

SCALE-iDriver —

семейство гальванически изолированных драйверов IGBT в микросхемном корпусе

В статье рассматривается новое семейство одноканальных драйверов IGBT SCALE-iDriver — первых представителей драйверов, выполненных по усовершенствованной технологии SCALE-2+, и не в традиционном для производителя модульном исполнении, а в виде интегральных схем. При этом данные устройства имеют усиленную гальваническую изоляцию (SID11x2K на 1200 В), версию с рабочим напряжением на 1700 В (SID1183K) и защитную функцию мягкого выключения в случае короткого замыкания (КЗ). При этом драйвер способен выдать в нагрузку ток до 8 А (1 Вт), что позволяет без бустера управлять IGBT/MOSFET-ключами с током до 450 А и блокирующим напряжением до 1700 В. Рассмотрены основные характеристики и особенности применения данных устройств.

Анатолий Бербенец

berben@efo.ru



Рис. 1. Высоковольтный корпус eSOP-драйверов семейства SCALE-iDriver

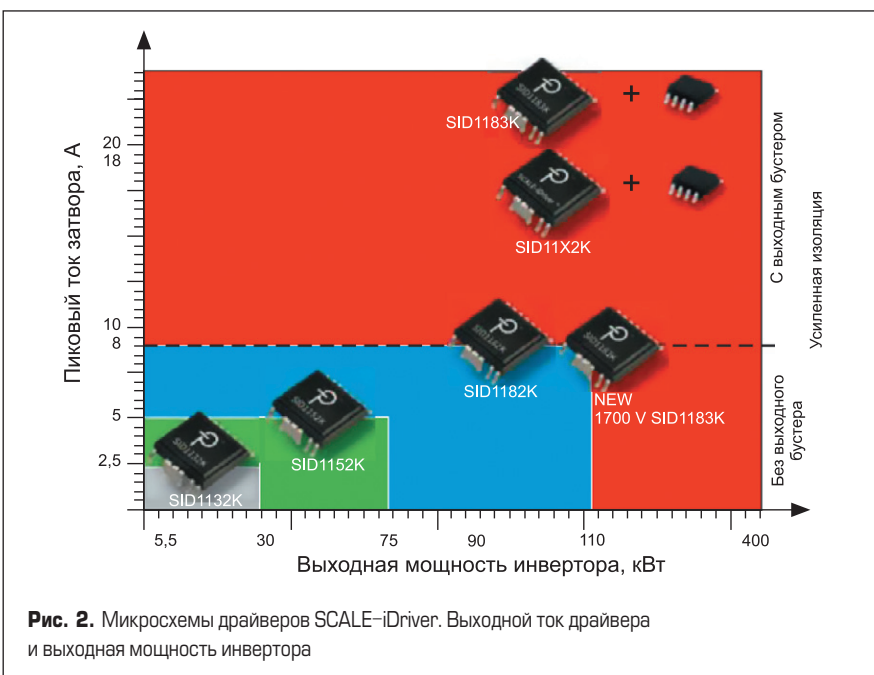


Рис. 2. Микросхемы драйверов SCALE-iDriver. Выходной ток драйвера и выходная мощность инвертора

Рowater Integrations (PI) — технологический лидер на рынке драйверов затвора силовых IGBT/MOSFET в преобразователях средней и большой мощности (от 5 кВт до единиц мегаватт). Используя высоко интегрированную технологию ASIC, компания смогла снизить количество компонентов в драйвере практически на 85% по сравнению с широко распространенными решениями. При этом драйверы обладают максимальным набором функциональных и технических характеристик, главные из которых:

- гальваническая изоляция управляющих входных сигналов от выходных силовых цепей;
- широкий набор защитных и диагностических функций;
- диапазон рабочих температур $-40...+125\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- хорошая долговременная стабильность параметров благодаря трансформаторной гальванической изоляции;
- гибкость и простота адаптации к IGBT разных производителей;
- широкий диапазон рабочих напряжений и токов, управляемых IGBT (до 6,5 кВ и 3600 А);
- лучшее в своих классах быстродействие (до 500 кГц) и джиттер выходного сигнала ($<\pm 1\text{ нс}$);
- возможность быстрого выхода на рынок за счет наличия P&P-драйверов, адаптированных для IGBT ведущих производителей.

В статье подробно рассмотрена лишь небольшая новая группа драйверов затвора, выполненных в виде интегральных схем в специальном высоковольтном корпусе eSOP (рис. 1), обеспечивающем блокирующее напряжение до 1700 В. Ранее в ряде статей уже были описаны известные семейства модульных драйверов по технологии SCALE-1, SCALE-2, SCALE-2+ [1, 2].

Основные характеристики SCALE-iDriver

Семейство SCALE-iDriver включает в себя три микросхемы на 1200 В и одну на 1700 В напряжения гальванической изоляции. Все микросхемы одноканальные. Наглядно возможности драйверов представлены на диаграмме (рис. 2), где по оси Y отложен пиковый ток управления затвором в амперах, а по оси X — мощность инвертора в киловаттах, которую можно достичь, используя соответствующий IGBT-модуль. Используя только микросхему драйвера, можно достичь мощности преобразователя до 110 кВт. Для получения более высокой мощности достаточно добавить бустерный каскад на комплементарных транзисторах в виде еще одной микросхемы, например PBSS4041SPN.

Номенклатура драйверов приведена в таблице 1.

Основные характеристики 1200-В драйверов приведены в таблице 2 [3].

Драйверы на 1700 В представлены пока одной микросхемой SID1183K в том же корпусе eSOP [4]. В отличие от семейства на 1200 В, эта микросхема обеспечивает базовый уровень гальванической изоляции. Ее основные характеристики приведены в таблице 3.

Функциональные особенности SCALE-iDriver

Функциональные характеристики драйвера опишем на основе типовой и функциональной схем включения (рис. 3 и 4).

Одноканальные драйверы семейства SCALE-iDriver предназначены для управления IGBT, MOSFET и другими полупроводниковыми силовыми ключами с блокирующими напряжениями до 1700 В и обеспечивают при этом усиленную изоляцию (1200 В) или базовый уровень изоляции (1700 В) между микроконтроллером и силовой цепью. Управляющий ШИМ-сигнал

Таблица 1. Номенклатура SCALE-iDriver

Наименование	Максимальный выходной ток, А	Блокирующее напряжение IGBT/MOSFET-ключа, В	Максимальный ток IGBT/MOSFET-ключа, А
SID1132K	2,5	600, 650, 1200	100
SID1152K	5	600, 650, 1200	300
SID1182K	8	600, 650, 1200	600
SID1183K	8	600, 650, 1200, 1700	600

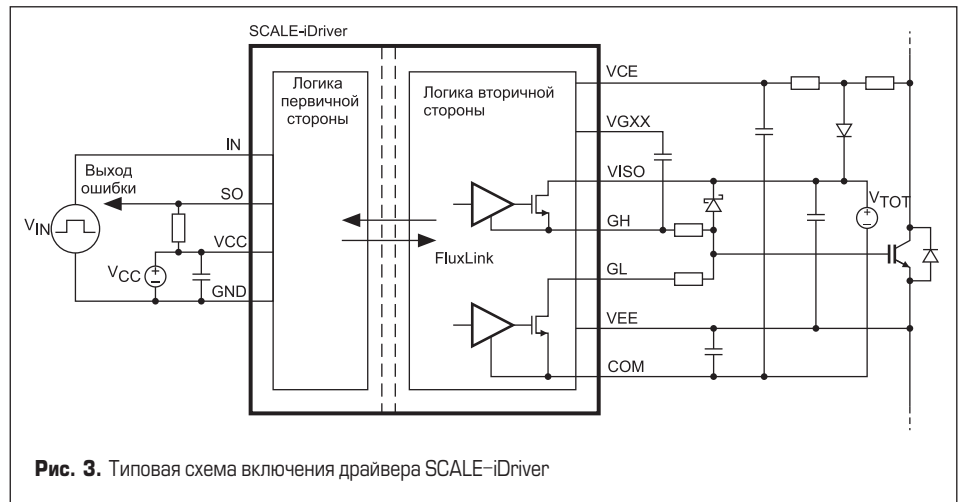


Рис. 3. Типовая схема включения драйвера SCALE-iDriver

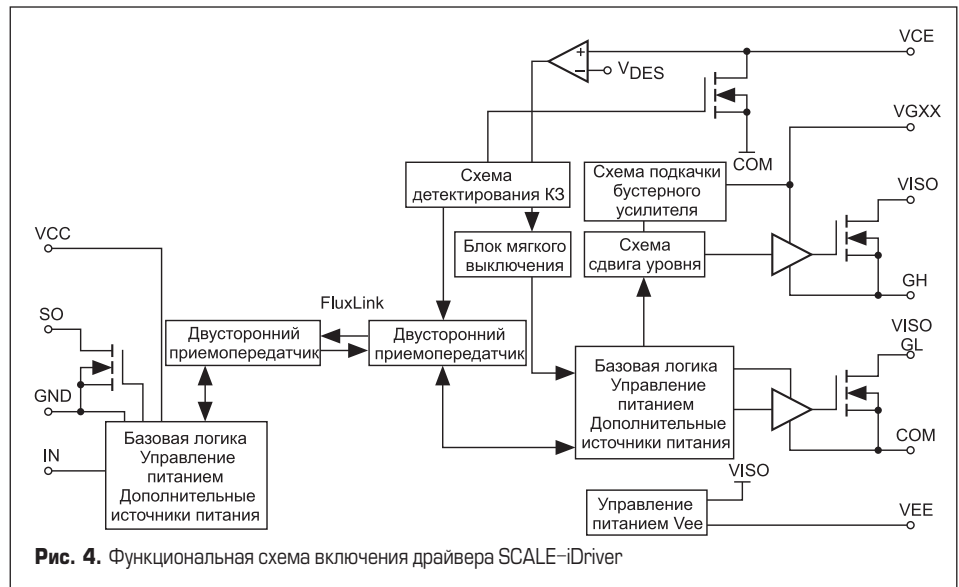


Рис. 4. Функциональная схема включения драйвера SCALE-iDriver

Таблица 2. Основные характеристики драйверов на 1200 В

Характеристика	Мин.	Тип.	Макс.
Напряжение источника питания первичной стороны V_{cc} , В	4,75	5	5,25
Напряжение источника питания вторичной стороны $V_{юв}$, В	22	25	25
Максимальный выходной ток драйвера высокого уровня (включения — вытекающий ток) $I_{двр}$, А		7,3	
Максимальный выходной ток драйвера низкого уровня (выключения — втекающий ток) $I_{двр}$, А		8	
Частота переключения f_r , кГц	0	75	250
Джиттер задержки распространения сигналов вход/выход, нс			±5
Задержка распространения времени включения $t_{рв}$, нс		253	
Задержка распространения времени выключения $t_{рв}$, нс		262	
Минимальная длительность ШИМ-импульсов включения/выключения, нс			650
Длина пути тока утечки вход/выход по поверхности (creepage), мм	9,5		
Длина пути тока утечки вход/выход по воздуху (clearance), мм	9,5		
Сравнительный индекс стойкости к пробое (СП)		600	
Максимальная мощность, рассеиваемая корпусом (T_1), Вт			1,79
Тестовое напряжение изоляции при выходном 100%-ном контроле V_{iso} , кВ эфф.	6		
Тестовое напряжение частичного разряда при выходном 100%-ном контроле V_{pdm} , В ампл.	2652		

Таблица 3. Основные характеристики драйверов на 1700 В

Характеристика	Мин.	Тип.	Макс.
Напряжение источника питания первичной стороны V_{cc} , В	4,75	5	5,25
Напряжение источника питания вторичной стороны $V_{юв}$, В	22	25	25
Максимальный выходной ток драйвера высокого уровня (включения — вытекающий ток) $I_{двр}$, А		7,3	
Максимальный выходной ток драйвера низкого уровня (выключения — втекающий ток) $I_{двр}$, А		8	
Частота переключения f_r , кГц	0	20	75
Джиттер задержки распространения сигналов вход/выход, нс			±5
Задержка распространения времени включения $t_{рв}$, нс		253	
Задержка распространения времени выключения $t_{рв}$, нс		262	
Минимальная длительность ШИМ-импульсов включения/выключения, нс			650
Длина пути тока утечки вход/выход по поверхности (creepage), мм	9,5		
Длина пути тока утечки вход/выход по воздуху (clearance), мм	9,5		
Сравнительный индекс стойкости к пробое (СП)		600	
Максимальная мощность, рассеиваемая корпусом (T_1), Вт			1,79
Тестовое напряжение изоляции при выходном 100%-ном контроле V_{iso} , кВ эфф.	6		
Тестовое напряжение частичного разряда при выходном 100%-ном контроле V_{pdm} , В ампл.	2550		

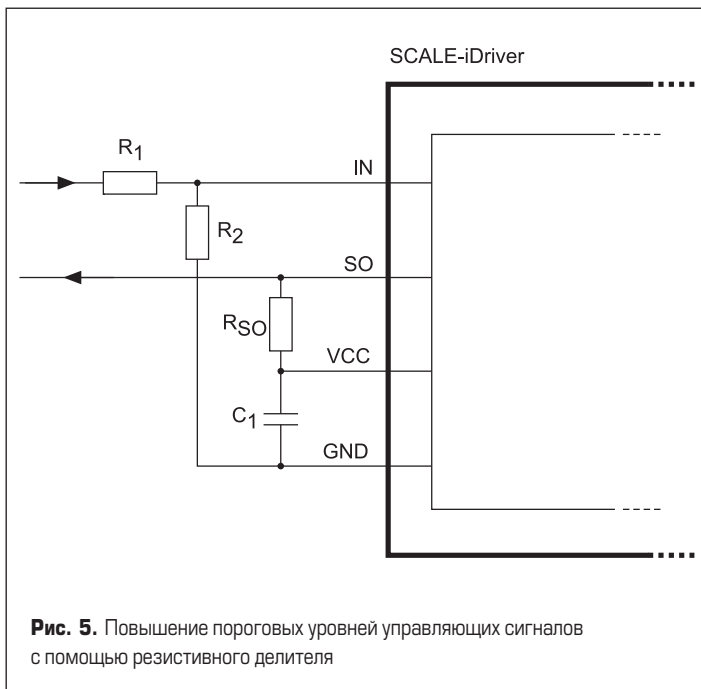


Рис. 5. Повышение пороговых уровней управляющих сигналов с помощью резистивного делителя

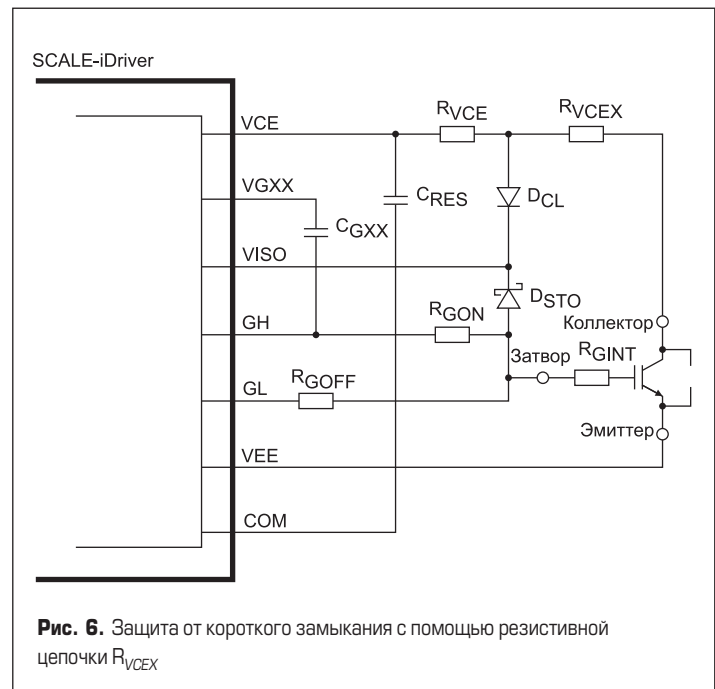


Рис. 6. Защита от короткого замыкания с помощью резистивной цепочки R_{VCEX}

подается на вывод IN, источник питания первичной стороны на вывод VCC; оба относительно вывода GND. Рабочее состояние драйвера и силового ключа индицируется потенциалом вывода SO.

Управляющие ШИМ-сигналы передаются с первичной стороны (IN) на вторичную через изоляционный барьер, выполненный по фирменной технологии FluxLink индукционного типа без магнитного сердечника. Вывод GH обеспечивает положительное управляющее напряжение и заряд емкости затвора силового ключа при включении. Вывод GL выдает отрицательное напряжение и обеспечивает разряд емкости затвора при выключении ключа.

Защита от короткого замыкания реализована методом мониторинга напряжения насыщения транзистора через вывод VCE и определения момента достижения им определенного порога, соответствующего КЗ. После определения момента КЗ силовой ключ выключается, используя метод плавного (мягкого) выключения ASSD.

Источники питания

Микросхемы SID11xxK требуют двух источников питания: один — для питания первичной стороны Vcc; второй, гальванически изолированный от первичной стороны, Vtot — для питания вторичной стороны. Источник Vtot подключается между выводом VISO и выводом COM. Источник Vtot должен иметь напряжение изоляции не хуже, чем у самого драйвера. Vtot должен иметь низкую емкостную связь с первичной стороной так же, как и с любой цепью вторичной стороны. Положительное (включающее) напряжение «затвор-эмиттер» снимается с вывода VISO и стабилизируется на уровне 15 В относительно VEE внутри драйвера. Отрицательное (выключающее) напряжение на затвор силового ключа снимается с вывода VEE относительно COM.

В силу ограниченной величины вытекающего тока вывода VEE все дополнительные нагрузки должны прикладываться между выводами VISO и COM. Не допускается присоединение дополнительных нагрузок между выводами VISO и VEE, а также между VEE и COM.

Логика работы входа IN и вывода состояния SO

Выводы IN и SO соединяются напрямую с выводами микроконтроллера с логическими CMOS-уровнями 5 В. Если физическое расстояние между микроконтроллером и микросхемой драйвера велико или требуются другие логические уровни, может быть использован резистивный делитель или триггер Шмитта (рис. 5). Оба решения, помимо согласования логических уровней, позволяют повысить помехозащищенность управляющих цепей.

Управляющие сигналы драйвера с вывода IN передаются на выходы GH и GL с задержкой распространения $t_{p(lh)}$ и $t_{p(hl)}$, величина которых приведена в табл. 2 и 3. Когда драйвер работает в нормальном режиме и нет событий ошибки, вывод SO находится в высокоимпедансном состоянии (открыт). Любое событие ошибки переводит его в состояние замыкания на землю GND с нулевым потенциалом. В случае снижения напряжения источника питания первичной стороны Vcc ниже заданного уровня UVLOvcc, вход SO переходит в низкоимпедансное состояние практически без задержки и остается в нем до исчезновения ошибки. В случае выхода силового транзистора из насыщения при КЗ или понижении напряжений VEE и VISO вторичной стороны ниже заданного уровня, вход SO обрабатывает с временем задержки t_{fault} и поддерживает нулевой выход в течение времени t_{SO} . В случае любого события ошибки выход драйвера переходит в состояние «выключено» (вывод GL соединен с COM).

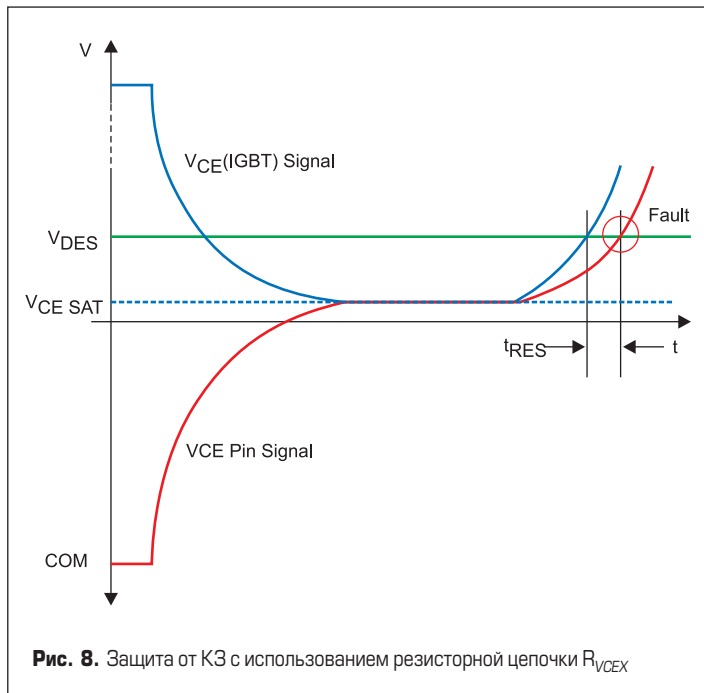
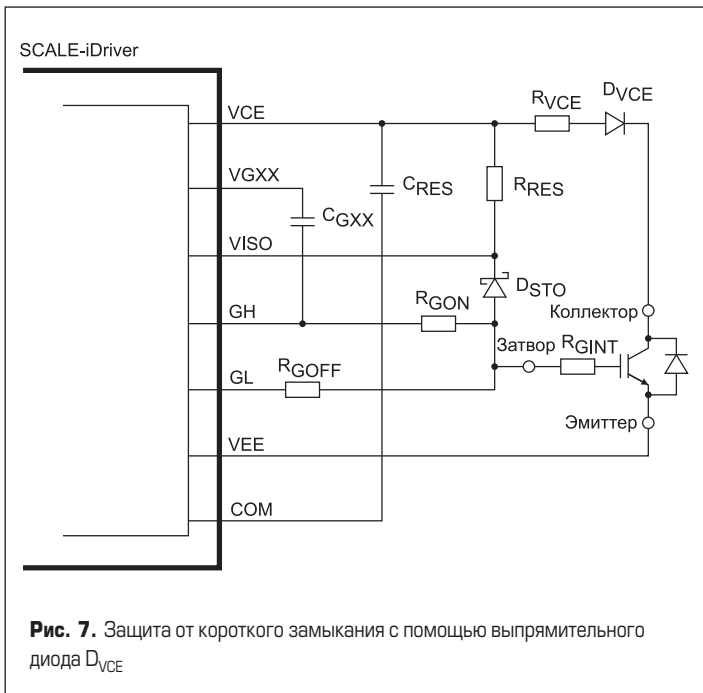
В течение действия времени t_{SO} управляющие сигналы со входа IN игнорируются. Для включения выхода драйвера потребуется повторный сигнал на включение.

Выходные сигналы драйвера (вторичная сторона)

Затвор силового ключа, которым управляет драйвер, подключается к его выводам GH и GL через два резистора. Затворный резистор цепи включения силового транзистора R_{GON} соединяется с выводом GH, а затворный резистор выключения R_{GOFF} — с выводом GL. Если резисторы одинаковые по величине, то выводы GH и GL могут быть соединены вместе. Необходимо иметь в виду, что в технической документации на SCALE-iDriver под R_{GH} и R_{GL} подразумевается полная величина затворных резисторов, присоединяемых к соответствующим выводам GH и GL драйвера. В то же время в большинстве спецификаций на силовые полупроводниковые транзисторы указывается величина внутреннего встроенного резистора затвора R_{GINT} . В дополнение к R_{GINT} в документации на IGBT указывают величину внешних резисторов затвора R_{GON} и R_{GOFF} , которые надо добавить для оптимального управления ключом, следовательно, R_{GH} — это сумма R_{GON} и R_{GINT} (рис. 6). Внешние затворные резисторы должны выбираться по мощности с учетом пиковых токов через них.

Защита от короткого замыкания

Для защиты силового ключа в случае КЗ SCALE-iDriver использует полупроводниковый эффект выхода транзистора из насыщения для определения момента КЗ и метод плавного выключения ASSD (Advanced Soft Shutdown) для защиты его от повреждения. Момент выхода силового ключа из насыщения может быть определен с помощью двух схемотехнических



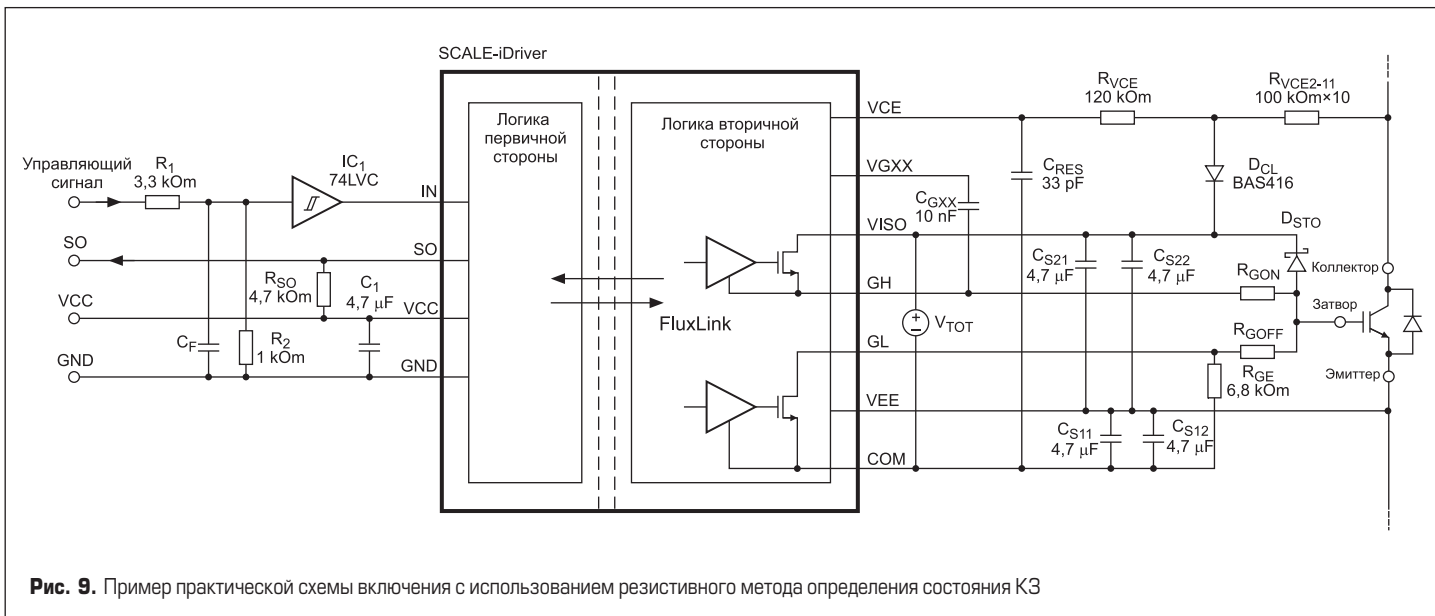
способов: используя либо диодную схему с диодом D_{VCE} (рис. 7), либо резисторную цепочку с резистором R_{VCEX} (рис. 6), подключенные к выводу VCE. Покажем, как это работает, на примере резисторной схемы. В состоянии, когда силовой ключ выключен, вывод VCE внутренне соединен с выводом COM, и конденсатор C_{RES} разряжен (красная линия на рис. 8 представляет потенциал вывода VCE). При поступлении на затвор силового ключа сигнала на включение, его напряжение «коллектор-эмиттер» V_{CE} снижается от уровня в состоянии «выключено», а это практически напряжение DC-звена, до уровня напряжения во включенном состоянии V_{CESAT} (см. синюю кривую на рис. 8), и конденсатор C_{RES} начинает заряжаться до уровня V_{CESAT} . Время заряда конденсатора определяется сопротивлением R_{VCEX} (рис. 6), напряжением DC-звена, величинами C_{RES} и R_{VCE} . Во время включенного состояния напряжение

«коллектор-эмиттер» ключа V_{CE} непрерывно сравнивается с опорным напряжением V_{DES} (зеленая линия). Величина опорного напряжения выбрана оптимально для приложений с IGBT. Как только величина $V_{CE} > V_{DES}$ (красный кружок на рис. 8), драйвер отключает силовой ключ в режиме контролируемого наклона спада коллекторного тока, ограничивая таким образом напряжение на коллекторе до уровня допустимого. Команды на включение, приходящие в течение этого периода выключения, а также в течение времени t_{SO} , игнорируются, а вывод состояния SO подключен к GND.

Время реакции t_{RES} — это время заряда C_{RES} , отражающее задержку между установлением V_{CE} и подъемом напряжения на выводе VCE. Время реакции должно быть достаточно долгим, чтобы исключить ложные переключения, и может подстраиваться с помощью R_{RES} и C_{RES} (рис. 7) или R_{VCE} и C_{RES} (рис. 6).

Безопасное включение и выключение питания

В процессе подачи питания на драйвер и его выключения состояния входов/выходов могут быть не определены. Для того чтобы избежать возможных проблем, в процессе подачи и выключения питания рекомендуется поддерживать на выводе IN низкий логический уровень. Все выводы, связанные с питающими напряжениями, — VCC, VISO, VEE и VGXX — должны быть зашунтированы керамическими конденсаторами (рис. 9). Существует время начала работы драйвера после того, как источники питания выходят на номинальное значение, которое определяется в технической документации как t_{START} . Это время составляет 10 мс. Оно необходимо, чтобы передать на выход SO информацию о возможных отклонениях в напряжениях источников питания, о том, что источники находятся в допусках, все питающие напряжения в норме и нет КЗ.



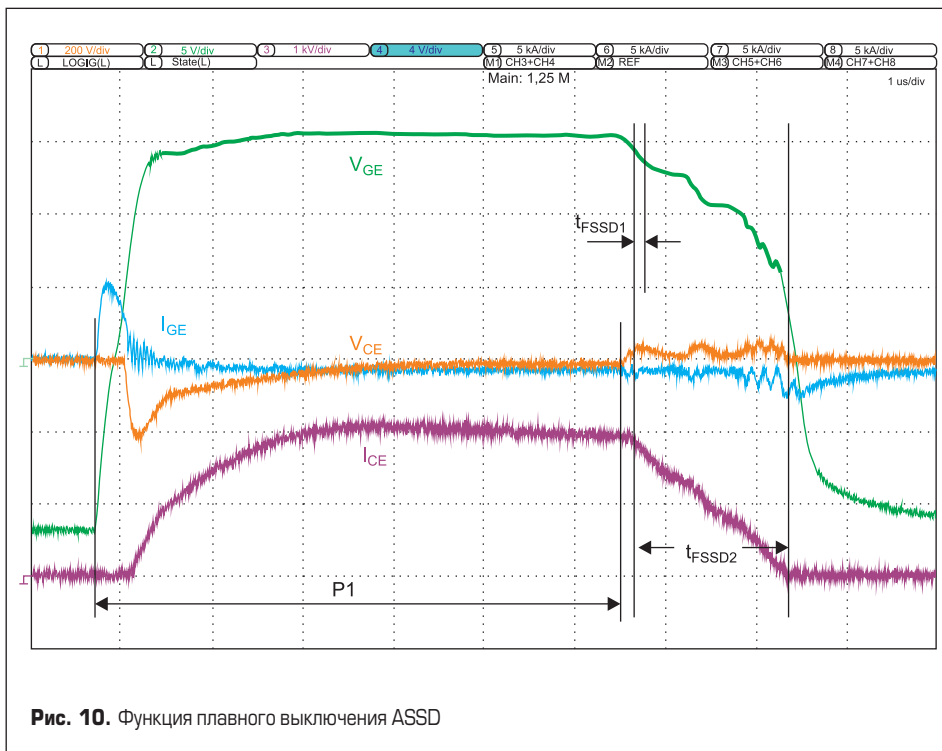


Рис. 10. Функция плавного выключения ASDD

Работа с короткими импульсами

Если сигналы (импульсы) управления на входе имеют длительность меньше, чем определенные в спецификации $T_{GE(MIN)}$, сигналы на выходах драйвера GH и GL будут увеличены по длительности до $T_{GE(MIN)}$. Импульсы управления, большие чем $T_{GE(MIN)}$ не модифицируются по длительности.

ASDD-функция плавного выключения

Эта функция активируется только после того, как определено событие КЗ силового ключа. Она обеспечивает защиту силового ключа от разрушения путем его выключения и ограничения скорости спада тока коллектора на уровне, обеспечивающем напряжение на коллекторе VCE до безопасного уровня V_{CES} . Эта функция особенно применима для

IGBT силовых ключей. На рис. 10 показан принцип работы ASDD.

Желтой линией отображено увеличенное из-за КЗ напряжение «коллектор–эмиттер» V_{CE} , которое оценивается в течение периода P1. В течение этого времени напряжение «затвор–эмиттер» (зеленая кривая) остается стабильным. Ток коллектора (розовая кривая) тоже остается относительно стабильным и не превышает предельного значения. В конце периода P1 напряжение «затвор–эмиттер» V_{GE} снижается в течение времени t_{FSSD1} . Ток коллектора снижается, что приводит к небольшому выбросу напряжения «коллектор–эмиттер» V_{CE} (рис. 10). Напряжение V_{GE} продолжает снижаться, и продолжается разряд емкости затвора силового ключа. Когда напряжение «затвор–эмиттер» снижается ниже порогового, ток коллектора становится практически

нулевым, что завершает событие КЗ. Все время определения события КЗ и безопасное выключение силового транзистора не превышает 10 мкс (в данном примере 8 мкс), что соответствует предельным спецификациям по току КЗ для IGBT ведущих производителей.

Средства разработки SCALE-iDriver

Традиционно с целью ускорения разработки драйверов на основе своих продуктов производитель предлагает образцы плат драйверов (reference design) на основе микросхем нового семейства. Предлагается две платы для 1200 В серии RDHP-1608 и RDHP-1526 [5] и одна оценочная плата для 1700 В микросхемы RDHP-1702 [5] (рис. 11). Все три платы двухканальные и обеспечивают работу всех функций SCALE-iDriver и дополнительно подавление коротких импульсов, синхронизацию работы двух каналов в полумостовом режиме («мертвое время»), электрический интерфейс. Все референс-платы обеспечены комплектом конструкторской документации: электрическая схема, перечень элементов, монтажная схема, gerber-файлы и файл для автоматической установки компонентов на плату при производстве.

Комплект конструкторской документации доступен для загрузки с сайта производителя [5].

Заключение

В статье рассмотрено новое семейство гальванически изолированных одноканальных драйверов затвора SCALE-iDriver в микросхемном корпусе eSOP.

Семейство включает три микросхемы для управления силовыми ключами с блокирующим напряжением до 1200 В и одну — до 1700 В.

Драйвер способен выдать в нагрузку ток до 8 А (1 Вт), что позволяет без бустера управлять IGBT/MOSFET-ключами с током до 450 А и блокирующим напряжением до 1700 В. При этом драйверы имеют защитную функцию мягкого выключения в случае КЗ.

Для ускорения разработки собственных драйверов доступен комплект конструкторской документации для печатной платы двухканального драйвера, включая электрическую схему и gerber-файлы.

Литература

1. Бербенец А. Драйверы CT-Concept для силовых IGBT- и MOSFET-модулей на базе нового ядра SCALE-2 // Силовая электроника. 2009. № 5.
2. Бербенец А. Драйверы IGBT на основе SCALE 2+ с защитными функциями мягкого выключения и активного ограничения // Силовая электроника. 2015. № 6.
3. Datasheet. SID11x2K SCALE-iDriver Family.
4. Datasheet. SID1183K 1700 V SCALE-iDriver.
5. www.power.com

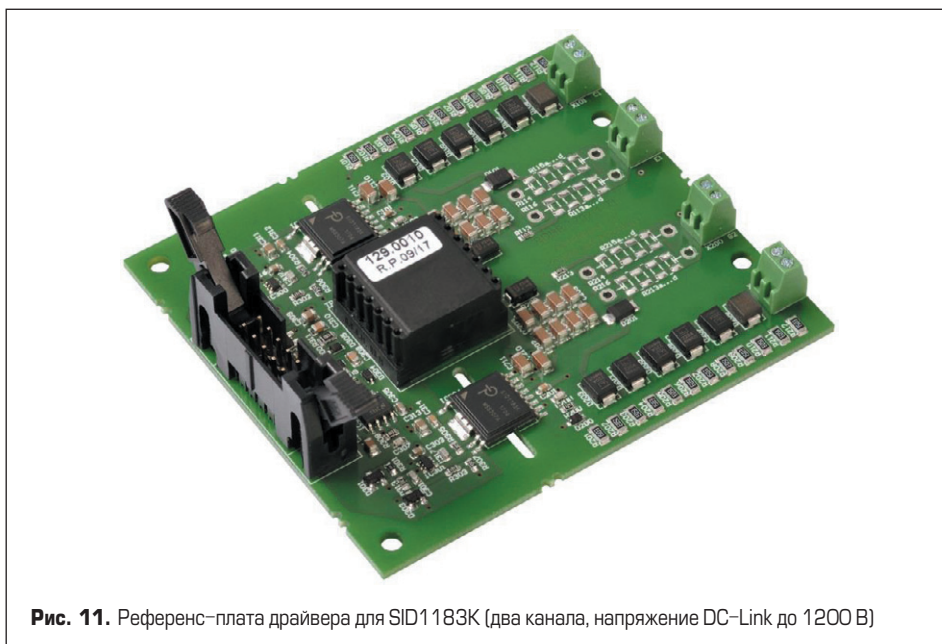


Рис. 11. Референс-плата драйвера для SID1183K (два канала, напряжение DC-Link до 1200 В)