

# Нужны ли предварительные испытания на соответствие требованиям по ЭМС?

## Как их проще организовать и провести — предлагает компания Tektronix

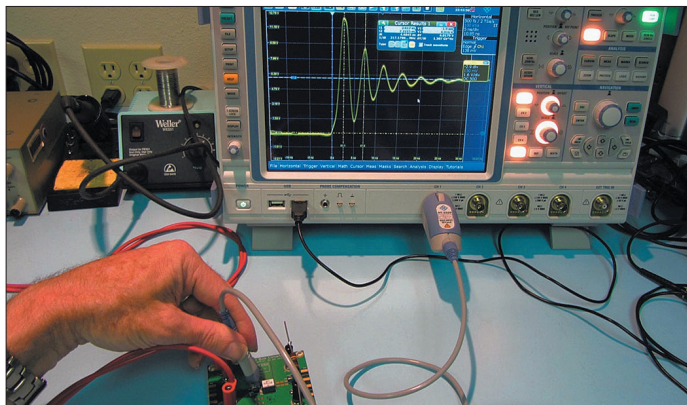
Владимир РЕНТЮК  
Rvk.modul@gmail.com

Оборудованию, в основе которого лежит генерация, преобразование или использование электрической энергии, требуется подтверждение того факта, что оно не будет создавать проблем ни само себе, ни каким-либо внешним устройствам, то есть выполнять требования по электромагнитной совместимости (ЭМС). Эти требования установлены стандартами, их выполнение является обязательным. Еще до выхода на рынок следует подтвердить соответствие вашего продукта требованиям по уровню электромагнитных помех (ЭМП) и по обеспечению ЭМС в независимом и аккредитованном испытательном центре. ЭМС — это проблема, от которой не уйти, и решать ее нужно с самых ранних стадий проекта [1]. Статья написана на основе авторского перевода рекомендаций известной своими контрольно-измерительными приборами компании Tektronix [2] с рядом дополнений, она дает советы о том, как сделать это оптимально, без чрезмерных потерь времени и дополнительных финансовых затрат.

Электромагнитная совместимость (ЭМС) и тесно связанные с ней электромагнитные помехи (ЭМП) являются одними из технических и юридических препятствий, которые необходимо преодолеть, прежде чем практически любой продукт из области электроники, радио- и электротехники сможет быть представлен на рынке. Эти требования касаются самой широкой номенклатуры продукции, будь то коммерческие изделия [3] или оборудование военного и аэрокосмического назначения [4] (далее для краткости, если не требуется уточнение, — «продукция» или «продукт»). Проблема в том, что такие продукты не должны мешать друг другу вследствие генерации излучаемых и кондуктивных ЭМП выше установленных лимитов. Кроме того, продукты должны быть разработаны таким образом, чтобы они сами также были защищены от воздействия ЭМП от внешних источников, то есть имели тот или иной запас устойчивости к внешним электромагнитным воздействиям. С этой целью регуляторные органы всех стран принимают обязательные для

исполнения стандарты по выполнению требований ЭМС, которые устанавливают ограничения на допустимый уровень ЭМП, требуя полного тестирования на соответствие продукции в специальных сертифицированных испытательных центрах по ЭМС. При этом стандарты в части ЭМС все более ужесточаются, что связано с ростом использования самой разнообразной электроники в нашей современной жизни.

Неудачное тестирование на соответствие требованиям в части ЭМС и ЭМП может быть одним из самых худших кошмаров в жизни инженера-разработчика, и без того нелегкой и полной сюрпризов. Затраты и временные задержки, связанные с этим довольно неприятным процессом, при неудачном раскладе имеют свойство нарастать как снежный ком. Кроме прямых затрат на подготовку изделия и документации для подтверждения соответствия вашей продукции, вам неизбежно придется оплатить недешевые услуги сертификационного центра, а в некоторых случаях затратить время на отладку, доработку продукта и повторные испытания. Мало того что неудача задерживает выход продукта на рынок, доработка и повторные испытания — удовольствие тоже далеко не из дешевых. Чтобы избежать непредвиденных сценариев, все большее число проектных групп, даже тех, которые работают с ограниченным бюджетом, организуют собственные испытательные мини-лаборатории или имеют комплекты контрольно-измерительной аппаратуры и комплекты приспособлений для проведения предварительных испытаний и устранения проблем с ЭМП в ходе выполнения ОКР и для финишной проверки перед отправкой продукта на сертификацию в аккредитованную лабораторию. Такой подход при наличии собственной испытательной базы (рис. 1) позволяет заранее охарактеризовать и смягчить проблемы и риски ЭМС [17], еще до отправки продукции в сторонний испытательный центр для проведения испытаний на соответствие требованиям.



Однако напрашивается естественный вопрос: а стоит ли овчинка выделки? Настолько ли проблемно пройти сертификацию по ЭМС — мы же не лыком шиты? Окупит ли организация собственной лаборатории по тестированию на соответствие ЭМП и ЭМС затраченное на это время, силы и средства? Чтобы ответить на этот вопрос, давайте сначала посмотрим на затраты, связанные с тестированием на соответствие требованиям по ЭМС, когда такая проверка своими силами недоступна. Затем посмотрим, как работают новейшие анализаторы спектра в реальном времени и высокочастотные осциллографы в сочетании со специализированным программным обеспечением, которые могут выполнить эту работу быстро и просто, даже специалистами, не имеющими опыта тестирования продуктов в части ЭМС.

Но для начала немного статистики. Знаете ли вы, что почти 50% проектов не проходят тестирование на соответствие требованиям к ЭМП и по ЭМС с первого раза? И это не голословное утверждение. Это связано с тем, что в продуктах не применяются принципы электромагнитной совместимости, у разработчиков не хватает знаний об этой проблеме, и они неправильно выполняют требования соответствующих нормативных актов. Кроме того, даже у опытных разработчиков, которые, как говорится, собаку на этом съели, проблемы могут быть вызваны непредсказуемыми взаимодействиями между элементами схем или добавлением несовместимых модулей и узлов в конечный продукт, причем при их полном соответствии всем требованиям в части ЭМС. Последнее часто успокаивает. А зря — бывает, что вместе они работать не хотят, такой пример из личного опыта автора статьи будет описан позже. Но главный фактор здесь — это то, что проверка решений проблемы ЭМС часто откладывается на потом, с надеждой на столь любимый нами русский авось.

Вероятность успешного прохождения полного цикла тестирования на соответствие требованиям по ЭМС и ЭМП, причем с первого раза, значительно повышает проведение предварительного тестирования пусть даже не для 100%-ной проверки соответствия требованиям, а просто оценки и выявления слабых сторон продукта, явных и потенциальных подводных камней. Компании, разрабатывающие продукты для медицинской, автомобильной и военной отраслей, а также продукты для применения в мультимедийных устройствах, могут получить значительные преимущества от инвестиций в оборудование для предварительного тестирования на соответствие требованиям нормативов. В этой статье рассказывается, как добавление этапов предварительных испытаний в процесс разработки продукта и грамотный подбор комплекта контрольно-измерительной аппаратуры может ускорить этот процесс и в результате уменьшить общую себестоимость проекта.



Рис. 1. Предлагаемый алгоритм рабочего процесса проектирования и постановки продукта на производство, позволяющий избежать непредвиденных задержек и дополнительных затрат при верификации на соответствие требованиям ЭМС

## Типичные расходы на сертификацию по ЭМС

Чтобы не покупать коша в мешке и понять, за что мы платим, необходимо знать, как подготавливается изделие на испытания по ЭМС, как их проводят и что вы в результате должны получить. Это сложные вопросы, которые требуют отдельного рассмотрения, поэтому обратитесь к [5], где это расписано буквально в деталях, а здесь мы займемся подсчетами. При расчете стоимости испытаний на соответствие требованиям по ЭМС и ЭМП необходимо учитывать целый ряд факторов. Они могут включать тип продукта, количество стран, в которые планируется его поставлять, количество требуемых поездок в специализированный испытательный центр, время на доработки и отладки, количество задействованных узлов (то есть компонентов или блоков в продукте, которые не всегда состоят из одной коробочки) и стоимость сертификационных испытаний для выбранной лаборатории.

В таблице 1 приведен пример типичных прямых затрат, связанных с соблюдением требований FCC (США) и CE (Европейский союз). Расходы не включают в себя дополнительные расходы, которые могут иметь место (как правило, они с весьма большой вероятностью у вас будут), но это хорошее начало, чтобы проиллюстрировать некоторые из затрат, понять общую картину и сделать определенные выводы. Приведенные в таблице 1 цифры [2] взяты не с потолка, они представляют обобщенные показатели из [6].

На первый взгляд, эти цифры, хотя они и не маленькие, особого страха не вселяют, и с ними можно смириться как с неизбежностью, но давайте посмотрим на несколько реальных ситуаций из [6].

### Сценарий № 1

Команда разработчиков годами доставляет продукты в испытательный центр и для подготовки к сертификации обращается к сторонней организации, предоставляющей услуги по тестированию в безэховой камере. Заметьте, это еще не сертификация. По последним разработанным ими двум продуктам они рассчитывали совершить 40 поездок

в год, потратив по \$700 за полдня аренды испытательной установки, что тянет на общую сумму в \$28 000. Кроме того, по их оценкам, стоимость полного тестирования на соответствие, которое включает в себя нечто большее, чем просто испытание на излучения, составила приблизительно \$30 000.

### Сценарий № 2

Эта же команда столкнулась с серьезной проблемой и в течение года пыталась выяснить, откуда исходит «помеха» в их продукте. Чтобы протестировать продукт, они отправились в лабораторию с безэховой камерой для предварительного сканирования с арендной платой \$1250 в час для найма техника, оборудования и камеры. Раз в квартал они обращались в эту лабораторию с двенадцатью платами. В некоторых случаях они проводили там целый день. Анализируя свои расходы на соответствие требованиям по ЭМС и ЭМП, они обнаружили, что понесли дополнительные расходы в размере около \$30 000 в год, не говоря уже о задержках с продукцией и потере рабочего времени квалифицированного персонала. Этот пример еще не включает фактические расходы на сертификацию, поскольку это была еще не сертификация, а лишь проверка решения по доработке.

Плохая новость заключается в том, что это далеко не единичные примеры, о статистике уже было сказано. Вот пример из личной практики. Совместное англо-украинское предприятие по разработке наукоемкой продукции, на котором автор статьи работал ведущим инженером,

Таблица 1. Оценка затрат на тестирование типового продукта на соответствие требованиям по ЭМС и ЭМП по FCC и CE

Статьи стоимости испытаний по ЭМС (только ЭМС + излучаемые ЭМП)	Оценка стоимости, \$
Стоимость сертификации: непреднамеренная помехоэмиссия (FCC + CE)	5000–10 000
преднамеренное радиоизлучение (FCC + CE)	10 000–20 000
Услуги сторонней испытательной лаборатории	1000–10 000 за рабочий день
Затраты на отладку, доработку конструкции, внесение изменений в разводку печатной платы, тестирование	80–200 за час работы специалиста
Вращение доски при необходимости (стоимость /плата + стоимость настройки)	1000–15 000
<b>Итого (не включая затраты на доработку)</b>	<b>17 000–55 000</b>

попало в такую ситуацию. Главный конструктор, имевший огромный опыт работы, не учел ряд моментов при объединении блоков изделия в систему (тактовые генераторы, которые не могли быть синхронизированы, плюс импульсные преобразователи, процессоры, быстродействующие FPGA и TFT-панели человеко-машинных интерфейсов). В результате, надеясь на опыт и «авось», мы провалили дорогую и длительную сертификацию по ЭМС в одной из европейских лабораторий (наше «договориться», как известно, там не работает), а выход изделия на мировой рынок задержался более чем на год, так как потребовались дополнительные фильтры, экранирование, переработка ряда плат, в том числе и собственного графического процессора платы, который заказывали на Тайване, изменения в интерфейсах и, соответственно, новый цикл испытаний. Однако ситуация могла бы быть намного хуже и еще более затратной. Нам помогло то, что мы имели доступ к экранированной камере и необходимой для проверки уровня ЭМП контрольно-измерительной аппаратуре, так что, проведя неоднократные собственные проверки, второй раз на сертификации мы уже не промахнулись. По мере увеличения сложности продуктов и уменьшения форм-факторов проектировщики должны находить экономически эффективные способы для заблаговременного выявления проблем во время циклов разработки продукта, а не непосредственно перед началом их производства — здесь опять хорошо обратиться к [5].

### Устранение неисправностей, связанных с ЭМП, и предварительное тестирование

Существует большая разница между устранением обычных неполадок и общих проблем ЭМП и тестированием на соответствие требованиям. Посмотрите пример личного опыта автора статьи, а также обратитесь к [7]. Эти различия крайне важно понимать при планировании собственного тестового комплекта именно для решения вопросов по ЭМП. Устранение общих неполадок в части ЭМП обычно выполняется с помощью набора зондов ближнего поля или токового радиочастотного зонда, а также с помощью анализатора спектра или высокочастотного осциллографа. Цель здесь состоит в том, чтобы идентифицировать источники энергии по гармоникам от основной частоты (это могут быть тактовые частоты по шинам, цифровые сигналы с крутыми фронтами, помехи от преобразователей напряжения и т. п.) и определить те или иные меры, которые уменьшают их уровни, то есть оценить риски [17]. Здесь мы в основном работаем с относительными изменениями, по типу «было — стало» (в приведенном автором примере так и поступили). Несмотря

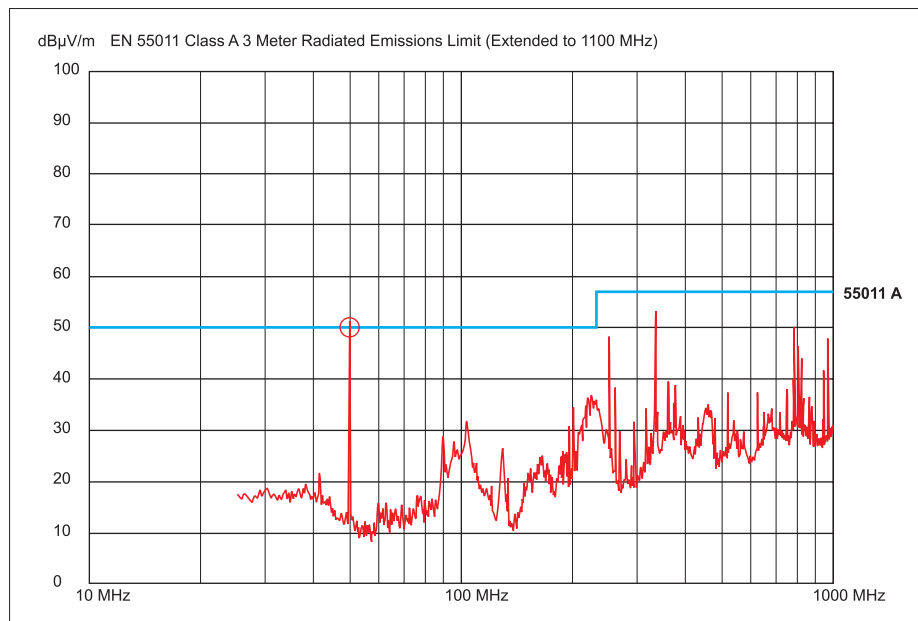


Рис. 2. Пример сканирования при проверке на соответствие требованиям по ЭМС, представленный сертификационной лабораторией, показывающий, что уровень излучения с частотой 50 МГц превышает установленный стандартом EN55011 предел для продуктов класса А

на то, что процедуры тестирования на полное соответствие предназначены для получения абсолютных, точно откалиброванных измерений, устранение несоответствий может быть выполнено с использованием и относительных измерений.

С другой стороны, предварительное тестирование на соответствие пытается дублировать способ проведения полных тестов с максимально возможной способностью и сравнивать полученные результаты с фактическими пределами, установленными соответствующими стандартами (рис. 2). Для этого требуется откалиброванная антенна для измерения излучаемых ЭМП, знание коэффициентов усиления или потерь в измерительной системе и таблицы предельных значений уровня ЭМП в частотном спектре на основе интересующих стандартов.

Для достижения наилучших результатов испытание на излучаемые и кондуктивные ЭМП обычно проводят внутри полубезэховой камеры или ГТЕМ-камеры. Полубезэховые экранированные камеры (пБЭК) — это экранированные камеры, стены и потолок которых покрыты радиопоглощающим материалом. Они предназначены для проведения испытаний на электромагнитную совместимость в соответствии с военными и гражданскими стандартами. В полубезэховых камерах имитируется открытая измерительная площадка, стены и потолок которой не отражают радиосигналы, а пол отражает их полностью. ГТЕМ-камера (Gigahertz Transverse Electro-Magnetic test cell) представляет собой волновод для возбуждения поперечных электромагнитных волн (ТЕМ-волн) с высокой граничной частотой, захватывающей гигагерцевый диапазон. Это недорогое альтернативное измерительное средство, применяемое для из-

мерений как характеристик излучения, так и устойчивости к его воздействию. Метод испытаний электрического и электронного оборудования на помехоэмиссию и помехоустойчивость с использованием волноводов для возбуждения поперечных электромагнитных волн не суррогат — он определен стандартом ИЕС 61000-4-20. Примеры таких портативных камер приведены на рис. 3.

Экранирование рабочего места необходимо для того, чтобы исключить внешние помехи, то есть электромагнитное излучение из окружающей среды. Здесь подразумеваются сигналы радиовещательных станций, телевидения, двусторонней радиосвязи или помехи от сотовой связи. Однако это может привести к значительным расходам и для современного испытательного оборудования и программных средств не всегда является необходимым на все 100%. В результате испытания на соответствие нормам выбросов, проводимые собственными силами, часто могут выполняться вне экранированной камеры, и для них могут использоваться методы, позволяющие отличить сигналы окружающей среды от сигналов, исходящих от тестируемого продукта.

Например, некоторые анализаторы спектра с программным обеспечением для предварительной оценки на соответствие требованиям по ЭМС [14] выполняют при выключенном продукте измерение окружающей электромагнитной обстановки, что дает базовый уровень, позволяющий оценить имеющийся место внешней радиочастотный шум. Затем, используя выявленную зависимость, его можно вычесть из фактического измерения. Таким образом, пользователь может различать ЭМП, генерируемые тестируемым устройством непосредственно в окружающей его среде.



Рис. 3. Портативная система для испытаний на устойчивость к излучению. Бюджетное решение компании Emctestlab LLC [18]

### Создание собственной лаборатории по предварительной проверке продуктов на ЭМП и на соответствие требованиям в части ЭМС

Итак, что входит в разработку базовой лаборатории по устранению проблем и тестированию продукции на соответствие требованиям ЭМС? Во-первых, сразу уточним: это не так дорого, как вы думаете. Во-вторых, как уже отмечалось выше, тестирование и устранение проблем с ЭМП при тестировании на соответствие требованиям ЭМС перед отправкой вашего нового детища на сертификацию не обязательно требует полубеззховой или специальной экранированной камеры, а самое необходимое для этого оборудование обходится дешевле, чем оборудование для испытаний на полное соответствие.

На рис. 4 показано оборудование, необходимое для проведения предварительных испытаний на соответствие по уровням излучаемых ЭМП, включая калиброванную антенну, предварительный усилитель и анализатор спектра с программным обеспечением по ЭМС. Для проведения испытаний на излучение ЭМП все, что вам, вероятно, понадобится, — это анализатор спектра и такое устройство, как эквивалент полного сопротивления сети (ЭПСС), а также дополнительный фильтр или предусилитель. По опыту, наиболее распространенной проблемой в части ЭМС, с которой сталкиваются разработчики во время сертификации своих продуктов, является помехоэмиссия, то есть излучение ЭМП.

Ниже приведено краткое описание оборудования, которое необходимо для начала проведения собственных испытаний на излучаемые и кондуктивные ЭМП.

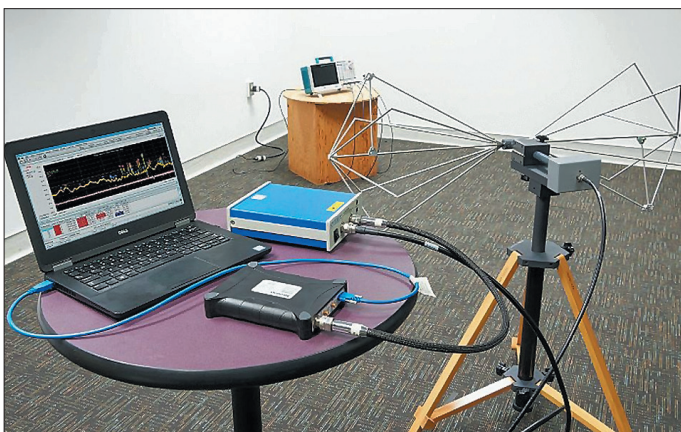


Рис. 4. Типичная установка для испытаний на соответствие изделий по излучению ЭМП в большом помещении на базе недорогих приборов и оборудования компании Tektronix. Расстояние между антенной и тестируемым оборудованием составляет 3 м

### Анализатор спектра или высокочастотный осциллограф

Наиболее предпочтительным вариантом для рассматриваемой цели, а именно предварительных испытаний по ЭМС, является недорогой USB-анализатор спектра, выполняющий анализ в режиме реального времени, поскольку, в отличие от традиционного анализатора спектра с качающейся частотой, он с высокой точностью и высокой вероятностью обнаружения может захватывать и отображать прерывистые или редко встречающиеся сигналы [8]. Анализатор спектра/сигнала в реальном времени, например серии RSA500 [10], может выполнять измерения, используя узкую полосу разрешения (Resolution bandwidth, RBW), и делать это в несколько раз быстрее, чем традиционные анализаторы с качающейся частотой, экономя время пользователей при сканировании и поиске радиочастотных всплесков низкого уровня. Для того чтобы проверить характеристики, или, как сейчас стало принято говорить, производительность модуля беспроводной связи или радиоприемника, он также может выполнить анализ сигнала, такой как определение величины вектора ошибки (Error Vector Magnitude, EVM — один из наиболее распространенных количественных показателей качества модуляции в цифровых системах связи) и сигнальное созвездие (constellation diagram — представление всевозможных значений комплексной амплитуды манипулированных радиосигналов на комплексной плоскости), что позволяет проверить качество и производительность многих распространенных стандартов беспроводной связи. Пример тестовой установки с анализатором спектра компании Tektronix с режимом анализа в реальном времени приведен на рис. 5.

Но для команд разработчиков с ограниченным бюджетом или для тех, кто предпочитает сосредоточить свое внимание на тестировании, направленном только на устранение проблем с ЭМП, может оказаться более целесообразным рассмотреть использование многоцелевого высокочастотного осциллографа, который имеет отдельный ВЧ-вход, в сочетании с внутренним анализатором спектра. Новейшие осциллографы со смешанным сигналом также предлагают комбинированные возможности по сравнению с традиционными осциллографами на основе быстрого преобразования Фурье, позволяя осуществлять независимый контроль во временной и частотной областях сразу по нескольким каналам. Возможность коррелировать сигналы в обеих областях значительно упрощает поиск неисправностей, связанных с ЭМП (рис. 6).

Комбинированные осциллографы серии MDO, например MDO3000 (рис. 7) [11], состоит из шести интегрированных приборов, включая варианты исполнения с анализатором спектра, генератором заданных функциями сигналов и т. д., позволяющих регистрировать аналоговые, цифровые и радиочастотные сигналы при помощи одного устройства. Кроме того, можно добавлять приборы, функции анализа и расширять полосу пропускания по мере роста требований, предъявляемых проектируемыми схемами.



Рис. 5. Типовой набор для измерения уровня излучаемых ЭМП, подключаемый по шине USB анализатором спектра RSA500 компании Tektronix



Рис. 7. Комбинированный осциллограф MDO3000 компании Tektronix

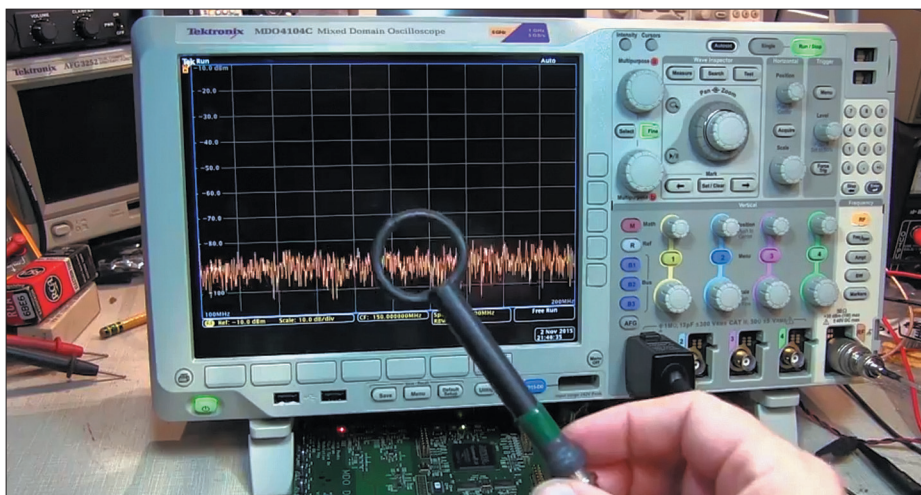


Рис. 6. Тестовая установка объединяет каналы аналогового осциллографа и канал анализатора спектра с датчиком ближнего поля (на переднем плане) с использованием комбинированного осциллографа серии MDO. Кроме датчика ближнего поля, используются пассивные пробники с делителем 10:1

В то время как осциллограф очень полезен для определения времени нарастания сигнала (или фронта импульса) и так называемого «звона» (переходных экспоненциально затухающих помех высокой частоты, которая может многократно превышать рабочую) и может иметь встроенные возможности для анализа в частотной области, анализатор спектра, работающий в режиме реального времени, является более удобным инструментом для устранения проблем ЭМП и для предварительных измерений перед отправкой продукта на сертификационные испытания. Для предварительной оценки на соответствие требованиям в части ЭМС, в зависимости от стандарта, могут потребоваться детекторы, определенные требованиями CISPR<sup>1</sup>, это могут быть детекторы для пикового, среднего и квазипикового уровня излучаемых ЭМП, принятых измерительным приемником. Поэтому убедитесь, что ваш анализатор спектра поддерживает требования CISPR, когда это необходимо, и всегда обращайтесь к интересующим стандартам, чтобы

<sup>1</sup> CISPR — International special committee on radio interference, международная специализированная служба по радиопомехам, была основана в 1934 году для установления стандартов контроля электромагнитных помех в электрических и электронных устройствах и входит в состав Международной электротехнической комиссии.

точно определить то, что вам нужно проверять и чему соответствовать. Здесь опять повторюсь: лучше делать это на более ранних стадиях проектирования.

Требуемый диапазон частот будет зависеть от стандартов и области частот, по которым будет проводиться проверка на соответствие [3, 4], но и здесь есть свои тонкости. Самый низкий частотный диапазон обычно определяется тактовой частотой самой низкой частоты, используемой в продукте. Максимальный диапазон измерения частоты — это коэффициент от наивысшей частоты, генерируемой или используемой в устройстве, или на которой устройство работает или настраивается. В таблице 2 показано, как FCC (Federal

Communications Commission — Федеральная комиссия по связи США) определяет его для непреднамеренных излучателей.

Есть также множество нюансов касательно частотных диапазонов в зависимости от типа продукта. Чтобы понять это более точно для своего диапазона измерения частоты, обязательно ознакомьтесь с требованиями FCC Part 15.33 [9] или с положениями конкретных стандартов, по которым вы проходите сертификацию.

Итак, давайте суммируем: при выборе для предварительного тестирования на соответствие требованиям в части ЭМС анализатора спектра или решения на основе осциллографа вам необходимо учитывать следующее:

- низкий уровень собственных шумов и помех;
- широкий диапазон частот, достаточных для охвата всех диапазонов измерений;
- пиковые, средние и квазипиковые детекторы (аналогично реальным приемникам электромагнитных помех);
- регулируемая ширина полосы разрешения (RBW), которая может быть установлена вплоть до 1 Гц;
- программируемый интерфейс;
- надежность, с погрешностью в пределах требуемых норм;
- программное обеспечение по ЭМС, дающее следующие возможности:
  - учет вносимых от датчиков искажений в виде усиления и ослабления;
  - сравнение результатов измерения;
  - функция контроля внешних помех среды;
  - установка предельных значений;
  - создание отчета и вывод изображений.

Таблица 2. Частотный диапазон для испытаний на соответствие требованиям по ЭМС в трактовке FCC

Наибольшая частота, которая генерируется или используется в устройстве или на которой устройство работает или настраивается, МГц	Верхняя частота диапазона измерения
Ниже 1,705	30 МГц
1,705–108	1000 МГц
108–500	2000 МГц
500–1000	5000 МГц
Выше 1000	Пятая гармоника самой высокой частоты, или 40 ГГц, в зависимости от того, что больше.



Рис. 8. Антенны и принадлежности от компании Tektronix, используемые для предварительного тестирования на соответствие требованиям ЭМС

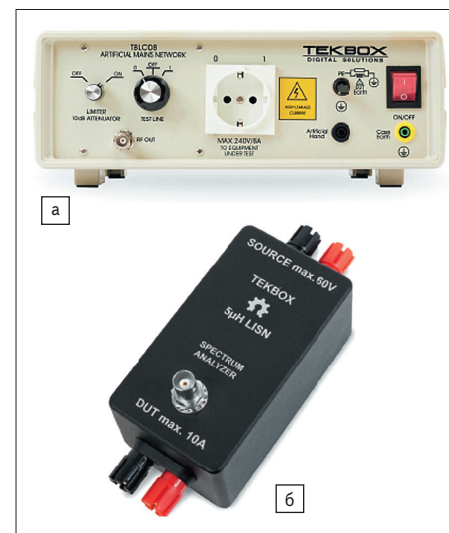


Рис. 9. Эквиваленты полного сопротивления сети компании Tektronix для проведения предварительных испытаний на соответствие требованиям ЭМС: а) 50 мкГн/8 А; б) 5 мкГн/10 А

### Антенны и пробники

Для устранения проблем с ЭМП вам понадобится набор датчиков ближнего поля и датчик тока. Для предварительного сканирования излучаемых ЭМП также нужна специальная широкополосная антенна. Однако характеристики антенны будут зависеть от частотного диапазона, требуемого для измерения. Иногда требуется несколько антенн, потому что профили усиления зависят от частоты. Имеется вероятность того, что вы, если усиление антенны недостаточно велико и измеренный сигнал скрыт уровнем внешних помех, не сможете снять измерения интересующей помехи. Для усиления условно полезного сигнала (на самом деле какой же он полезный, если вам кровь портит) можно использовать внешний предусилитель или высокочастотный усилитель между антенной и анализатором спектра.

Вот четыре наиболее распространенных типа антенн, используемых для тестирования на соответствие требованиям в части ЭМС, и их типичные диапазоны рабочих частот:

- петлевая: 10 кГц — 30 МГц;
- биконическая: 25–300 МГц;
- логопериодическая: 300 МГц — 1 ГГц;
- рупорная: 1–26 ГГц.

Примеры биконической и логопериодической антенн от компании Tektronix показаны на рис. 8.

### Антенный штатив

Для установки и ориентации антенны понадобится неизлучающий штатив, который может подниматься, опускаться и вращаться в горизонтальной и вертикальной плоскости (рис. 8). Это связано с тем, что при сертификации продукта на выполнение требований по ЭМС генерируемые им ЭМП будут измеряться в вертикальной и горизонтальной поляризации. Об этом лучше не забывать. Если это не учесть, то результат сертификации может оказаться для вас неприятным сюрпризом. Также примите во внимание, что конкретный стандарт может требовать другого вида штатива. Если вы можете себе это позволить, то можно и самим спроектировать штатив, специально предназначенный для испытаний на электромагнитную совместимость, из дерева и поливинилхлоридных труб.

### Эквивалент полного сопротивления сети

Для измерений кондуктивных (наведенных) ЭМП вместо антенн используется специальное устройство, называемое эквивалентом полного сопротивления сети (ЭПСС). ЭПСС, называемый еще как LISN (Line Impedance Stabilization Network), — это измерительное устройство, подключаемое между испытуемым оборудованием и любым вспомогательным или связанным с основным

оборудованием и обеспечивающее нормируемое затухание симметричного сигнала в цепи измерения общего несимметричного напряжения и полное общее несимметричное сопротивление (сопротивление общего вида) в цепи подключения к портам связи испытуемого оборудования.

ЭПСС — это, по сути, фильтр нижних частот, который помещается между источником питания переменного или постоянного тока и проверяемым устройством для создания известного импеданса (часто 50 Ом) и для обеспечения порта измерения радиочастотного шума на проводах питания. Он также служит для изоляции нежелательных высокочастотных сигналов от источника питания. Для проведения предварительных испытаний на соответствие требованиям ЭМС компания Tektronix предлагает два варианта ЭПСС (рис. 9) на 50 мкГн/8 А на диапазон частот 9 кГц — 30 МГц [12] и на 5 мкГн/10 А на диапазон частот 100 кГц — 110 МГц [13].

### Предусилитель

Предусилитель может помочь, усиливая низкоуровневые сигналы, поднимая их выше уровня внешних ЭМП и улучшая чувствительность измерительной системы. Убедитесь, что он работает в интересующем вас диапазоне частот и имеет достаточный коэффициент усиления. Некоторые предусилители имеют дополнительное преимущество, заключающееся в наличии перезаряжаемой аккумуляторной батареи, позволяющей проводить измерения в том случае, когда источник питания недоступен, например в полевых условиях или на местах эксплуатации. Для проведения предварительных испытаний на соответствие требованиям ЭМС компания Tektronix предлагает предусилитель PAM-103 [13] (рис. 10) с частотным диапазоном 1 МГц — 1 ГГц, возможностью работы от внутренней батареи (не менее 13 ч на одну зарядку) или адаптера переменного тока, высоким коэффициентом усиления 33 дБ (типичное значение) и низким уровнем собственных шумов.

### Коаксиальные кабели

Для испытаний, помимо кабелей подключения продукта, понадобятся как минимум еще два радиочастотных кабеля. Один для подключения между антенной и предварительным усилителем, а другой — для подключения между предварительным усилителем и анализатором спектра или осциллографом. Они не должны быть очень качественными, а значит и дорогими. Они должны соответствовать нужному диапазону частот, волновому сопротивлению вашей антенны и быть стабильными при изгибе, так что к их выбору нужно подойти с особой тщательностью. Длина кабеля обычно варьируется от 1, 5 и до 10 м.



Рис. 10. Предусилитель PAM-103 компания Tektronix

### Поворотный стол

В зависимости от стандарта по ЭМС вам потребуется измерение ЭМП не только в разной поляризации, но и под разными углами. То есть тестируемый продукт должен быть рассмотрен буквально со всех сторон. Для этой цели используются вращающиеся поверхности или поворотные столы (на таком установлен тестируемый продукт на рис. 5). Такие столы, предназначенные для испытаний на электромагнитную совместимость, чтобы обеспечить легкое, точное вращение и надежную фиксацию в выбранном положении, лучше приобрести. В крайнем случае, для тех, чьи средства ограничены и продукт не отличается большим весом, экономически выгодной альтернативой будет обычная картонная коробка, расположенная на правильной высоте и должном расстоянии.

### Организация рабочего места для проведения предварительных испытаний по ЭМС

В отличие от полного тестирования на соответствие требованиям по ЭМС и уровню ЭМП, предварительные испытания соответствия не обязательно требуют соответствующего испытательного оборудования или безэховой камеры. Сегодня вы можете получить относительно точные результаты в собственном офисе, конференц-зале или подвале. Экранированная камера в данном случае является, безусловно, идеальным решением, но обычно можно прекрасно обойтись и без нее и сэкономить десять или даже сотню тысяч долларов. Однако если вы стеснены в средствах, то для предварительных испытаний в неблагоприятной с точки зрения внешних электромагнитных помех обстановке вам может понадобиться исполь-

зование недорогих экранированных коробок или ячейки ТЕМ (рис. 3).

Автор статьи, работая вторым главным конструктором в одном из производственных объединений, организовал с этой целью в инженерном центре, отвечающем за разработку и постановку продукции на производство, клетку Фарадея из двойной металлической сетки с металлической зажимной дверью, электропитание (три линии) было заведено через фильтры, а для освещения использовались только лампы накаливания. Фон от внешних источников ЭМП в этой экранированной камере не превышал 60 дБ (хотя измерительной и прочей излучающей аппаратуры рядом в зале было предостаточно). Работать в такой «клетке» было в целом комфортно, и она весьма помогала в работе, так как была под рукой, а имеющаяся на предприятии испытательная лаборатория часто была занята.

При выборе места проведения испытаний лучше всего остановиться на том, в котором имеется минимум внешних источников сигналов. Сельские районы, конференц-залы или подвалы хороши тем, что минимизируют внешние сигналы, которые могут маскировать уровни излучения проверяемого устройства. Другие соображения по повышению точности включают наличие хорошей плоскости заземления и уменьшение количества отражающих объектов вокруг испытательной зоны. Вы также можете реализовать методы измерения, которые включают базовое измерение окружающего шума, о чем упоминалось ранее.

### Заключение

Собственное тестовое решение для проведения предварительных испытаний продукта, планируемого для вывода на рынки, в ча-

сти его соответствия требованиям по ЭМС и уровню ЭМП может помочь пройти полное тестирование на соответствие при сертификации, сэкономив значительное время и затраты, а также избежать головной боли и проблем с задержкой завершения ОКР и освоения продукта в серийном производстве и выводе продукта на рынок. Помните: ваши конкуренты не спят, а кто не успел, тот опоздал — и потерял планируемую прибыль. Такой подход особенно эффективен в том случае, когда вы тестируете продукт на ранних этапах цикла проектирования, когда выявленные проблемы могут быть относительно легко устранены.

Разработка собственных возможностей по предварительной проверке на соответствие требованиям в части ЭМС и устранение проблем может быть довольно-таки экономически эффективным решением, особенно с учетом стоимости нескольких заходов в сертификационный испытательный центр и в том случае, если это не разовая разработка. В отличие от полного тестирования на соответствие предварительное тестирование, как показано в настоящей статье, не обязательно требует использования сверхдорогостоящего испытательного оборудования или безэховой камеры, понесенные капитальные затраты — разовые, само же оборудование, если оно от хорошо зарекомендовавшего себя изготовителя и надежного поставщика, будет служить вам долгие годы. Не забывайте при этом, что такие проверки могут потребоваться не только в рамках ОКР, но и при выпуске продукции, когда по тем или иным причинам вам потребуется проведение типовых испытаний, а для ряда продукции — периодических или приемосдаточных.

Для получения полной информации по теме статьи можно использовать ссылки к [2], материалы русскоязычного сайта компании Tektronix [19] и серии статей по проблемам выполнения требований и испытаний на ЭМС в бесплатно распространяемых сборниках [15, 16], а также следить за публикациями и их новыми выпусками на сайте [20]. В рекомендованных сборниках вы найдете не только теоретические статьи и статьи по общим проблемам ЭМС и ЭМП [1, 3–5, 7], а также рекомендации по анализу рисков [17], обзоры оборудования от ведущих поставщиков и описания практических решений. ■

### Литература

1. Рентюк В. Электромагнитная совместимость: проблема, от решения которой не уйти // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
2. Stinson D. How to Build Your Own EMI Troubleshooting and Pre-Compliance Kit. Interference Technology's 2019 EMC Testing Guide. [www.learn.interferencetechnology.com/2019-emc-testing-guide](http://www.learn.interferencetechnology.com/2019-emc-testing-guide)

3. Рентюк В. Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований по ЭМС для изделий коммерческого назначения // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
4. Петит Г. Что нужно знать по испытаниям на выполнение требований ЭМС для изделий военного и аэрокосмического назначения. Краткий обзор // Компоненты и технологии. 2017. № 8.
5. Петит Г. Что требуется при подготовке изделия для испытаний, как их проводят и чем они заканчиваются // Компоненты и технологии. 2017. № 9.
6. Akerson D. The Financial Case for an EMI/EMC Pre-Compliance Test Solution. [www.ru.tek.com/blog/financial-case-emi-emc-pre-compliance-test-solution?\\_ga=2.221224536.1312169855.1582439976-939529787.1582439976](http://www.ru.tek.com/blog/financial-case-emi-emc-pre-compliance-test-solution?_ga=2.221224536.1312169855.1582439976-939529787.1582439976)
7. Уайт К. Устранение проблем, выявленных в ходе испытаний изделия на выполнения требования по ЭМС // Компоненты и технологии. 2017. № 10.
8. Wyatt K. EMI Troubleshooting with Real-Time Spectrum Analyzers. [www.interferencetechnology.com/emi-troubleshooting-with-real-time-spectrum-analyzers](http://www.interferencetechnology.com/emi-troubleshooting-with-real-time-spectrum-analyzers)
9. Electronic Code of Federal Regulations [www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?tpl=/ecfrbrowse/Title47/47cfr15\\_main\\_02.tpl](http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?tpl=/ecfrbrowse/Title47/47cfr15_main_02.tpl)
10. Анализаторы спектра реального времени серии RSA500. [www.ru.tek.com/spectrum-analyzer/rsa500-series#](http://www.ru.tek.com/spectrum-analyzer/rsa500-series#)
11. Комбинированный осциллограф MDO3000. [www.ru.tek.com/oscilloscope/mdo3000-mixed-domain-oscilloscope](http://www.ru.tek.com/oscilloscope/mdo3000-mixed-domain-oscilloscope)
12. 50  $\mu$ H LISN for Tektronix EMC pre-compliance. [www.ru.tek.com/datasheet/50-mh-lisn-tektronix-emc-pre-compliance](http://www.ru.tek.com/datasheet/50-mh-lisn-tektronix-emc-pre-compliance)
13. Preamplifier for Tektronix EMC pre-compliance. [www.ru.tek.com/datasheet/preamplifier-tektronix-emc-pre-compliance](http://www.ru.tek.com/datasheet/preamplifier-tektronix-emc-pre-compliance)
14. EMCVu Software and Accessories. [www.tek.com/landing-page/emcvu-software-and-accessories](http://www.tek.com/landing-page/emcvu-software-and-accessories)
15. Сборник «Электромагнитная совместимость в электронике-2018». [www.emc-e.ru/magazine/emc-2018/](http://www.emc-e.ru/magazine/emc-2018/)
16. Сборник «Электромагнитная совместимость в электронике-2019». [www.emc-e.ru/magazine/emc-2019/](http://www.emc-e.ru/magazine/emc-2019/)
17. Хейс С. Что такое риски и анализ рисков применительно к ЭМС // Компоненты и технологии. 2017. № 11.
18. Измерительные площадки, испытательные камеры и установки. [www.emctestlab.ru/catalog-chambers](http://www.emctestlab.ru/catalog-chambers)
19. [www.ru.tek.com/](http://www.ru.tek.com/)
20. [www.emc-e.ru/magazine/](http://www.emc-e.ru/magazine/)

Статья опубликована в журнале «Компоненты и технологии» № 03'2020