

Решение проблем, связанных с электрической перегрузкой усилителя

Томас КЮЛЬ (Thomas KUENL)
Бонни БЕЙКЕР (Bonnie BAKER)

У всех, кто использует операционные усилители, возникает общий вопрос: «Может ли напряжение на входах усилителя превышать напряжение питающей шины?». Такая ситуация возникает при наличии в системе нескольких источников питания. Если эти источники включаются в разное время, то напряжение на одном или нескольких выводах входящего в систему устройства может быть превышено. При этом устройство подвергается воздействию электрической перегрузки. Условия перегрузки возникают и в том случае, когда внешний сигнал или сигнал от отдельной части системы, подключенной к другому источнику питания, подается на вход или выход операционного усилителя.

Изложенная в этой статье информация поможет тем, кто хочет спроектировать надежную и несложную схему, отказы которой в процессе эксплуатации можно легко и быстро обнаружить. Авторы рассматривают проблему с двух сторон. Когда речь идет о том, что усилитель подвергается воздействию электрической перегрузки, это часто ассоциируют с возникновением электростатического разряда (ЭСР). В таком случае выводы усилителя подвергаются воздействию кратковременного высоковольтного разряда. Другая, часто упускаемая из виду ситуация — это состояние электроперегрузки. В этом случае усилитель подвергается меньшей перегрузке по напряжению и току по сравнению с электростатическим разрядом, но это воздействие более продолжительное. Узнав о возможных условиях электрической перегрузки усилителя, можно составить план противодействия. Этот план позволит разработать надежную в эксплуатации систему на интегральных схемах, в которой будет исключено повреждение от электрической перегрузки.

Повреждение от электростатического разряда

Одна из очевидных причин электрической перегрузки — электростатический разряд (ЭСР). Если два тела, имеющие разность электростатических потенциалов в сотни или тысячи вольт, находятся в непосредственной близости друг от друга, появляется возможность электрического разряда. При создании проводящего пути между этими двумя телами происходит перенос ЭСР до тех пор, пока заряды не будут нейтрализованы.

Возникновение электростатического разряда вероятно в том случае, когда микросхема находится в окружении, не входящем в состав ее электрической цепи. Обычно повреждение от ЭСР происходит в результате неправильного обращения с интегральными схемами. Электростатический разряд происходит за долю секунды, как правило, менее 250 нс. Через микросхему может протекать ток порядка нескольких ампер, если проводящий путь имеет низкое сопротивление.

Несколько десятилетий назад полупроводниковые схемы часто подвергались разрушению из-за электростатического разряда. В результате происходил полный отказ схемы или возникал риск еще более опасного последствия — незаметного ухудшения параметров. Но после изучения характеристик ЭСР производители полупроводниковых приборов начали встраивать в конструкцию новых интегральных схем защитные электрические цепи. Такие цепи существенно снижают вероятность повреждения интегральных схем электростатическим разрядом.

Основная функция встроенной электрической цепи для защиты от ЭСР заключается в предотвращении повреждения электростатическим разрядом во время подготовки к монтажу и монтажа печатной платы. В ходе этих операций контуры заземления с низким полным сопротивлением могут служить путями разряда для зарядов, накопленных интегральными схемами или окружающими поверхностями.

Сценарий меняется после установки интегральной схемы на печатную плату. После монтажа между интегральной схемой и другими компонентами на плате возникает электрическое соединение. При этом значитель-

но уменьшается вероятность существования канала с низким полным сопротивлением, пригодным для электростатического разряда. Возможно, что после такого монтажа никогда не возникнет ситуации, при которой воздействию ЭСР подвергаются внутренние цепи интегральной схемы. И это действительно большое достижение!

Однако существует и другая ситуация. Характеристики схемы и условия, в которых она должна работать, могут приводить к воздействию электрической перегрузки на интегральную схему, при которой канал электростатического разряда неожиданно активизируется. Период времени для электрической перегрузки может быть намного более продолжительный, чем время возникновения ЭСР. Электропроводность во время электрической перегрузки может быть довольно высокой и сохраняться достаточно долго для того, чтобы температура внутри микросхемы поднялась до критического уровня. В этой экстремальной ситуации повреждение интегральной микросхемы будет быстрым и необратимым, что приведет к повреждению всей схемы.

Фантомная электрическая перегрузка

Зачастую мы неосознанно надеемся, что внутренняя цепь для защиты от электростатического разряда защитит и от электрической перегрузки — даже в том случае, если эта цепь не предназначена для подобной цели. Может случиться так, что интегральная схема, полностью рабочая до подачи питания (рис. 1), внезапно приходит в негодность после включения питания и подачи входных сигналов. Электрическая перегрузка может



Рис. 1. Полностью функциональная интегральная схема до установки



Рис. 2. Поврежденная интегральная схема после электрической перегрузки

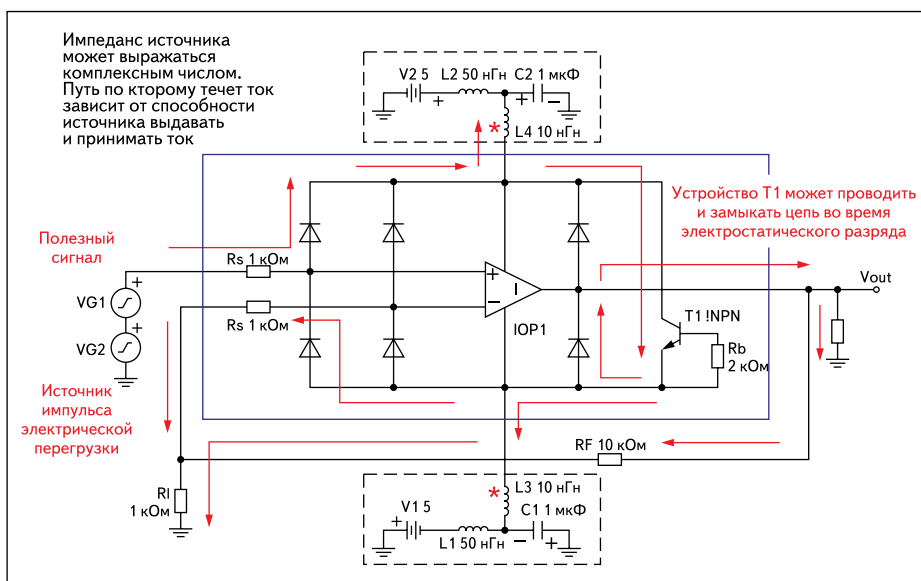


Рис. 3. В состоянии электрической перегрузки активизируется несколько проводящих путей

быть столь сильной, что интегральная схема нагревается до высокой температуры, при этом оплавляются кристалл микросхемы и материал корпуса. Пример таких разрушительных последствий показан на рис. 2.

Усилители на интегральных схемах обычно не имеют защиты от электрической перегрузки. В лучшем случае при возникновении электрической перегрузки могут активизироваться внутренние цепи, обеспечивая достаточную защиту от электростатического разряда. Однако проектирование цепей для защиты от электрического разряда не гарантирует, что этого окажется достаточно для защиты и от электрической перегрузки.

Проводящий путь, образующийся в состоянии электрической перегрузки, может иметь сложную и подчас непредсказуемую форму, тем более что при высоких частотах полное паразитное сопротивление становится существенным. На рис. 3 приведен пример некоторых возможных проводящих путей внутри усилителя. Диоды в цепи защиты от электростатического разряда, разомкнутые в нормальном состоянии, обеспечивают прямой проводящий путь к источникам питания и устройству T1.

Если источники питания усилителя не могут отводить токи, связанные с состоянием электрической перегрузки, то существует риск возрастания напряжения на выводах питания интегральной схемы до небезопасного уровня. T1 — устройство поглощения ЭСР. Функция T1 при электростатическом разряде состоит в том, чтобы включиться и привести напряжение на выводах питания к безопасному уровню. Помните, что чаще всего электростатический разряд возникает, когда интегральная схема находится вне электрической цепи. Однако во время электрической перегрузки внутри цепи может произойти незапланированное включение устройства T1. При этом T1 устанавливает соединение с низким сопротивлением между питающими выводами операционного усилителя. После чего появляются сильные разрушительные токи, которые приводят к расплавлению устройства T1, создавая короткое замыкание между питающими выводами усилителя. В результате весьма вероятен вышеупомянутый перегрев и повреждение. Разогрев может быть столь сильным, что корпус плавится и растрескивается, как было показано на рис. 2.

При проектировании следует руководствоваться тем, что любой из проводящих путей должен выдерживать токи и напряжения, присутствующие во время состояния электрической перегрузки. Если подобные условия не соблюдаются, а интегральная схема не в состоянии рассеивать выделяемое тепло, возможно повреждение схемы. Изучение сведений по внутренним цепям для защиты от электростатического разряда и прогнозирование их поведения в случае электрической перегрузки — это эффективный способ предотвращения опасных ситуаций. Большинство производителей операционных усилителей могут предоставить информацию по цепям для защиты от ЭСР.

Примеры электрической перегрузки

На рис. 4, который был создан с помощью программного инструмента TINA и макро-модели устройства OPA364, показана простая схема повторителя с применением операционного усилителя OPA364 на КМОП-компонентах. Низкочастотный сигнал (VG1) представляет собой сигнал от выхода датчика. Датчик находится на некотором расстоянии от усилителя, с которым его соединяет кабель (TL1). В этой схеме окружающие компоненты индуцируют переходные процессы в кабеле.

VG2 — это непредусмотренный сигнал, связанный с переходными процессами, в сочетании с сигналом от выхода датчика (VG1). Суммарная амплитуда сигнала превышает максимальный допустимый входной диапазон усилителя. Достаточно сильный сигнал, обусловленный переходными процессами, включает цепь для защиты от электростатического разряда на входе операционного усилителя.

Резистор, установленный перед неиспользуемым входом этого усилителя, ограничивает амплитуду результирующего входного тока. Ячейки для защиты от электростатического разряда (ячейки ЭСР) рассчитаны таким образом, чтобы безопасно проводить ток в несколько ампер за очень короткий промежуток времени — не более десятков или сотен наносекунд. При активации этих ячеек во время электрической перегрузки продолжительность электропроводного состояния определяется импульсом электрической перегрузки или характеристиками избыточного напряжения. Эти же ячейки ЭСР обычно выдерживают ток от 5 до 10 мА в течение продолжительного времени или существенно больше по мере спада максимальной нагрузки. При таких обстоятельствах эти компоненты полностью надежны и не зависят от воздействия избыточного напряжения.

Существуют приложения, в которых входной сигнал присутствует до подачи напряжения питания на усилитель (рис. 5). Это изображение было создано с использованием программного инструмента TINA и макро-модели устройства OPA374. Такой сце-

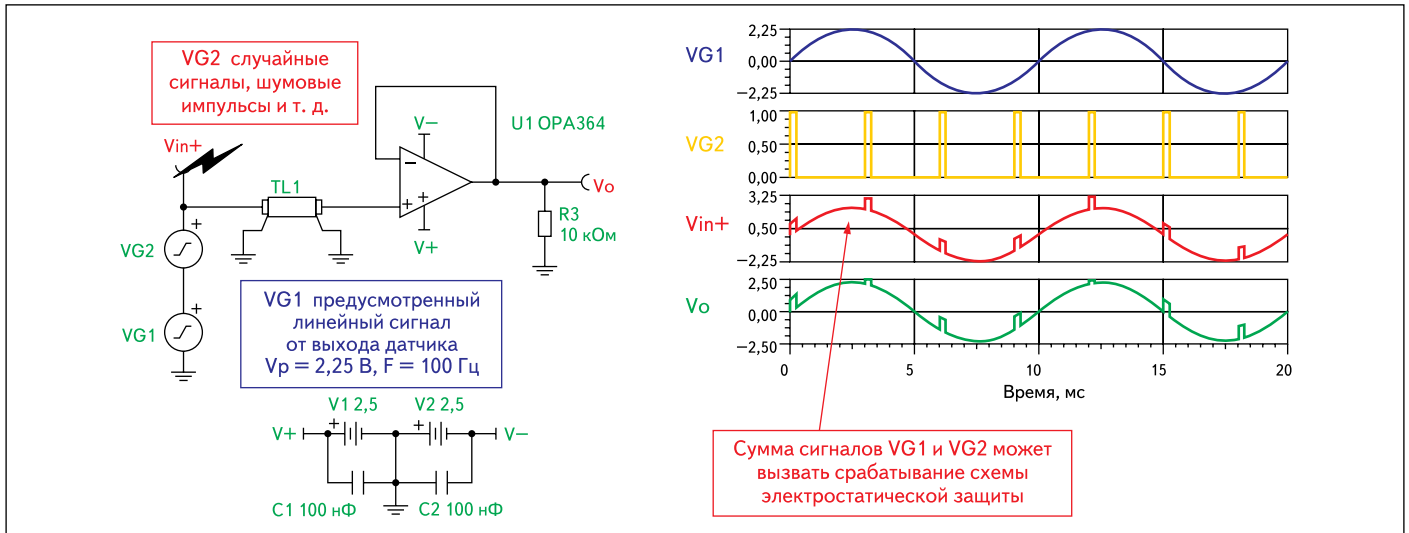


Рис. 4. Перегрузка входа может привести к активизации цепей защиты от ЭСП

нарий включения питания может привести к повреждению входной цепи для защиты от электростатического разряда, если ток не ограничен до безопасной величины.

На рис. 5 питающее напряжение (VG2) линейно увеличивается от 0 до 5 В за 50 мс. Это происходит во время подачи входного сигнала (VG1) с напряжением 3,5 В через 5 мс после начала линейного роста напряжения питания. В этом случае напряжение на входах изначально превышает напряжение на положительной шине. В результате открывается диод в цепи защиты от электростатического разряда на инвертирующем входе. Ток течет от инвертирующего входа (AM1), пока разность напряжений между источником питания и входом не станет меньше ~0,6 В. Если источник входного сигнала имеет низкое

полное сопротивление и способен обеспечить большой ток, то необходимо как минимум ограничить этот ток в цепи. При таких условиях потенциально опасный ток может протекать через диод в цепи защиты от электростатического разряда. Последовательное подключение резистора на входе защищает входной контур от подобных повреждений.

Во время нарастания выходного сигнала усилителя входной сигнал (VG1) очень быстро достигает величины 3,5 В. А выходной сигнал (VM1) достигает пиковой величины входного импульса по мере нарастания выходного сигнала усилителя. Эта схема создает очень большую разность напряжений между входом и выходом во время нарастания выходного сигнала усилителя. Первоначально разность напряжений между входным и выходным выводами состав-

ляет 10 В. Внутренняя схема операционного усилителя и элементы обратной связи должны поддерживать ток, текущий на вход усилителя (AM1) во время этого периода.

Другая потенциально опасная ситуация возникает, когда вход усилителя подвергается воздействию сильного сигнала с быстро изменяющимся фронтом импульса (рис. 6). Этот рисунок был создан с помощью программного инструмента TINA и макро модели устройства OPA277. В этом случае сигнал VG1 подается на вход в виде прямоугольного импульса с пиковым напряжением 10 В. Усилитель отвечает на этот импульс быстрым линейным нарастанием выходного напряжения. Ограниченная скорость нарастания выходного сигнала усилителя (в данном примере скорость нарастания выходного напряжения

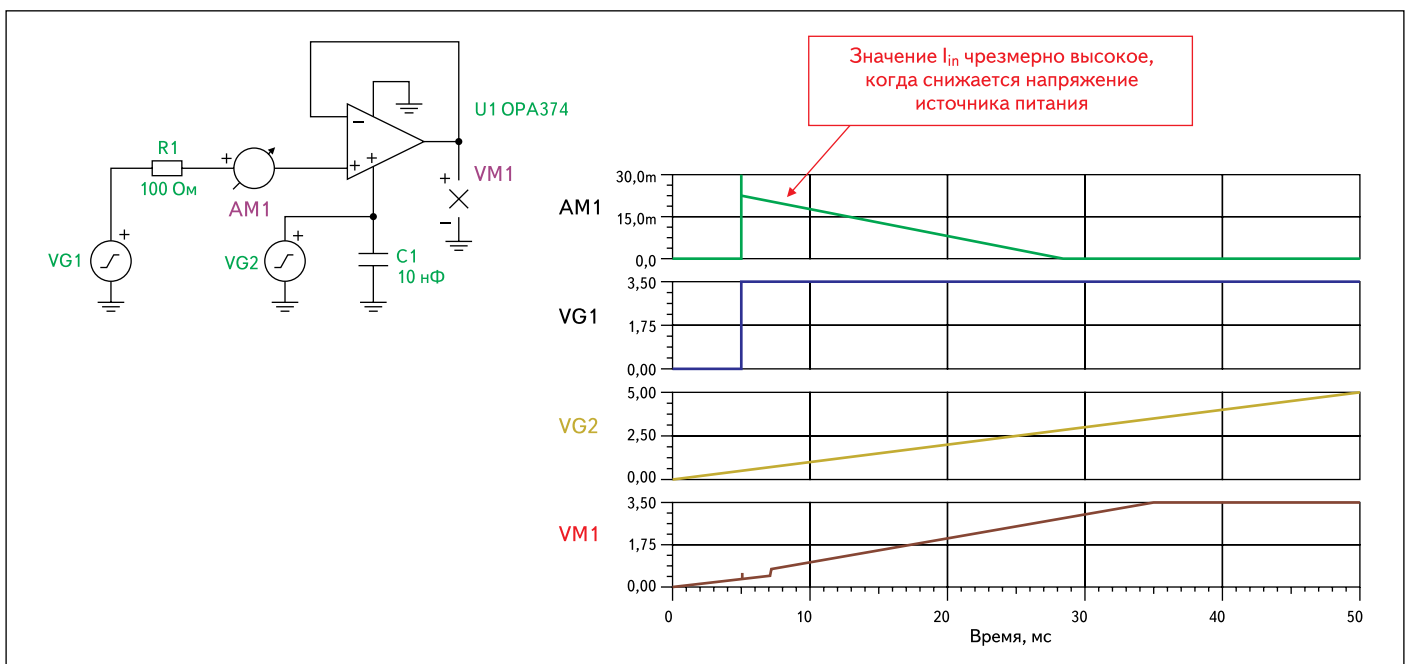


Рис. 5. Контроль входного напряжения V_{in} во время включения питания

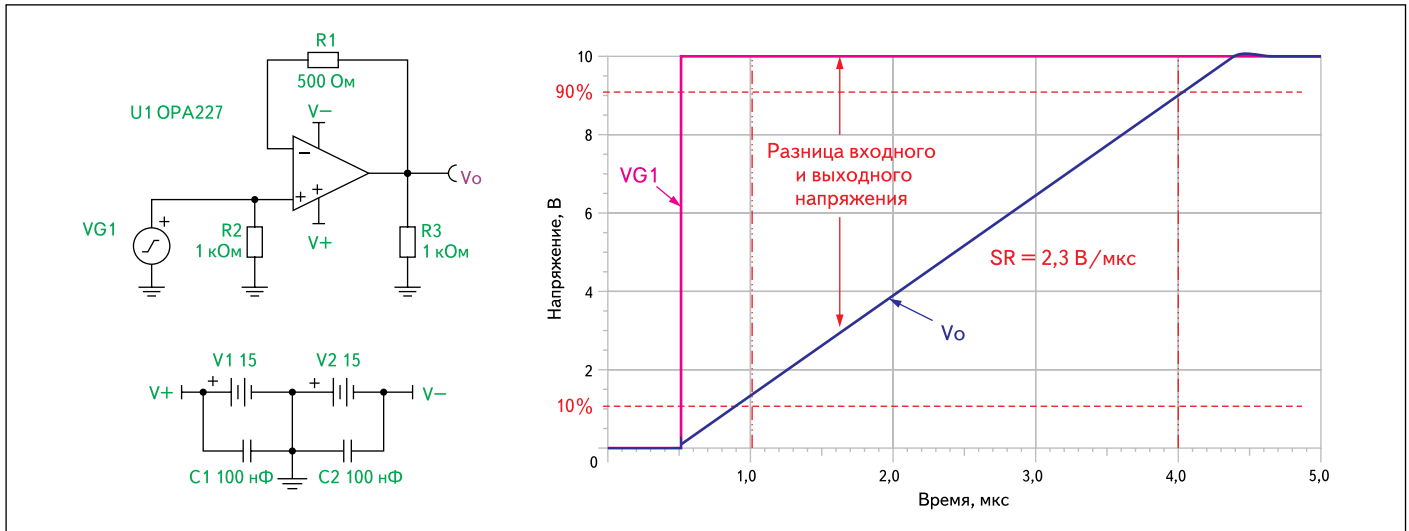


Рис. 6. Напряженность между входами во время нарастания входного сигнала

для OPA227 составляет 2 В/мкс) определяет характеристики выходного напряжения.

При нарастании входного сигнала (рис. 6) возникает большая разность напряжений между входом и выходом в течение времени, необходимого для достижения на выходе пиковой величины входного импульса. Первоначально разность напряжений между входом и выходом усилителя составляет 10 В. Эта разность уменьшается по мере нарастания выходного сигнала усилителя до конечного уровня. Поскольку инвертирующий вход первоначально имеет тот же потенциал, что и выход, между двумя входами существует разность напряжений (10 В). Если операционный усилитель не обеспечивает фиксацию уровня напряжения между входами, то к полупроводниковым переходам входного транзистора может быть приложено напряжение, способное вызвать повреждение. Эта более чем серьезная проблема связана с операционными усилителями, имеющими биполярный вход. Современные операционные усилители с биполярным входом почти всегда имеют защитную схему фиксации.

Некоторые операционные усилители демонстрируют инверсную характеристику на выходе, которая сопровождается перегрузкой на входе (рис. 7). Этот эффект часто называют инверсией фазы на выходе. Современные операционные усилители не должны работать подобным образом, но, как ни удивительно, некоторые из них все же имеют такую особенность. Подобный эффект возникает лишь в том случае, когда уровень приложенного входного напряжения превышает диапазон синфазного напряжения (СФН), установленный для данного изделия. Когда операционный усилитель демонстрирует инверсию фазы на выходе, необходимо принять меры для предотвращения перегрузки входа.

На рис. 7 показано, что вход усилителя (VG1) приведен к потенциалу приблизительно на 0,5 В ниже, чем у отрицательной питающей шины. Уровень выходного сигнала мгновенно инвертируется при переходе от отрицательной к положительной шине. Показатели продолжительности инверсии на выходе ухудшаются по мере дальнейшей перегрузки

на входе. Тем не менее даже при отсутствии разрушительного воздействия на усилитель такого состояния лучше избегать, поскольку оно может иметь негативные последствия для нагрузки электромеханического типа (например, электромотор, привод и т.п.).

Проблему с перегрузкой можно устранить, разместив предназначенный для слабых сигналов диод Шоттки, подключенный с обратным смещением, между неинвертирующим входом и отрицательной питающей шиной. Необходимо также последовательно подключить входной резистор, чтобы ограничить ток через диод.

На выходе импульсного источника питания может выделяться энергия высокочастотных переходных процессов. Даже при наличии в этих источниках питания фильтров, «выбросы» выходного напряжения могут создавать мгновенное избыточное напряжение на питающих выводах усилителя. Если питающее напряжение превысит предельное напряжение электрического пробоя усилителя, то может включиться устройство погло-

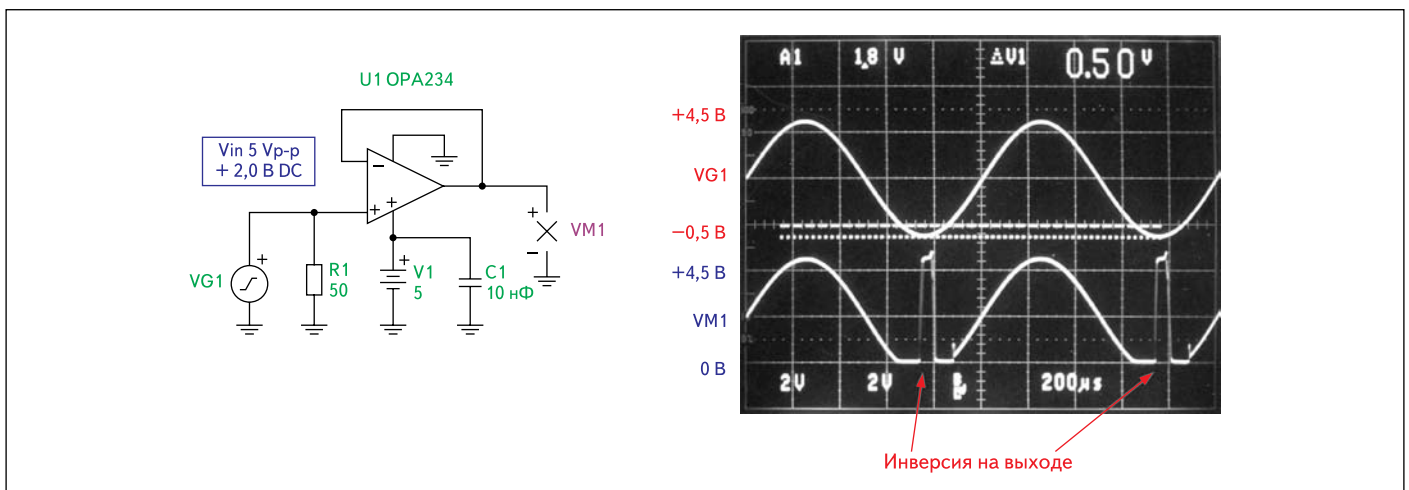


Рис. 7. Инверсия на выходе при перегрузке на входе

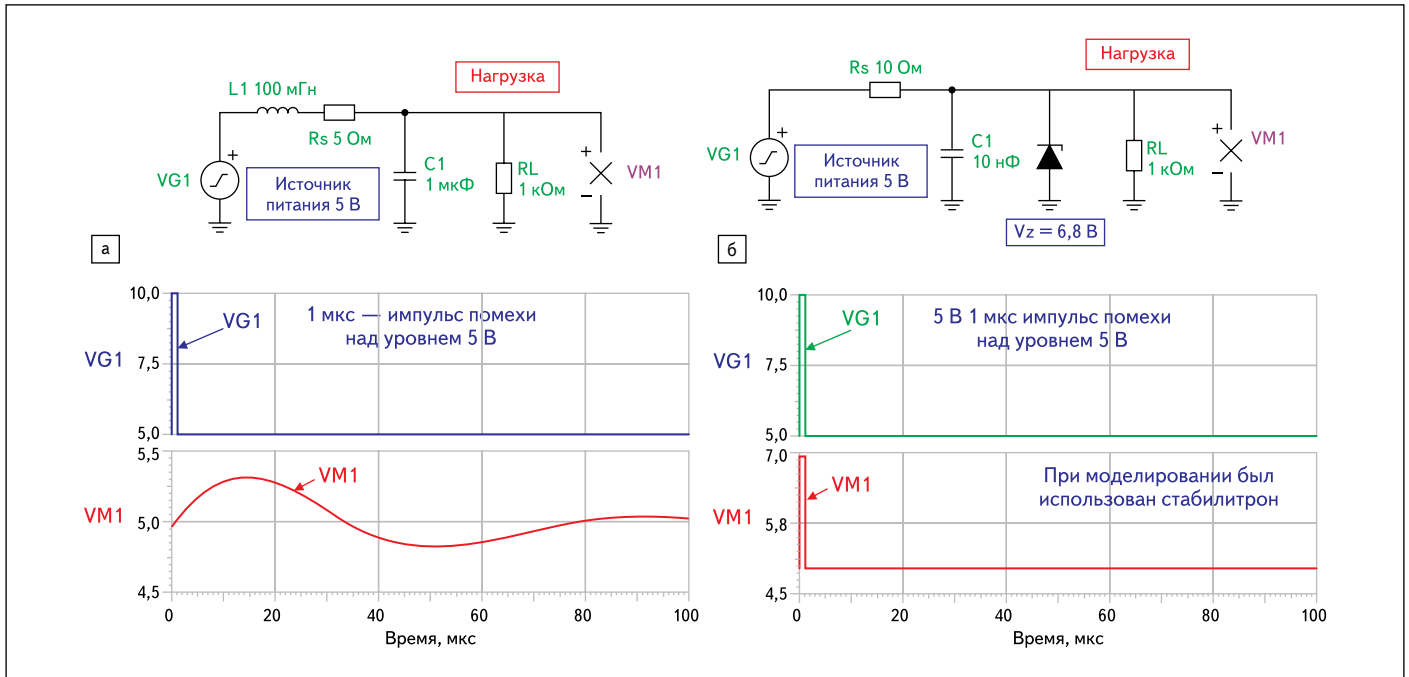


Рис. 8. Защита от превышения напряжения на питающем выводе

щения электростатического разряда, создающее проводящий путь между питающими выводами.

Устройство можно защитить от переходных процессов источника питания с помощью RC-контура или RLC-контура (рис. 8). Для этого можно разместить на плате обычный фильтр электромагнитных/радиочастотных помех. Тем не менее реакция схемы в значительной степени определяется постоянными параметрами RLC-контура и характеристиками нагрузки.

Простой RLC-контур подключен к нагрузочному сопротивлению (рис. 8а). На питающее напряжение 5 В накладывается нестационарное напряжение 5 В (в течение 1 мкс), связанное с переходными процессами и эквивалентное выбросу 10 В. Эта величина превышает наибольшее питающее напряжение для некоторых низковольтных КМОП-процессов. Нагрузка с сопротивлением 1 кОм имитирует усилитель, который потребляет питающий ток (приблизительно 5 мА). Как видно по реакции схемы, RLC-контур интегрирует выброс в синусоидальный отклик вблизи уровня 5 В постоянного тока. Небольшое избыточное напряжение не представляет проблемы для этого устройства. Однако во многих случаях неизвестные факторы, связанные с комбинацией элементов RLC-контура, будут приводить к отрицательным выбросам питающего напряжения. Это повлияет на смещение выходного сигнала операционного усилителя. Увеличение коэффициента подавления шумов источника питания (PSRR) для операционного усилителя помогает свести к минимуму смещение выходного сигнала, но при этом возникает заметная погрешность. Лучше всего не пола-

гаться на защиту такого типа, если неизвестно количество переменных параметров.

Более удачный и предсказуемый способ подавления помех, обусловленных переходными процессами, состоит в применении подавителя напряжений переходных процессов (TVS) на питающей линии (рис. 8б). Устройство TVS аналогично зенеровскому диоду, но оно специально спроектировано для очень сильных переходных токов и высокой пиковой мощности. Разработана серия устройств TVR Littlefuse 1.5KE с напряжением обратного непроводящего состояния от 6,8 до 550 В, при односторонней и двусторонней поляризации. Допустимая пиковая мощность составляет 1500 Вт для десяти 100-мкс импульсов. Это быстродействующие устройства с наносекундным временем отклика. Очевидное преимущество заключается в быстрой фиксации напряжения при небольших отрицательных выбросах питающего напряжения.

На рис. 9 приведена законченная схема защиты от электрической перегрузки с использованием внешних защитных устройств. Если для каждого вывода операционного усилителя известно, какие внутренние ячейки ЭСР на нем используются, то некоторые из этих внешних устройств можно исключить, потому что внутренние устройства способны в достаточной мере защитить соответствующие выводы операционного усилителя.

Диоды Шоттки SDIx обеспечивают фиксацию уровня напряжения в случае избыточного входного напряжения. Резистор R1 ограничивает ток через эти диоды до заданного уровня, зависящего от применяемого диода. Диоды Шоттки SDOx обеспечивают защиту с фиксацией уровня напряжения

в случае избыточных выходных напряжений. Если используется такая защита выхода в схеме питания операционного усилителя, следует применить мощные диоды Шоттки. Ток через эти диоды должен быть ограничен до заданного уровня в зависимости от применяемых диодов. После перенаправления переходных токов через входные или выходные диоды энергию необходимо отвести на «землю», иначе питающие цепи операционного усилителя могут перейти в состояние с избыточным напряжением. Если это произошло, усилитель может заклинить и получить необратимое повреждение. Если источник питания не в состоянии отводить ток или его полное сопротивление не является низким при частоте направляемого через диоды тока, то на каждой питающей цепи необходимо установить зенеровские диоды или подавители выбросов напряжения постоянного тока (TVS), чтобы заземлить ток. Большинство источников питания выдают или отводят ток только в одном направлении. Зенеровские диоды или однонаправленные полупроводниковые подавители напряжений переходных процессов обеспечивают простой и экономичный способ поддерживать безопасные уровни напряжения на выводах устройства.

Заключение

Электрическая перегрузка может активизировать цепь для защиты от электростатического разряда внутри операционного усилителя. Может показаться, что цепь для защиты от электростатического разряда годится также для контроля электрической перегрузки.

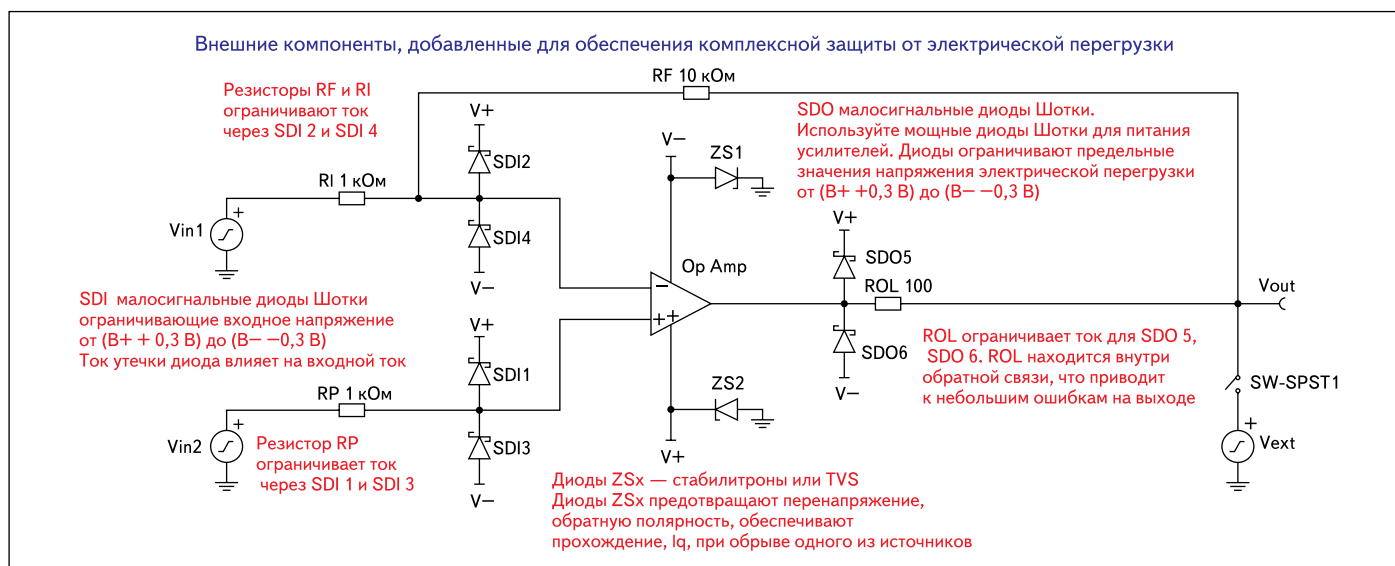


Рис. 9. Полная внешняя защита от электрической перегрузки

Однако электростатические разряды очень кратковременны и обычно продолжаются не более нескольких сотен наносекунд, а состояние электрической перегрузки может быть гораздо более продолжительным. Когда цепь для защиты от ЭСР активизируется в результате электрической перегрузки, по этой цепи могут протекать токи, приводящие к чрезмерному нагреву и возможному повреждению. При условиях, в которых система подвергается электрической перегрузке, защищайте электрические схемы с помощью простых внешних цепей защиты. Затратив незначительные усилия в самом начале, вы избежите от серьезных трудностей в будущем. ■

Литература

1. Информация по OPA227:
<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/opa227.html>
2. Информация по OPA364:
<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/opa364.html>
3. Информация по OPA374:
<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/opa374.html>
4. Программа для моделирования аналоговых устройств на базе SPICE (TINA-TI):
<http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/tina-ti.html>