

Л.Н. КЕЧИЕВ, зав. каф. РТУиС ГОУ ВПО МИЭМ, д.т.н.
Н.В. ЛЕМЕШКО, с.н.с. ФГУП НИИР, к.т.н.

ВИРТУАЛЬНАЯ СЕРТИФИКАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПО УРОВНЮ ПОМЕХОЭМИССИИ КАК СРЕДСТВО ПОДГОТОВКИ К ЛАБОРАТОРНЫМ ИСПЫТАНИЯМ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, моделирование, электромагнитная обстановка, сертификационные испытания, кондуктивные и излучаемые радиопомехи, стандарты по электромагнитной совместимости, нормы помехоэмиссии, испытательная площадка, условия проведения испытаний, оборудование информационных технологий.

Современный этап развития общества характеризуется широким использованием электронных средств. Сейчас быт и производственная деятельность немислимы без сотовых телефонов, компьютеров, оборудования информационных технологий и многих других устройств.

Пространственная насыщенность электронными средствами, а также спектральная сложность обрабатываемых сигналов и повышающиеся рабочие частоты, помехоэмиссия приводят к актуализации проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС). Под ЭМС понимается способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам [1, 2]. Любое РЭС в текущий момент времени работает в условиях воздействия некоторого уровня помех, которые создают вокруг него определенную электромагнитную обстановку (ЭМО). Согласно общепринятому определению, под ЭМО понимается совокупность электромагнитных явлений, процессов в заданной области пространства, частотном и временном диапазонах.

Электромагнитные помехи, воздействуя на РЭС, могут вызывать сбои в их работе, поскольку приводят к возникновению в их цепях дополнительных токов. Вместе с тем, любое электронное средство является источ-

ником помех. Для обеспечения совместного сосуществования РЭС и их нормального функционирования необходимо, чтобы уровень создаваемых ими помех не превышал допустимых уровней. Для обеспечения этого требования вводят обязательную сертификацию РЭС по ЭМС.

Согласно стандарту [3], проектируемая, а также ввозимая на территорию Российской Федерации аппаратура подлежит сертификационным испытаниям по ряду параметров, которые можно классифицировать как относящиеся к устойчивости РЭС к внешним помехам и к уровню помехоэмиссии. В части последней также можно выделить две группы параметров, по которым выполняется сертификация — это характеристики кондуктивных и эфирных помех.

Таким образом, задачу сертификации можно сформулировать как определение значений параметров, характеризующих устойчивость технического средства к помехам и их эмиссию, и сравнение их со значениями, установленными частными стандартами, регламентирующими эти параметры для конкретного типа продукции.

Согласно современному законодательству, несертифицированные РЭС не могут реализовываться через предприятия торговли. Поэтому производители радиоэлектронной аппаратуры обязаны проводить свою продукцию через сертификационные испытания, которым подвергается первая

партия изделий при серийном установившемся производстве. В России испытания проводятся в независимых испытательных лабораториях или центрах, которые аккредитованы Госстандартом РФ. Как правило, такие испытания являются дорогостоящими, и не все изделия проходят их с первого раза. Более того, если в результате измерений будет установлено, что, например, на некоторой частоте изделие создает помехи недопустимого уровня, то разработчику далеко не всегда будет очевидно, какие изменения ему следует внести в проект, чтобы в следующий раз сертификация по ЭМС прошла успешно.

Отсюда следует, что в настоящее время существует противоречие между необходимостью проведения РЭС через процедуру сертификации по ЭМС в установленном законодательством порядке и отсутствием какой-либо гарантии, за исключением предыдущего опыта разработок, на успешное её прохождение, в особенности по излучаемым радиопомехам.

Выявлению перспектив и путей разрешения данного противоречия и посвящена данная работа.

Стандарты в области ЭМС. Сертификация по стойкости к радиопомехам и генерируемым кондуктивным помехам

Перечень проектируемых радиоэлектронных средств очень широк. Они отличаются назначением, полосой рабочих частот, областью использования. Поэтому их разделяют на укрупненные виды технических средств, для которых формируют отдельные требования по характеристикам ЭМС. Стандарты, относящиеся к конкретной группе технических средств, называются продуктовыми. Таким образом, изготовителю РЭС для того, чтобы установить, какие требования предъявляются к его изделию, необходимо его отнести к той или иной группе и далее ориентироваться на требуемые для неё показатели.

В целом существует около десятка таких

групп, примерами которых являются:

- технические средства с малым энергопотреблением [4];
- технические средства промышленных зон [5];
- радиовещательные и телевизионные приемники и другая схожая бытовая аппаратура [6];
- оборудование информационных технологий [7];
- профессиональная аудио-, видео- и аудиовизуальная аппаратура, а также устройства управления световыми приборами для зрелищных мероприятий [8];
- оборудование дуговой сварки [9];
- средства радиосвязи [например, 10].

Основополагающим стандартом, который устанавливает последовательность и содержание сертификационных испытаний по ЭМС, а также общие требования к средствам и условиям измерений, является ГОСТ 51320-99 [11], соответствует международным стандартам СИСПР 16-1 (1993-08), изд. 1 и СИСПР 16-2 (1996-11), изд. 1.

Таким образом, перечисленные выше продуктовые стандарты являются уточняющими и дополняющими по отношению к [11], причем их структура такова, что частично включает в себя содержание основополагающего стандарта. Поэтому в рамках данной работы для определенности будем ориентироваться на оборудование информационных технологий (ОИТ), подразумевая, что параметры, принципы и испытательная аппаратура для технических средств других групп не имеют принципиальных отличий от ОИТ. Такой выбор обусловлен тем, что ОИТ является очень распространенным и относится к типовым РЭС.

Итак, исходно задача сертификации по ЭМС состоит в экспериментальном определении стандартизованных показателей, которые можно подразделить на относящиеся к стойкости РЭС к электромагнитным воздействиям (импульсные помехи в цепях питания, электростатические разряды, электромагнитное поле и т.п.), и к генерации излучаемых и кондуктивных радиопомех.

Уровень стойкости к радиочастотному

излучению устанавливается путем воздействия электромагнитного поля на РЭС, функционирующее в штатном режиме и в характерных условиях эксплуатации [12], причем выбранный режим должен соответствовать наиболее критичному с точки зрения восприятия изделием помех. Напряженность электромагнитного поля в заданной точке корпуса РЭС (в основном, измерения проводят на портах оборудования) должна соответствовать установленным требованиям для данного типа технического средства.

При исследовании устойчивости к кондуктивным помехам в интерфейсные цепи РЭС вводят источники помеховых сигналов. Сигналы помех должны отвечать требованиям стандартов. Устройство также должно функционировать в режиме, наиболее критичном к восприятию кондуктивных помех.

Критерием соответствия требованиям по стойкости к электромагнитным воздействиям является бессбойное функционирование РЭС, либо, в отдельных случаях, такая степень нарушения функционирования, при которой последнее может быть устранено оператором либо ликвидируется без его вмешательства после устранения помехи [12].

Из приведенного краткого описания экспериментов по определению уровня стойкости к радиопомехам можно сделать следующий вывод. Современные подходы к проектированию, предполагающие широкое использование средств автоматизации и моделирования, а также сращивание схмотехнических и конструкторских решений для построения общей электромагнитной модели позволяют при определенной доработке решить проблему приближенного расчета показателей стойкости и генерации кондуктивных помех. Такая доработка должна включать в себя построение модели объекта испытаний, источников помех и измерительных приборов, а также их взаимодействия.

Для установления уровня кондуктивной помехоэмиссии в сети электропитания ис-

пользуется следующая схема измерений. Техническое средство подключается к эквиваленту сети электропитания, который служит для обеспечения заданного значения полного сопротивления на высоких частотах в точке измерений [7], что необходимо для однозначной трактовки результатов измерений. Обычно эквивалент сети имеет положительную реактивную составляющую полного сопротивления. В точке подключения РЭС к эквиваленту сети осуществляют измерения квазишиковых и средних значений радиопомех для ряда исследуемых частот, которые обычно лежат в интервале от 0,15 до 30 МГц. Длительность проведения измерений на каждой выбранной частоте, а также требования по максимальному уровню кондуктивных помех устанавливаются продуктовыми стандартами.

Из этого следует, что генерирование кондуктивных помех может быть в целом спрогнозировано без непреодолимых сложностей. Основной проблемой здесь является необходимость построения адекватных решаемой задаче моделей и выполнение расчета с учетом условий и специфики средств, задействованных в реальных испытаниях.

Задача сертификации по излучаемым помехам не может быть решена аналогичными, сравнительно простыми методами по целому ряду причин. В связи с этим целесообразно рассмотреть порядок проведения и средства измерений более подробно.

Сертификация РЭС по уровню излучаемых радиопомех

Сертификация РЭС по уровню излучаемых радиопомех предполагает использование разного оборудования для разных интервалов частот, причем для каждого из них параметры помехоэмиссии имеют свою норму. Требования, предъявляемые к ОИТ по уровню излучаемых радиопомех [7], приведены в таблице 1. Классы оборудования информационных технологий введены по уровню помехоэмиссии. Предельная частота, на которой измеряется уровень излуче-

ния техни-ческого средства, определяется наивысшей частотой внутреннего источника из-лучений РЭС. Параметры, указанные в таблице 1, являются типичными при оценке уровня излучаемых радиопомех.

Особенностью измерений излучаемых помех является большое влияние окружающей ЭМО и условий испытаний на их ре-

зультаты. Именно потому для получения нормализованных, стандартных результатов сертификационные испытания следует проводить на специальных испытательных площадках. Это позволяет обеспечить одинаковость условий проведения измерений и возможность их сопоставления.

В настоящее время указанные измере-

Таблица 1

Нормы напряженности поля для ОИТ

Полоса частот, МГц	Измерительное расстояние, м	Напряженность поля, дБ(мкВ/м)
<i>ОИТ класса А</i>		
30...230	10	40 (квазипиковое значение)
230...1000	10	47 (квазипиковое значение)
1000...3000	3	56 (среднее значение) 76 (пиковое значение)
3000...6000	3	60 (среднее значение) 80 (пиковое значение)
<i>ОИТ класса Б</i>		
30...230	10	30 (квазипиковое значение)
230...1000	10	37 (квазипиковое значение)
1000...3000	3	50 (среднее значение) 70 (пиковое значение)
3000...6000	3	54 (среднее значение) 74 (пиковое значение)

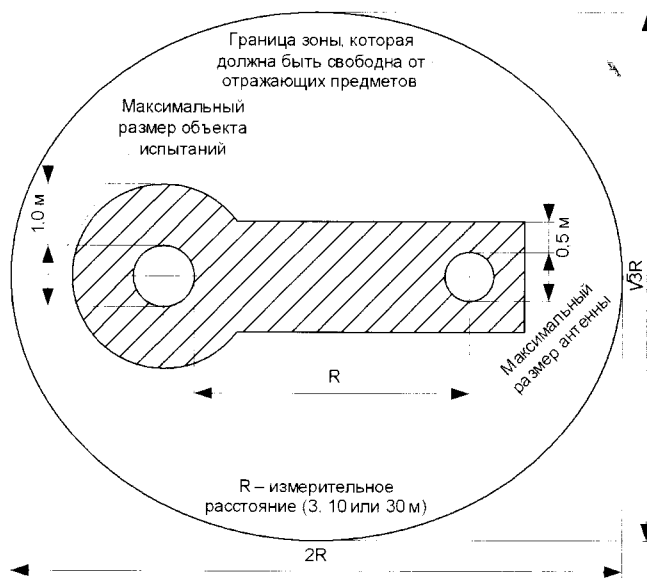


Рис. 1. Схема открытой испытательной площадки

ния рекомендуется проводить на открытых площадках. Для устранения влияния посторонних отраженных волн в пределах измерительной площадки не должно быть отражающих объектов. Схема измерительной площадки приведена на рис. 1. Здесь штриховкой показана область, закрытая пластиной заземления. Эллипс с обозначенными на рисунке размерами ограничивает наименьшую область, в которой не должны находиться отражающие объекты. На практике для обеспечения хорошей повторяемости результатов, получаемых на различных испытательных площадках, желательно, чтобы отражающие объекты были удалены на значительно большее расстояние. Таким образом, в зоне проведения измерений излучаемых помех недопустимо располагать оборудование, которое, собственно, используется для этих измерений. Альтернативой этому является размещение измерительных средств под пластиной заземления либо использование в качестве испытательной площадки плоской крыши какого-либо здания.

Поскольку исключить отражения от поверхности земли при использовании испытательной площадки невозможно, то их необходимо нормировать для получения сопоставимых для разных площадок результатов. Для этой цели служит пластина заземления, регуляризирующая отражения от поверхности земли. Обычно она изготавливается из меди, латуни или стали. Её минимальные размеры показаны на рис. 1. Увеличение размеров пластины заземления будет приближать её характеристики к теоретически рассчитанным. Это связано с тем, что рассеяние электромагнитных волн на краях пластины заземления вносит существенный вклад в суммарную ошибку измерений, которая может быть уменьшена путем снижения резкости смены свойств при переходе с пластины на грунт.

С учетом назначения пластины заземления представляется необходимым изготавливать её из сплошных металлических листов, однако в ряде случаев это не целесообразно. Часто в качестве неё исполь-

зуется металлическая сетка, обеспечивающая электрическое соединение в местах соприкосновения проволоки. Размер ячеек не должен превосходить 0,1λ для максимальной частоты.

Расстояние между проекциями испытуемого объекта (ИО) и измерительной антенной определяет общие размеры площадки. Общепринятыми являются расстояния 3, 10 и 30 м. При этом измерительное расстояние может отсчитываться как от центра ИО, так и от его границы, ближней к антенне, в зависимости от требований различных стандартов. Ниже под расстоянием R будем понимать расстояние между проекциями антенны и границы ОИ на заземляющую пластину. Как отмечается в [7], для ОИТ не во всех случаях удастся вести измерения на расстоянии 10 м, тогда допускается выполнять их для 3 м с соответствующим пересчетом. С учетом обратной пропорциональности составляющих поля в дальней зоне напряженность поля на 10 м будет примерно на 10 дБ меньше. Однако, в стандарте для ОИТ оговаривается, что в случае проведения измерений на расстоянии 3 м для низких частот на результаты измерений могут оказывать влияние поля ближней зоны.

Проверка измерительных площадок на пригодность к проведению сертификационных испытаний осуществляется путем измерения так называемого нормализованного коэффициента затухания, который определяет степень их приближенности к идеальной площадке. Испытательная площадка считается пригодной при отклонении данного параметра от нормы не более чем на 4 дБ. Порядок таких измерений подробно описан в стандартах.

Для всех категорий технических средств в целом характерны одни и те же методы измерений показателей помехоэмиссии. Продуктовые стандарты лишь уточняют их. Поскольку результаты проведения измерений в значительной степени зависят от взаимного расположения ИО и приемной антенны, то они регламентируются стандартами. Типовое расположение обо-

рудования изображено на рис. 2.

Отсчет измерительного расстояния осуществляется от границы ИО, под которой, согласно принятому определению, понимается воображаемая линия, описывающая простую геометрическую фигуру, которая окружает ИО. Испытуемое оборудование, в т.ч. информационных технологий, устанавливается на столе из непроводящего мате-

риала высотой 0,8 м. С учетом сложного характера излучения ИО должно поворачиваться вокруг оси на 360° для определения направления максимального излучения. Это обеспечивается путем размещения ИО на поворотной платформе. Если оборудование слишком велико для расположения его на поворотной платформе, то измерительная антенна должна передвигаться вок-

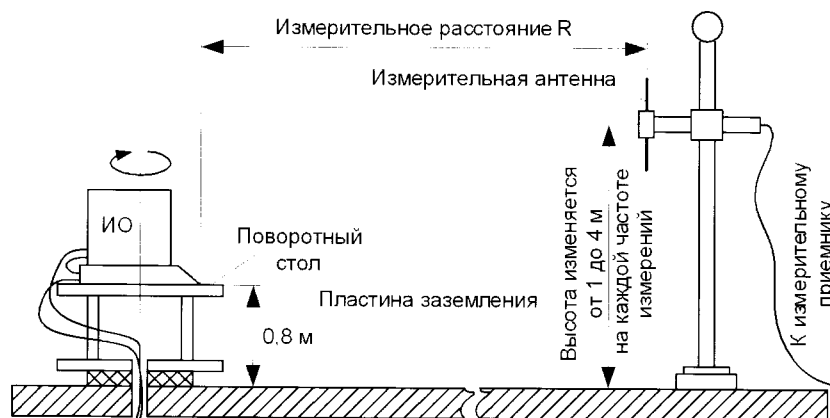


Рис. 2. Типовое расположение оборудования при испытаниях на соответствие нормам эмиссии излучаемых помех

руг ИО, установленного в фиксированном положении. Пластина заземления должна соответствовать приведенным выше требованиям для всех углов поворота.

В ходе измерений особые требования предъявляются к конфигурации ИО, поскольку она оказывает существенное влияние на уровень помехоэмиссии. При этом используется понятие типовой конфигурации, которую определяет производитель оборудования, а также общепринятые правила. К факторам, определяющим конфигурацию оборудования, относят:

- число и выбор портов, используемых для подключения вспомогательного оборудования;
- расположение отдельных элементов ИО в случае, если он представляет собой систему. При этом необходимо экспериментально определить, при каком размещении наблюдается максимальный уровень помехоэмиссии;
- длина, расположение и тип подключе-

ния всех кабелей ИО;

- наличие дополнительных подвижных модулей;
- режимы функционирования оборудования, используемое программное обеспечение;
- использование имитаторов вместо вспомогательного оборудования;
- метод заземления ИО.

При проведении испытаний должна быть обеспечена типовая конфигурация оборудования, а те параметры (например, режим функционирования), которые могут варьироваться, должны соответствовать максимальной помехоэмиссии. Во многих случаях их выявление может быть связано с существенными временными затратами.

Процесс измерений излучаемых помех обычно является достаточно простым, но занимает длительное время. Для ОИТ он заключается:

- для полосы частот от 30 до 1000 МГц – в измерении квазипиковых значений

поля с применением соответствующих детекторов;

• для частот выше 1000 МГц — в измерении пиковых и средних значений с применением пиковых детекторов и детекторов средних значений.

При этом в каждом интервале устанавливается не менее шести частот, на которых наблюдается наибольшая помехоэмиссия. Измерения проводят для вертикальной и горизонтальной поляризации.

При выполнении измерений особое внимание уделяют максимизации уровня помех. Именно по этой причине ИО размещают на поворотном столе, а антенну перемещают по вертикали в интервале от 1 до 4 м над уровнем пластины заземления. Поскольку этот процесс, в особенности при наличии многих частот, на которых уровень помех близок к норме, может быть достаточно трудоемким, то его автоматизируют. Это позволяет также устранить возможные ошибки, связанные с действиями оператора.

В протокол проведения измерений вносят максимальное установленное измерениями значение показателей ЭМС для данной частоты.

Оборудование для измерения уровня излучаемых помех

Измерительный тракт состоит в самом простом случае из антенны, кабеля и измерительного устройства. При измерении параметров поля могут анализироваться электрические или магнитные составляющие, связанные в дальней зоне, для излучения в которой, собственно, и проводятся сертификационные испытания, через волновое сопротивление свободного пространства.

Нормы электромагнитного поля устанавливаются в В/м или мкВ/м, в то время как измерительный приемник калибруется в вольтах. Поэтому калибровка антенны осуществляется таким образом, чтобы можно было определить выходное напряжение на антенне при 50-омной нагрузке и при

заданной напряженности поля на каждой частоте. Такой пересчет может быть осуществлен путем использования частотной зависимости коэффициента калибровки, который измеряется в дБ/м и может быть определен как коэффициент пропорциональности между напряженностью поля и напряжением на нагруженном выходе антенны.

Действующие стандарты устанавливают в качестве типа эталонной измерительной антенны симметричный настраиваемый вибратор, однако допускают использование широкополосных антенн, не требующих настройки на каждой частоте. Широко используют биконические и логопериодические антенны, часто объединяемые в единую конструкцию, работающую в полосе частот от 30 до 1000 МГц. Для более высоких частот используют специальные измерительные антенны.

В качестве измерительного устройства обычно используется специальный измерительный приемник. Основными его отличиями от анализатора спектра являются:

- проведение анализа для очень узкой полосы частоты;
- высокая чувствительность, точность измерений амплитуды и частоты;
- избирательность входных цепей и стойкость к перегрузкам;
- соответствие требованиям стандартов СИСПР;
- использование нескольких приемников при измерениях в широкой полосе частот.

Уровень помехи, являющийся результатом измерений на некоторой частоте, зависит от ширины полосы пропускания измерительного приемника и отклика его детектора. В настоящее время стандарт СИСПР 16-1 предполагает деление диапазона частот от 9 кГц до 1000 МГц на четыре участка, и устанавливает значение измерительной ширины полосы пропускания приемника и другие характеристики, постоянные для каждой из этих интервалов (таблица 2).

Практика измерений показала, что ис-

точники помехоэмиссии могут быть отнесены к создающим узкополосные и широкополосные помехи. К первым относят гармоники сигналов, вторые могут быть обусловлены, например, процессами переключения в цифровой аппаратуре. С точки зрения измерений помехи классифицируются аналогично на основе соотношения ширины полосы частот помехи и полосы пропускания измерительного приемника. Обработка сигналов помех, попавших в полосу пропускания, осуществляется при помощи детекторов. К используемым типам детекторов относят пиковый и квазипиковый детектор, а также детектор средних значений.

Напряжение на выходе пикового детек-

тора характеризуется достаточно быстрым нарастанием при заряде и снижением при разряде. Поэтому если измерительный приемник настроен на некоторую частоту, то пиковый детектор будет фактически выделять огибающую сигнала, и поэтому иногда называется детектором огибающей. Как отмечается в [2], стандарты СИСПР не предусматривают использования пиковых детекторов при оценке показателей помехоэмиссии, однако, например, для ОИТ на частотах более 1 ГГц нормируются именно пиковые значения напряженности поля [7].

Детектор средних значений служит для измерения средних уровней поля на данной частоте. Детектор этого типа широко используется и при измерении кондуктив-

Таблица 2

Характеристики измерительного приемника и параметры детектора квазипиковых значений (по СИСПР 16-1)

Параметры детектора квазипиковых значений	Полоса частот			
	А 9...150 кГц	В 0,15...30 МГц	С 30...300 МГц	Д 300...1000 МГц
Ширина полосы пропускания по уровню -6дБ, кГц	0,2	9	120	
Электрическая постоянная времени заряда детектора, мс	45	1	1	
Электрическая постоянная времени разряда детектора, мс	500	160	550	
Коэффициент перегрузки цепей, предшествующих детектору, дБ	24	30	43,5	

ных помех. Для непрерывного синусоидального сигнала напряжение на его выходе будет близко к пиковому значению. Основной целью установления норм по среднему уровню помех является ужесточение требований к устройствам с непрерывным излучением помех. Импульсные помехи с малым коэффициентом заполнения дают существенно меньшее значение по сравнению с пиковым значением. Одним из способов выделения среднего значения является ограничение полосы пропускания последетекторных цепей до меньших значений, чем низшая частота модуляции или следования импульсов.

Детектор квазипиковых значений пред-

ставляет собой детектор средних значений со взвешенными постоянными времени заряда и разряда (таблица 2). Это позволяет корректировать результаты измерений с учетом особенностей субъективного восприятия человеком воздействия импульсных помех на радиоприем. Известно, что при малых частотах повторения отрицательное воздействие импульсных помех на качество радиоприема оказывается меньшим, чем при значительных частотах повторения. Детектор квазипиковых значений снижает при малых частотах повторения измеренный уровень помех в сравнении с пиковыми детекторами. Таким образом, на детектор квазипиковых значений возла-

гается функция более «мягкой» обработки импульсных помех.

При измерении импульсных помех с малым коэффициентом заполнения с помощью детекторов квазипиковых и пиковых значений результаты измерений будут разными. Соотношение между ними зависит от коэффициента заполнения импульсов, постоянного времени квазипикового детектора и частоты следования импульсов. Практика радиотехнических измерений показала, что для получения точных результатов измерений сигнал, подаваемый на детектор, должен быть неискаженным при уровнях существенно более высоких, чем напряжение на выходе детектора. Чем ниже частота следования импульсов, тем выше должно быть пиковое значение импульса на входе детектора для получения одних и тех же результатов измерений. Обычно входной аттенюатор настраивают таким образом, чтобы оптимизировать уровень сигнала, обрабатываемого в измерительном приемнике. Однако требования по импульсному отклику приемника таковы, что каскады усиления радиочастоты и промежуточной частоты должны обеспечивать линейность при большом коэффициенте перегрузки (таблица 2). Это предъявляет чрезвычайно сложные в реализации требования к динамическому диапазону этих каскадов, обуславливает высокую стоимость измерительных приемников и невозможность использования для измерений стандартных анализаторов спектра.

Основные требования к измерительному оборудованию определяются стандартами [13, 14]. В них детально описаны требуемые свойства измерительных детекторов, используемых при сертификационных испытаниях.

Особенности обеспечения ЭМС с использованием САПР

Для корректной и полной постановки проблемы виртуальной сертификации необходимо рассмотреть средства автоматизации проектирования, которые могут быть

использованы для оценки излучаемых помех с учетом конструкции исследуемого РЭС и условий измерения.

В настоящее время средства анализа ЭМС обычно являются узкоспециализированным и интегрируются в среду разработки, например, печатных плат. Обычно для использования заложенных в них методов конструкции должна иметь определенную структуру, электромагнитное описание которой хорошо формализовано. Программные продукты, ориентированные на решение частных задач ЭМС, можно классифицировать следующим образом [15].

1. *САПР для обеспечения внутрисистемной ЭМС печатных узлов.* К ним относят систему Omega PLUS, программу Signal Integrity из пакета P-CAD 200x и аналогичные средства разработки. С точки зрения ЭМС они предназначены для анализа целостности сигналов до изготовления реальных конструкций. Тем самым сокращаются сроки проектирования и уменьшается его стоимость при повышении качества. Возможности данных САПР ограничиваются расчетом помех отражения, перекрестных помех, а также решением сходных задач. Анализ обычно проводится на базе хорошо исследованных и формализованных моделей линий передач и их взаимодействия.

2. *САПР сверхвысокочастотных устройств, в т.ч. интегральных микросхем.* К ним относятся системы типа Analog Office (разработка СВЧ интегральных микросхем), Microwave Office (разработка планарных СВЧ-устройств), Visual System Simulator (моделирование систем, работающих с широкополосными цифровыми сигналами). Общим назначением этих систем является анализ прохождения и преобразований СВЧ-сигналов в отдельных видах электронных компонентов. Сюда же можно отнести систему IE3D, предназначенную для моделирования электромагнитных процессов, текущих в конструкциях, состоящих из нескольких слоев проводников и диэлектриков. Система Fidelity предназна-

чена для моделирования СВЧ-устройств. Последние два программных продукта позволяют анализировать трехмерные объекты масштаба небольшого блока, а также моделировать излучение антенных устройств.

3. САПР полного трехмерного электромагнитного моделирования. Примерами являются системы Remcom XFDTD и Wireless InSite. Первая предназначена для моделирования электродинамических процессов во временной области. Уровень сложности анализируемых объектов — от интегральных схем до фрагментов печатных плат. Вторая САПР используется при анализе распространения радиоволн в условиях сложного рельефа местности.

В настоящее время разработчикам предлагается также ряд экспертных систем, направленных на обеспечение ЭМС. Примером является встроенная в программу для проектирования печатных плат Cadstar система правил проектирования, включая рекомендации по электромагнитной совместимости. Такие средства хоть и не применяются непосредственно при анализе электромагнитных процессов, но существенно улучшают качество разработок.

При построении САПР, ориентированных на решение задач ЭМС, существует два основных подхода. Первый из них заключается в создании систем, единственным предназначением которых является расчет электромагнитных полей. Примером является программный продукт Ansoft and Qumatic фирмы INCASES, позволяющий проводить анализ излучения печатных плат в ближней зоне на основе расчета распределения тока в линиях передачи, образованных проводниками и слоями металлизации на печатных платах. Второй принцип заключается в совместном решении в САПР частных проблем ЭМС и тех задач конструирования, которые могут быть автоматизированы.

Таким образом, на текущий момент не создано САПР, основным назначением которых является оценка излучаемых и кондуктивных помех в целях проведения сер-

тификационных испытаний. Между тем, имеется острая потребность в разработке таких систем в силу обязательности сертификационных испытаний.

Основными проблемами в разработке САПР обеспечения ЭМС на стадии проектирования РЭС являются следующие аспекты:

- разбиение сложного объекта приводит к резкому увеличению размерности задачи, причем требуемая для анализа машинная память растет пропорционально n^2 , а расчетное время пропорционально n^3 ;
- увеличение частоты, как следует из методов электродинамики, приводит к необходимости использовать все более мелкие элементарные единицы;
- современные САПР обычно предполагают расчет в некотором, сравнительно небольшом интервале частот. Сертификационные испытания относятся к полосе частот от 30 до 1000 МГц и выше, что приводит к необходимости многократного расчета;
- в ходе анализа должен быть обеспечен всесторонний учет электрофизических процессов, текущих в конструкции РЭС, для обеспечения адекватности результатов моделирования;
- на степень приближенности результатов расчета к истине большое влияние будет оказывать расположение элементов типа кабелей и проводов, а также допуски на параметры реальных компонентов схем и конструкций.

Подводя итог изложенному, можно утверждать, что использование классических методов, используемых в современных САПР, для реализации процедуры виртуальной сертификации затруднительно, а во многих случаях — в принципе невозможно из-за существующих ограничений. Решение задачи разработки методологии виртуальной сертификации на практике должно лежать в основе создания новых САПР обеспечения ЭМС, обладающих универсальностью и гибкостью, и опираться на новые методы и подходы к анализу, также требующие развития.

Оценка возможности и выявление путей осуществления виртуальной сертификации оборудования по уровню излучаемых помех

Из рассмотрения принципов измерений следует, что на сегодняшний момент сертификация по уровню излучаемых и кондуктивных помех осуществляется дифференцировано, что, очевидно, связано с различиями используемого оборудования. Однако к решению задачи разработки методологии виртуальной сертификации следует подходить комплексно, в противном случае последняя не будет обладать должной полнотой и завершенностью.

Виртуальная сертификация по уровню кондуктивных помех может быть осуществлена с использованием схемотехнического моделирования РЭС, однако с применением дополнительных мер по упрощению объекта исследования. Наиболее перспективным представляется моделирование в частотной области некоторого фрагмента принципиальной схемы, непосредственно расположенного вблизи порта РЭС. Сопряженные части схемы должны заменяться на макромодельные эквиваленты, построение которых является отдельной задачей и требует дополнительных исследований.

При измерении эмиссии помех в сети электропитания переменного тока, как отмечалось выше, используют эквиваленты сети, чтобы нормировать сопротивление на высоких частотах. В этом случае эквивалент сети [2] может быть также промоделирован обычными методами, а макромодельные эквиваленты замещают только нагрузки источников питания, что не предполагает полное схемотехническое моделирование РЭС и существенно упрощает задачу.

Реализация виртуальной сертификации по уровню излучаемых помех представляет собой существенно более сложную задачу. Для её решения можно предложить следующий укрупненный алгоритм, схема которого приведена на рис. 3. Заметим, что он является приближенным и может потре-

бовать корректировки при более глубоком рассмотрении.

Исходными данными для осуществления виртуальной сертификации является полностью сконструированное РЭС, включая трассировку печатных узлов, несущие конструкции, провода и т.п. На их основе строится полная схемотехническая модель устройства, в которой представляется обоснованным использовать макро-модели отдельных элементов, например, интегральных микросхем. Далее для РЭС определяется режим функционирования, характеризующийся наибольшей предполагаемой помехоэмиссией. Для цифровых РЭС, например, для компьютеров, такой режим обычно соответствует наиболее интенсивному обмену данными между функциональными узлами. Затем осуществляется моделирование РЭС во временной области в целях расчета распределения токов в конструкции РЭС для каждого анализируемого момента времени.

Выше отмечалось, что задача виртуальной сертификации не решена до сих пор в т.ч. по причине её высокой сложности. Это приводит к необходимости использования ряда упрощений, которые должны быть проработаны самым тщательным образом. К таковым можно отнести приближение бесконечно тонких проводников, коротких антенн и т.д. При этом их использование не должно оказывать существенного влияния на конечный результат расчета.

Для моделирования процедуры сертификационных испытаний необходимо построить точные модели измерительных средств, задействованных в измерениях, что позволяет поставить задачу их функционального моделирования. В общем случае она сводится к построению по некоторому описанию модели функциональной структуры устройства. На этом этапе представляется особо важным использование макромоделей совместно со схемотехническими моделями, причем первые должны обеспечивать реализацию функций блоков измерительного средства, а вторые — адекватные реальности интерфейсные показа-

тели (входной импеданс, емкость и т.п.).

Наиболее сложным с методической точки зрения является построение модели условий проведения испытаний, которая должна отражать свойства измерительной площадки, перемещение антенны измерительного приемника, вращение ИО на измерительном столе и т.п., а также переход помеховых сигналов из эфира в антенну. На текущий момент эта задача представляется сложной и требующей особо тщательной проработки.

На основе проделанных расчетов и построенных моделей осуществляется моделирование измерительной процедуры, основанное на вычислении полей в заданных точках пространства. Далее, на основе разложения Фурье рассчитываются уровни излучения для необходимых частот, и осуществляется их сопоставление с нормой.

Как и при проведении обычных, лабораторных сертификационных испытаний, при несоответствии требованиям по уров-

ню помехоэмиссии выявляются причины превышения и определяются направления доработки. Решение этой задачи может осуществляться на основе функций чувствительности, рассчитываемых для параметров конструкции, оказывающих наиболее существенное влияние на уровень помех. При внесении изменений в конструкцию или схемотехнику необходимо оценивать их экономический эффект. Далее осуществляется следующая итерация по виртуальной сертификации.

Как следует из предложенного алгоритма, для реализации виртуальной сертификации как целостной и законченной процедуры необходимо решить следующие частные задачи.

1. Разработка системы приближений и упрощений для расчета помехоэмиссии от печатных узлов и конструкции РЭС, характерной для дальней зоны. Данная система должна быть основана на специфике сертификационных испытаний и

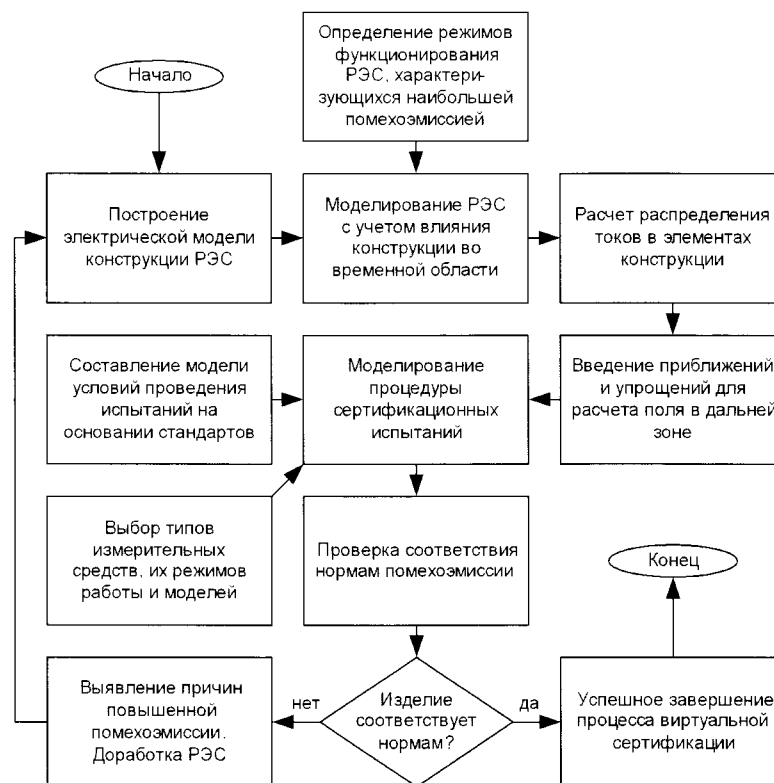


Рис. 3. Схема алгоритма методики проведения виртуальной сертификации по уровню излучаемых помех

порядке проведения измерений, возможность её использования должна быть подтверждена численными либо физическими экспериментами.

2. Разработка методики моделирования условий проведения испытаний и алгоритмов перехода от геометрической модели испытательной площадки к некоторому формализованному описанию, обладающему должной универсальностью.

3. Разработка функциональных моделей измерительных средств, задействованных в сертификационных испытаниях, соответствующих требованиям стандартов СИСРР 16-1 и 16-2.

4. Разработка методов моделирования процедуры сертификационных испытаний для произвольного объекта.

5. Разработка аппарата функций чувствительности для выбора направлений доработки РЭС при повышенном уровне помехоэмиссии.

С постановкой проблемы виртуальной сертификации РЭС по промышленным радиопомехам возникает вопрос о положительных сторонах её практического использования, среди которых можно выделить следующие.

1. Виртуальная сертификация позволит оценить уровень радиопомех, создаваемых радиоэлектронным средством, на стадии его разработки, что даст определенную гарантию прохождения сертификационных испытаний в лабораторных условиях. Это даст возможность выявить итерационным путем те изменения, которые должны быть внесены в конструкцию либо схемотехнику РЭС для снижения уровня помех.

2. Финансовые, трудовые и временные затраты, приходящиеся на осуществление процедуры виртуальной сертификации, при качественной проработке её теории будут существенно ниже, чем при проведении натурных испытаний.

3. Высокие требования, предъявляемые к электромагнитной обстановке на испытательных площадках, приводят к необходимости их размещения вне городов и крупных населенных пунктов, что создает

дополнительные сложности при измерениях в условиях полигона. Виртуальная сертификация может осуществляться при заданном качестве электромагнитной обстановки для приближения к реальности.

4. В ряде стандартов отмечается, что на некоторых частотах измерение промышленных помех может оказаться невозможным из-за наводок, формируемых электромагнитными полями местных вещательных станций. Виртуальная сертификация технических средств полностью устранит эту проблему.

5. Неопределенность результатов измерений параметров ЭМС обусловлена несовершенством измерительного оборудования, погрешность в измерении напряженности электрических полей может составлять до 10 дБ и более. Это приводит к возникновению спорных ситуаций при принятии решения о соответствии либо несоответствии изделия установленным требованиям. Процедура виртуальной сертификации позволит снизить вероятность их возникновения за счет закладывания в конструкцию надлежащего, обоснованного запаса по помехоэмиссии, даже несмотря на то, что на сегодняшний день уровень неопределенности в области ЭМС не нормируется [2].

Решение задач, поставленных в рамках данной статьи, позволит заложить методологию виртуальной сертификации оборудования и поднять на новый качественный уровень исследования РЭС в части электромагнитной совместимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. **ГОСТ 50397-92.** Совместимость радиоэлектронных средств электромагнитная. Термины и определения. М.: Издательство Стандартов, 1993. 15 с.
2. **Уильямс Т.** ЭМС для разработчиков продукции / Пер. с англ. Кармашева В.С., Кечиева Л.Н. М.: Издательский дом «Технологии», 2003. 540 с.
3. **ГОСТ 29037-91.** Совместимость технических средств электромагнитная. Сертификационные испытания. Общие положения. М.: Издательство Стандартов, 1991. 7 с.
4. **ГОСТ Р 51317.6.3-99.** Совместимость технических средств электромагнитная. Помехоэмиссия от технических средств, применяемых в жилых, коммерческих и производственных зонах с малым

- энергопотреблением. Нормы и методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 2000. 6 с.
5. **ГОСТ Р 51317.6.4-99.** Совместимость технических средств электромагнитная. Помехоэмиссия от технических средств, применяемых в промышленных зонах. Нормы и методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 2000. 6 с.
 6. **ГОСТ Р 51318.13-2006.** Совместимость технических средств электромагнитная. Радиовещательные и телевизионные приемники и другая бытовая радиоэлектронная аппаратура. Радиопомехи промышленные. Нормы и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2007. 30 с.
 7. **ГОСТ Р 51318.22-2006.** Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование информационных технологий. Радиопомехи промышленные. Нормы и методы измерений. М.: Стандартинформ, 2007. 60 с.
 8. **ГОСТ Р 51523-99.** Совместимость технических средств электромагнитная. Помехи от профессиональной аудио-, видео-, аудиовизуальной аппаратуры и аппаратуры управления световыми приборами для зрелищных мероприятий. Нормы и методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 2000. 8 с.
 9. **ГОСТ Р 51526-99.** Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование для дуговой сварки. Нормы и методы испытания. М.: Издательство Стандартов, 2000. 11 с.
 10. **ГОСТ Р 51855-2001.** Совместимость технических средств электромагнитная. Средства радио-связи личного пользования, работающие с угловой модуляцией в полосе частот от 26965 до 27860 кГц. Требования и методы испытаний. М.: Издательство Стандартов, 2002. 16 с.
 11. **ГОСТ 51320-99.** Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные. Методы испытаний технических средств — источников промышленных помех». М.: Издательство Стандартов, 2000. 39 с.
 12. **ГОСТ Р 51317.6.2-2007.** Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в промышленных зонах. Нормы и методы испытаний». М.: Стандартинформ, 2008. 10 с.
 13. **ГОСТ Р 51318.16.1.1-2007.** Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 1-1. Аппаратура для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости. Приборы для измерения промышленных радиопомех». М.: Стандартинформ, 2008. 54 с.
 14. **ГОСТ Р 51318.16.1.4-2008.** Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 1-4. Аппаратура для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости. Устройства для измерения излучаемых радиопомех и испытаний на устойчивость к излучаемым радиопомехам». М.: Стандартинформ, 2009. 71 с.
 15. **Веб-сайт:** www.rodnik.ru.