Оптроны для управления затвором карбид-кремниевых MOSFET

В статье рассмотрены особенности оптронов для управления затвором транзисторов компании Avago Technologies, используемых для надежного управления и защиты карбид–кремниевых MOSFET, которые находят все более широкое применение на рынке силовых полупроводников.

Робинсон Лоу (Robinson Law)

Чжунь Кеонг Ти (Chun Keong Tee)

Перевод: Андрей Лебедев

andrey.lebedev@macrogroup.ru

Введение

Рынок силовых полупроводников на основе карбида кремния (SiC), которые обеспечивают ряд преимуществ по сравнению с кремниевыми силовыми приборами, быстро развивается. Карбид-кремниевые MOSFET (SiC MOSFET) способны повысить общую эффективность системы более чем на 10%, а меньшие потери на переключение снижают габариты и стоимость системы. Более высокие технические характеристики в сочетании с меньшей стоимостью ускорили внедрение силовых полупроводников на базе SiC в таких приложениях, как управление электроприводами в промышленности, системы индукционного нагрева, промышленные источники питания и возобновляемые источники энергии.

Оптроны для управления затвором от компании Avago Technologies широко используются при регулировке кремниевых полупроводников, таких как IGBT и силовые MOSFET. Оптроны применяются для надежной гальванической развязки схем управления от высоких напряжений и силовых полупроводников. Способность этих устройств подавлять синфазный шум снижает вероятность ложных срабатываний силовых полупроводников при высокочастотной коммутации.

Преимущества карбид–кремниевых MOSFET

Карбид кремния — это полупроводниковое соединение с широкой запрещенной зоной (3,2 эВ), в состав которого входит кремний и углерод. Карбид кремния, обладающий свойствами широкозонного полупроводника, помимо способности работать при высоком напряжении, частоте и температуре, демонстрирует на порядок меньшие значения сопротивления во включенном состоянии и заряда затвора, чем кремний. Компания Cree провела сравнение 1200 В/20 А SiC MOSFET второго поколения с кремниевым высокоскоростным 1200 В/20 А H3 IGBT с использованием повышающего DC/DC-преобразователя с жестким переключением мощностью 10 кВт, работающего в режиме чередования. Результаты анализа показали, что даже при пятикратном увеличении частоты коммутации решение на базе SiC способно обеспечить эффективность на уровне 99,3% на частоте 100 кГц и снижение потерь на 18% по сравнению с наиболее эффективным решением на базе IGBT на частоте 20 кГц.

Новое семейство MOSFET C2M от компании Cree представляет карбид-кремниевые MOSFET, предназначенные для широкого спектра приложений, обладающие конкурентной ценой и рассчитанные на напряжение пробоя 1200 и 1700 В. Компании Cree удалось значительно снизить цены, в то же время улучшив характеристики переключения и уменьшив сопротивление $R_{ds(on)}$. Повышение частоты коммутации способствует значительному сокращению размеров дросселя. Более низкие потери на проводимость и переключение позволяют инженерам сократить габариты радиатора или потенциально отказаться от вентиляторов и перейти на пассивное охлаждение. Более компактный дроссель и радиатор значительно уменьшает цену решения. Хотя полупроводник на базе SiC дороже кремниевого полупроводника, общая стоимость комплектующих и материалов может быть снижена по сравнению с кремниевым решением на 20%.

Внедрение SiC MOSFET на рынке

В настоящее время SiC-технология широко признана в качестве надежной альтернативы кремнию. Более 30 компаний по всему миру создали произ-

водственную базу для SiC-технологии, занимаются соответствующей коммерческой деятельностью и выполняют мероприятия по стимулированию спроса. Многие компании, занятые изготовлением силовых модулей и силовых инверторов, включили SiC в свои перспективные планы.

Производители инверторов солнечных батарей и серверных источников питания стали первыми, кто использовал полупроводники на базе SiC, поскольку эффективность устройства для них является ключевым требованием. В 2013 году ведущие производители преобразователей для солнечных батарей — REFU, SMA и Delta — анонсировали новую модель на базе SiC-компонентов. По оценке журнала Photon, эффективность инверторов солнечных батарей увеличилась с 98 до 99%, а их вес снизился на 30% по сравнению с эквивалентными инверторами на базе IGBT. С ростом доступности, расширением спектра рабочих напряжений и снижением стоимости объем производства полупроводников на базе SiC будет расти, что приведет к их более широкому внедрению в таких приложениях, как электроприводы, источники бесперебойного питания для тяговых железнодорожных электродвигателей и гибридные транспортные средства.

Оптроны для управления затвором транзисторов от Avago Technologies широко применяются для управления кремниевыми полупроводниками, например IGBT. В данной статье обсуждается, как ценные свойства оптронов нового поколения могут быть использованы для управления и защиты также и карбид-кремниевых MOSFET.

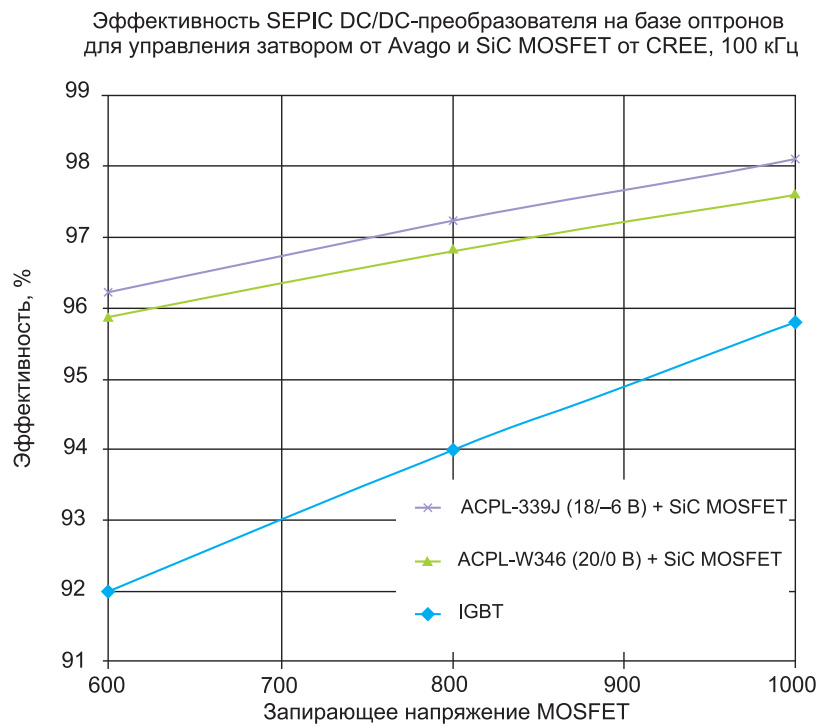

Рис. 1. Эффективность системы, использующей оптроны для управления затворами транзисторов от Avago и SiC MOSFET типа C2M0080120D компании Cree

Оптроны для управления затвором SiC MOSFET

Компания Avago Technologies в сотрудничестве с лидером рынка SiC-приборов Cree Inc выбрала оптроны, которые подходят для управления SiC MOSFET. Была выполнена оценка характеристик оптронов для управления затвором ACPL-W346 и ACPL-339J при их работе совместно с SiC MOSFET серии C2M от Cree в 8-А SEPIC DC/DC-преобразователе на частоте 100 кГц. Как показано на рис. 1, нагрузочная способность этих двух оптронов обеспечила эффективность на уровне 98% в соответствии с требованиями компании Cree.

Для того чтобы оптимально использовать низкие потери на переключение SiC MOSFET от Cree, драйвер для управления затвором транзистора должен поддерживать высокий ток на выходе и высокую скорость нарастания выходного напряжения для обеспечения быстрого заряда емкости затвора SiC MOSFET. Осциллограмма, приведенная на рис. 2, показывает форму управляющего сигнала амплитудой 20 В для оптрона ACPL-W346 с малым временем нарастания и спада на затворе SiC MOSFET, что необходимо для эффективного переключения SiC MOSFET.

ACPL-W346 — оптрон базового уровня для управления затвором транзистора, используемый для развязки и управления SiC MOSFET, работающего при высоком напряжении на шине питания. Он имеет выход полного размаха (rail-to-rail) с максимальным выходным током 2,5 А.

Уникальной особенностью оптрона ACPL-W346 является его самое высокое в своем классе быстродействие. Максимальная задержка распространения составляет 120 нс, а типовое время нарастания и спада напряжения на выходе — около 10 нс.

Для того чтобы обеспечить изолирование переходного шума при работе устройства на высокой частоте от выходного сигнала, требуется весьма высокий уровень подавления синфазных помех в 50 кВ/мкс. Оптрон ACPL-W346 в сочетании с биполярным буферным каскадом обеспечивает быстрое переключение высокого напряжения и высокого управляющего тока для эффективного и надежного включения и отключения SiC MOSFET. По сравнению с более ранними исходными проектами, в которых использовались специализированные драйверы MOSFET с патентованной схемой, ACPL-W346 и стандартный биполярный буфер обеспечивают более дешевое и простое

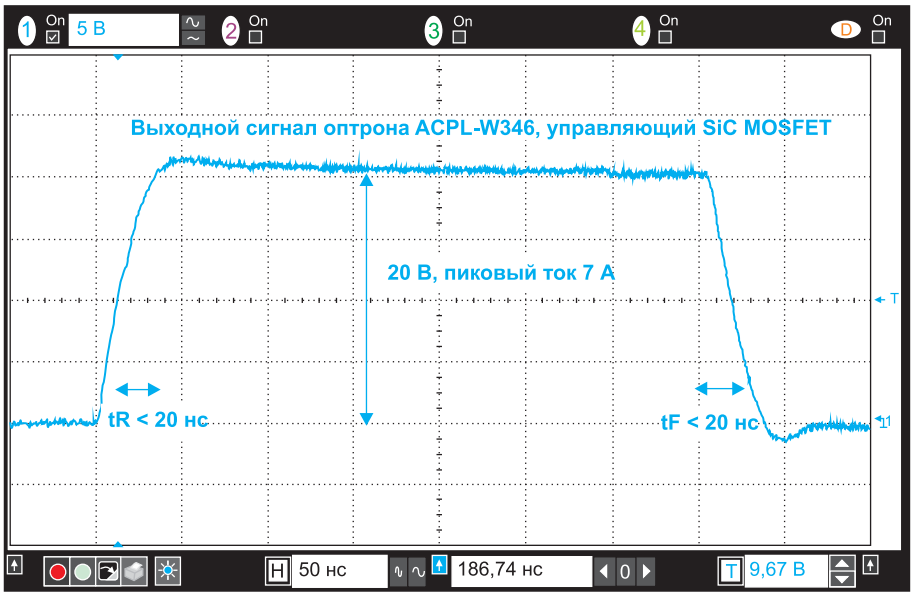

Рис. 2. Осциллограмма выходного сигнала оптрона ACPL–W346, который управляет SiC MOSFET

Рис. 3. Электрическая схема исходного проекта на базе ACPL-W346 и SiC MOSFET от Cree

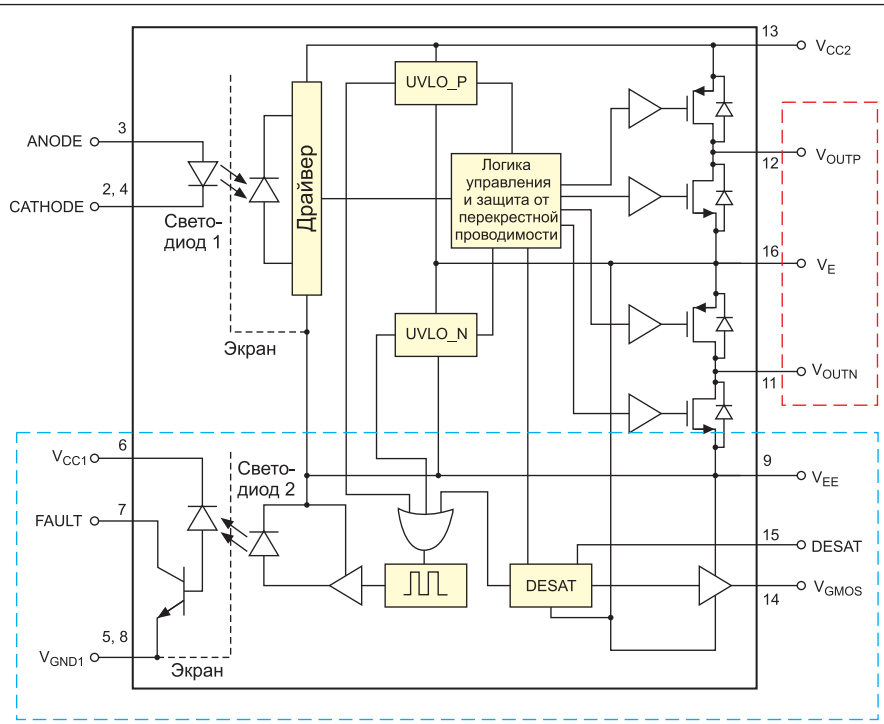

Рис. 4. Блок-схема оптрона ACPL-339J

решение для реализации драйвера управления затвором. На рис. 3 приведена электрическая схема исходного проекта на базе оптрона ACPL-W346 и SiC MOSFET от Cree.

Управление и защита SiC MOSFET

ACPL-339J — интеллектуальный оптрон для управления затвором транзистора, представляющий собой однокристальное решение, которое может обеспечить развязку, управление и защиту карбид-кремниевых MOSFET. На блок-схеме, представленной на рис. 4, синим пунктиром выделены интегрированные в оптрон ACPL-339J схемы детектирования короткого замыкания и сигнализации об отказе. Это решение имеет первый в отрасли оптрон для управления затворами транзисторов с двумя выходами, специально предназначенный для поддержки буфера MOSFET (выделено красным пунктиром). Устройство обеспечивает минимальный пиковый ток на выходе порядка 1 А, величина которого оптимизирована для управления как верхним, так и нижним плечом буферного каскада MOSFET, и содержит встроенную схему активного управления синхронизацией, предотвращающую

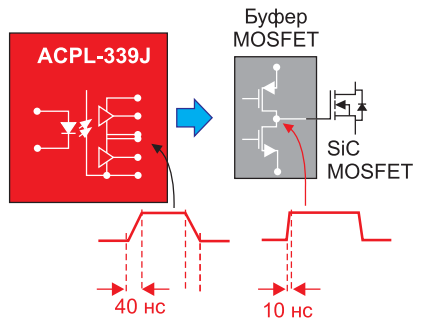

Рис. 5. Буфер MOSFET обеспечивает быстрое переключение

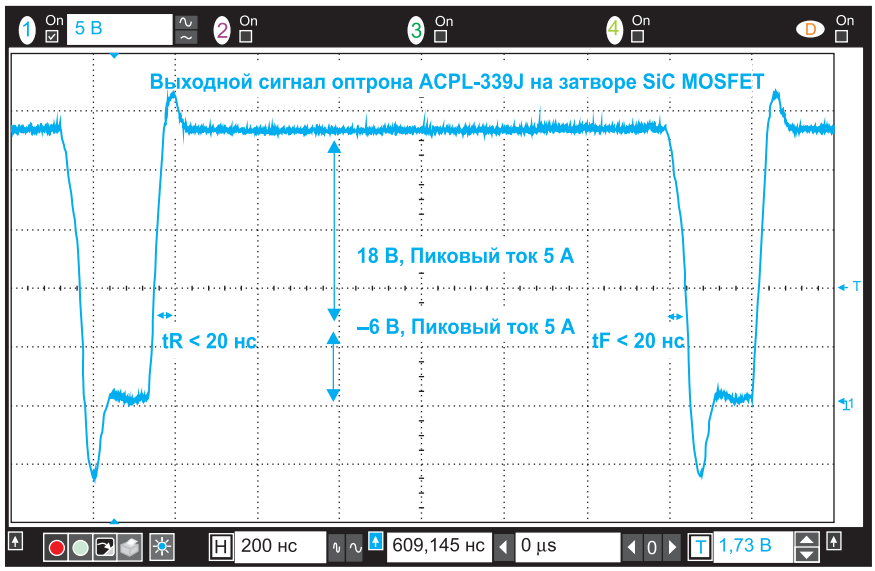

Рис. 6. Осциллограмма выходного сигнала оптрона ACPL–339J с буфером MOSFET при управлении затвором SiC MOSFET

перекрестную проводимость и снижающую до минимума потери на переключение в буферном каскаде MOSFET.

Основная причина применения буферов MOSFET, которые содержат PMOS- и NMOS-транзисторы, состоит в том, что они являются приборами, управляемыми напряжением. Выход MOSFET способен переключаться очень быстро, когда напряжение на входе превышает пороговое напряжение (как правило, 1 В). Таким образом, скорость переключения логического уровня буфера MOSFET не зависит от скорости переключения логического уровня предыдущего каскада оптрона, как показано на рис. 5.

Осциллограмма, приведенная на рис. 6, иллюстрирует форму выходного сигнала оптрона ACPL-339J с малым временем нарастания и спада на затворе SiC MOSFET, что необходимо для эффективного переключения SiC MOSFET.

Для того чтобы обеспечить защиту от короткого замыкания, напряжение сток-исток карбид-кремниевого MOSFET контролируется оптроном ACPL-339J в обычном режиме. Когда происходит короткое замыкание, через SiC MOSFET протекает сильный ток и вызы-

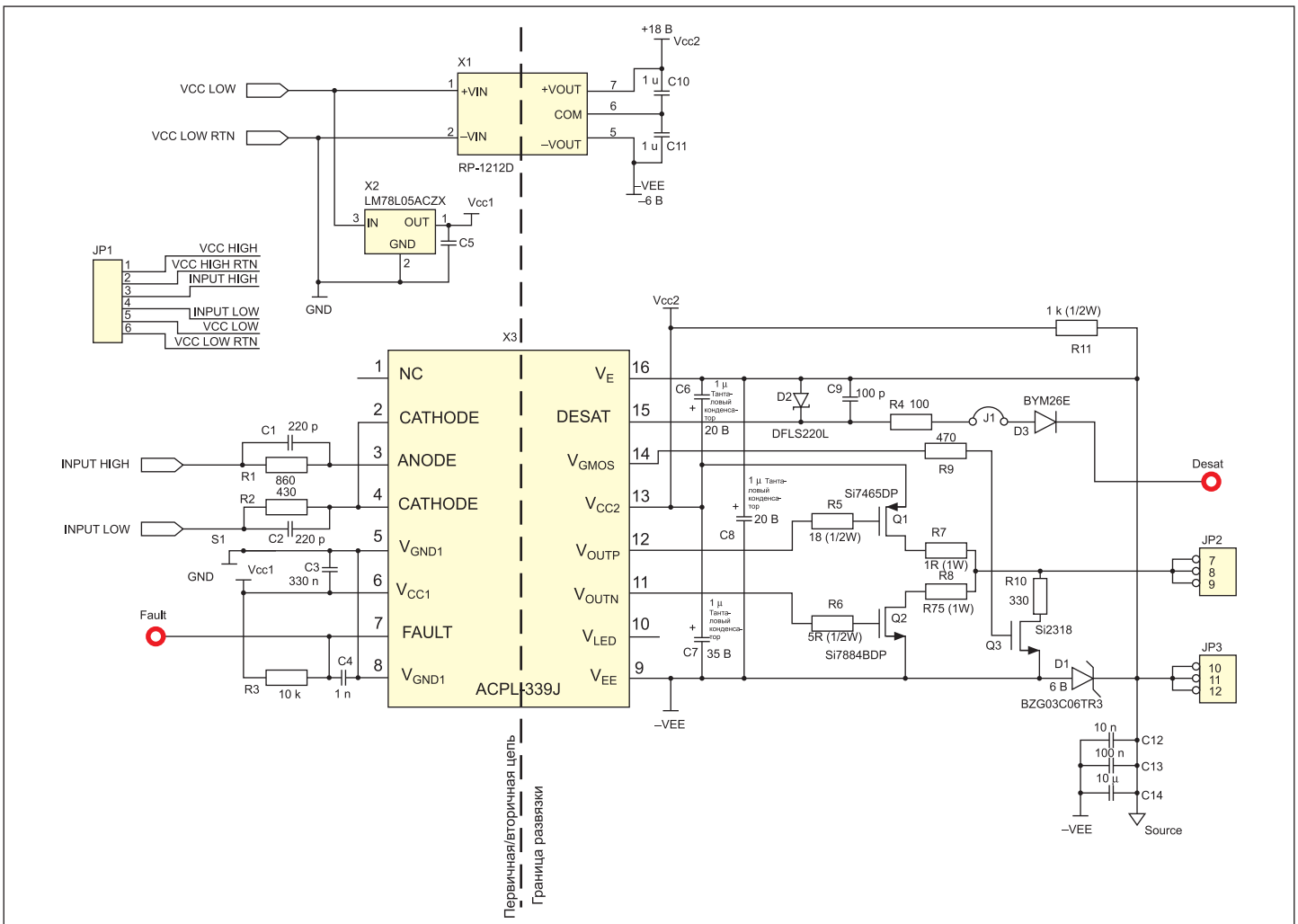

Рис. 7. Электрическая схема исходного проекта на базе ACPL–339J и SiC MOSFET от Cree

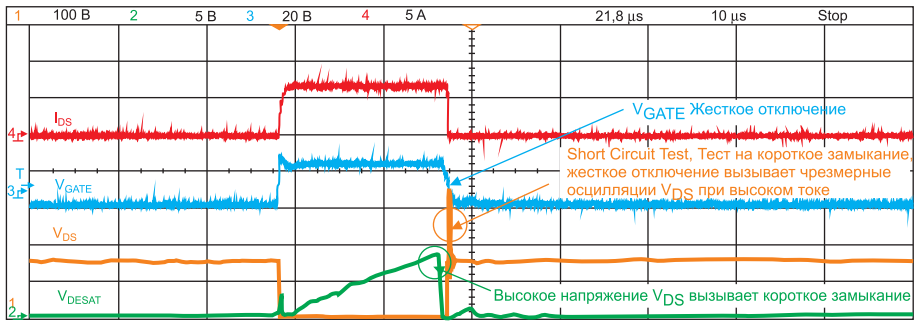

Рис. 8. Случай жесткого (внезапного) отключения, вызывающего чрезмерные осцилляции напряжения сток–исток во время короткого замыкания

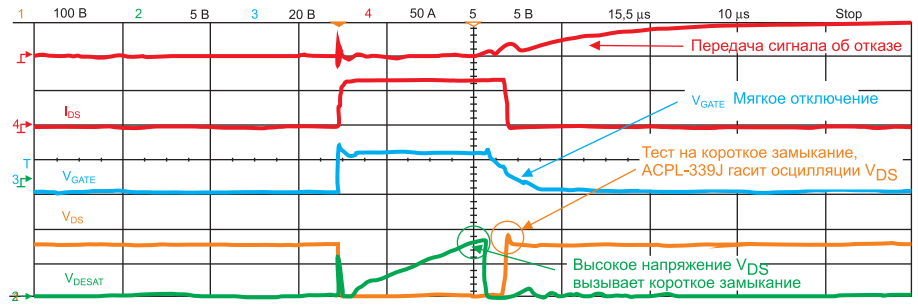

Рис. 9. В случае мягкого (постепенного) отключения при коротком замыкании осцилляции напряжения VDS могут быть уменьшены

вает быстрый рост напряжения сток-исток. Как только это напряжение превышает пороговое значение (для ACPL-339J оно составляет 8 В), фиксируется аварийный рост тока и запускается плавное отключение устройства. Вывод V_{GMOS} оптрона переключается на внешний транзистор, чтобы медленно разрядить затвор SiC MOSFET и обеспечить плавное отключение. Полностью процесс защиты от короткого замыкания завершается передачей сигнала FAULT по изолированному каналу обратной связи в контроллер. На рис. 7 показана электрическая схема исходного проекта на базе ACPL-339J и SiC MOSFET от Cree.

Во время короткого замыкания высокий ток перегрузки вместе с паразитными индуцированными токами в случае резкого отключения SiC MOSFET может вызвать появление выбросов напряжения, величина которых способна превысить пробивное напряжение SiC MOSFET. Для минимизации амплитуды выбросов напряжения после того, как детектируется короткое замыкание, в оптроне ACPL-339J предусмотрено плавное отключение. Напряжение на затворе SiC MOSFET медленно снижается до состояния низкого уровня. Скорость плавного отключения регулируется с помощью внешнего MOSFET и резистора (Q3 и R10 на рис. 7), что позволяет снизить амплитуду напряжения паразитного выброса.

На рис. 8 показан случай жесткого (внезапного) отключения во время короткого замыкания, что вызывает резкие выбросы и осцилляции напряжения сток-исток SiC MOSFET (во время этого эксперимента использовалось низкое напряжение на шине питания, чтобы избежать повреждения SiC MOSFET). На рис. 9 видно, что сильные выбросы напряжения могут быть погашены, когда запускается детектирование короткого замыкания и выполняется мягкое (плавное) отключение устройства.