

# MiniSKiiP IPM — инструкция по эксплуатации

**Рост популярности миниатюрных модулей MiniSKiiP, ориентированных на применение в приводах средней мощности, обусловлен высокой степенью интеграции, надежностью и простотой прижимного способа подключения. Семейство MiniSKiiP — одна из наиболее успешных в коммерческом плане разработок компании SEMIKRON. Заказчиками этих компонентов являются крупнейшие мировые производители: LENZE, Miller Electric, Schneider, SEW Eurodrive, Siemens A&D, Vacon и многие другие. На ежегодной выставке PCIM, проходившей в мае 2009 года в Нюрнберге, было представлено новое поколение MiniSKiiP IPM (рис. 1), его отличие — встроенный интегральный драйвер [1]. Ожидается, что популярность интеллектуальных силовых модулей, сохранивших все преимущества конструктива MiniSKiiP, будет еще выше. Предлагаемая статья посвящена особенностям применения силовых ключей данного типа.**

Андрей КОЛПАКОВ  
Andrey.Kolpakov@semikron.com  
Андрей КОЛЕНЧИКОВ  
Andrey.Kolenchikov@semikron.com

Как и у всех элементов класса MiniSKiiP, подключение силовых и сигнальных цепей новых интеллектуальных модулей (Intellectual Power Module, IPM) осуществляется с помощью пружинных контактов, непосредственно соединяющих токонесущие шины керамической DBC-подложки с интерфейсной платой.

Главным отличием компонентов семейства, получившего название MiniSKiiP IPM, является наличие интегрального высоковольтного драйвера затворов, в котором полностью исключен эффект защелкивания во всем диапазоне рабочих токов и температур [2]. Это стало возможным благодаря применению технологии SOI (Silicon On Insulator), впервые внедренной SEMIKRON для компонентов такого типа. Данная технология предусматривает электрическую изоляцию каждого полупроводникового элемента, благодаря чему резко снижается ток утечки и гарантируется подавление паразитных триггерных структур при всех

условиях эксплуатации, включая короткое замыкание.

Технология SOI обеспечивает высокий иммунитет к наведенным переходным напряжениям обеих полярностей с уровнями вплоть до напряжения пробоя MOSFET. Все сказанное в сочетании с расширенным температурным диапазоном (теоретически  $T_{jmax}$  достигает 200 °C) позволяет использовать чипы SOI для построения высоконадежных электронных устройств управления затворами.

Интегральный драйвер MiniSKiiP IPM, работающий при напряжении питания 12–17 В, способен управлять тремя верхними и тремя нижними ключами 3-фазного инвертора и чоппером, который может быть использован в качестве тормозного каскада или корректора коэффициента мощности (ККМ). Устройство обеспечивает запрет одновременного отпирания оппозитных транзисторов (функция Interlock). Входы управления совместимы с уровнями логики TTL (5 В) и CMOS (3,3 В), время задержки составляет около 300 нс. Схема защиты драйвера выполняет все базовые функции, выключая выходные транзисторы при снижении напряжения управления (Under Voltage LockOut, UVLO) и перегрузке по току (Over Current Protection, OCP).

При работе маломощных IPM амплитуда коммутационных выбросов обычно не превышает предельных для IGBT значений, поскольку малы величины  $di/dt$  и  $L_s$ . Однако с ростом мощности уровень переходных перенапряжений растет лавинообразно, делая этот эффект опасным как для силового ключа, так и для драйвера. В модулях серии MiniIPM реализована новая концепция сдвига уровня, гарантирующая защиту схемы управления

от наведенных со стороны силовых каскадов перенапряжений обеих полярностей.

Установка чипа драйвера непосредственно на DBC-керамику дает возможность эффективно отводить от него тепло, что особенно важно при работе схемы управления на высоких частотах. При размере кристалла 4,9×3,1 мм величина теплового сопротивления составляет 4 °C/Вт, для сравнения укажем, что при установке аналогичного чипа в корпусе SOP28 значение  $R_{th(j-a)}$  достигает 75 °C/Вт. При выходном токе порядка 1 А это позволяет драйверу эффективно управлять силовым каскадом инвертора среднего диапазона мощности.

Конструктив MiniSKiiP IPM отличается низким значением теплового сопротивления, а по плотности тока его показатели — одни из лучших для данного класса силовых ключей. Благодаря «безбазовой» конструкции и использованию пружинных терминалов он имеет высокую стойкость к термоциклированию и обеспечивает гораздо более высокую временную стабильность характеристик, чем любой стандартный модуль аналогичной мощности. Соединение MiniSKiiP с платой управления и радиатором производится с помощью одного крепежного винта в ходе одной производственной операции, что является важным преимуществом при автоматизированной сборке. Модуль предназначен для применения в приводах мощностью до 15 кВт, источниках питания и UPS, преобразователях солнечных батарей.

Основные особенности MiniSKiiP IPM:

- Интегральный SOI-драйвер: расширенный температурный диапазон, отсутствие эффекта защелкивания.
- Усовершенствованный каскад сдвига уровня.



Рис. 1. Внешний вид модуля MiniSKiiP со встроенным интегральным драйвером

- Логика 3,3/5 В, LSTTL совместимый интерфейс.
- Согласованное время прохождения сигнала в каналах управления.
- Защита от перегрузки по току по сигналу резистивного шунта.
- Предотвращение сквозного тока (функция Interlock).
- Вход стробирования.
- Защита от падения напряжения управления (функция UVLO).
- Кристаллы 4-го поколения T4 IGBT/CAL 4.
- Встроенный термодатчик NTC.
- Соответствие экологическим стандартам.

Модули MiniSKiiP IPM выпускаются в двух вариантах схем: 3-фазный инвертор и CIB (Converter/Inverter/Brake — выпрямитель/инвертор/тормозной каскад) и в двух типах корпусов.

### Технология прижимного контакта

В основе конструкции выпускаемых в настоящее время силовых ключей лежит медная базовая плата толщиной 2–3 мм, на которой размещается изолирующая керамическая DBC-пластина с чипами IGBT и диодов. При изменении температуры силового ключа в сопрягающихся слоях возникают термомеханические напряжения, вызванные разницей коэффициентов теплового расширения КТР (или СТЕ — Coefficient of Thermal Expansion). Вероятность разрушения слоя оценивается с помощью так называемого фактора риска, являющегося произведением разницы КТР на площадь контакта. Самая большая проблема возникает при соединении базовой платы и DBC-керамики, имеющей наибольшую площадь. Тепловые стрессы вызывают изгиб элементов конструкции (так называемый «биметаллический эффект») и приводят к постепенному разрушению связей.

Эти напряжения создаются и при производстве модулей в процессе пайки керамики на базу, для их компенсации используется технологический предварительный изгиб медной пластины. Правильно выбранное усилие и радиус изгиба позволяют обеспечить хорошую результирующую плоскостность основания модуля и избежать образования полостей при установке на радиатор. Однако наличие у припоя вязкопластичных свойств приводит к временной релаксации и постепенной деформации, возникающей после пайки. Компенсировать данный эффект не позволяют никакие технологические приемы.

Анализ приведенных выше фактов привел к тому, что в начале 1990-х годов компания SEMIKRON начала производство силовых ключей прижимного типа, конструкция которых не содержит базовой платы. Технология прижимного контакта (pressure contact technology) была внедрена в модулях семейства SKiiP, ставшего одним из самых популярных в секторе высоконадежных преобразователей большой мощности.



Рис. 2. а, б) Пружинные контакты MiniSKiiP; в) нитевидные кристаллы на поверхности пружины

Следует отметить, что отсутствие базы приводит к некоторому ухудшению распределения тепла по поверхности радиатора. Однако этот недостаток компенсируется за счет более тонкого слоя теплопроводящей пасты. Поскольку у прижимных конструкций отсутствует биметаллический эффект, толщина слоя может быть уменьшена со 100 мкм (номинальное значение для стандартных ключей) до 20–30 мкм. Очевидно, что при этом предъявляются и более высокие требования к качеству обработки радиатора. Однако преимущества прижимной системы очевидны: меньшая масса, пониженное тепловое сопротивление и высокая стойкость к термоциклированию, простота сборки.

### Пружинные контакты MiniSKiiP

Поверхность пружин MiniSKiiP имеет серебряное покрытие, что обеспечивает оптимальные контактные характеристики при давлении на пружину в диапазоне 4–6 Н. Основным критерием выбора материала покрытия контактных площадок печатной платы (PCB) является обеспечение стабильных свойств прижимного соединения в течение срока службы. Специальные ускоренные испытания подтверждают, что контактная пара «пружина – площадка PCB» надежно работает как при традиционных способах металлизации плат (SnPb), так и новых, соответствующих экологическим директивам RoHS [3, 4]. К ним относятся покрытие химическим оловом (Sn) с выравниванием горячим воздухом (Hot-Air-Leveling, HAL) и сплавом никель-золото ENIG (Ni/Au). Наилучшими контактными характеристиками обладает комбинация Ni/Au — посеребренный контакт. При использовании пружинных выводов не рекомендуется применение органических защитных покрытий (OSP, Organic Surface Protection).

При проектировании печатной платы (PCB) и сборке необходимо учитывать следующие факторы:

- Допустимо использование материалов PCB FR4, толщину омеднения необходимо выбирать в соответствии со стандартом IEC 326-3.
- Положение контактных площадок при проектировании платы выбирается в соответствии с чертежом, приведенным в тех-

нической документации на модуль, перед монтажом они должны быть абсолютно чистыми, на них не должны располагаться переходные отверстия (vias).

- Не допускается использование химических очистителей и спреев для очистки поверхности пружин.
- Подводящие силовые цепи питания DC+/DC– должны иметь максимально возможную площадь и быть компланарными. Для обеспечения плоско-параллельности можно использовать слои PCB.
- Максимальная высота компонентов, расположенных под прижимной крышкой, составляет 3,45 мм, они не должны находиться вблизи точек контакта крышки с печатной платой.
- Для обеспечения надежного соединения MiniSKiiP с печатной платой пружинные контакты выступают над поверхностью модуля на 1,1 мм, как показано на рис. 2.

Пружины изготавливаются из высокотехнологичного сплава K88, разработанного компаниями Wieland Werke и Olin Brass специально для данного способа соединения. Материал K88 отличается большим пределом текучести (550 МПа), хорошей способностью к формованию и изгибу, отличной электропроводностью и высокой временной стабильностью механических характеристик в диапазоне температур до 200 °С. Для стабилизации контактного сопротивления и предотвращения нарастания нитевидных кристаллов пружины пассивируются слоем серебра толщиной 3–5 мкм. Кроме этого, их наружная поверхность имеет защитное покрытие (0,1 мкм, сплав 50–55% Cu, 30–35% Sn, 13–17% Zn), предохраняющее от окисления. В результате принятых мер механические и контактные свойства выводов MiniSKiiP гарантируются в течение всего срока службы.

Для проверки стойкости прижимного соединения к электромиграции и нарастанию нитевидных кристаллов SEMIKRON проводит специальные тесты на воздействие коррозионно-активной среды (сернистый газ H<sub>2</sub>S высокой концентрации). Нитевидные кристаллы представляют собой токопроводящие структуры, которые могут расти на поверхности металлов при подаче напряжения смещения. Наиболее часто этот эффект наблюдается на олове и цинке, реже — на се-

ребре и золоте. Наиболее вероятной причиной появления кристаллов считается возникновение сжимающих напряжений. Процессы образования и роста нитевидных кристаллов подробно описаны в [4].

Рост нитевидных кристаллов на серебре, в отличие от других металлов, активизируется в агрессивных средах, что используется для проведения ускоренных испытаний. В результате подобных тестов наблюдается образование кристаллов на внешней поверхности пружинных контактов MiniSKiIP в области изгиба, где толщина защитного покрытия минимальна (рис. 2в).

Пружинные контакты установлены в пластиковом изолирующем корпусе (рис. 2б), и описанный эффект не приводит ни к каким нежелательным последствиям, поскольку минимальное расстояние между контактами намного превышает размер кристаллов. Более того, наличие «нитей» даже несколько уменьшает переходное сопротивление кон-

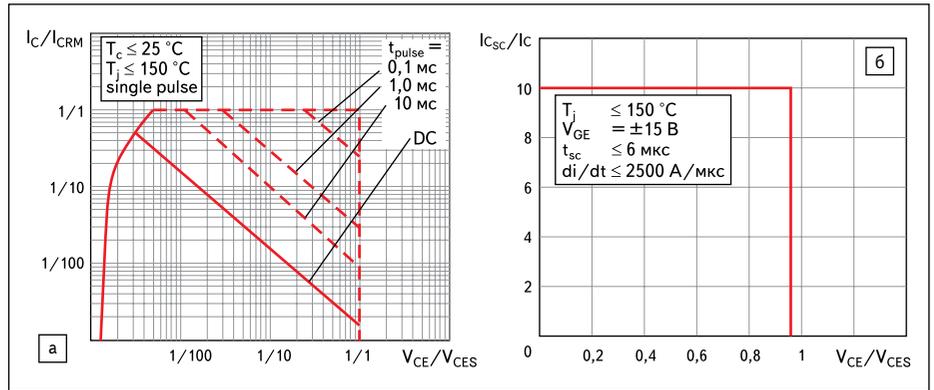


Рис. 3. Область безопасной работы MiniSKiIP: а) для режима переключения; б) для режима короткого замыкания

тактирующей пары. Испытания, проводимые в соответствии с условиями, приведенными в таблице 1, подтвердили отсутствие паразитных утечек.

Стабильность электрических характеристик контактной пары подтверждается в ходе специальных тестов сборки модуля MiniSKiIP IPM и тестовой печатной платы в соответствии с условиями, указанными в таблице 2. Для повышения достоверности испытаний перед их началом плата подвергается ускоренному «старению» в течение 1000 ч при температуре 85 °C и влажности 85%, а затем при температуре 150 °C.

Надежность пружинных соединений подтверждена и многолетним опытом эксплуата-

ции, прежде всего в лифтовых приводах, где чаще всего используются компоненты семейства MiniSKiIP. Достаточно наглядным является тот факт, что сегодня более 300 млн пружин успешно работает в модулях SEMIKRON по всему миру.

**Область безопасной работы и тепловые характеристики**

Как и для всех силовых ключей, работающих в импульсных режимах, у MiniIPM нормировано количество коротких замыканий (срабатываний защиты) в течение срока службы: оно не должно превышать 1000, а время между КЗ должно быть больше 1 с. На рис. 3 приведены характеристики области безопасной работы для нормального режима переключения и режима короткого замыкания (КЗ). Как показывает график SCSOA (рис. 3б), нормальным для данных модулей считается короткое замыкание при почти полном рабочем напряжении и 10-кратном токе коллектора. Допустимое время, отведенное на анализ состояния КЗ и отключение, у последних поколений тонкопленочных IGBT сокращено с 10 до 6 мкс.

При тепловом расчете необходимо учитывать способ измерения теплового сопротивления, отличающийся для модулей разной конструкции. Различными бывают и мето-

Таблица 1. Испытания на воздействие коррозионно-активной атмосферы

Вид испытаний	Условия испытаний
Предварительная подготовка	48 часов, 25 °C, относительная влажность 75%, 80 В напряжение смещения между соседними контактами
Воздействие коррозионно-активной атмосферы	240 часов, 25 °C, относительная влажность 75%, 80 В напряжение смещения между соседними контактами, H <sub>2</sub> S концентрация 10 ppm
Критерий отказа	Возрастание тока утечки > 10 мкА

Таблица 2. Испытания сборки MiniSKiIP IPM — PCB

Вид испытаний	Условия испытаний	Метод оценки
Хранение при высокой температуре	125 °C, 1000 часов	Измерение контактного сопротивления до и после воздействия
Хранение при высокой температуре и влажности	125 °C, 85% RH, 1000 часов	Измерение контактного сопротивления до и после воздействия
Термоциклирование при пропуске тока	-40...+125 °C, 100 циклов	Непрерывный мониторинг контактного сопротивления
Воздействие агрессивных газов по стандарту IEC 60068-2-60	H <sub>2</sub> S — 0,4 ppm SO <sub>2</sub> — 0,4 ppm NO <sub>2</sub> — 0,5 ppm Cl <sub>2</sub> — 0,1 ppm 21 день	Измерение контактного сопротивления до и после воздействия
Вибрационные воздействия	Синусоидальная вибрация 5 g; 2 часа по каждой оси	Непрерывный мониторинг контактного сопротивления
Ударные воздействия	Полусинусоидальные импульсы 30 g; ±3 по каждой оси	Непрерывный мониторинг контактного сопротивления

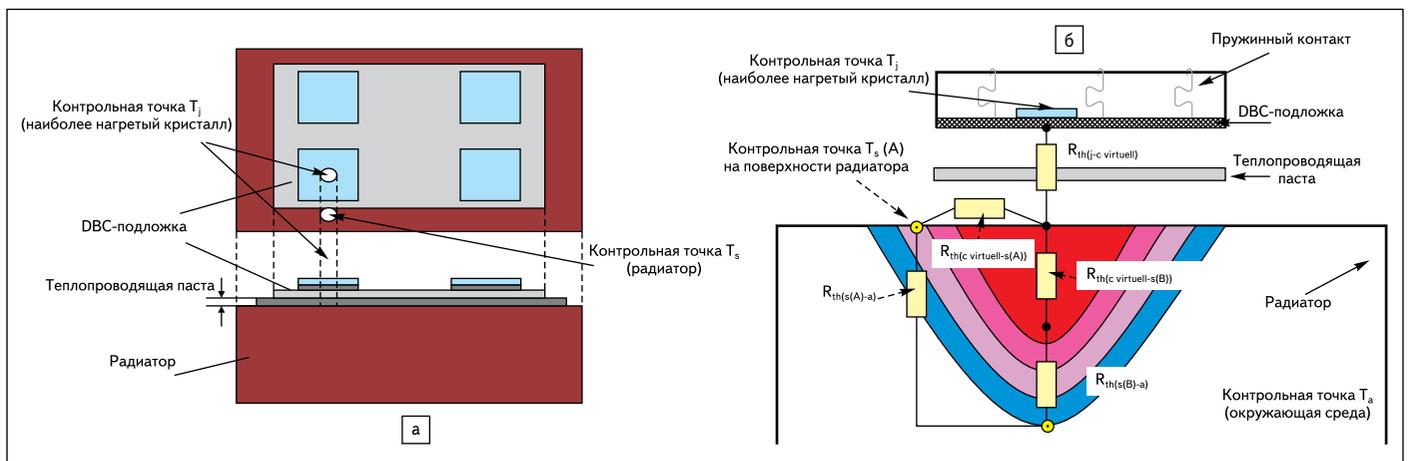


Рис. 4. Положение контрольных точек при измерении тепловых сопротивлений: а) эквивалентная схема; б) тепловая схема

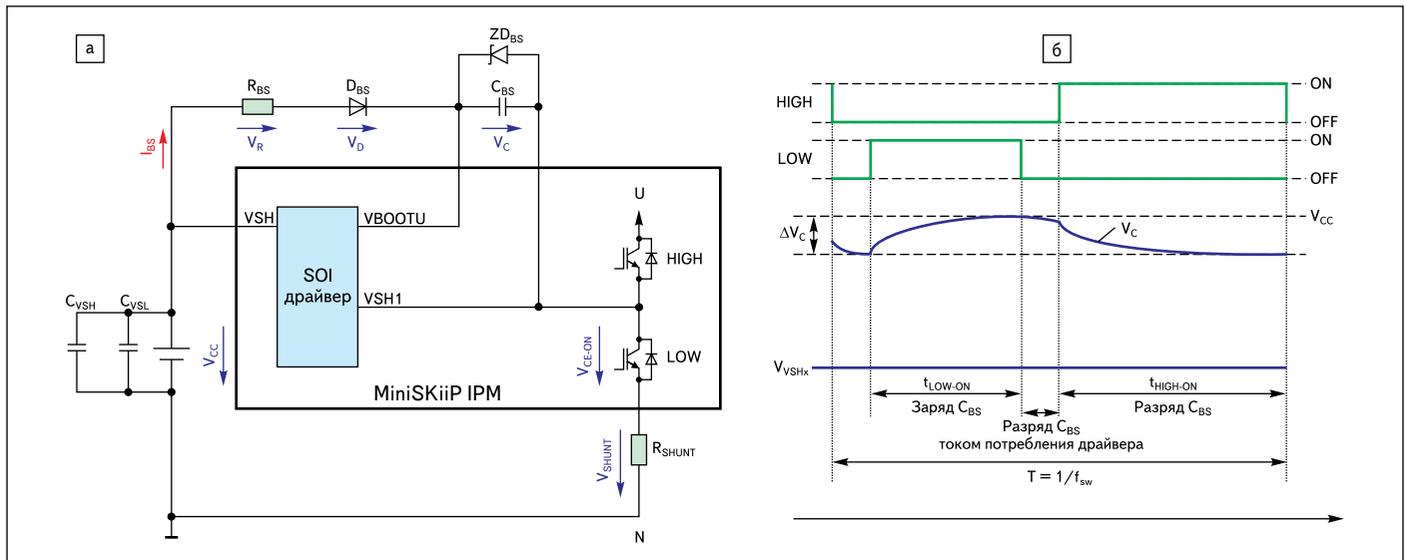


Рис. 5. Бутстрепная схема питания MiniSKiiP IPM

дики нормирования  $R_{th}$  у разных производителей. При исследовании тепловых характеристик MiniSKiiP температура радиатора измеряется на его поверхности рядом с модулем, в точке, максимально близкой к наиболее нагретому кристаллу (IGBT или диода), как показано на рис. 4а. Такой выбор положения датчика температуры тепловода является наиболее корректным при исследовании «безбазовых» компонентов (“baseless” в англоязычной литературе), у которых значения  $R_{th(j-c)}$  и  $R_{th(c-s)}$  являются «виртуальными» из-за отсутствия теплопроводящего основания корпуса. Для таких модулей физический смысл имеет только сопротивление «кристалл – радиатор»  $R_{th(j-s)}$ , а тепловые параметры и непосредственно температура «корпуса» могут быть определены расчетным способом [5].

Тепловое сопротивление вычисляется на основе значения температуры кристалла  $T_j$ , определяемой по напряжению насыщения  $V_{CEsat}$ . При малом токе коллектора обратная зависимость параметра  $V_{CEsat}$  от температуры является линейной, что позволяет рассчитывать перегрев кристалла с высокой точностью без использования датчиков. Метод, основанный на использовании калиброванной функции  $V_{CEsat} = f(T_j)$ , распространен и применяется многими производителями. В процессе измерения модуль нагружается номинальным током до установления теплового равновесия, это время составляет около 90 с. После этого нагрузка отключается, через открытый транзистор пропускается измерительный ток (100 мА) в течение 3 с и производится замер напряжения «коллектор – эмиттер» и расчет температуры кристалла. При определении напряжения насыщения измерительный прибор подключается к выводам модуля, следовательно, значение  $V_{CEm}$  включает падение напряжения на силовых терминалах  $V_{CEm} = V_{CE} + R_{CC+EE}$ . Погрешность

измерения, вносимая потерями на выводах модуля, учитывается при вычислении температуры кристалла.

На рис. 4б показана эквивалентная тепловая схема модуля MiniSKiiP. Области распределения температуры отмечены цветом: красный соответствует наиболее нагретым зонам. Тепловое сопротивление  $R_{th(j-s)}$  определяется на основании измеренного значения градиента температуры  $\Delta T$  «кристалл – радиатор» с помощью выражения:

$$R_{th(j-s)} = \Delta T_{(j-s)} / P.$$

Общее значение теплового сопротивления чипа относительно окружающей среды является суммой:

$$R_{th(j-a)} = R_{th(j-c \text{ virtuell})} + R_{th(c \text{ virtuell-s})} + R_{th(s-a)}$$

где первое и второе слагаемое представляют собой «виртуальные» значения тепловых сопротивлений «кристалл – корпус» и «корпус – радиатор».

### Цифровой интерфейс и бутстрепное питание

На всех логических входах MiniIPM, включая вход схемы защиты от перегрузки по току (CIN), установлены резисторы утечки на логическую «землю» GNDH, а входы /ERROR и /RESET через сопротивления привязаны к цепи питания VSH.

Для питания верхних каскадов устройства управления затворами рекомендуется бутстрепная схема (рис. 5а), широко применяемая в высоковольтных интегральных драйверах, не имеющих гальванической изоляции. Электролитический конденсатор  $C_{VSH}$  в цепи питания необходим для сглаживания низкочастотных пульсаций и обеспечения быстрого заряда бутстрепных емкостей. Его номинал рассчитывается по формуле:

$$C_{VSH} = Q_{VSH} / V_{CC} = E_{on} / (V_{Gon} \times V_{CC}),$$

где  $Q_{VSH}$  — заряд включения затвора ( $Q_{VSH} = E_{on} / V_{Gon}$ );  $V_{CC}$  — напряжение питания;  $E_{on}$  — энергия включения затвора;  $V_{Gon}$  — напряжение включения (+15 В).

Рекомендуемое значение  $C_{VSH}$  учитывающее разброс и временную стабильность параметров, составляет 10–22 мкФ. Параллельно электролиту следует установить керамический конденсатор  $C_{VSL}$  (100–220 нФ), необходимый для фильтрации ВЧ-шумов и защиты IC-драйвера от переходных перенапряжений. Обе емкости должны располагаться предельно близко к выводам модуля VSH и GNDH.

Потенциал эмиттера IGBT верхнего плеча «плавающий», он меняется вместе с выходным напряжением и является опорным для сигнала управления затвором транзистора HIGH. Для питания выходного каскада драйвера верхнего плеча нужен изолированный источник с общим выводом, подключенным к цепи VSH1 (рис. 5), соответственно, для работы 3-фазной схемы таких источников нужно три. Более простым решением, чаще всего используемым в подобных случаях, является бутстрепная схема. Как показано на рис. 5, для ее реализации требуется несколько дискретных компонентов, задача которых состоит в обеспечении и поддержании заряда, необходимого для работы драйвера IGBT канала HIGH:  $C_{BS}$ ,  $R_{BS}$ ,  $ZD_{BS}$ ,  $D_{BS}$ .

Резистор  $R_{BS}$  необходим для ограничения тока заряда бутстрепной емкости  $C_{BS}$ , который происходит через быстрый высоковольтный диод  $D_{BS}$  при открытии транзистора IGBT канала LOW. Диод  $D_{BS}$  блокирует обратный разряд  $C_{BS}$  на источник  $V_{CC}$ , когда нижний IGBT закрыт и выходное напряжение имеет высокий уровень. Стабилитрон  $ZD_{BS}$  предназначен для защиты драйвера и затвора от перенапряжений.

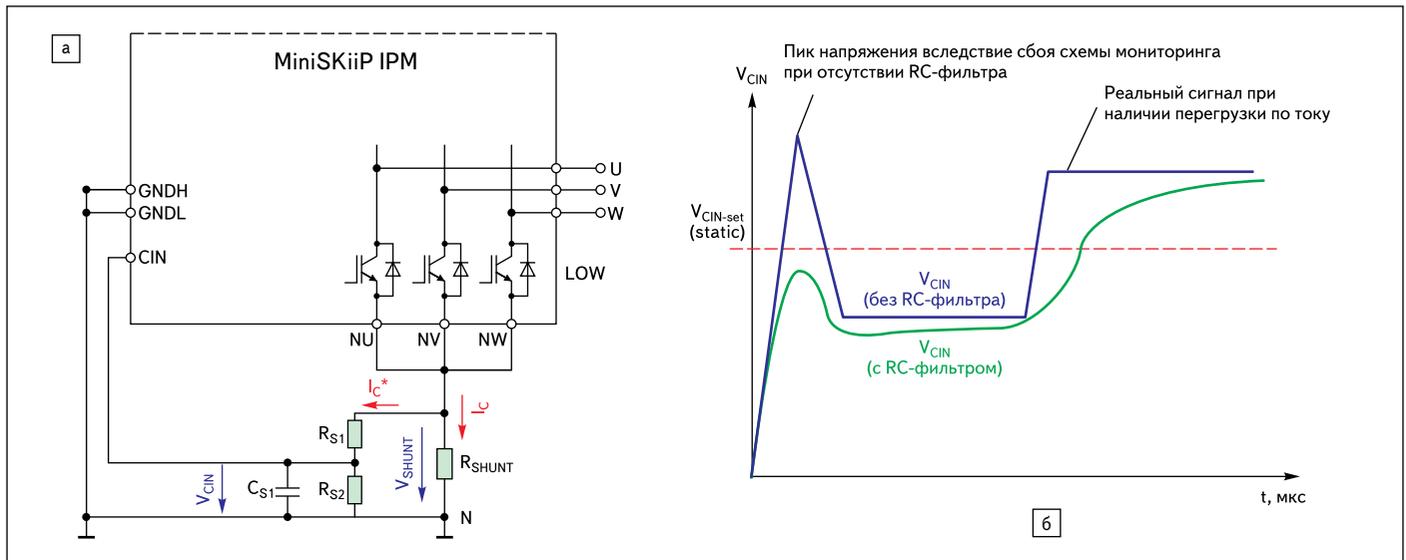


Рис. 6. Схема защиты от перегрузки по току MiniSKiiP IPM

Чтобы драйвер верхнего плеча начал работать, бутстрепный конденсатор  $C_{BS}$  должен быть заряжен до уровня  $V_{C_{MAX}} \approx V_{CC}$ . Как правило, для этого требуется подача одного или нескольких отпирающих импульсов на IGBT нижнего плеча. При нормальной работе схемы напряжение  $V_C$  меняется между минимальным и максимальным значением в пределах  $\Delta V_C$ , как показано на рис. 56. Его нарастание (заряд  $C_{BS}$ ) происходит при открывании IGBT нижнего плеча, а спад за счет тока потребления драйвера канала HIGH — в течение «мертвого времени» и при открывании верхнего IGBT.

На работу бутстрепной схемы оказывают влияние все элементы схемы, включая токовый шунт  $R_{SHUNT}$ . При ее анализе необходимо учитывать ток потребления драйвера  $I_{QD}$ , напряжение питания  $V_{CC}$ , минимальную длительность импульса включения IGBT LOW —  $t_{low\_on\_min}$  и максимальную длительность импульса включения IGBT HIGH —  $t_{high\_on\_max}$ .

Расчет компонентов схемы следует производить исходя из следующих соображений: емкость  $C_{BS}$  должна успеть зарядиться в течение времени  $t_{low\_on\_min}$  и не разрядиться ниже значения  $V_{C_{MIN}}$  в течение времени  $t_{high\_on\_max}$ . Величина  $V_C$  при заряде рассчитывается следующим образом:

$$V_C = V_{CC} - V_R - V_D - V_{CE\_ON} - V_{SHUNT}$$

Учитывая, что  $\tau = C_{BS} \times R_{BS} = t_{charge} = t_{low\_on\_min}$  и  $t_{discharge} = t_{high\_on\_max}$ :

$$C_{BS} = Q_{BS} / \Delta V_C = ((I_{BS} + I_{QD}) \times t_{discharge}) / \Delta V_C$$

$$C_{BS} = t_{charge} / C_{BS} = (t_{charge} \times \Delta V_C) / ((I_{BS} + I_{QD}) \times t_{discharge})$$

#### Схема защиты

Для предотвращения возникновения сквозных токов схема управления инвертором

должна формировать так называемое «мертвое время» ( $t_{dt}$  — dead time) между запирающим одним транзистором полумоста и отпиранием другого. Необходимо учесть, что драйвер MiniSKiiP IPM не имеет этой функции, интервал времени  $t_{dt}$  должен быть задан внешним контроллером.

Одним из важнейших видов защиты является предотвращение выхода IGBT из насыщения (desaturation), для ее реализации служит функция UVLO (Under Voltage Lockout). Если напряжение питания любого из каскадов драйвера окажется ниже заданного значения ( $V_{SUV(th)}$ ), все транзисторы выключаются, и схема защиты выдает сигнал неисправности низкого уровня (ERROR = LOW). Для сброса этого состояния на все входы должен быть подан сигнал логического нуля ( $HIN^{**} = LIN^{**} = LOW$ ) на время  $t_{d(err)CLR}$ .

Безаварийная работа любого силового преобразователя обеспечивается при наличии защиты выходного каскада от перегрузки по току и КЗ. В MiniSKiiP IPM использован простейший вариант мониторинга тока инвертора с помощью резистивного шунта  $R_{SHUNT}$ . Организация схемы защиты показана на рис. 6а: падение напряжения на шунте  $V_{SHUNT} = I_C \times R_{SHUNT}$ , вызванное протеканием тока нагрузки, через делитель и фильтр ( $R_{S1}$ ,  $R_{S2}$ ,  $C_{S1}$ ) подаются на вход CIN модуля. При превышении этим сигналом заданного уровня (типичное значение 0,5 В) все IGBT отключаются.

В качестве шунта рекомендуется использовать низкочастотное сопротивление в корпусе smd, TO-220, TO-247, такие элементы производит компания CADDOCK. Конденсатор фильтра  $C_{S1}$  предназначен для подавления пиков напряжения, вызванных высоким значением скорости коммутации  $di/dt$  и броском тока при обратном восстановлении оппозитных диодов IGBT (рис. 6б). С помощью делителя задается уро-

вень тока отключения  $I_{TRIP}$  в соответствии с формулой  $I_{TRIP} = 0,5(R_{S1} + R_{S2}) / (R_{S1} \times R_{S2})$ .

Запирание транзисторов инвертора происходит при подаче сигнала низкого уровня на вход стробирования (/ERRIN = LOW), определении состояния UVLO или срабатывании защиты от перегрузки по току ( $V_{CIN} > 0,5$  В). Во всех описанных случаях на выходе схемы защиты появляется обобщенный сигнал неисправности низкого уровня (/ERROUT = LOW).

Все модули семейства MiniSKiiP имеют в своем составе термодатчик (терморезистор с NTC-характеристикой), который может быть использован для мониторинга перегрева радиатора и организации тепловой защиты. Следует учесть, что сенсор не способен корректно отображать температуру кристаллов в динамических режимах из-за тепловой инерции теплостока. Номинальное сопротивление датчика  $R_{25} = 5000$  Ом (при 25 °C или 298,15 К), температурная зависимость отражена в соответствующих диаграммах и графиках. Величина сопротивления  $R_T$  при температуре  $T$  определяется по формуле:

$$R_T = R_{25} \times \exp^{B(1/T - 1/25)}$$

В условиях принудительного воздушного охлаждения радиатора со стандартным профилем рекомендуемая температура отключения составляет 115 °C. Для измерения значения  $R_T$  используется резистивный мост или обычный делитель напряжения. Параллельно термодатчику в делителе рекомендуется устанавливать конденсатор, сглаживающий коммутационные помехи, наличие которых может привести к ложным срабатываниям схемы защиты.

#### Электрическая изоляция

Как видно на рис. 7а, термодатчик на DBC-плате расположен в непосредственной близости от чипов IGBT и диода. Внутреннее

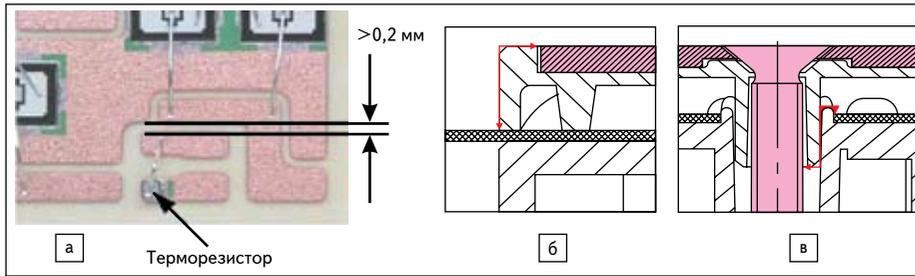


Рис. 7. а) Положение термодатчика на DBC-плате; б) путь тока утечки «прижимная пластина — PCB»; в) путь тока утечки «крепежный болт — PCB»

пространство MiniSKiiP IPM при изготовлении заливается силиконовым гелем, имеющим высокие изоляционные свойства, в результате конструктив модуля соответствует базовым требованиям по напряжению изоляции (АС 2,5 кВ в течение 1 мин). Параметры изоляции тестируются у 100% производимых компонентов.

Однако следует учесть, что электрические перегрузки, вызванные коротким замыканием, могут привести к разрушению выводов чипов и последующему возникновению дугового разряда. Предсказать путь распространения плазмы при этом невозможно, и в этих условиях терморезистор может оказаться под действием высокого напряжения. Соответственно в изделиях с повышенными требованиями по изоляции (например, медтехника) следует организовывать дополнительные каскады потенциальной развязки.

Прижимная крышка MiniSKiiP имеет металлическую армирующую вставку, электрически соединенную через крепежный винт с теплоотводом (рис. 76, в). Поскольку потенциал вставки и радиатора одинаков, их положение влияет на длину пути тока утечки, прежде всего, по внешней поверхности модуля. Основные размеры, влияющие на изоляционные свойства изделия, приведены в таблице 3.

## Заключение

По данным исследований рынка силовых полупроводниковых компонентов, которые провел британский исследовательский институт IMS (British Market Research Institute), в области производства миниатюрных модулей SiC доля рынка SEMIKRON составляет 30% в мире и более 46% — в Европе. Ожидается, что популярность данных компонентов с интегрированным драйвером окажется еще больше. Это подтверждается постоянно растущим спросом на модули IPM, предназначенные для разработки промышленных приводов средней мощности.

Для создания интеллектуального силового модуля на базе MiniSKiiP была разра-

ботана интегральная высоковольтная микросхема (HVIC) 7-канальной схемы управления затворами IGBT. Кристалл драйвера устанавливается непосредственно на керамическую DBC-подложку модуля, что обеспечивает эффективный отвод тепла и кратчайшие связи выходов драйвера с затворами IGBT. Благодаря усовершенствованной схеме сдвига уровня удалось существенно повысить помехозащищенность и надежность работы нового IPM. Модули серии MiniIPM способны стать новым промышленным стандартом в диапазоне приводных мощностей 5–15 кВт.

## Литература

1. Колпаков А. Mini IPM — интеллект и компактность // Силовая электроника. 2008. № 4.
2. Колпаков А. Драйверы MOSFET/IGBT-технологии SOI с усовершенствованными каскадами сдвига уровня // Силовая электроника. 2008. № 4.
3. MiniSKiiP IPM Technical Explanations. SEMIKRON International, 2009.
4. Chudnovsky B. H. Degradation of Power Contact in Industrial Atmosphere: Silver Corrosion and Whiskers. Proceedings of the 48<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2002.
5. Колпаков А. Контрольная точка, или Как читать datasheet между строк // Электронные компоненты. 2005. № 6.

Таблица 3. Длина пути тока утечки для MiniSKiiP IPM 600 В

Вне модуля		
	Утечка по поверхности, мм	Утечка по конструкции, мм
Пружинные контакты — радиатор и крепежный винт	—	≥3,0
Пружинные контакты с разным потенциалом	≥6,0	—
Металлическая вставка — печатная плата	≥8,3	—
Внутри модуля		
	Утечка по поверхности, мм	Утечка по конструкции, мм
Пружинные контакты — радиатор и крепежный винт	—	≥3,0
Пружинные контакты с разным потенциалом (кроме контактов термодатчика)	≥1,7	≥1,0
Крепежный винт — печатная плата	≥7,5	—