

Оборудование и методы проверки РЭА на устойчивость к электростатическим разрядам и элементы для ее защиты от их воздействия

При разработке радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) любого профиля — коммерческого, широкого медицинского, специального назначения, в том числе и военного, — одним из важнейших этапов является принятие мер по ее устойчивости к внешним воздействиям, что должно быть подтверждено соответствующими испытаниями и сертификатами. К числу таких обязательных для РЭА испытаний относится и проверка ее устойчивости к электростатическому разряду (ЭСР). Степень устойчивости задается регламентами, предусматривающими использование специального стандартизованного испытательного оборудования. В статье пояснены методики и подходы к испытаниям на системном уровне, представлен имитатор электростатических разрядов компании NoiseKen (Япония) и предложены решения компании Amazing Microelectronic Corp. по обеспечению РЭА промышленного и автомобильного назначения к воздействию ЭСР.

Денис ДЕНИСОВ
dendenisov@ultran.ru

Введение

Статическое электричество — это совокупность явлений, связанных с возникновением, сохранением и релаксацией свободного электрического заряда на поверхности или в объеме диэлектриков или на изолированных проводниках. Когда два непроводящих (изолированных друг от друга) материала соприкасаются или разделяются, возникает накопление электронов на поверхности одного материала и их потери на другом. Значение напряжения, до которого можно зарядить объект, зависит от емкости в соответствии с законом $Q = CV$. Так, человеческое тело можно зарядить до нескольких киловольт. Передача такого электростатического заряда с одной поверхности на другую называется электростатическим разрядом (ЭСР), или в англоязычной и некоторой отечественной литературе — ESD (Electrical Static Discharge). ЭСР может произойти только тогда, когда разность напряжения между двумя объектами достаточно высока, чтобы преодолеть электрическую прочность разделяющего их диэлектрика (в том числе воздуха).

Разность потенциалов соприкасающихся поверхностей зависит от ряда факторов — свойств материалов, их взаимного располо-

жения, влажности и температуры поверхностей этих тел, климатических условий. При последующем разделении данных тел каждое из них сохраняет свой электрический заряд, а с увеличением расстояния между ними, за счет совершаемой работы по разделению зарядов, разность потенциалов возрастает и может достигнуть десятков и сотен киловольт. Заряд статического электричества имеет свойство накапливаться на теле человека, инструменте или на самом устройстве. ЭСР может произойти в процессе изготовления узлов изделия, сборки, проверки и при испытаниях или хранении.

При производстве РЭА упреждающими мерами защиты от статики являются заземление, в том числе персонала (через специальные браслеты), и инструмента, а также использование антистатических материалов, одежды, ковриков и покрытий. Но при транспортировке, установке на объектах и, самое главное — при эксплуатации, где принятие мер по нейтрализации статического электричества или нецелесообразно, или просто невозможно, аппаратура должна справляться с воздействием ЭСР уже самостоятельно, поскольку, если не предпринять соответствующих мер, такой разряд может не только нарушить должное функциониро-

вание РЭА, но и вывести ее из строя. Такие защитные меры должны быть не просто приняты, их эффективность для того или иного типа аппаратуры должна быть доказана, а сама аппаратура сертифицирована.

В случае когда электронные компоненты РЭА подвергаются воздействию ЭСР, они могут проявлять непредсказуемые эффекты, приводящие к сбоям или неисправностям. В ряде случаев работа устройства может быть прекращена, однако если она восстанавливается посредством перезапуска, что является некритическим отказом и квалифицируется как неисправность. Но если воздействие было выше уровня защиты от ЭСР, то электронные компоненты могут быть необратимо повреждены. Быстрое движение электростатического заряда (его скорость может достигать 8 кВ/нс) генерирует ток, который повреждает или разрушает подзатворный оксид, металлизацию, соединения в интегральной схеме и даже основную изоляцию.

Самое негативное в воздействии ЭСР заключается в том, что вызванные им повреждения, например изолирующего слоя, могут накапливаться и проявиться не сразу, а впоследствии, спустя сотни часов нормального функционирования устройства. Отсюда следует вывод: заниматься проблемой устойчи-

ности к ЭСР необходимо на самых ранних этапах НИОКР и проводить проверку прототипов, не откладывая ее в долгий ящик. Как известно, доработка уже законченного изделия стоит намного дороже, чем поиск и ликвидация проблемы еще на этапе разработки [1].

Электрический разряд и его симуляция

Проблема устойчивости РЭА к воздействию электростатического разряда заключается в том, что по сравнению с другими видами перенапряжения он представляет собой чрезвычайно быстрый переходный процесс в виде импульса сложной формы. При этом уровень его воздействия зависит от типа воздействия или, как сказано в стандарте, «модели». Основным документом, регламентирующий устойчивость РЭА к ЭСР, — это международный обязательный стандарт IEC 61000-4-2 Ed. 2.0 b:2008 “Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-2: Testing and measurement techniques — Electrostatic discharge immunity test”. На территории Российской Федерации в этом направлении действует ГОСТ 30804.4.2-2013 (IEC 61000-4-2:2008) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний» [2]. Настоящий стандарт модифицирован по отношению к международному стандарту IEC 61000-4-2:2008, однако в части установленных требований идентичен и определяет методы испытаний и, в соответствии со своим названием, устанавливает требования по степени жесткости испытаний и устойчивости РЭА.

Как уже было сказано, воздействия статического электричества различаются по своему типу. Стандартами IEC 61000-4-2:2008 и, следовательно, ГОСТ 30804.4.2-2013 установлены следующие типы воздействий: воздушный разряд и контактный разряд, ко-

торые используются на системном уровне. Также существует разделение воздействия ЭСР на прямое и не прямое. Кроме того, дополнительными стандартами предусмотрены три испытательные модели: модель человеческого тела (HBM), модель машины (MM) и модель заряженного устройства (CDM), которые используются на уровне компонента.

Метод воздушного разряда (air discharge method)

Метод испытаний, при котором разрядный наконечник испытательного генератора (обычно искрового пистолета), находящийся под напряжением, постепенно приближают к испытуемой РЭА до возникновения разряда в воздухе между испытательным генератором и РЭА.

Метод контактного разряда (contact discharge method)

Метод испытаний, при котором разрядный наконечник испытательного генератора во время разряда находится в соприкосновении с РЭА и разряд производится при помощи разрядного ключа внутри испытательного генератора.

Прямое воздействие (direct application)

Электростатический разряд производится непосредственно на РЭА.

Непрямое воздействие (indirect application)

Электростатический разряд осуществляется на пластину связи, размещенную вблизи РЭА, имитируя разряд от обслуживающего персонала на объекты, расположенные вблизи РЭА.

Модель механического устройства (Machine Model, MM)

Электростатический разряд в данной модели возникает в результате различных механических воздействий, всегда имеющих

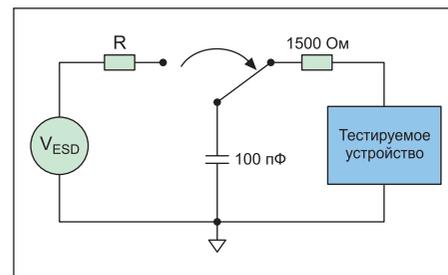


Рис. 1. Эквивалентная схема генератора модели человеческого тела (HBM)

место в оборудовании для производства компонентов РЭА. Корпус и механизмы такого оборудования сделаны из металла, но неизбежно содержат различные пластиковые части (например, подшипники), сильно отличающиеся по размерам и формам. При движении этих частей может создаваться электростатический заряд и происходить его разряд.

Модель заряженного устройства (Charging Device Model, CDM)

Модель воздействия электростатическим разрядом, которая приближенно создает явление разряда, возникающее, когда заряженный компонент быстро разряжается на другой объект с более низким электростатическим потенциалом через сигнальный штырь или контакт. Эта модель используется для оценки восприимчивости электронного устройства к повреждению от электростатического разряда. Модель является альтернативой модели человеческого тела.

Модель человеческого тела (Human Body Model, HBM)

Моделируется событие ЭСР, при котором человеческое тело разряжает накопленный электростатический заряд, имеющий противоположный потенциал. В стандартах JS-001-2012 и MIL-STD-883H заряженное че-

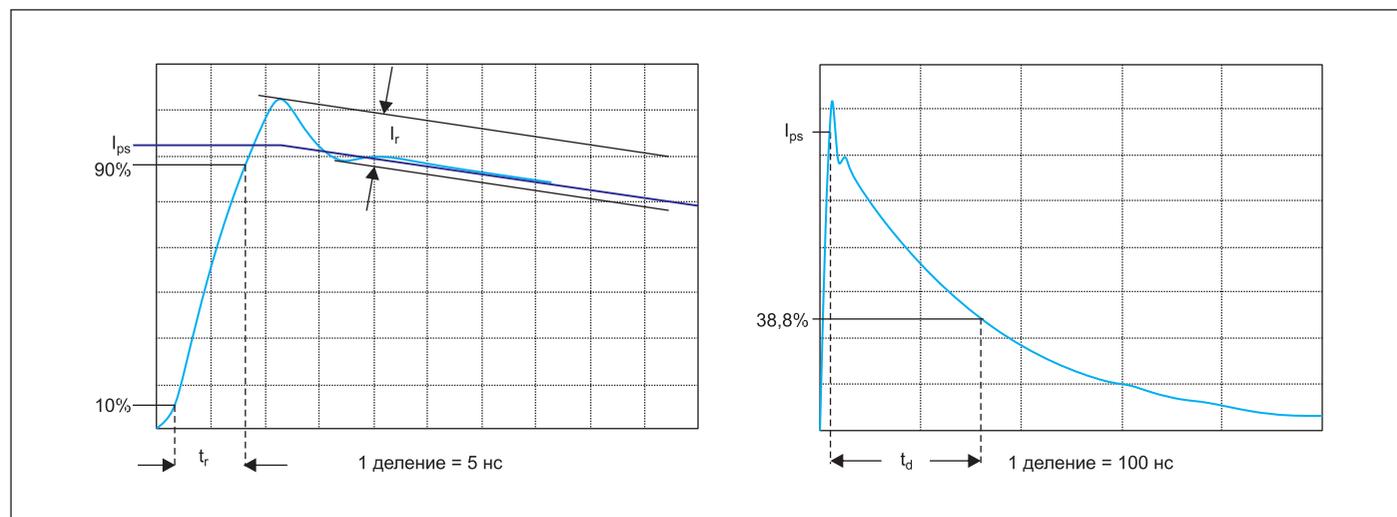


Рис. 2. Форма волны эквивалентного разряда модели человеческого тела (HBM) согласно ГОСТ Р 53734.3.1-2013 (МЭК 61340-3-1:2006)

Таблица 1. Степени жесткости испытаний по IEC 61000-4-2:2008

Контактный разряд		Воздушный разряд	
Степень жесткости	Испытательное напряжение, кВ	Степень жесткости	Испытательное напряжение, кВ
1	2	1	2
2	4	2	4
3	6	3	8
4	8	4	15
Х*	Специальное	Х*	Специальное

Примечание. *Открытая степень жесткости испытаний. Испытательное напряжение должно быть указано в технической документации на ТС конкретного вида. Если установлено более высокое испытательное напряжение, чем указано для степеней жесткости, необходимо использовать специальное испытательное оборудование.

ловеческое тело моделируется конденсатором и разрядным резистором, как показано на рис. 1.

Во время тестирования на ЭСР конденсатор полностью заряжается до нескольких киловольт, а затем разряжается через резистор, подключенный последовательно к испытываемому устройству. Типичными стандартными уровнями ЭСР являются 2, 4, 6 и 8 кВ. Модель человеческого тела (НВМ) считается основной на уровне компонента, но иногда используется и на системном уровне, например для доступных прикосновению разъемов портов. Время нарастания разрядной волны такого генератора с конденсатором емкостью 150 пФ и разрядным резистором сопротивлением 1500 Ом составляет около 5–10 нс, а форма тока имеет вид, показанный на рис. 2.

Импульс тока должен удовлетворять следующим требованиям:

- t_r — длительность фронта импульса: 2–10 нс;
- t_d — длительность среза импульса: (150 ± 20) нс;
- I_r — максимально допустимая амплитуда колебаний выбросов должна быть меньше 15% от I_{ps} при измерении параллельно к вершине импульса тока и затуханием с ненаблюдаемыми выбросами в течение 100 нс после начала импульса.

При напряжении разряда в 8000 В на компонент РЭА будет воздействовать пиковый ток силой около 5,5 А. Однако в реальных условиях электронное оборудование на системном уровне РЭА должно быть устойчиво к более жестким воздействиям электростатического разряда, определяемым

уже в рамках IEC 61000-4-2:2008 и, соответственно, ГОСТ 30804.4.2-2013. Так что, хотя полупроводниковые устройства перед отправкой на сборочные предприятия проходят испытания на устойчивость к ЭСР, установленные в конечные продукты, они могут не соответствовать требованиям системного уровня.

Устойчивость к электростатическим разрядам на системном уровне

Если рассматривать устойчивость к электростатическим разрядам на системном уровне, то для испытаний оборудования на устойчивость к электростатическим разрядам стандартом IEC 61000-4-2:2008 и, соответственно, ГОСТ 30804.4.2-2013 установлена степень жесткости испытаний, указанная в таблице 1 [2].

Упрощенная схема испытательного генератора показана на рис. 3, а пример формы разрядного тока испытательного генератора при контактном разряде и испытательном напряжении 4 кВ — на рис. 4 [2]. Параметры импульса разрядного тока при контактном разряде согласно IEC 61000-4-2:2008 представлены в таблице 2.

На уровне системы кривая разрядного тока в стандарте IEC 61000-4-2:2008 (ГОСТ 30804.4.2-2013) более «жесткая», чем при тестировании НВМ, а разряд создается портативным модулем. Метод предназначен для тестирования в случае прямых и непрямых ЭСР между человеком и частью оборудования. Прямые разряды применимы к доступным для людей во время нормального использования оборудования металлическим частям, а непрямые разряды вызываются контактными разрядами на пластину связи. Преимущественный испытательный метод IEC 61000-4-2:2008 (ГОСТ 30804.4.2-2013) — это режим прямого контактного разряда; воздушным разрядом испытываются только изолированные покрытия, кнопки, регуляторы и выводы разъемов в пластмассовой оболочке.

По сравнению с моделью человеческого тела емкости и разрядные сопротив-

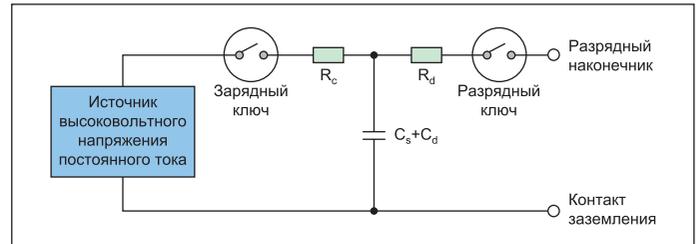


Рис. 3. Упрощенная схема испытательного генератора IEC 61000-4-2:2008 (ГОСТ 30804.4.2-2013)

Примечания.

C_d — распределенная емкость между испытательным генератором и его окружением. Значение $C_d + C_s$ должно быть равно 150 пФ. Значение R_d должно быть равно 330 Ом.

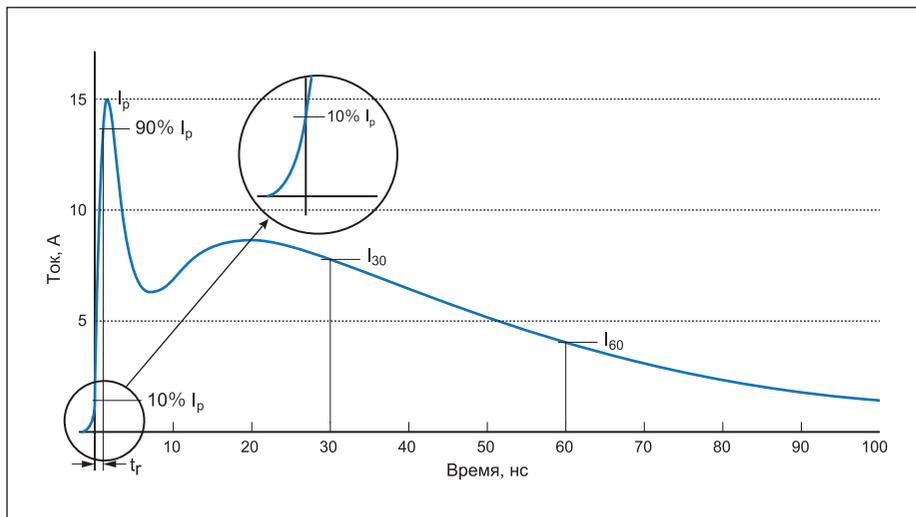


Рис. 4. Форма разрядного тока испытательного генератора (контактный разряд, испытательное напряжение 4 кВ) по IEC 61000-4-2:2008 (ГОСТ 30804.4.2-2013)

Таблица 2. Параметры импульса разрядного тока при контактном разряде по IEC 61000-4-2:2008

Степень жесткости испытаний	Испытательное напряжение, кВ	Ток первого максимума ($\pm 15\%$), А	Время t_r нарастания ($\pm 25\%$), нс	Ток разряда при 30 нс ($\pm 30\%$), А	Ток разряда при 60 нс ($\pm 30\%$), А
1	2	7,5	0,8	4	2
2	4	15	0,8	8	4
3	6	22,5	0,8	12	6
4	8	30	0,8	16	8

ления на уровне системы и компонентов составляют 150 и 100 пФ, 330 и 1500 Ом соответственно. В обстоятельствах с большей емкостью и, соответственно, накоплением энергии и меньшим сопротивлением разряда энергия, произведенная ЭСР в тесте на уровне системы, будет больше. При том же напряжении 8000 В пиковый ток, производимый на уровне системы, достигнет 30 А, что в пять раз больше, чем это было определено на уровне компонента. Такова основная причина, по которой продукты с интегральными схемами после прохождения аналогичного теста на уровне компонентов иногда не могут пройти тест на устойчивость к ЭСР на уровне системы. Поэтому прохождению данного теста необходимо уделять самое пристальное внимание.

Для того чтобы обеспечить функционирование электронных продуктов, международные компании запрашивают соответствие OEM-продуктов стандартам IEC 61000-4-2 (ГОСТ 30804.4.2-2013). Помимо прохождения испытаний на уровне компонентов, РЭА требует постоянной проверки на соответствие требованиям их спецификаций по устойчивости к разрядам статического электричества и на уровне системы, что является важным показателем надежности устройств в условиях их эксплуатации. В этом могут помочь испытательные устройства — имитаторы электростатических разрядов, например ESS-B3011, «специалист» по моделированию импульсных электромагнитных помех японской компании NoiseKen (Noise Laboratory Co., Ltd.) [3].

На протяжении более 45 лет с момента своего основания в 1975 году компания Noise Laboratory специализируется на оборудовании для испытаний на помехоустойчивость и сопутствующих решениях. В настоящее время линейка продуктов компании включает самые различные типы аппаратуры для испытаний на невосприимчивость, начиная от приборов, соответствующих стандартам серии IEC 61000-4 (ГОСТ 30804.4.2-2013), другим международным или национальным стандартам помехоустойчивости и заканчивая оборудованием, отвечающим внутренним стандартам испытаний, установленным заказчиком.

Продукция и услуги компании:

- генераторы для испытаний на воздействие ЭСР;
- генераторы быстрых переходных процессов и пачек импульсов;
- генераторы импульсов;
- генераторы электромагнитных помех;
- генераторы для имитации удара молнии;
- испытательные лаборатории по проверке РЭА по требованиям электромагнитной совместимости и устойчивости к ЭСР.



Рис. 5. Комплект оборудования компании NoiseKen для проверки РЭА на устойчивость к воздействию разрядов статического электричества в составе имитатора электростатического разряда ESS-B3011A и искрового пистолета GT-30RA

Таблица 3. Имитатор электростатического разряда ESS-B3011A

Полярность импульса	Положительная или отрицательная
Напряжение на выходе	0,2–30 кВ ($\pm 5\%$) (30,5 кВ, max) 0,2–10 кВ с шагом 0,05 кВ 10–30,5 кВ с шагом 0,1 кВ
Цикл повторения	0,05–99,9 с ($\pm 10\%$) вручную 5–10 с с шагом 0,05 с 10–99,9 с с шагом 0,10 с
Число разрядов	1–999 раз / непрерывно
Режим разряда	Контактный / воздушный
Режим запуска	От разрядного пистолета / от главного блока
Панель управления	Светодиодная матрица 5×7 Управление: кнопки (с частичной подсветкой)
Переключатель выбора режима	Встроенная функция переключения Extra / Normal
Обнаружение разряда	Функция обнаружения разряда в режиме воздушного разряда
Функция предварительной проверки	Проверка наличия выхода высокого напряжения (при работе, не относится к калибровке)
Проверка наконечника и RC-цепи	RC-цепь и наконечник интуитивно распознаваемы (промаркированы во избежание неправильной комбинации)
Функция переключения уровня согласно IEC 61000-4-2	Контактный разряд: 2, 4, 6, 8 кВ, пошагово Воздушный разряд: 2, 4, 8, 15 кВ, пошагово
Сигнальная лампа	Загорается во время включения высокого напряжения Мигает во время процесса разряда
Зарядный конденсатор и резистор	150 пФ $\pm 10\%$, 330 Ом $\pm 10\%$ (встроены в разрядный пистолет GT-30RA)
Зарядное сопротивление блока управления	10 МОм (53 МОм в комбинации с разрядным пистолетом GT-30RA)
Источник питания / Потребляемая мощность	100–240 В (AC) 50 / 60 Гц $\pm 10\%$ / 62 В·А
Габаритные размеры (Д×Ш×В) и вес	200×270×263 мм, примерно 4,6 кг

Таблица 4. Искровой пистолет GT-30RA

Выходное напряжение	30,5 кВ, max
Полярность импульса	Положительная или отрицательная
Цикл повторения	0,05 с и выше. Гарантированное значение 0,1 с и более (при емкости 330 пФ и менее)
Режим разряда	Контактный / воздушный
Зарядный резистор	Встроенный в CR-блок
Зарядный / разрядный конденсатор и разрядный резистор	Встроенный в CR-блок
Высоковольтный разъем	Композитный разъем высокого напряжения и сигнальной линии (вилка), разработка NoiseKen
Активация разряда	С помощью триггера
Светодиодная подсветка	Встроенный белый светодиод для подсветки тестируемого устройства (точка фокусировки — наконечник)
Комплектация	CR-блок (150 пФ, 330 Ом) 06-00073В Конический наконечник: 12-00007А Скругленный наконечник: 12-00008А
Габаритные размеры (Д×Ш×В) и вес	229×83×217 мм, 0,8 кг (без кабеля и разъема), 1,08 кг (с кабелем, без разъема)

Имитатор электростатических разрядов GT-30R/ESS-B3011

Имитаторы используются для оценки устойчивости электронных компонентов и РЭА к электростатическим разрядам. Данный вид испытаний может определить вероятность возникновения неисправности или каких-либо отклонений, вызванных воздействием статического электричества, которые в дальнейшем приводят

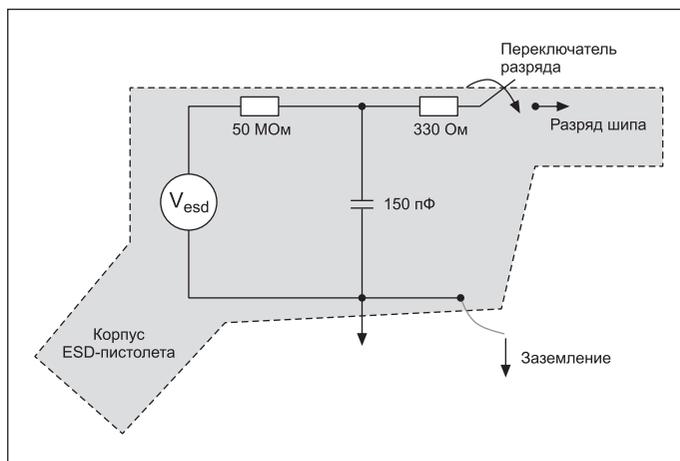


Рис. 6. Эквивалентная схема искрового пистолета GT-30RA

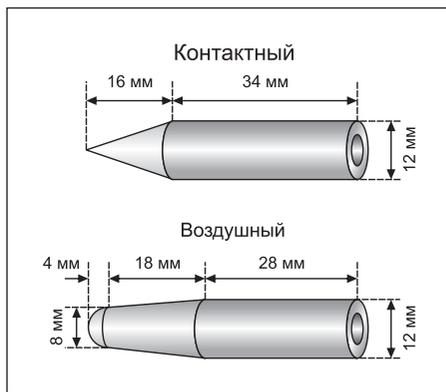


Рис. 7. Наконечники искрового пистолета GT-30RA, используемые для контактного и воздушного разрядов

к неработоспособности устройства. Недавно компания NoiseKen выпустила новый продукт — недорогой имитатор ESS-B3011A [4] с ручным управлением (табл. 3), который очень прост в эксплуатации, но при этом имеет все необходимые базовые возможности популярного программируемого имитатора электростатического разряда ESS-S3011A. Комплект оборудования состоит из имитатора ESS-B3011A и искрового (в терминах ГОСТ 30804.4.2-2013) пистолета GT-30RA с наконечниками (табл. 4).

Внешний вид комплекта испытательного оборудования от компании NoiseKen, предназначенного для моделирования электростатических разрядов на уровне системы и соответствующего требованиям стандарта IEC 61000-4-2:2008 (ГОСТ 30804.4.2-2013) для проверки на устойчивость к воздействию электростатического разряда GT-30RA/ESS-B3011A, показан на рис. 5, эквивалентная схема его искрового пистолета GT-30RA показана на рис. 6, а используемые для проведения испытаний наконечники — на рис. 7.

Важным моментом для получения достоверных результатов испытаний на устойчивость к электростатическим разрядам является соблюдение требований к условиям окружающей среды. Согласно стандарту IEC 61000-4-2:2008 (ГОСТ 30804.4.2-2013) проверка на устойчивость к воздействию электростатического разряда проводится в нормальных климатических условиях, то есть температура окружающей среды должна составлять +15...+35 °С, влажность поддерживаться на уровне 30–60%, а давление находиться на уровне 68–106 кПа. Однако испытания РЭА, эксплуатируемой в особых климатических условиях, допускается проводить при других климатических условиях. Наиболее часто в ходе системных испытаний РЭА проводят тестирования методом контактного и воздушного разряда.

Программа и программные средства испытаний должны обеспечивать функционирование испытываемой РЭА в ее основных режимах работы. При испытаниях допускается

использование специального программного обеспечения. При этом должна быть установлена правильность функционирования испытываемого изделия. В ходе испытаний на соответствие тестируемое изделие должно функционировать непрерывно в режиме (при программном цикле) наибольшей восприимчивости к электростатическим разрядам, который должен быть определен ранее во время предварительных испытаний.

Испытания должны быть выполнены при прямом и непрямом воздействиях электростатическими разрядами на испытываемую РЭА в соответствии с программой испытаний, которая должна включать:

- условия работы испытываемой РЭА;
- условия испытаний РЭА в качестве настольного или напольного оборудования;
- точки, к которым должны быть приложены разряды;
- указание о том, какой разряд (контактный или воздушный) должен быть приложен к каждой точке;
- степень жесткости испытаний;
- число разрядов, приложенных к каждой точке для полного выполнения испытания;
- необходимость проведения испытаний на месте эксплуатации.

Допускается проведение исследовательских испытаний для определения отдельных положений программы испытаний. Предпочтительным считается метод контактного электростатического разряда.

Испытание методом прямого контактного разряда

Метод тестирования состоит в моделировании явления электростатического разряда, когда металлический инструмент контактирует с электронным компонентом РЭА. В этом методе испытаний в искровом пистолете для концентрации заряда и создания

испытательного напряжения используется наконечник с очень маленьким радиусом. В процессе испытания металлический наконечник искрового пистолета с наконечником для контактного разряда (рис. 8) направляется в испытываемую точку. Электростатические разряды от наконечника искрового пистолета должны быть поданы только к тем точкам и поверхностям испытываемой РЭА, которые доступны обслуживающему персоналу при ее эксплуатации. В стандарте IEC 61000-4-2:2008 (ГОСТ 30804.4.2-2013) установлены исключения, согласно которым электростатические разряды не подаются на точки и поверхности, доступные только при техническом обслуживании, точки редкого доступа (например, контакты в батарейном отсеке) и т. п., подробно в ГОСТ 30804.4.2-2013 [2].

При контактных ЭСР следует сначала прикоснуться наконечником искрового пистолета к испытываемому оборудованию, а затем замкнуть разрядный ключ. Испытания проводят воздействием напряжения, соответствующего установленной для данной РЭА степени жесткости — в большинстве случаев это степень жесткости 2 (± 4 кВ). Число воздействий устанавливается стандартами согласно типу РЭА и программе испытаний.

Испытание методом непрямого контактного разряда

Организация рабочего места для проверки устойчивости РЭА к ЭСР системного уровня в режиме непрямого разряда показана на рис. 8. Испытательная установка состоит из заземленного деревянного стола, на котором имеется изолирующая прокладка, используемая для изоляции тестируемого устройства, и горизонтальная (только в данном случае) пластина связи на столе. Пластина связи через два последовательных резистора сопротивлением 470 кОм подклю-

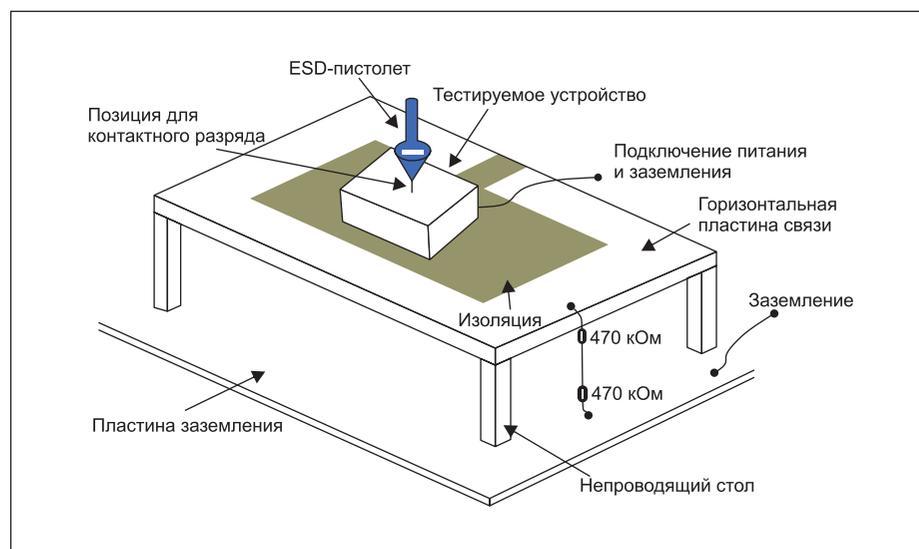


Рис. 8. Испытательная установка для проверки устойчивости РЭА к электростатическим разрядам системного уровня в режиме непрямого воздействия

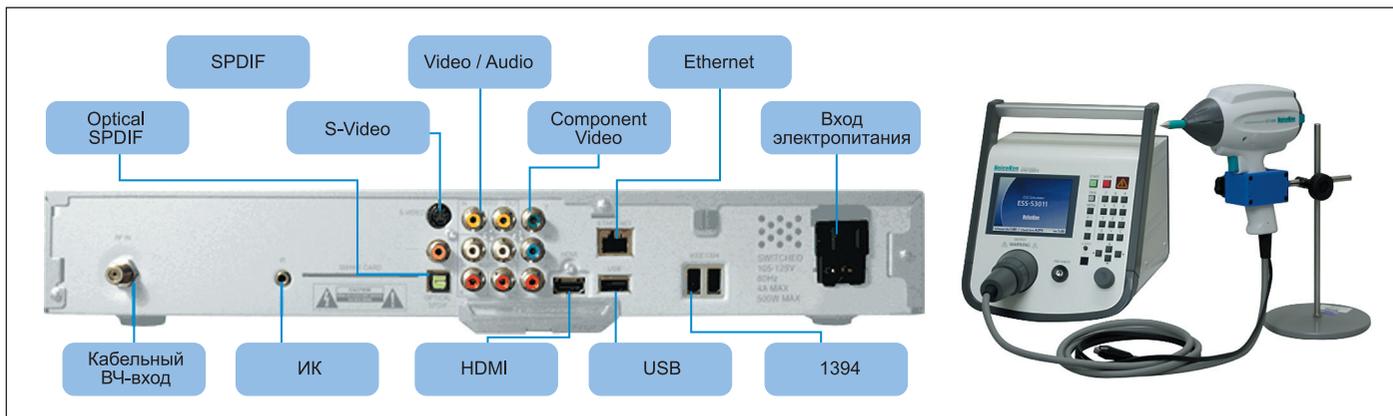


Рис. 9. Типовые интерфейсы современной аппаратуры, где защита от электростатического разряда имеет решающее значение

чается к заземлению. Когда искровой пистолет с наконечником для контактного разряда касается горизонтальной пластины связи, он создает электромагнитные помехи на тестируемом устройстве.

Испытание методом воздушного разряда

Метод воздушного электростатического разряда используют в случаях, когда контактный разряд применить невозможно. Степени жесткости испытаний и значения испытательного напряжения для каждого вида разрядов приведены в таблице 1. Для каждого метода испытаний указаны различные значения напряжения ввиду различия методов испытаний. Однако это не означает, что жесткость испытаний будет одинаковой для разных методов.

Суть данного метода заключается в моделировании явления электростатического разряда при непрямом контакте пальца оператора с РЭА. В нем в качестве наконечника искрового пистолета используется специальный наконечник для воздушного разряда круглой формы (рис. 7). Во время теста на ЭСР искровой пистолет активируется на близком расстоянии, не касаясь тестовой точки. Наконечник искрового пистолета выполняет испытание на бесконтактный разряд с передачей энергии на РЭА по воздуху.

Соответствие международным стандартам, проведение испытаний на устойчивость к ЭСР дает гарантию долговременной надежности электронного устройства. Испытания по стандарту IEC 61000-4-2 можно разделить на четыре группы по напряжению ЭСР: 2, 4, 6 и 8 кВ, которое подается от предварительно заряженного конденсатора через резистор на 330 Ом. Современные электронные системы должны выдерживать напряжение разряда не ниже третьей или четвертой степени жесткости. Если взять за основу, например, степень жесткости 4, то максимальный ток электростатического разряда может достигать 30 А, что в 20 раз больше, чем ток ЭСР на уровне компонента (например, кристал-

ла микросхемы). Если рассчитывать в соответствии со стандартами по устойчивости к ЭСР, упомянутыми выше, то вполне очевидно, что следующее поколение ИС будет иметь катастрофические повреждения, даже если будет всего лишь один разряд. Можно предположить, что самим ИС без дополнительной помощи будет сложно пройти тест на ЭСР на уровне системы.

Оценка результатов испытаний

Результаты испытаний должны быть классифицированы исходя из прекращения выполнения функций или ухудшения качества функционирования испытуемой РЭА в сравнении с установленным уровнем функционирования, определенным изготовителем РЭА или заказчиком испытаний или согласованным между изготовителем и пользователем РЭА.

Рекомендуется следующая классификация критериев качества функционирования РЭА при испытаниях на воздействие ЭСР:

- A. Нормальное функционирование в соответствии с требованиями, установленными изготовителем, заказчиком испытаний или пользователем.
- B. Временное прекращение выполнения функции или ухудшение качества функционирования, которые исчезают после прекращения помехи и не требуют вмешательства оператора для восстановления работоспособности.
- C. Временное прекращение выполнения функции или ухудшение качества функционирования, восстановление которых требует вмешательства оператора.

Таблица 5. Критерии качества функционирования при испытаниях на устойчивость к электростатическим разрядам на уровне системы

Критерий качества функционирования	Статус	Результат
A	Нет следов воздействия	+
B	Автоматическое восстановление	+
C	Требовалась перезагрузка	+/-
D	Необратимый ущерб	-

D. Прекращение выполнения функции или ухудшение качества функционирования, которые не могут быть восстановлены из-за повреждения РЭА (или его компонентов), или нарушение в работе программного обеспечения, или имела место потеря данных.

В таблице 5 показаны возможные результаты испытаний на уровне системы для контактного и воздушного разрядов, но в документах изготовителя также могут быть указаны нарушения функционирования РЭА при воздействии помех, которые рассматриваются как незначительные и допустимые. Стандарт IEC 61000-4-2:2008 (ГОСТ 30804.4.2-2013) это предусматривает.

Проблемы устойчивости РЭА к электростатическим разрядам и их решения от компании Amazing Microelectronic Corp.

Поскольку современная РЭА становится все более сложной в части используемых протоколов интерфейсов, она является и более уязвимой. Долгое время производители РЭА проводили испытания на устойчивость к ЭСР только воздействием на корпус, и этого было достаточно. Однако в последнее время, хотя устройства и выдерживали испытания на соответствие системным стандартам, было обнаружено, что многие продукты, возвращенные покупателями, все же были повреждены. После анализа причин отказов обнаруживалось, что на портах входа/выхода происходило короткое замыкание. То есть для того, чтобы гарантировать надежность продукта в целом и избежать отложенных отказов, испытаний воздействием только на корпус РЭА явно недостаточно. Для гарантии долговременной надежности РЭА в обязательном порядке следует дополнительно проверять на устойчивость к ЭСР сигнальные порты, показанные на рис. 9.

Соответственно, чтобы найти оптимальное решение, разработчику приходится балансировать между стоимостью системы защиты, выполнением требований стандартов

HDMI / Display Port

Для высокоскоростной TMDS:
AZ 1023-04F, AZ 1143-04F
Для линий управления: AZC199-04S

LAN (10M, 100M, 1G)

Для защиты линий от взаимного перенапряжения:
AZ3125-08 F, AZ3133-08F
Для защиты линии от перенапряжения по отношению к земле
AZ1515-04S, AZ1513-04S

10G LAN

AZ1365-06F, AZ1023-04F, AZ1243-04F

USB3.1 Type-A

Для Tx, Rx: AZ176S-04F, AZ1023-04F
Для V_{BUS}: AZ5825-01F, AZ3105-01F
Для D+, D-: AZC199-04S, AZ1515-04S
Для общих решений: AZ1365-06F

USB3.1 Type-C

Для Tx, Rx: AZ176S-04F, AZ1023-04F
Для V_{BUS}: AZ5825-01F, AZ3105-01F
Для D+, D-: AZC199-04S, AZ1515-04S
Для общих решений: AZ1365-06F

**USB2.0 / CF Card / SD Card Reader**

AZ1515-04S, AZC199-04S

GPIO / низкоскоростные линии данных

AZ1613-01L, AZ1605-01L

SIM-карта

AZ1515-04S

Антенна

AZ5B75-01B

Светодиоды

AZ3103-01F

VGA/DVI

AZ1515-04S

AZ3105-01F

AZC199-04S

UART

AZ5413-01F, AZ5323-01F

Аудио / Микрофон

AZ1605-01L, AZ5825-01F

RS485/RS232/RS422

AZ4212-01G

Питание / Reset

AZ3003-01G, AZ3005-01G, AZ4008-01G, AZ4212-01G
AZ4015-01G, AZ4018-01G, AZ4020-01G, AZ4024-01G
AZ4030-01G, AZ4036-01G, AZ4040-01G, AZ4045-01G

Рис. 10. Элементы защиты от электростатического разряда на системном уровне для промышленного применения, предлагаемые компанией Amazing Microelectronic Corp.

Индикация показаний приборов на ветровом стекле

Для сигналов: AZ9143-04F
Для цепей питания: AZ9315-01F

Система мониторинга автомобиля

AZ9143-04F

USB2.0

AZ9115-04S

SD Card

AZ9143-04F

Информационно-развлекательная система

Для цепей питания AZ9525-011-1, AZ9585-01F,
AZ9712-01F, A79412-01H, AZ9812-01F
Для HDMI выходы управления: AZ9115-04S
Для HDMI витая пара TMDS: AZ9143-04F, AZ9143-08F

Панель управления

Для сигнальных линий MIPI видеокамеры: AZ9143-04F, AZ9143-08F
Для сигнальных линий LVDS: AZ9143-04F, AZ9143-08F
Для FPD-Link, GMSL: AZ9565-01F
Для цепей питания и линий управления:
AZ9313-01F, AZ9315-01F, AZ9305-01G, AZ9525-01H
AZ9585-01F, AZ9407-01H, AZ9707-01F, AZ9408-01G
AZ9808-01F, AZ9712-01F, AZ9412-01G, AZ9412-01H
AZ9812-01F, AZ9424-01F, AZ9424-01H, AZ9436-01G

**Система питания**

A79525-01H, AZ9412-01H, AZ9407-01H
AZ9412-01G, AZ9513-01F, P29313-01F, P29523-01F
A79625-01F, AZ9305-01G, AZ9315-01F, AZ9812-01F
AZ9707-01, FAZ9408-01G, AZ9808-01F, AZ9712-01F

Зарядное устройство

AZ9436-01G

Шина CAN

AZ9424-02S

Модуль беспроводной связи

AZ9565-01F

LIN

AZ9824-01L

Драйвер светодиодов

AZ9315-01F, AZ9313-01F

Модуль цифрового видео

AZ9625-01F, AZ9513-01F

AZ9523-01P, AZ9525-01H

Рис. 11. Элементы защиты от электростатического разряда на системном уровне для автомобильной промышленности, предлагаемые компанией Amazing Microelectronic Corp.

лет используются в качестве стандартных защитных устройств, часто их путают со стабилитронами, что в корне неверно.

TVS-диоды представляют собой твердотельные устройства, выполненные на базе *p-n*-перехода, специально предназначенные для защиты входов аппаратуры от разрушающего воздействия переходных и наведенных напряжений. Преимущества таких защитных устройств в том, что они являются универсальными продуктами широкого назначения — они малогабаритные, обеспечивают быстрое и хорошо контролируемое напряжение ограничения. Такие диоды находят самое широкое применение и выигрывают по сравнению с обычными диодами и тем более стабилитронами. Что касается ограничения по емкости, сейчас имеются двунаправленные TVS-диоды с типовыми емкостями менее 1 пФ, которые специально разработаны для защиты высокоскоростных цифровых линий передачи данных. Что касается поглощаемой мощности, то уже предлагаются диоды, способные принять токи, превышающие 100 А.

Одной из компаний, специализирующихся на устройствах защиты от воздействия разрядов статического электричества, является Amazing Microelectronic Corp. [7]. Компания входит в тройку крупнейших в мире поставщиков компонентов защиты, наряду с ON Semiconductor и Nexperia, с долей порядка 11%. Решения от компании Amazing используются в продукции таких гигантов, как Samsung, DELL, Lenovo, Asus, Verizon, Motorola, Toshiba, Sharp, и многих других. Следует также отметить, что компоненты Amazing IC используются в референс-дизайнах Intel, Qualcomm, NVIDIA, Mediatek, Realtek и других компаний. Продукция и производство сертифицированы по стандартам ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 18001, AEC-Q101, IECQ.

Головной офис компании находится на Тайване, там же расположено две из шести ее исследовательских лабораторий. В качестве производственных партнеров используются фабрики на Тайване, в Японии и Китае. Последние несколько лет компания Amazing Microelectronic Corp. развивает направление интерфейсов с интегрированными защитными собственной разработкой. На рис. 10, 11 представлены продукты компании, оптимизированные для защиты от электростатического разряда на уровне системы для РЭА автомобильного и промышленного применения.

Заключение

Результаты испытаний на устойчивость к электростатическим разрядам на уровне элементов и компонентов (HBM и CDM) не коррелируются с устойчивостью РЭА на уровне системы, определяемом стандартом IEC 61000-4-2:2008 (ГОСТ 30804.4.2-2013). Допустимые параметры на уровне компонентов относятся только к компонентам или интегральным схемам, с которыми работают

и надежности защиты таких систем в местах эксплуатации. Все это становится как коммерческой, так и технической проблемой, которая усугубляется дополнительными ограничениями, связанными с все возрастающей производительностью современных цифровых сетей.

Оценивая вышеизложенное, мы приходим к выводу, что лучшим решением для защиты порта ввода/вывода (I/O) от ЭСР будет использование специального устройства защиты. Такое внешнее по отношению к ИС интерфейса устройство защиты от воздействия ЭСР будет обеспечивать первую линию обороны, а защита ИС со степенью жесткости 1 будет вторичной ступенью защиты [5]. Поскольку порт ввода/вывода РЭА открывает путь для разрядного тока непосредственно

к микросхемам интерфейса, то использование дополнительной защиты станет наиболее эффективным способом ограничения и поглощения энергии электростатического разряда перед его распространением по печатной плате.

Выбор устройства защиты должен учитывать низкое напряжение ограничения и обладать коротким временем отклика. С этой точки зрения наиболее целесообразно использование такого защитного компонента, как специальные диоды подавления переходных напряжений (Transient Voltage Suppressor, TVS-диод), работающие за счет быстрого перехода от высокого импеданса к нелинейной характеристике сопротивления, которая ограничивает скачки напряжения [6]. Кремниевые TVS-диоды уже много

в защищенных от действия статического электричества зонах со специально защищенным оборудованием для производства и монтажа. Для конечного продукта — РЭА — требуется оценка устойчивости к электростатическим разрядам на уровне системы.

Проектирование такой системы нуждается в целостном подходе. Это требует от разработчиков печатных плат и OEM-изготовителей следующих действий:

- Понимать и оценивать эффекты воздействия статического электричества в своей системе на максимально ранней стадии проектирования.
- С самого начала НИОКР следовать рекомендациям по устойчивым к разрядам статического электричества процессам.
- Выполнять тестирование на уровне системы (в соответствии с IEC 61000-4-2) на различных стадиях разработки, чтобы своевременно идентифицировать и ликвидировать пробелы в проекте. Подробно с требованиями и методами испытаний на устойчивость РЭА к электростатическим разрядам можно ознакомиться в ГОСТ 30804.4.2-2013 [2]. ■

Литература

1. Рентюк В. Электромагнитная совместимость: проблема, от решения которой не уйти // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
2. ГОСТ 30804.4.2-2013 (IEC 61000-4-2:2008) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний (издание с поправкой). www.docs.cntd.ru/document/1200104291
3. www.noiseken.com
4. Electrostatic Discharge Simulator ESS-B3011A/GT-30RA. www.noiseken.com/modules/products/index.php?content_id=253
5. Пирк Т. Когда хорошо работающая электроника вдруг выходит из строя, или Как защитить ее аналоговые входные каскады. www.emc-e.ru/razrabotka-i-konstruirovanie/elektricheskoe-perenapryazhenie/
6. Рентюк В. Преимущества, особенности применения и проблема выбора кремниевых защитных элементов для высокоскоростных интерфейсов // Компоненты и технологии. 2017. № 10.
7. www.amazingic.com/en/about/Company-Profile