

Организация защиты аналоговых входов на системном уровне в соответствии со стандартами IEC

Дэвид ФОРДЕ (David FORDE)
Перевод: Михаил РУССКИХ

Системы, работающие в средах с сильным электромагнитным полем, должны выдерживать высоковольтные переходные процессы на входных или выходных узлах, а при переходе от стандартов уровня устройства к стандартам уровня системы в плане устойчивости к высоковольтным переходным процессам существует значительная разница в уровнях энергии, воздействующей на вывод микросхемы. Вот почему микросхемы, которые непосредственно взаимодействуют с узлами ввода/вывода, также должны иметь достаточную защиту, позволяющую выдерживать высоковольтные переходные процессы на системном уровне. Если на ранних стадиях разработки не предусмотреть подобную защиту, это может сделать систему менее безопасной, снизить ее эффективность и замедлить выпуск продукта. В статье рассказывается о том, как защитить чувствительные аналоговые входные и выходные узлы от переходных процессов, описанных в стандарте IEC (International Electrotechnical Commission — Международная электротехническая комиссия).

Внешние высоковольтные переходные процессы, которые оказывают влияние на аналоговые входы и выходы системы, могут повредить имеющиеся в составе этой системы интегральные схемы, если они не защищены должным образом. Линии аналогового ввода и вывода современных микросхем, как правило, снабжены защитой от высоковольтных переходных процессов электростатического разряда (рис. 1). Модель человеческого тела (human-body model, HBM), машинная модель (machine model, MM) и модель заряженного устройства (charged-device model, CDM) представляют собой действующие на уровне устройства стандарты, используемые для измерения его способности выдерживать влияние электростатического разряда. Эти тесты предусматривают, что во время процессов производства и сборки печатной платы устройство может выдерживать воздействия, которые определены для него стандартами и обычно выполняются в контролируемой среде.

Стандарты серии IEC 61000

IEC 61000 — это серия стандартов, регламентирующих электромагнитную совместимость на системном уровне. Тремя стандартами, которые относятся к высоковольтным переходным процессам, являются IEC 61000-4-2 (ГОСТ 30804.4.2-2013), IEC 61000-4-4 (ГОСТ IEC 61000-4-4-2016) и IEC 61000-4-5 (ГОСТ IEC 61000-4-5-2017). В этих документах определяется устойчивость к электростатическим разрядам, к наносекундным импульсным помехам и к выбросам напряжения соответственно. Данные

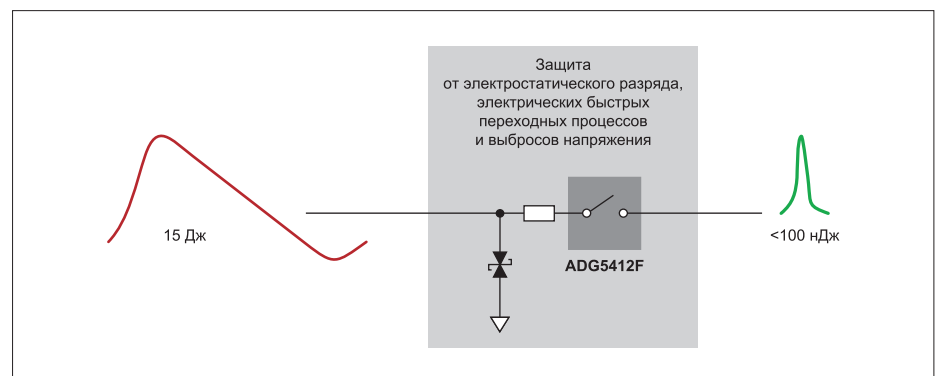


Рис. 1. Системная защита в соответствии с требованиями стандартов IEC для прецизионных аналоговых входов

стандарты устанавливают формы сигналов, методы испытаний и уровни испытаний для оценки устойчивости электрического и электронного оборудования при воздействии переходных процессов.

Основная цель испытаний в соответствии со стандартом IEC 61000-4-2 — определение устойчивости систем к внешним электростатическим разрядам, создаваемым вне самой системы во время ее работы, например, когда линия ввода/вывода системы контактирует с человеком, кабелем или инструментом, на котором присутствует электростатический заряд. В IEC 61000-4-2 описан порядок испытаний с использованием двух методов: контактного разряда и воздушного разряда.

Испытания согласно IEC 61000-4-4 предполагают воздействие на сигнальные линии ряда чрезвычайно быстрых импульсов с целью создания помех, свойственных внешним

коммутационным схемам, которые имеют емкостную связь с сигнальными линиями. Такие испытания симулируют дребезг контактов или переходные процессы, возникающие в результате коммутации индуктивных или емкостных нагрузок, — весьма распространенные явления в промышленных условиях.

Выбросы напряжения — это следствие коммутационного или грозового перенапряжения. Коммутационные переходные процессы могут возникать во время переключения компонентов в силовом оборудовании, при изменениях нагрузки в системах распределения питания или вследствие различных системных сбоев, например коротких замыканий и дугообразований в системе заземления установки. Грозовое перенапряжение может появиться из-за воздействующих на цепь высоких токов и напряжений, возникающих от ударов молнии.

Ограничитель выбросов напряжения: основные параметры

Ограничитель выбросов напряжения (transient voltage suppressor, или TVS) может использоваться для подавления выбросов напряжения. Эти устройства применяются, чтобы отсечь высоковольтные переходные процессы и шунтировать большие токи для их отвода от высокочувствительной схемы. Основные параметры TVS-устройств:

- рабочее импульсное обратное напряжение — напряжение, ниже которого устройство практически не проводит ток;
- напряжение пробоя — напряжение, при котором проявляется некоторая проводимость;
- максимальное напряжение срабатывания — максимальное напряжение на устройстве, когда оно проводит максимально возможный для него ток.

При использовании TVS-устройства на входе или выходе системы следует учитывать ряд факторов. Электростатический разряд или импульсная помеха сгенерируют сигнал с очень быстрым переходным процессом (1–5 нс), что приведет к выбросу напряжения на входе системы прежде, чем TVS-устройство подавит его при напряжении пробоя. Выброс напряжения имеет другую форму сигнала с медленным временем нарастания (1,2 мкс) и большой длительностью самого импульса (50 мкс) — в таком случае напряжение будет сначала подавлено при напряжении пробоя, но оно может продолжать увеличиваться до максимального напряжения срабатывания TVS-устройства. Кроме того, максимальное напряжение срабатывания TVS-устройства должно быть выше, чем любое допустимое перенапряжение постоянного тока (которое может быть вызвано в результате неправильного подключения, потери питания или ошибок пользователя), чтобы защитить систему от перенапряжения. Все три ситуации способны привести к появлению потенциально опасного перенапряжения на входе.

Цепь защиты аналогового входа

Для того чтобы полностью обеспечить безопасность узла ввода/вывода системы, ее следует защитить от перенапряжений и высоковольтных переходных процессов. Для этого на входе системы используется высокооточный и надежный аналоговый ключ в сочетании с TVS-устройством, способный защитить чувствительные нисходящие цепи (например, аналого-цифровые преобразователи или входы/выходы усилителя), поскольку такой ключ можно применить для ограничения перенапряжений и подавления остаточных токов, которые не шунтируются на «землю» с помощью TVS-устройства.

На рис. 2 показана функциональная блок-схема стандартного аналогового ключа для защиты от перенапряжения. Следует заметить, что в своем составе ключ не содержит защищающих от электростатического разряда диодов, подключенных к линиям питания на его входном узле. Вместо этого он имеет ячейку защиты от электростатического разряда, которая срабатывает при превышении максимального обратного напряжения устройства, что позволяет устройству блокировать напряжение, превышающее его напряжение питания. Поскольку в работающей с аналоговыми сигналами системе, как правило, требуется, чтобы только внешние выводы ключа были защищены в соответствии со стандартом IEC, защищающие от электростатического разряда диоды устанавливаются на внутренних выводах (то есть на выходе ключа). Эти диоды хорошо справляются со своей задачей в качестве устройств вторичной защиты. В течение короткого промежутка времени, то есть высоковольтного переходного процесса с быстрым временем нарастания, как у электростатического разряда или импульсной помехи, напряжение переходного процесса ограничивается, поэтому высокое напряжение не достигнет нисходящих цепей. В течение длительного периода, то есть высоковольтного переходного процесса с большим временем нарастания, как при выбросе напряжения, выходное напряжение ключа ограничивается внутренними защитными диодами прежде, чем активируется

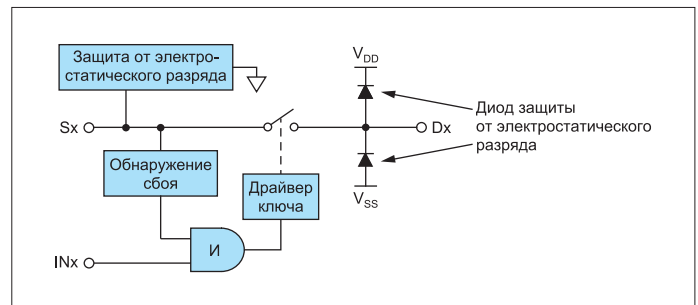


Рис. 2. Функциональная блок-схема аналогового ключа для защиты от перенапряжения

защита от перенапряжения ключа, и он будет разомкнут, чтобы полностью оградить нисходящую схему от повреждений.

На рис. 3 показаны области функционирования входов системы, которые взаимодействуют с внешним миром. Крайняя левая область (зеленого цвета) отображает нормальную работу входа, когда входное напряжение находится в границах диапазона напряжения питания. Вторая область слева (синего цвета) — это диапазон, где на вход воздействует постоянное или длительное переменное напряжение вследствие потери питания, неправильного подключения или короткого замыкания. Крайняя правая область (фиолетового цвета) представляет собой напряжение срабатывания внутренних защитных диодов ключа перенапряжения. Напряжение пробоя TVS-устройства (оранжевого цвета) должно быть меньше, чем максимальное обратное напряжение ключа, предназначенного для защиты от перенапряжения, а также больше, чем любое из возможных значений постоянного или длительно действующего переменного напряжения, чтобы избежать непреднамеренного срабатывания TVS-устройства.

Представленная на рис. 4 схема защиты в соответствии с IEC может выдержать электростатический разряд до 8 кВ (по методу контактного разряда), электростатический разряд до 16 кВ (по методу воздушного разряда), импульсные помехи до 4 кВ и выбросы напряжения до 4 кВ. ADG5412F (счетверенный однополюсный аналоговый ключ для защиты от перенапряжения ± 55 В компании Analog Devices) выдерживает перенапряжение, вызванное электростатическим разрядом, импульсными помехами и выбросами напряжения, в то время как защита от перенапряжения в сочетании с защитными диодами на выходе предохраняет и изолирует нисходящую цепь. В таблице 1 показаны уровни высоковольтных переходных процессов, которые может выдерживать ADG5412F с различными комбинациями TVS-устройств и резисторов. Основные технические характеристики ADG5412F и других компонентов от компании Analog Devices, предназначенных для защиты от перенапряжений ± 55 В, представлены в таблице 2.

Защитная цепь состоит из TVS-устройства и дополнительного низкоомного резистора. Резистор требуется для достижения более высоких уровней защиты от электростатического разряда и импульсных помех,

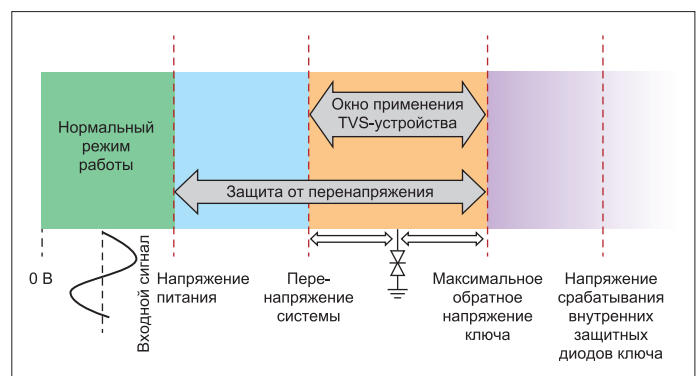


Рис. 3. Области функционирования системы

Таблица 1. Результаты испытаний на максимальные уровни высоковольтных переходных процессов

Средства защиты	Защита от электростатического разряда по методу контактного разряда в соответствии с IEC 61000-4-2	Защита от электростатического разряда по методам контактного разряда и воздушного разряда в соответствии с IEC 61000-4-2	Защита от импульсных помех в соответствии с IEC 61000-4-4	Защита от импульсных помех в соответствии с IEC 61000-4-4 и от выбросов напряжения согласно IEC 61000-4-5
TVS на 33 В и резистор 0 Ом	5 кВ		3 кВ	4 кВ
TVS на 33 В и резистор 10 Ом	8 кВ	16 кВ	4 кВ	4 кВ
TVS на 45 В и резистор 0 Ом	4 кВ		2 кВ	4 кВ
TVS на 45 В и резистор 15 Ом	8 кВ	16 кВ	4 кВ	4 кВ
TVS на 54 В и резистор 30 Ом	8 кВ	16 кВ	4 кВ	4 кВ

Примечание. Не проводились испытания по методу воздушного разряда с резистором 0 Ом при TVS на 33 В и TVS на 45 В.

поскольку он предотвращает активацию предназначенной для защиты от электростатического разряда внутренней ячейки аналогового ключа до того, как TVS-устройство ограничит напряжение на входе. На рис. 4 также показаны различные пути прохождения тока во время действия высоковольтного переходного процесса. Большая часть тока шунтируется на «землю» через TVS-устройство (путь I1). Путь I2 обозначает ток, рассеиваемый через внутренние защитные диоды на выходе ADG5412F, при этом выходное напряжение ограничивается на уровне 0,7 В выше напряжения питания. Наконец, путь I3 представляет собой остаточный ток, который должны выдерживать компоненты нисходящей цепи. Для получения более подробной информации об этой

схеме защиты следует изучить руководство по применению AN-1436 от Analog Devices.

Защита от электростатического разряда в соответствии со стандартом IEC

На рис. 6, 7 показаны результаты измерения, полученные при выполненных на основе схемы рис. 5 испытаниях по методу контактного разряда с электростатическим разрядом 8 кВ и методу воздушного разряда с электростатическим разрядом 16 кВ. Как уже было сказано, на выходе источника присутствует начальное перенапряжение до того, как TVS-устройство ограничит напряжение на уровне примерно 54 В. Напряжение на выходе ключа во время

присутствия этого перенапряжения ограничивается на уровне 0,7 В выше напряжения питания. Измерение тока на данном выходе показывает, что ток течет в диоды устройства нисходящей цепи. Пиковый ток импульса равен примерно 680 мА, а продолжительность действия тока составляет приблизительно 60 нс. Для сравнения: электростатический разряд напряжением 1 кВ в соответствии с моделью человеческого тела имеет пиковый ток 660 мА, а продолжительность его воздействия равна 500 нс. Поэтому разумно сделать вывод о том, что компонент нисходящей цепи, защита которого соответствует модели человеческого тела, благодаря использованию этой схемы защиты должен выдерживать контактный разряд 8 кВ и разряд через воздушный зазор 16 кВ.

Защита от электрических быстрых переходных процессов

На рис. 8 изображены результаты измерения, полученные при воздействии одного импульса напряжением 4 кВ. Так же как и в случае с электростатическим разрядом, на выводе источника будет присутствовать начальное перенапряжение до того, как TVS-устройство ограничит напряжение на уровне примерно 54 В. Напряжение на выходе ключа во время присутствия этого перенапряжения тоже будет ограничено на уровне 0,7 В выше напряжения питания. Пиковый ток импульса, протекающий в устройство нисходящей цепи, в данном

Таблица 2. Продукция Analog Devices для защиты от перенапряжений ± 55 В

Компонент	Конфигурация	Уровень разряда в соответствии с моделью человеческого тела, кВ	Характеристики						Номинальное напряжение, $V_{НОМ}$				Корпус		
			Сопротивление во включенном состоянии (тип.), Ом	Неравномерность сопротивления во включенном состоянии, Ом	Ток утечки во включенном состоянии (тип.), нА	Инжекция заряда, пК	Полоса пропускания, МГц	Однополярное		Двухполярное		TSSOP	LFCSP		
								12	36	± 15	± 20				
ADG5412F/ADG5413F	4x, один полюс, одно направление	5,5	10	0,6	0,3	680	270							EP	
ADG5412BF/ADG5413BF	4x, один полюс, одно направление	3	10	0,6	0,3	680	270								
ADG5436F	2x, один полюс, два направления	6	10	0,6	0,3	654	108								
ADG5243F	3x, один полюс, два направления	3,5	270	7	0,3	0,8	350								
ADG5404F	4:1/мультиплекс.	5	10	0,6	0,3	680	108								
ADG5208F/ADG5209F	8:1/диффер. 4:1/мультиплекс.	3,5	250	6,5	0,3	0,4	190/290								
ADG5248F/ADG5249F	8:1/диффер. 4:1/мультиплекс.	3,5	250	6,5	0,3	0,8	190/320								
ADG5462F	4x, защита каналов	4	10	0,6	0,3	—	318								

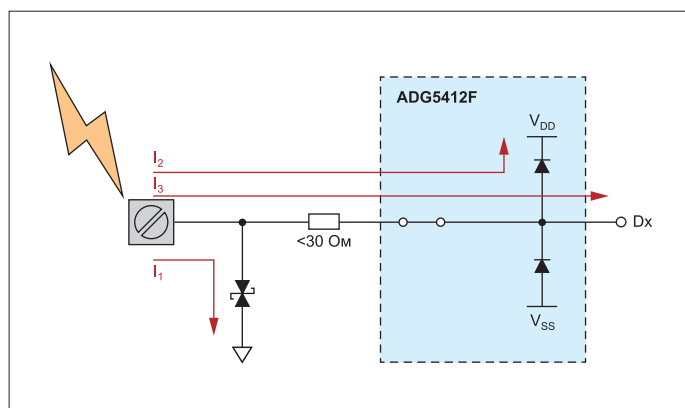


Рис. 4. Схема защиты

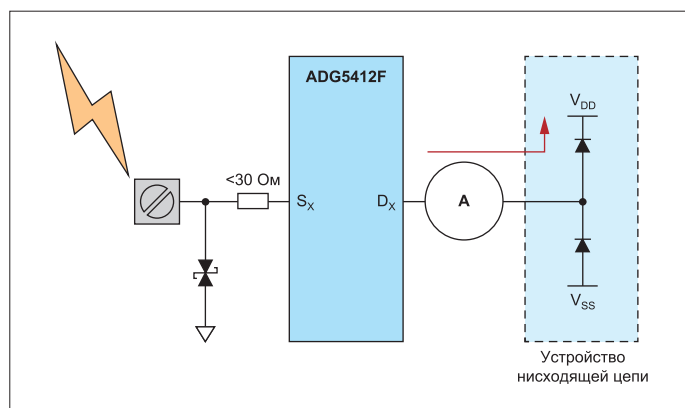


Рис. 5. Испытательная схема

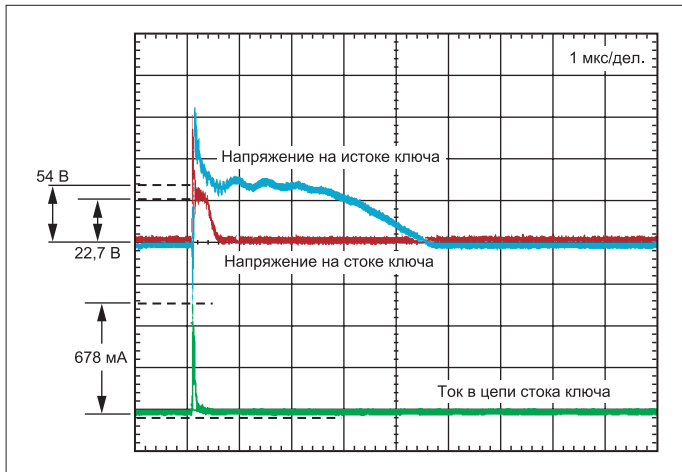


Рис. 6. Напряжение и ток на выходе ключа при воздействии разряда 8 кВ

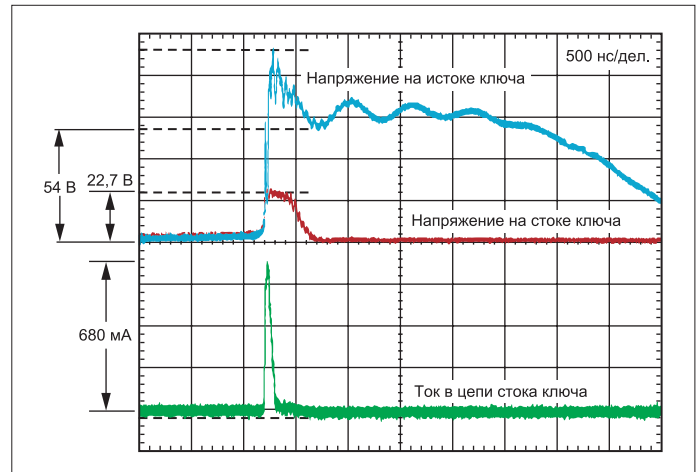


Рис. 7. Напряжение и ток на выходе ключа при воздействии разряда через воздушный зазор 16 кВ

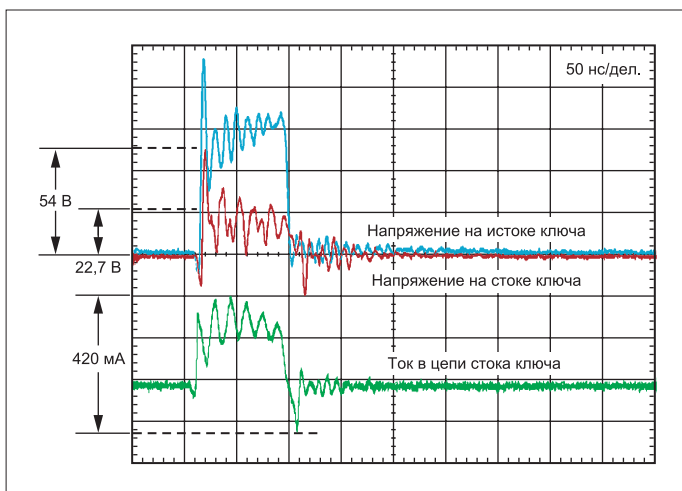


Рис. 8. Ток одного импульса помехи

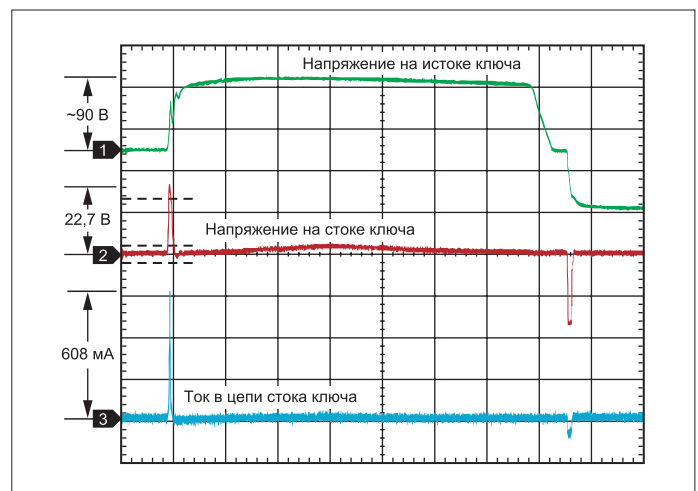


Рис. 9. Работа цепи защиты от перенапряжений во время выброса напряжения

случае равен всего 420 мА, а продолжительность действия этого тока составляет приблизительно 90 нс. Снова сравнивая эти показания с электростатическим разрядом по модели человеческого тела, можно сказать, что разряд 750 В в соответствии с такой моделью имеет пиковый ток 500 мА, а его продолжительность составляет 500 нс. Таким образом, на вывод устройства нисходящей цепи передается энергия в течение действия импульсной помехи 4 кВ, что менее опасно, чем воздействие электростатического разряда 750 В в соответствии с моделью человеческого тела.

Защита от выбросов напряжения

На рис. 9 можно увидеть результаты измерения, полученные при воздействии выброса напряжения 4 кВ на вход защитной цепи. Как уже упоминалось, напряжение на источнике может превысить напряжение пробоя TVS-устройства до максимального напряжения срабатывания. Ключ защиты от перенапряжения имеет время реакции примерно 500 нс, и напряжение на выходе ключа будет ограничено

на уровне 0,7 В выше напряжения питания в течение этого 500-нс промежутка. Пиковый ток, протекающий в устройство нисходящей цепи, равен лишь 608 мА в течение данного периода. Затем примерно 500 нс ключ, как видно на графике, размыкается и изолирует нисходящую цепь, тем самым защищая ее от повреждений. Опять же, это менее опасно, чем воздействие электростатического разряда 750 В в соответствии с моделью человеческого тела.

Заключение

В статье рассказано о том, как защитить аналоговые входы и выходы интегральной схемы от высоковольтных переходных процессов в соответствии с описаниями, приведенными в стандартах IEC 61000-4-2, IEC 61000-4-4 и IEC 61000-4-5.

Данная публикация предоставляет разработчикам систем полезную информацию, необходимую для проектирования защитных схем для системных входов и выходов при одновременном достижении следующих преимуществ:

- Простота защитной схемы.
- Более быстрое время выхода продукта на рынок.
- Более высокая эффективность схемы защиты благодаря сокращению количества дискретных компонентов.
- Уменьшение значения сопротивления последовательно включенных в тракте прохождения сигнала резисторов.
- Простота выбора TVS-устройств благодаря смягчению требований для таких устройств.
- Защита на уровне системы для следующих стандартов:
 - IEC 61000-4-2: 16 кВ в соответствии с методом воздушного разряда;
 - IEC 61000-4-2: 8 кВ в соответствии с методом контактного разряда;
 - IEC 61000-4-4: 4 кВ;
 - IEC 61000-4-5: 4 кВ.
- Защита от перенапряжения ± 55 В как по переменному, так и по постоянному току.
- Защита при потере питания ± 55 В.