

Об особенностях комплектации лаборатории для испытаний на ЭМС в части восприимчивости к излучаемому радиочастотному электрическому полю

Антон ЕЛИЗАРОВ

Для любой лаборатории, работающей в области испытаний радиоэлектронной продукции на соответствие регламентам электромагнитной совместимости, самым затратным мероприятием является создание или модернизация площадки для тестирования оборудования на восприимчивость к излучаемым помехам. В статье приведены важные и зачастую недооцененные аспекты, которые необходимо учитывать при выборе основных компонентов будущей испытательной системы.

Введение

Испытание на соответствие регламентам электромагнитной совместимости имеет высокий «порог входа», поскольку подразумевает наличие безэховой экранированной камеры (БЭК) или открытого испытательного полигона для удовлетворения всем предъявленным требованиям.

В подавляющем большинстве случаев при создании лаборатории для сертификационных испытаний переоборудовать имеющиеся испытательные комнаты, использовавшиеся ранее для предварительных испытаний, в полном соответствии с требованиями того или иного стандарта не представляется возможным. В таких случаях понадобится проектировка отдельной камеры, а иногда — и возведение под эти цели отдельного здания.

К примеру, бюджет лаборатории при комплектации стенда на полное соответствие МЭК 61000-4-3, включая строительство испытательной камеры, может составлять порядка 40–50 млн рублей. Причем доля оборудования занимает около трети указанной суммы.

Очевидно, что для столь ответственной задачи необходим стратегический подход к комплектации испытательного стенда как с точки зрения гарантированного соответствия требованиям при аккредитации, так и с ориентиром на дальнейшее развитие лаборатории и удобство в повседневной работе.

Однако и для задач предварительного тестирования испытательную установку не следует выбирать по остаточному прин-

ципу или руководствуясь определением минимальной цены комплекта.

Правильный подход к подбору оборудования, кроме банального несоответствия требованиям, позволяет существенно снизить длительность повседневных испытаний, увеличить достоверность и воспроизводимость результатов и даже избежать повреждения дорогостоящего оборудования в процессе эксплуатации в случае ошибок оператора. Все эти факторы значительно снижают долгосрочные расходы пользователя, а также обеспечивают долгие годы безотказной работы системы.

Установка для испытаний на устойчивость к излучаемым электрическим полям

Для начала рассмотрим базовую схему комплекта для испытаний излучаемыми электрическими полями, показанную на рис. 1. Она включает:

- безэховую или полубезэховую камеру для обеспечения экранирования и плоскости однородного поля вследствие снижения переотражений излучаемых волн;
- генератор сигналов, выступающий в качестве источника синусоидального непрерывного, аналого- или импульсно-модулированного сигнала;
- усилитель мощности, обеспечивающий достаточную мощность для формирования электрического поля заданной напряженности в плоскости испытуемого устройства;

- излучающую антенну, являющуюся источником электрического поля;
- пробник электрического поля, обеспечивающий калибровку уровня напряженности в плоскости испытуемого оборудования;
- монитор поля или компьютер для обработки измеренных пробником поля значений напряженности;
- штативы для пространственного размещения антенны и пробника электрического поля в объеме испытательной камеры;
- соединительные коаксиальные кабели или волноводные тракты для передачи РЧ-энергии на антенну;
- интерфейсные кабели для передачи информации с пробника электрического поля и регулировки источника сигнала.

Несмотря на то, что указанный выше состав является достаточным для предварительных испытаний, в полноценной испытательной установке для сертификационных испытаний должен присутствовать прямой контроль выходной мощности усилителя. Это обеспечивается подключением двух измерительных головок мощности к портам измерения прямой и отраженной мощности усилителя соответственно. Либо при отсутствии таких соединителей на панели усилителя — к портам двойного направленного ответвителя, подсоединенного к его выходу. Данные с головок мощности отправляются на измеритель мощности либо на управляющий компьютер, обеспечивающий индикацию и контроль измеренных уровней.

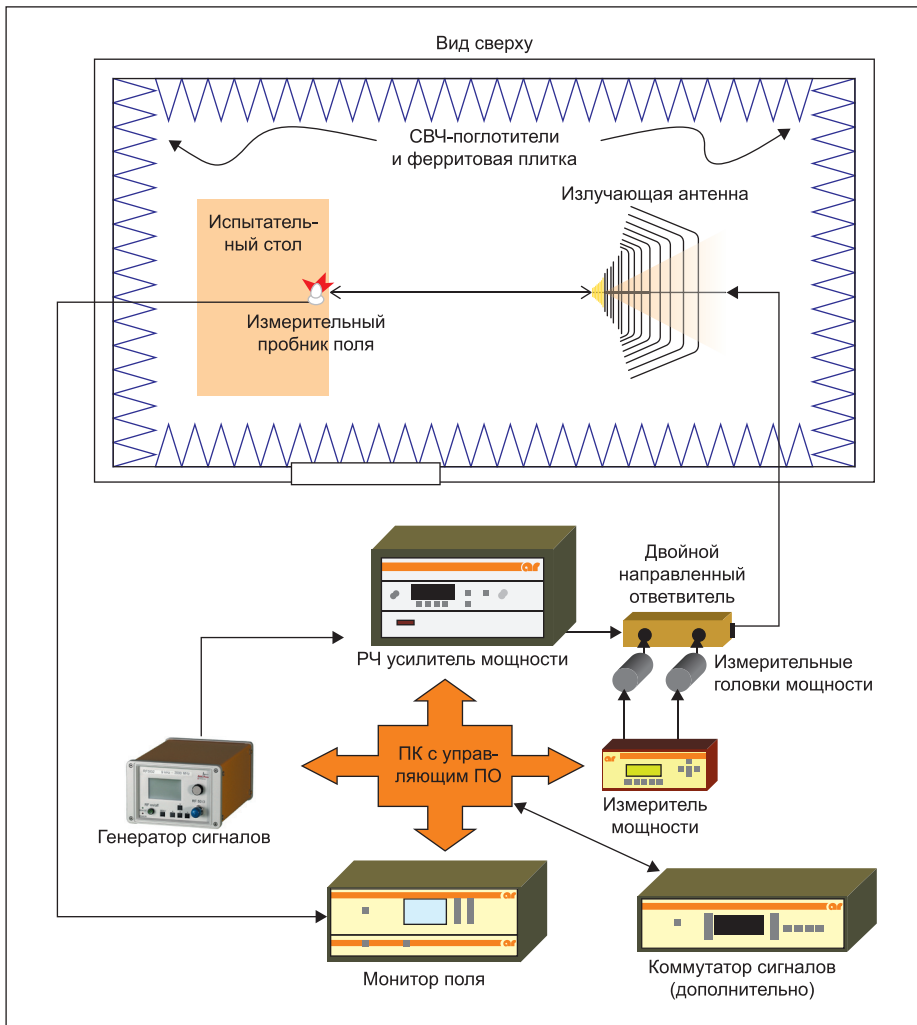


Рис. 1. Схема комплекса для испытаний излучаемыми электрическими полями

Поскольку система включает три петли обратной связи — от пробника электрического поля, головки прямой и отраженной мощностей соответственно, регулировка амплитуды сигнала источника, контроль работы усилителя и аварийное отключение оборудования при неисправности канала лучше выполнять в автоматическом, а не ручном режиме, используя специализированное программное обеспечение.

В то же время необходимость регулировки высоты размещения и пространственного направления антенны при калибровке плоскости однородного поля при многочисленных перестановках пробника поля приводит к логичной мысли о применении автоматизированной антенной мачты для дистанционного управления, также управляемой с помощью ПО.

Подобный комплект позволит существенно сократить длительность калибровки, при возникновении аварии оперативно отключать мощность для защиты компонентов и, самое главное, позволит оператору сконцентрироваться на ключевых моментах в своей повседневной работе.

Естественно, в абсолютном большинстве случаев требуемый частотный диапазон ра-

боты испытательной установки по тому или иному стандарту не предполагает использования только одной излучающей антенны или только одного усилителя мощности, подключенного к ней. К примеру, в настоящей ре-

дакции стандарта МЭК 61000-4-3 максимальная полоса частот составляет 80 МГц – 6 ГГц. И если широкополосные антенны, перекрывающие данный диапазон, существуют, то усилителей потребуется как минимум два.

Ручная перекоммутация кабелей при переходе между диапазонами влечет множество проблем:

- изнашивание соединителей усилителей, антенн и кабелей, повышающее потери и отражения, особенно критичные на высоких частотах, и, естественно, приводящее к значительным расходам;
- изнашивание ответвителей и головок мощности при их перестановках между усилителями;
- снижение воспроизводимости результатов из-за неравномерного затягивания соединителей и пространственного перемещения кабелей, особенно критично на высоких частотах;
- повышение длительности испытаний из-за необходимости остановки работы комплекса;
- повышенный риск допущения ошибок оператором, способных привести к повреждению оборудования или получению недостоверных результатов.

При испытаниях на соответствие методикам с еще более широким частотным и мощностным диапазоном, таким как DO-160 Section 20 или MIL-STD 461 RS103, последствия описанных выше факторов становятся неприемлемыми.

Разрешить ситуацию поможет использование коммутатора сигналов, как показано на рис. 2, оснащенного необходимым количеством каналов, поддерживающих требуемый диапазон частот и выдерживающих максимально обеспечиваемую выходную мощность с усилителей. Кроме того, он предусмотрен для последовательного переключения головок мощности к различным усилителям комплекса в процессе их работы.

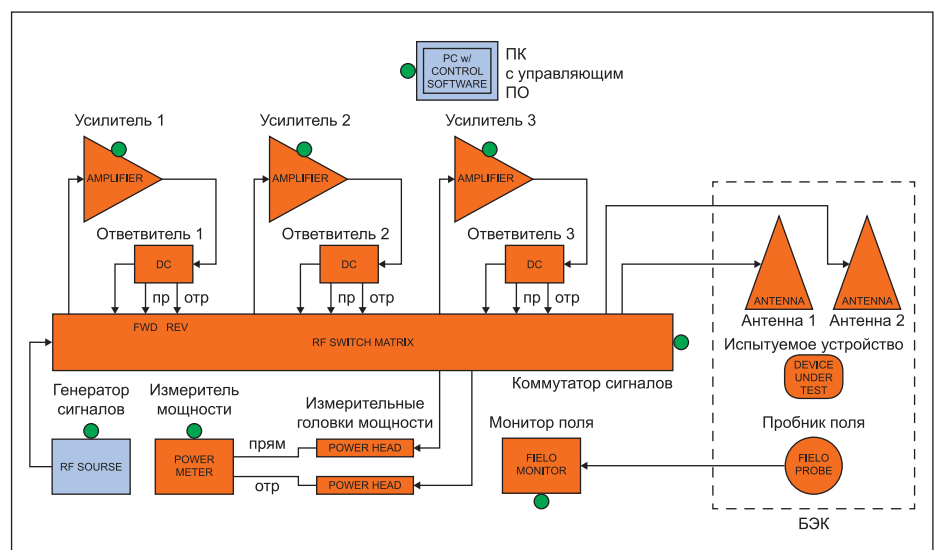


Рис. 2. Использование коммутатора сигналов

Далее последовательно рассмотрим основные факторы в выборе компонентов установки, применяемых для генерации испытательных сигналов.

Генераторы сигналов

Аналоговые генераторы сигналов для задач ЭМС — это сердце всего испытательного комплекса. Несмотря на то, что особо жестких требований к выходному сигналу с генератора не предъявляется, необходимо учитывать ряд факторов.

Частотный диапазон работы, очевидно, должен соответствовать требованиям планируемых к закрытию регламентов, однако следует учесть, что возможность аппаратного расширения полосы хоть и анонсируется рядом производителей, но фактически нерентабельна, потому при покупке нужно руководствоваться потенциалом развития лаборатории. К примеру, при выборе генератора под стандарт МЭК 61000-4-3 нет оснований ограничиваться диапазоном менее 6 ГГц, поскольку, даже если для текущих испытательных задач достаточно полосы в 2,7 ГГц, в обозримом будущем непременно появится потребность в расширении до 6 ГГц, что приведет к необходимости приобретения нового генератора.

Стандарты ЭМС описывают непрерывные, амплитудно- (АМ) или импульсно-модулированные (ИМ) сигналы. В современных генераторах возможности аналоговой модуляции обычно предоставляются в виде программных опций под ту или иную обработку. Аналогично, даже при работе по коммерческим стандартам, регламентирующим АМ с глубиной 80%, следует оценить возможности будущего программного расширения прибора.

Несмотря на то, что особое влияние на уровень гармоник сигнала, строго лимитированного требованиями стандартов, вносит усилитель, генератор сигналов должен обеспечивать малые уровни гармонических составляющих и чистый синусоидальный сигнал на выходе.

Наконец, наличие цифровых интерфейсов дистанционного управления также является необходимостью в современных ЭМС-системах.

Примером аналогового генератора сигналов для установки в испытательный комплекс согласно МЭК 61000-4-3 служит модель RFSG6 производства AnaPico (Швейцария, рис. 3). Генератор представляет собой компактное решение с полосой частот 9 кГц – 6,1 ГГц, аналоговой модуляцией (АМ, ЧМ, ФМ, ИМ, ЛЧМ) в стандартной комплектации, высокой выходной мощностью (до +17 дБм), а также низкими значениями гармонических искажений (40 дБн тип.) и фазовых шумов (–130 дБн/Гц на частоте 1 ГГц). Прибор оснащен современными интерфейсами связи и внесен в Госреестр СИ, а его исполнение позволяет существенно сэкономить средства в сравнении с традиционными решениями на рынке.

Усилители мощности

Без сомнений, именно усилители становятся основными компонентами испытательной ЭМС-системы как по критерию сложности подбора, так и зачастую по цене. Кроме того, они являются самыми уязвимыми компонентами комплекса при возникновении неисправностей канала или ошибок оператора. В этой главе мы обсудим базовые критерии в выборе усилителей мощности, уделив особое внимание часто не принимающимся в расчет факторам их надежности.

Формально нередко существует два требования к усилителю для задач ЭМС, кроме обеспечения достаточной мощности для получения в рабочей зоне заданной напряженности поля, — малый уровень гармонических искажений и, соответственно, работа в линейном режиме, исключая чрезмерное повышение таких искажений. Обусловлено это целым рядом критических факторов — неопределенностью результатов при калибровке и тестировании, возможностью перегрузки испытуемого приемника гармоническими составляющими и т. д.

Поэтому, где возможно, предпочтение отдается твердотельным усилителям, имеющим значительно более низкий уровень гармонических составляющих. Однако есть исключение, где применение ЛБВ

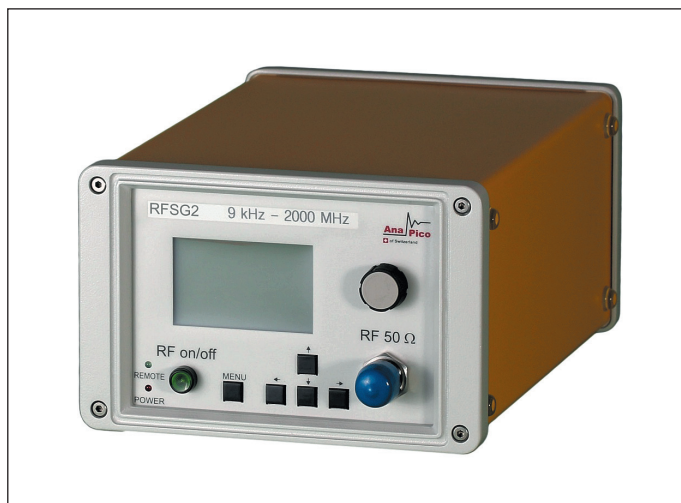


Рис. 3. Аналоговый генератор сигналов RFSG6 производства AnaPico

для ЭМС-испытаний оправданно, — это высокая номинальная мощность на РЧ-частотах либо экспортные ограничения. Причем уровень искажений, превышающий требования заданного регламента, можно подавить следящим фильтром, подключенным к выходу усилителя. Но подобные компоненты сложно подобрать и такой ситуации лучше избегать, выбрав твердотельный или высококачественный ЛБВ-усилитель. К дополнительным доводам в пользу твердотельных решений можно отнести широкую полосу, повышенную надежность и наработку на отказ, высокую линейность АЧХ. Линейность усилителя в сочетании с равномерным коэффициентом усиления антенны является одним из важнейших параметров любого усилителя, значительно упрощающим повседневную работу при необходимости частой перекалибровки системы.

Естественно, следует стремиться минимизировать количество усилителей, чтобы решить задачу экономии средств и рабочего пространства, а также снижения сложности комплекса и сопутствующих временных и материальных расходов. Однополосные решения имеют очевидное преимущество перед двух- и мультидиапазонными из-за более быстрой перестройки частот без необходимости внутреннего переключения диапазонов и, как следствие, увеличения их надежности.

Не нужно также недооценивать критерии качественного воспроизведения модуляции на входе и чистоты сигнала, низких уровней фазовых шумов и негармонических искажений усилителя. Эти параметры могут стать критичными при необходимости использования усилителя в других задачах лаборатории.

Отдельно стоит упомянуть интерфейсы дистанционного управления и аварийной блокировки, существенно увеличивающие удобство в работе с системой.

А теперь осветим важность устойчивости лабораторного усилителя к повреждениям. Максимальный входной уровень усилителей мощности обычно составляет около 0–1 дБм, потому при более высоком верхнем пределе установки амплитуды генератора необходимо предусмотреть программное или аппаратное ограничение уровня для защиты усилителя. Однако нельзя гарантировать, что такая защита окажется достаточной. К примеру, при перестановке генератора с другого стенда мощность на входе может составить +30 дБм, что при неосторожности или определенных настройках генератора или ПО приведет к выгоранию входного тракта усилителя.

А потому предусмотренная в некоторых решениях встроенная защита по входу становится залогом спокойной и длительной эксплуатации прибора. Она автоматически срабатывает при превышении номинального входного уровня, защищая компоненты входного каскада.

Однако подавляющее большинство неисправностей усилителей вызвано высоким уровнем отраженного сигнала при замыканиях на кабеле, неподключенных нагрузках, нагрузках с высоким уров-

нем КСВН (4–10 и более) и неравномерным по частоте импедансом, а также неправильным размещением излучающей антенны.

Наряду с длительной работой в режиме насыщения подобное рассогласование может привести как к критическим отказам усилителя, должным образом не защищенного от описанных сценариев, так и к невосстановиваемой деградации его характеристик.

Высокая стоимость негарантийного ремонта и логистики, простой испытательной установки в период ремонта, сложности, вызванные вывозом оборудования с предприятия и необходимостью отправки в сервисный центр за границу, — вот классические последствия таких трагических недоразумений. Суммарные потери лаборатории зависят от сложности и длительности ремонта, местоположения сервисного центра, а также от загрузки заказами в текущий момент. Очевидно одно — потери эти значительны.

Исходя из этого, не следует недооценивать предусмотренную разработчиками прибора устойчивость к рассогласованию на выходе, руководствуясь принципом минимальной стоимости, поскольку долговременная стоимость владения подобными защищенными решениями значительно ниже более экономичных предложений на рынке. Естественно, возможно установить на выход усилителя аттенуатор для защиты от отраженного сигнала, например 6 дБ, но уменьшение мощности в 4 раза в большинстве случаев будет недопустимо.

Один из вариантов защиты в усилителях класса АВ — прямое измерение отраженной мощности или температуры выходного канала и отключение выходного сигнала при превышении заданного порога. Такая защита применяется в некоторых усилителях и является грубым подходом, препятствующим бесперебойной работе комплекса.

Предпочтительным методом становится регулировка усиления прибора при фиксации превышения отраженной мощности заданного предела. При этом продолжение работы возможно на сниженной выходной мощности, при устранении причины этого режима возвращающейся к первоначальному значению.

Наконец, самый эффективный и функциональный подход — использование усилителей класса А, спроектированных с учетом обеспечения высокой устойчивости выходных каскадов усилителя к отраженной энергии. Однако, к сожалению, указание в документации на прибор класса А не означает автоматически, что он может без повреждения противостоять экстремальным рассогласованиям по выходу.

К числу основных примеров добросовестного подхода относятся решения производства Amplifier Research (США). Компания предлагает широкую номенклатуру твердотельных и ЛБВ-усилителей мощности, пере-

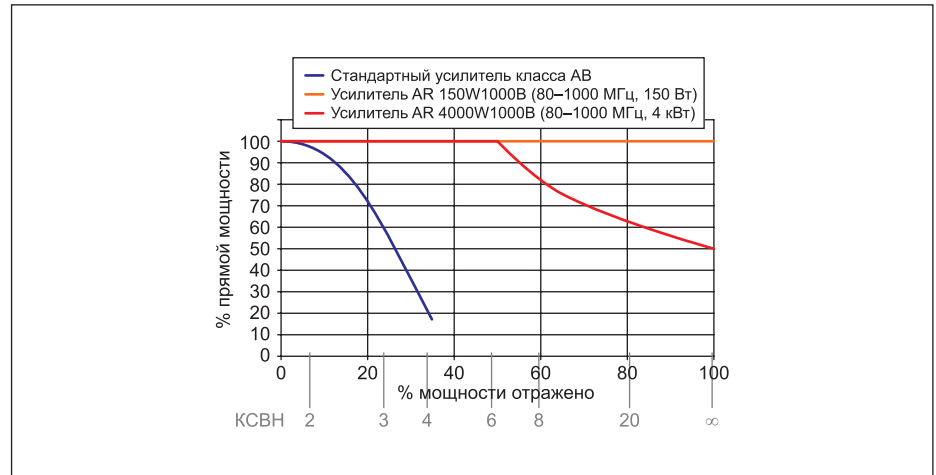


Рис. 4. Высокомощные усилители AR



Рис. 5. Сверхширокополосные усилители AR серии U

крывающих полосу частот 10 Гц – 50 ГГц, с номинальной выходной мощностью 1 Вт – 50 кВт. Кроме высокой линейности АЧХ, низких уровней гармонических искажений и фазовых шумов, решения Amplifier Research (AR) малой и средней мощности выдерживают 100% отраженной энергии без уменьшения выходной мощности даже при коротком замыкании или обрыве.

Высокомощные модели усилителей AR, в свою очередь, выдают номинальную мощность на выходе при КСВН нагрузки до 6:1. При более высоких значениях КСВН, вплоть до ∞, они линейно снижают выходную мощность до 50% от номинального значения (рис. 4).

Такие технологии позволяют применять усилитель в любых задачах и условиях, подключать любые резистивные, индуктивные или емкостные нагрузки и акцентировать внимание на важных аспектах.

В контексте темы надо отдельно упомянуть сверхширокополосные усилители AR серии U с единой полосой 10 кГц – 1 ГГц и номинальной мощностью 1, 2,5, 5, 10, 25, 50, 100, 250, 500 Вт (рис. 5). Такие решения могут исполь-

зоваться в стендах на устойчивость как к излучаемым, так и к кондуктивным помехам.

Излучающие антенны

Независимо от типа той или иной антенны для генерации электрического поля — полосковой линии, биконической, логопериодической, гибридной, рупорной — важно учитывать ряд факторов, позволяющих сэкономить на конечной стоимости комплекта и значительно упростить проведение калибровки и испытаний.

В первую очередь не всякую антенну можно эффективно применять для испытаний на ЭМС, даже если ее рабочая частота и выдерживаемая мощность соответствуют выходным параметрам подключенного усилителя. Малые коэффициенты усиления (КУ) антенны значительно повышают требования к выходной мощности усилителя для обеспечения заданного уровня напряженности, в то время как высокий входной КСВН приводит к излишним уровням отражений.

Высокая линейность КУ во всем диапазоне частот, как и линейность АЧХ усилителя,

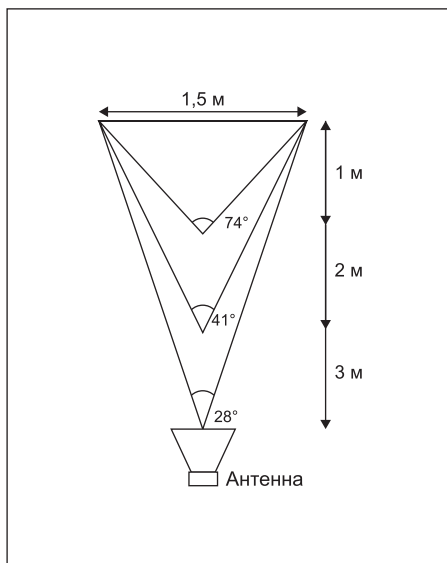


Рис. 6. Оценка ширины главного лепестка диаграммы направленности антенны



Рис. 8. Полосковые излучающие линии передачи ATR10K100M

обеспечивает удобство при калибровке напряженности электрического поля. Напротив, значительные провалы и неравномерности характеристики требуют дополнительной регулировки амплитуды сигнала с генератора в процессе частотной перестройки несущей.

Кроме того, нельзя не учитывать ширину главного лепестка диаграммы направленности антенны по уровню 3 дБ, чтобы убедиться, что она достаточна для облучения требуемой площади формируемого поля на заданном расстоянии. На рис. 6 наглядно показана такая оценка согласно требованиям МЭК 61000-4-3.

Излучающие антенны для задач ЭМС — еще одна специализация компании Amplifier Research, которая предлагает множество моделей антенн, совокупно перекрывающих частотный диапазон

10 кГц – 50 ГГц. Особенностью всех решений является высокая входная выдерживаемая мощность, высокие и равномерные КУ во всем диапазоне, исполнение для наиболее жестких условий эксплуатации.

Кроме того, компания внедряет свои агрессивные инновации, среди которых следует отметить:

- Антенны патентованной конструкции Radiant Arrow (рис. 7) — решения, перекрывающие диапазон частот МЭК 61000-4-3 26/80 МГц – 6 ГГц с высокой линейностью характеристики и сниженными до 75% габаритами относительно стандартных гибридных антенн, без сужения ширины луча либо уменьшения КУ. Применение единой для всего диапазона антенны позволит не тратить время на перестановку и переподключение антенн на штативе, а уменьшенные габариты — применять ее даже в компактных камерах, без дополнительных рисков повреждения при транспортировке.
- Полосковые излучающие линии передачи ATR10K100M (рис. 8) с диапазоном 10 кГц – 100 МГц, входной мощностью до 2 кВт, способные генерировать мощные низкочастотные поля для задач MIL-STD 461 RS103. Антенны оснащаются функциональными основаниями, позволяющими быстро производить пространственную регулировку для размещения испытуемого устройства больших габаритов в отдалении либо между ее элементами.
- Рупорные антенны серии АТН (рис. 9) со сверхвысоким коэффициентом усиления — более 20 дБи — и высокой входной мощностью для генерации электрических полей повышенной напряженности. Отдельные модели оснащены съемными компонентами, позволяющими снижать КУ при расширении ширины лепестка ДНА в тех задачах, где это необходимо.
- Гибридные сборки твердотельного усилителя и рупорной антенны для генерации полей в диапазоне 18–40 ГГц напряженностью 20–50 В/м (рис. 10). Решения позволяют заменить традиционные дорогостоящие высокочастотные ЛБВ-усилители и не переплачивать за высокие потери между усилителем и антенной. В совокупности с трехлетней гарантией производителя подобные решения оптимальны для задач, подобных MIL-STD 461 RS103, тестирования радарной техники или средств связи.

Заключение

В статье описаны основные аспекты, которые следует принимать во внимание при комплектации систем для испытаний на восприимчивость к излучаемым электрическим помехам с точки зрения как со-



Рис. 7. Антенны патентованной конструкции Radiant Arrow



Рис. 9. Рупорные антенны серии АТН

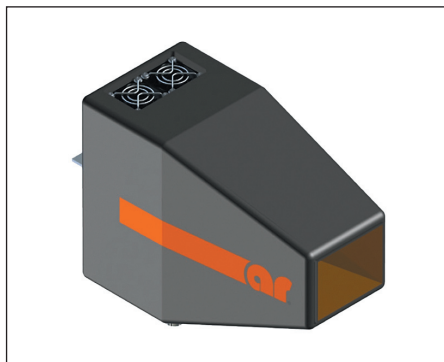


Рис. 10. Гибридные сборки твердотельного усилителя и рупорной антенны для генерации полей в диапазоне 18–40 ГГц напряженностью 20–50 В/м

става тестовой установки, так и требований к базовым компонентам — генератору сигналов, усилителям мощности и излучающим антеннам. Кроме того, приведены примеры конкретных систем и решений, оптимизированных под испытания ЭМС с учетом всех вышеизложенных факторов.

Следует учитывать, что для каждого конкретного случая необходим комплексный метод, исходя из бюджетных ограничений, объемов будущих работ и потенциала развития лаборатории. Однако при любых сценариях нужно оценивать инвестицию как долгосрочную, с учетом критериев надежности, расширяемости, универсальности и функциональности отдельных компонентов системы. ■