

Особенности разработки IGBT-драйверов

на основе ядра SCALE-2

Анатолий Бербенец

berben@efo.ru

Выпущенное в 2010 г. фирмой ST-Concept драйверное ядро, названное SCALE-2, является развитием популярного ядра SCALE-1, на основе которого уже много лет серийно производятся драйверы для управления IGBT-модулями практически всех мировых производителей [1]. Ядра также предназначены для драйверов MOSFET и модулей на их основе. Преимущества, технические характеристики и области применения нового ядра SCALE-2 уже освещались в ряде публикаций [2, 3]. В данной статье рассматриваются особенности, которые необходимо учитывать при разработке драйверов на основе ядра SCALE-2. Рассмотрены одноканальные и двухканальные ядра 2SC0108T, 2SC0435T, 2SC0650P, 1SC2060P.

На основе многолетнего опыта работы службы технической поддержки фирмы ST-Concept был сделан один простой вывод: в 99% случаев отказов драйверов на основе ядер SCALE причиной является невнимательное отношение пользователей к особенностям их применения в конкретных электрических

схемах и конструктивах. Эти особенности и описываются ниже на основе типовых примеров неправильного и правильного применения, и их можно рассматривать как краткие правила проектирования драйверов для инверторных приложений. Более детально они описаны в [4] на сайте производителя.

Успешная разработка драйверов на основе ядер SCALE-2 зависит от учета многих факторов, ключевыми из которых являются:

- топология преобразователя (например, параллельное включение IGBT-модулей);
- выбор электрической схемы и ее компонентов;
- геометрическое местоположение драйвера в конструкции преобразователя;
- влияния магнитных полей;
- изоляционные промежутки по воздуху и поверхности печатной платы;
- топология печатной платы;
- правильное применение стандартов;
- электромагнитная совместимость.

Рассмотрим три группы особенностей применения драйверных ядер SCALE-2:

- Особенности, вытекающие из топологий включения силовых ключей: многоуровневые, параллельные.
- Примеры использования функций ядер SCALE-2 в конкретных схемах включения.
- Конструктивные особенности разводки печатной платы драйвера и построения системы драйвер/силовой модуль в целом.

Применение SCALE-2 в различных топологиях инверторов

Трехуровневые и многоуровневые топологии

При работе трехуровневых преобразователей (рис. 1) схема управления обеспечивает невозможность выключения внутренних IGBT/MOSFET-ключей ветви в то время, когда наружные ключи находятся во включенном состоянии, чтобы исключить приложение полного напряжения DC-линии к соответствующим силовым ключам. Эта особенность должна учитываться при использовании драйверов SCALE-2. Подобная ситуация может произойти в случае, когда встроенные функции защиты драйвера от КЗ и понижения напряжения источника питания обнаруживают такое событие.

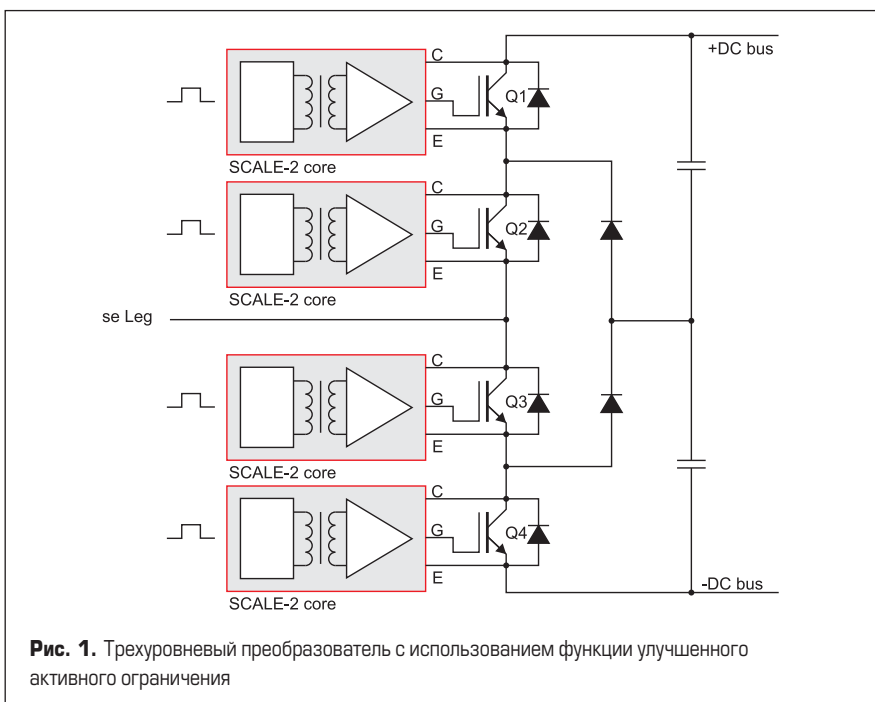


Рис. 1. Трехуровневый преобразователь с использованием функции улучшенного активного ограничения

В этом случае мгновенно выключается соответствующий канал драйвера. Силовые ключи обычно не рассчитываются на то, чтобы выдержать полное напряжение DC-линии. Выход ключа из строя в этом случае может быть предотвращен с помощью какой-либо защитной схемы.

Встроенная в ядро SCALE-2 функция улучшенного активного ограничения Advanced Active Clamping как раз и предназначена для защиты ключа от избыточного напряжения коллектор-эмиттер. Но в случае такой аварийной ситуации необходимо сформировать специальную последовательность выключения каналов драйвера — вместо того, чтобы подавать команды выключения на ключи в любой момент в течение 3 мкс после прихода сигнала ошибки, как это предусмотрено стандартно. В данном случае рекомендуется подавать одну общую команду на выключение всех ключей инвертора — это обеспечит стабильное состояние системы после прихода сигнала ошибки. Более подробно эта ситуация описана в [5].

Примечание: функция защиты чипсета SCALE-2 от понижения напряжения не может быть отключена. Каналы управления затворами силовых ключей отключаются сразу после появления события на первичной или вторичной стороне. Таким образом, использование встроенной функции активного ограничения является наилучшей защитой. Но в рассматриваемых многоуровневых схемах производитель рекомендует проводить окончательную проверку эффективности срабатывания функции активного ограничения после сборки всей системы в целом.

Параллельные топологии

Особенности использования функции улучшенного активного ограничения (УАО) для управления параллельно соединенными IGBT одним драйверным ядром

Активное ограничение — это метод неполного включения силового полупроводникового ключа в случае, когда его напряжение коллектор-эмиттер (сток-исток) превышает заранее определенное пороговое значение. Силовой ключ в этом случае переходит в линейный режим работы. Типовые схемы актив-

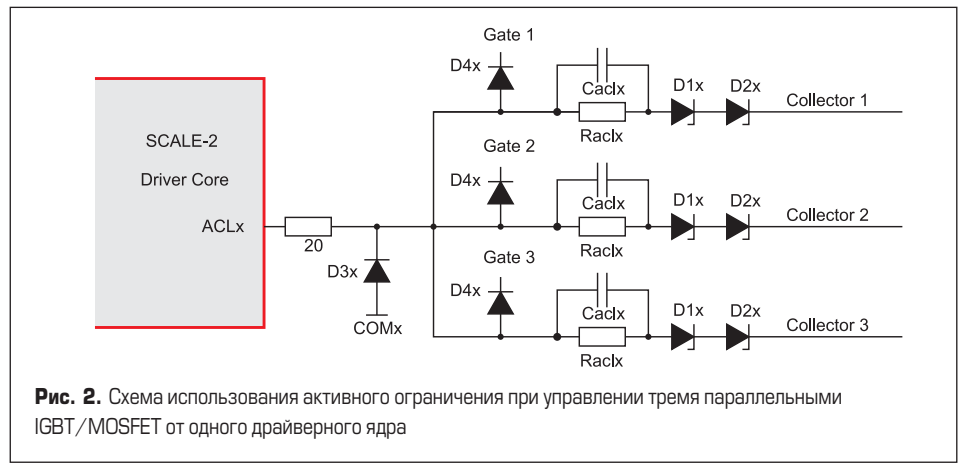


Рис. 2. Схема использования активного ограничения при управлении тремя параллельными IGBT/MOSFET от одного драйверного ядра

ного ограничения используют одну петлю обратной связи с коллектора IGBT через ограничитель переходных импульсов (TVS) на затвор транзистора. Большинство драйверных ядер SCALE-2 поддерживают фирменную функцию CT-Concept УАО, в которой есть второй канал обратной связи, подаваемой на вывод ACLx: как только напряжение на правом выводе 20-Ом резистора (рис. 2) превышает 1,3 В, выключаемый транзистор ускоренно запирается, что, в свою очередь, снижает потери в ограничителе TVS. Отключаемый транзистор полностью закрыт, когда напряжение на правом выводе 20-Ом резистора достигает 20 В (измеряется относительно общего провода COMx). При управлении параллельно-включенными IGBT/MOSFET от одного драйверного ядра необходимо заводить обратную связь УАО на вывод ACLx от каждого из транзисторов (рекомендованная схема приведена на рис. 2). Для выбора конкретных номиналов и типов TVS, Rclx, Cdcx, D3x, D4x следует обратиться к соответствующим руководствам по применению драйверных ядер. При этом хотя бы один TVS при последовательном соединении нескольких (D4x на рис. 2) должен обладать проводимостью в обе стороны.

Измерение напряжения насыщения включенного транзистора Vcesat при управлении параллельными IGBT/MOSFET от одного драйверного ядра

Производитель рекомендует использовать только одну связь для измерения Vcesat парал-

лельно соединенных силовых ключей, этого достаточно для защиты всех транзисторов группы рис. 3. Не рекомендуется подключать дополнительные выводы коллекторов остальных IGBT-модулей, так как это может создать значительные токи смещения или даже вызвать возбуждение системы. Более того, использование Vcesat для мониторинга токовых перегрузок в параллельных топологиях не рекомендуется.

Управление соединенными параллельно силовыми ключами стандартно ведется от одного драйвера, хотя для драйверов на основе ядра SCALE-2 можно подключить затвор каждого транзистора к своему драйверу — так называемый способ прямого параллельного включения (direct paralleling). Особенности этого способа описаны в [6].

Примеры использования ядер SCALE-2 в конкретных схемах включения

Использование оптического интерфейса в драйверах на основе SCALE-2

Ядра SCALE-2 можно легко использовать в тех случаях, когда управляющие ШИМ-сигналы и выходные сигналы ошибки должны быть представлены в оптической форме. Помимо стандартных готовых драйверов с оптическим интерфейсом для высоковольтных IGBT-модулей, можно использовать оптический интерфейс перед драйверным ядром ядра SCALE-2 при разработке собственного

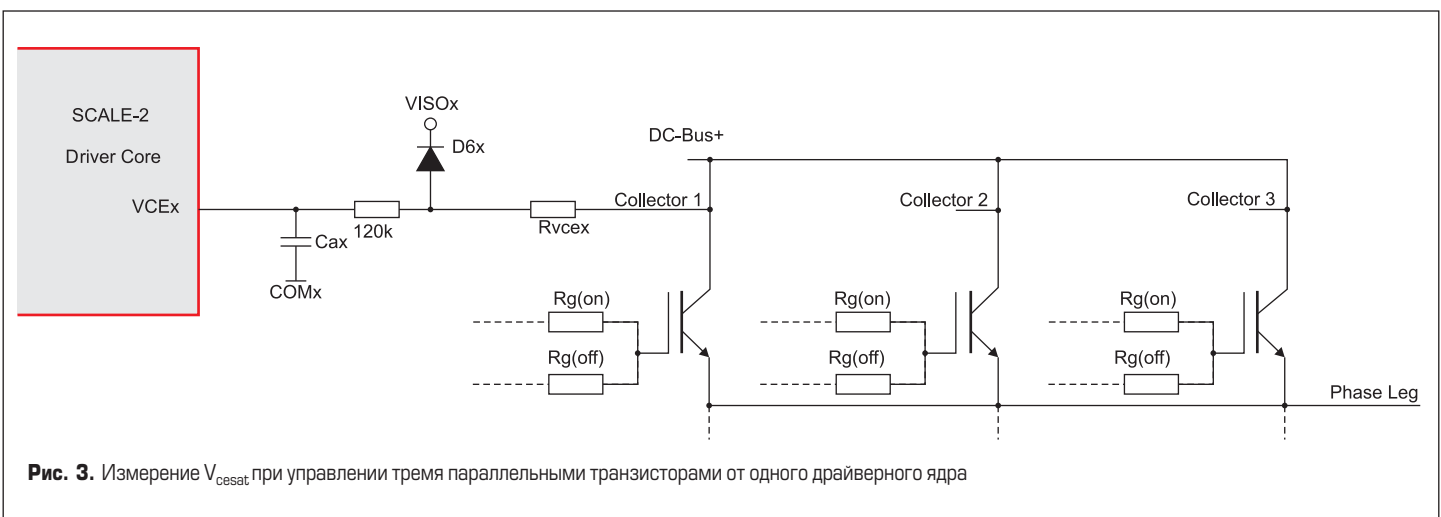


Рис. 3. Измерение Vcesat при управлении тремя параллельными транзисторами от одного драйверного ядра

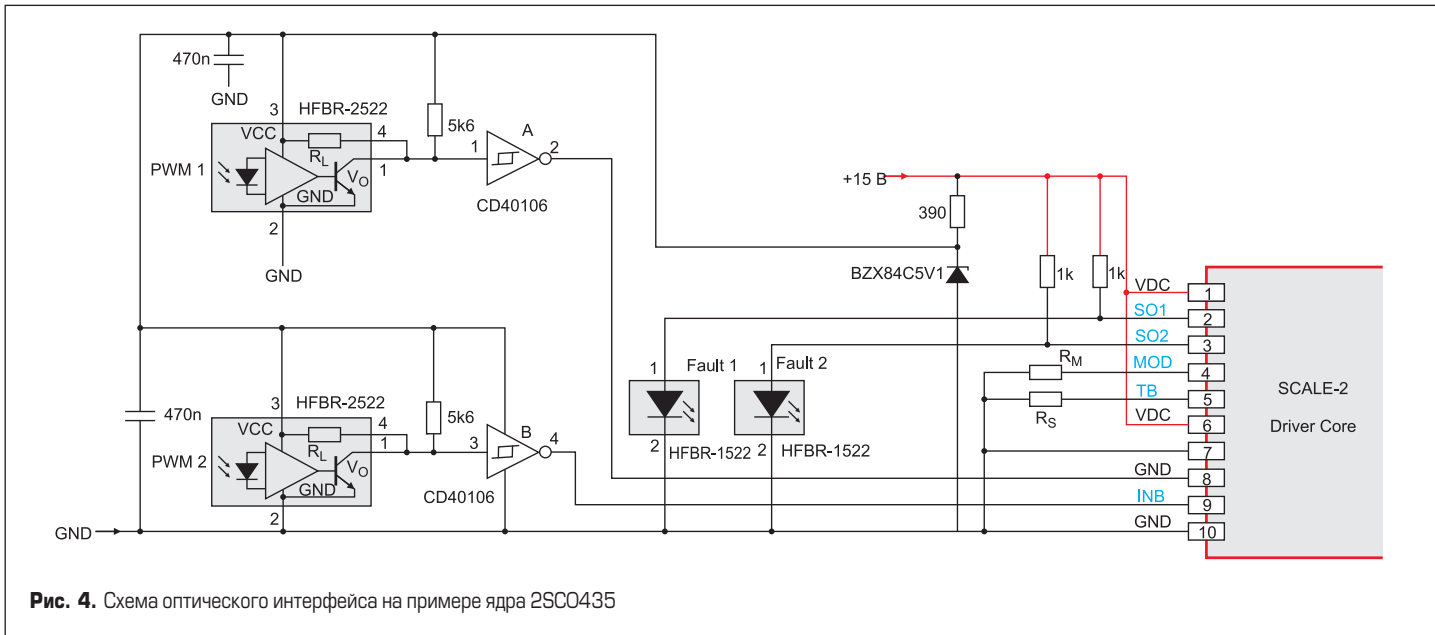


Рис. 4. Схема оптического интерфейса на примере ядра 2SC0435

драйвера. На рис. 4 приведен пример оптического интерфейса с использованием стандартных оптронов Avago Technologies типа HFBR.

Триггер Шмитта типа CD40106 инвертирует сигнал HFBR-2522 в логический сигнал 5 В, который подается на управляющий вход драйвера. Оптическая развязка выходов ошибки SO1, SO2, имеющих открытый коллектор, выполнена подключением подтягивающих резисторов 1 кОм. В нормальном состоянии светодиода светятся и выключаются в случае состояния ошибки. Ток светодиода в нормальном состоянии около 15 мА. В случае состояния неисправности/ошибки этот ток протекает через выводы SO1, SO2 — 20 мА.

Если драйвер модулей состоит из двух параллельно включенных ядер, то оптический интерфейс для такого драйвера можно реализовать, только если драйверные ядра включены в режим прямой (DIRECT MODE) независимой работы каналов. Такой режим включается подсоединением выводов MOD к общему проводу (GND). При этом входы INA, INB каждого из ядер включаются параллельно.

Подавление коротких импульсных помех по входам INA и INB

Драйверные ядра SCALE-2 имеют очень короткое время задержки распространения сигнала от входа к выходу, типовое значение <90 нс. В это время входит также встроенное подавление коротких импульсов <35 нс.

Это защищает от ложных переключений драйвера под воздействием возможных электромагнитных помех. Однако в ряде применений этого может быть недостаточно. На рис. 5 приведен вариант схемы увеличения длительности подавляемых входных импульсов. Не рекомендуется подключать входные управляющие сигналы непосредственно к выводам INA и INB, так как это может значительно увеличить джиттер задержки времени распространения. Для этого следует использовать триггеры Шмитта, как это показано на рис. 5. В случае необходимости параллельного включения каналов драйвера объединение соответствующих входов INA и INB следует делать после триггеров Шмитта, включенных в каждый канал. Использование триггеров Шмитта не рекомендуется в случае включения драйверных ядер в режиме прямого управления силовыми ключами (на каждый параллельно соединенный ключ — свой канал драйвера). В этом случае триггер Шмитта, имеющий собственный потенциально больший разброс задержки распространения, может вызвать опасные динамические токи при переключении. Приведем расчетные формулы для определения значений R1, C1 с учетом порогов переключения триггера Шмитта.

Минимальное время подавления импульсов при включении $T_{min,on}$ (временное окно нечувствительности входа при включении):

$$T_{min,on} = R_1 C_1 \ln(V_{DD} / (V_{DD} - V_{TH,high})),$$

где $V_{TH,high}$ — верхний порог срабатывания триггера; V_{DD} — логический уровень включения по входам Inx.

Аналогично минимальное время подавления импульсов при выключении $T_{min,off}$:

$$T_{min,off} = R_1 C_1 \ln(V_{DD} / V_{TH,low}),$$

где $V_{TH,low}$ — нижний порог срабатывания триггера; V_{DD} — логический уровень включения по входам Inx.

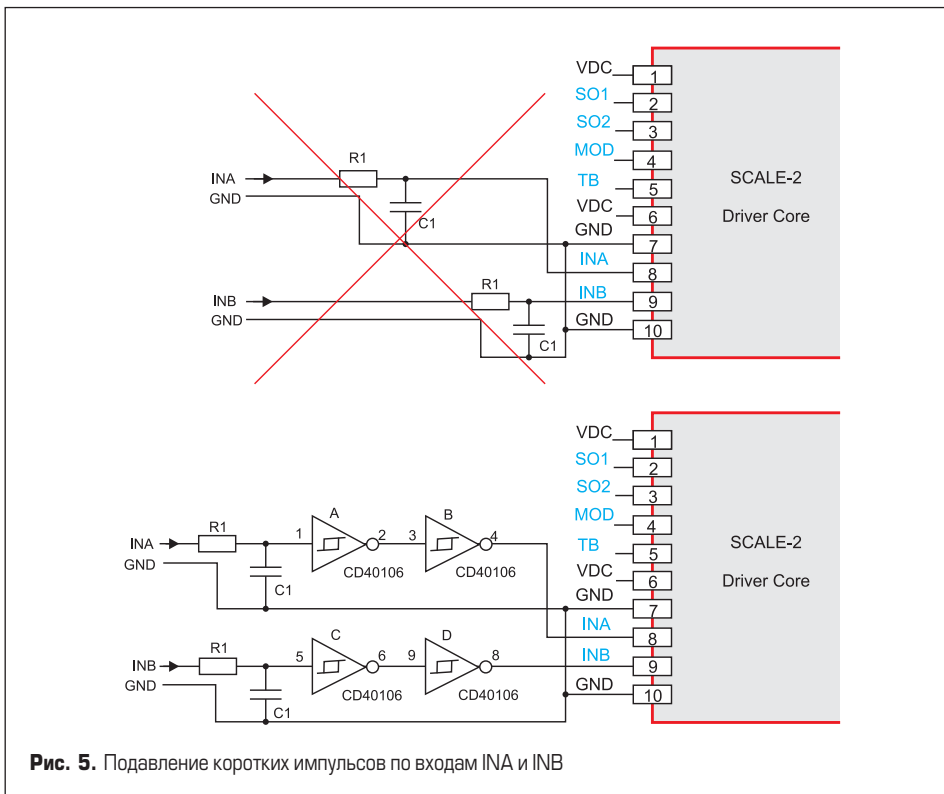


Рис. 5. Подавление коротких импульсов по входам INA и INB

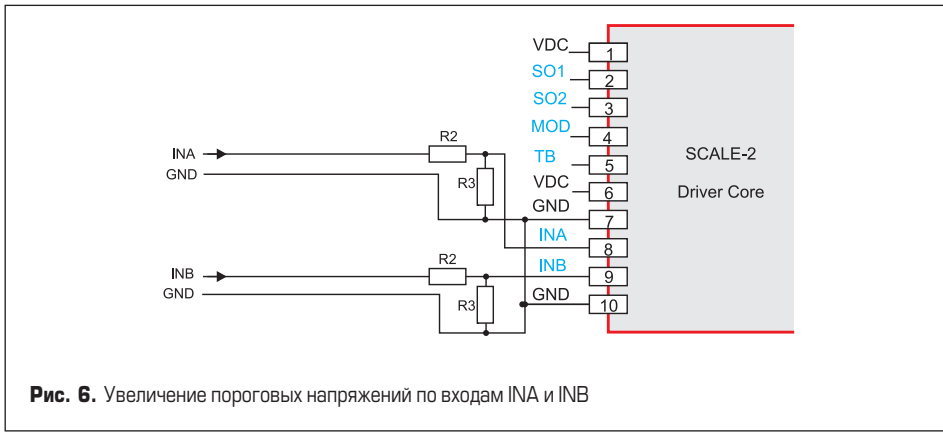


Рис. 6. Увеличение пороговых напряжений по входам INA и INB

Например:

для $T_{min,on} = 500$ нс, $R_1 = 3,3$ кОм, $V_{TH,high} = 10$ В, $V_{DD} = 15$ В получим $C_1 = 138$ пФ;
 для $T_{min,off} = 1$ мкс, $R_1 = 3,3$ кОм, $V_{TH,low} = 5$ В, $V_{DD} = 15$ В получим $C_1 = 276$ пФ.

Повышение нечувствительности к помехам по входам INA и INB

Стандартно каналы драйверов SCALE-2 включаются при уровне сигнала управления 2,6 В на входах INA и INB и выключаются при уровне 1,3 В. Таким образом, гистерезис составляет 1,3 В. В некоторых применениях с очень высоким уровнем помех этого гистерезиса может оказаться недостаточно, чтобы предотвратить ложные срабатывания драйверов. В этом случае полезно повысить пороги срабатывания. Наиболее просто это сделать с помощью резистивного делителя, подключаемого максимально близко к выводам INA и INB на печатной плате. Пример схемы приведен на рис. 6. Если $R_1 = 3,3$ кОм, $R_2 = 1$ кОм, INA = 15 В при включении, то без резистивного делителя включение драйвера произойдет при напряжении 2,6 В, а при использовании делителя — при 11,2 В. Выключение без делителя произойдет при 1,3 В, а с делителем — при 5,6 В.

Дополнительные развязывающие конденсаторы C1x и C2x

Ядра драйверов SCALE-2 содержат развязывающие конденсаторы на вторичной стороне встроенного DC/DC-преобразователя. Эти конденсаторы обеспечивают быстрый

перезаряд емкости затвора силовых ключей через MOSFET выходного каскада драйвера. Для IGBT и MOSFET силовых ключей минимальная рекомендуемая емкость развязывающего конденсатора составляет 3 мкФ на каждый 1 МКл заряда затвора силового ключа. В зависимости от типа силового ключа встроенной в драйвер емкости может быть достаточно либо нет. В последнем случае ее необходимо добавить до нужного значения, установив на печатную плату драйвера. Внешние развязывающие конденсаторы должны быть установлены между выводами VISOx и Vex (C1x) и Vex и COMx (C2x), где «x» означает номер канала (либо 1 и 2, либо 1 для одноканального ядра). Эти конденсаторы должны быть керамическими и установлены максимально близко к выводам драйверного ядра. Использовать электролитические или танталовые конденсаторы не рекомендуется. Рабочее напряжение керамических конденсаторов должно быть >20 В. При выборе необходимо учитывать известные зависимости уменьшения емкости керамических конденсаторов от температуры и приложенного напряжения.

Ядро SCALE-2.

Режим управления «MOSFET»

Как уже упоминалось, драйверы на ядре SCALE-2 применяются для управления как IGBT, так и MOSFET. В режиме управления IGBT напряжение на выходе драйвера изменяется от +15 В для включения силового ключа и до -10 В для его выключения. Для драйве-

ров SCALE-2 (за исключением 2SC0108T) есть возможность установить режим, называемый «MOSFET», когда напряжение выключения составляет 0 В.

Последовательность шагов для включения этого режима следующая:

- Соединить выводы COMx и VEx на вторичной стороне. Это должно быть сделано при выключенном источнике питания драйвера, чтобы не повредить выходную ASIC-микросхему. Конденсатор C21 на рис. 7 может быть оставлен, если это требуется, исходя из затворной емкости. Блокирующий конденсатор C22, соединяющий выводы COMx и Vex, может быть удален, так как фактически становится замкнутым.
- Установить требуемое напряжение включения. Источник питания Vcc на первичной стороне по-прежнему должен быть +15 В. Напряжение источника питания на вторичной стороне VISOx относительно COMx должно быть установлено в диапазоне 10–20 В через вывод VDC. Оно соответствует напряжению включения силового MOSFET. Коэффициент передачи от VDC к VISOx составляет 1,67. Значение VDC ниже 5,2 В вызывает ошибки срабатывания защиты по понижению напряжения в режиме «MOSFET». Например, при установке VDC = 6 В получим напряжение включения на выходе 10 В. Необходимо также принять во внимание, что устанавливаемое напряжение зависит от требуемой выходной мощности драйвера и температуры.
- Опорное напряжение V_{TH} для мониторинга V_{ce} (устанавливается посредством R_{th}) должно быть установлено не ниже или равным 4 В относительно COMx.

Необходимо помнить, что режим «MOSFET» предназначен для управления ультрабыстрыми MOSFET, соответственно, все задержки включения могут быть сведены к минимуму. MOSFET имеют низкий порог включения, поэтому использование режима «MOSFET» не всегда целесообразно. Для управления MOSFET может быть использован и IGBT-режим, что может дать более устойчивое переключение благодаря отрицательному уровню при выключении.

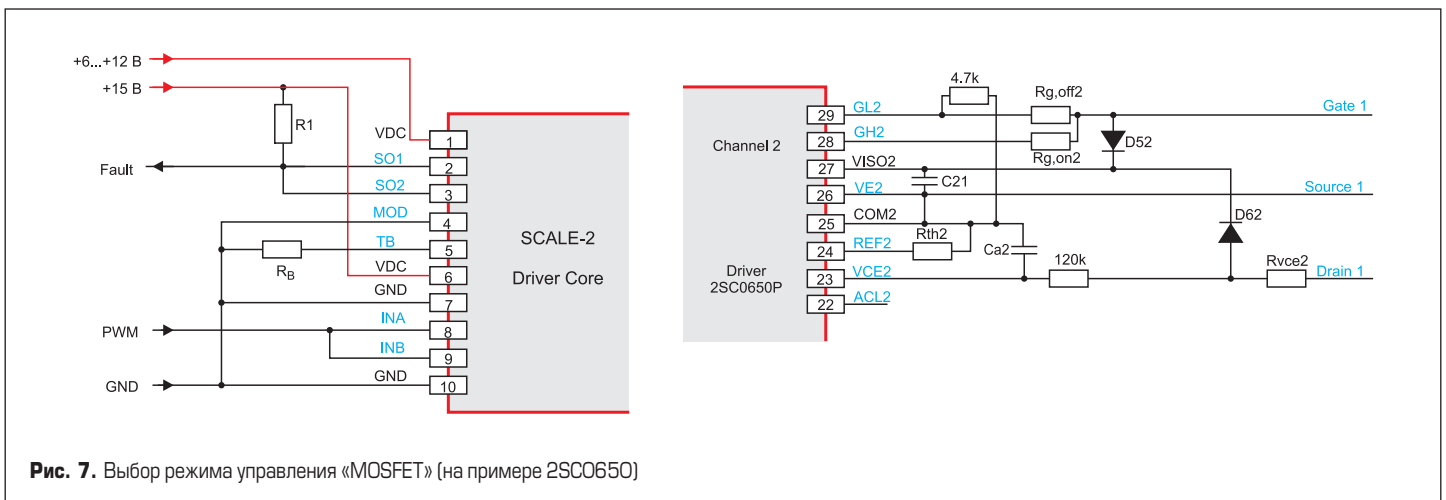


Рис. 7. Выбор режима управления «MOSFET» (на примере 2SC0650)

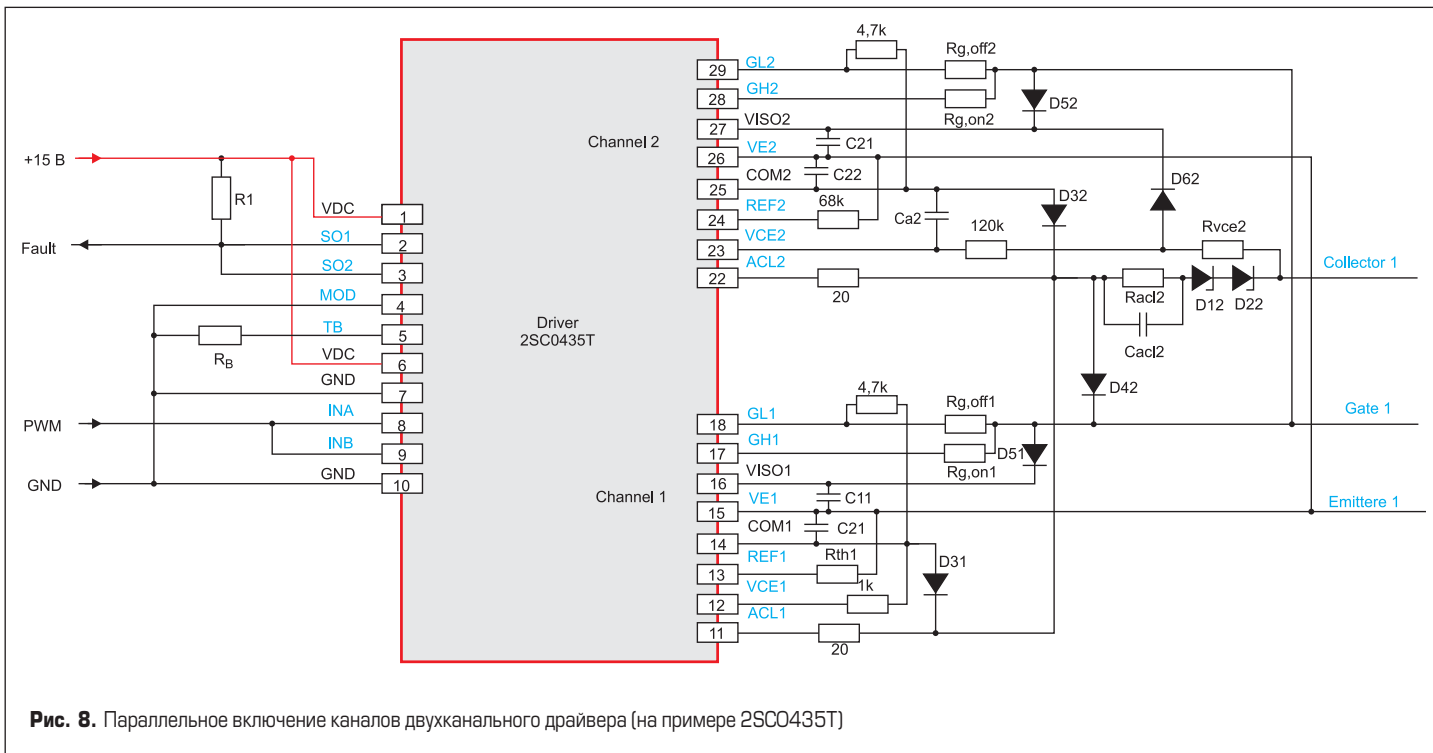


Рис. 8. Параллельное включение каналов двухканального драйвера (на примере 2SC0435T)

Параллельное соединение каналов двухканального драйвера

Двухканальное драйверное ядро может быть сконфигурировано в одноканальный драйвер с удвоенной выходной мощностью и выходным током. Последовательность действий по конфигурации подробно описана в [4]. На рис. 8 и 9 приведены примеры включения для драйверных ядер 2SC0435T и 2SC0108T.

Конструктивные особенности разводки печатной платы драйвера и построения системы драйвер/силовой модуль в целом

Размещение драйвера в конструкции инвертора

На работу драйвера в составе инвертора влияют как температура, так и магнитные и электрические поля. Правильное расположение драйвера в инверторной сборке позво-

ляет устранить или ослабить воздействие этих факторов на работу драйвера и всей системы в целом. Драйверы SCALE-2 спроектированы для работы при температуре окружающей среды -40...+85 °С. Критичным компонентом драйвера, ограничивающим верхний температурный диапазон, является DC/DC-преобразователь, а именно снижение его мощности из-за насыщения магнитного сердечника трансформатора. В наихудшем случае встроенный DC/DC-преобразователь выходит из строя. В инверторах необходимо располагать драйвер в тех местах, где температура окружающей среды не превысит допустимые для драйвера +85 °С (например, подальше от радиаторов). В 2011 г. ST-Concept анонсировала первое драйверное ядро 2SC0535T с трансформаторной изоляцией и диапазоном рабочих температур -55...+85 °С.

Помимо температуры, на работу электроники драйвера в составе инвертора влияют сильные магнитные и электрические поля,

генерируемые при протекании мощных импульсов по проводам и шинам при быстром переключении транзисторов.

В качестве примера можно рассмотреть применение драйверов на базе ядер 2SC0108T и 2SC0435T для управления популярными IGBT-модулями в тонких 17-мм корпусах, например модулями серии EconoPACK производства Infineon. Не рекомендуется размещать драйвер управления этим модулем, распаивая его непосредственно сверху модуля на предусмотренные для этого контакты. Причина кроется в том, что драйвер очень близко располагается к силовым цепям, которые генерируют сильные магнитные поля при переключениях и выводят из строя электронику драйвера.

Аналогичное влияние сильных магнитных полей наблюдается и при применении в конструкции инверторов ламинированных многослойных шин. Здесь наиболее критично взаимное расположение драйвера

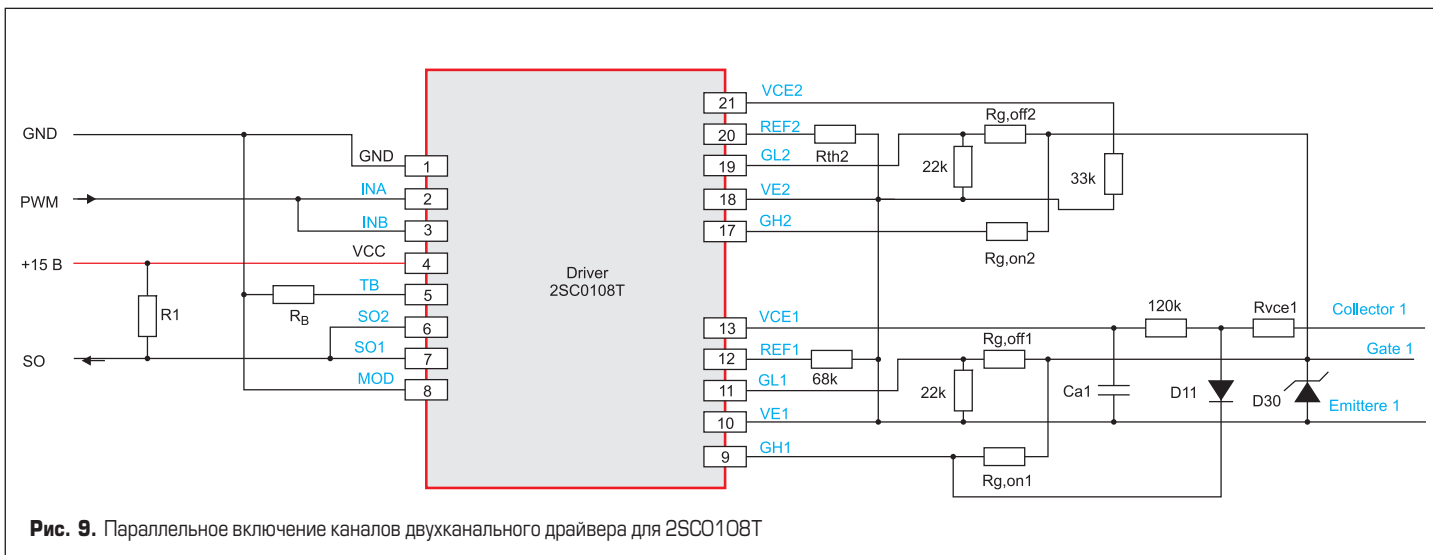
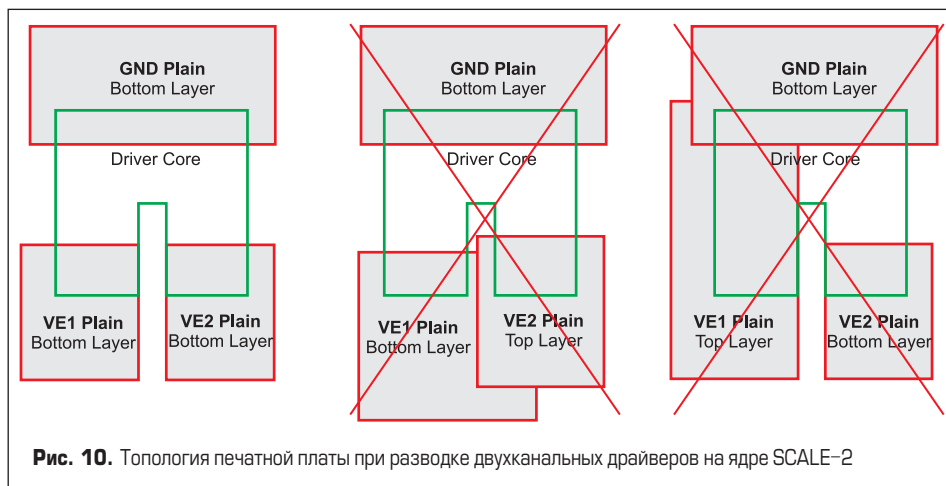


Рис. 9. Параллельное включение каналов двухканального драйвера для 2SC0108T



и АС-шины, т. е. шины, по которой протекает фазная (переменная) силовая составляющая тока инвертора. Драйвер рекомендуется располагать на некотором расстоянии (несколько сантиметров обычно достаточно) от поверхности таких шин или предусматривать дополнительное экранирование, выбирая материал и толщину экрана с учетом частоты переключения инвертора.

Разводка топологии печатной платы драйвера на базе ядра SCALE-2

При проектировании драйвера на основе ядер SCALE-2 существенный вклад в его работу вносит правильное размещение компонентов и топология их соединений на печатной плате. Одно из самых важных правил при проектировании печатной платы для силовой электроники заключается в том, что слои платы, относящиеся к различающимся высоковольтным потенциалам, никогда не должны перекрываться в плане. Это правило проиллюстрировано на рис. 10, где перечеркнуты неправильные варианты размещения слоев разводки.

В случае перекрытия из-за возникающей большой емкостной связи между слоями

с разницей потенциалов при переключении возникают избыточные синфазные токи I_{com} (common mode current), вызывающие электромагнитные помехи. Более того, такое перекрытие слоев может сказаться на надежности драйвера, вызывая проблемы в изоляции в долговременном плане.

Это правило распространяется не только на слои многослойной печатной платы, например с эмиттерным и земляным потенциалом, но и на любые другие сигнальные линии, в которых могут переключаться высокие потенциалы. Это, к примеру, может быть дорожка коллектора верхнего ключа, которая на печатной плате нигде не должна пересекать в плане линию затвора нижнего ключа полумостовой схемы инвертора.

CT-Concept разработала и серийно производит базовые платы для разработки драйверов на базе двух ядер SCALE-2 — 2SC0108T и 2SC0435T. Эти недорогие платы обозначаются соответственно 2BB0108T и 2BB435T и предназначены для разработки собственных драйверов. Платы снабжаются комплектом производственной документации, включая схему, перечень элементов и Gerber-файлы

для самостоятельного изготовления их. Топологию печатных плат можно использовать как образец правильной разводки слоев печатной платы драйвера. Более подробно эти базовые платы описаны в [3].

Выводы

- Рассмотрены особенности проектирования драйверов IGBT/MOSFET на основе ядер SCALE-2: 2SC0108T, 2SC0435T, 2SC0650P, 1SC2060P.
- В большинстве случаев отказов драйверов пользователей на основе ядер SCALE причиной является невнимательное отношение к особенностям применения их в конкретных электрических схемах и конструктивах.
- Приведены примеры схем включения драйверов в различных режимах.
- Крайне важное значение при проектировании драйвера имеет правильная разводка высоковольтных слоев печатной платы.
- Примером правильной разводки печатной платы драйвера являются базовые платы 2BB0108T и 2BB435T, которые поставляются с документацией на разводку платы.

Литература

1. www.igbt-driver.com
2. Бербец А. Драйверы CT-Concept для силовых IGBT- и MOSFET-модулей на базе нового ядра SCALE-2 // Силавая электроника. 2009. № 5.
3. Бербец А. Базовые платы драйверов IGBT от CT-Concept // Силавая электроника. 2010. № 4.
4. AN-1101: Application with SCALE-2 Gate Driver Cores.
5. AN-0901: Methodology for Controlling Multi-Level Converter Topologies with SCALE-2 IGBT Drivers.
6. AN-0904 Direct paralleling of SCALE-2 Gate Driver Cores.