

# SKYPER 52 —

## первый сверхмощный цифровой драйвер IGBT от компании SEMIKRON

**Для работы любого преобразователя, созданного с применением IGBT-модулей, необходимо устройство, осуществляющее передачу управляющих сигналов от контроллера к затворам силовых ключей. С ростом мощностей эта задача становится все более сложной, для ее решения необходимо увеличивать нагрузочную способность драйверов, повышать их помехозащищенность и стойкость к наведенным фронтам напряжения. Кроме этого, современное устройство управления должно выполнять целый набор защитных и сервисных функций.**

**Основной целью разработки полностью цифрового драйвера SKYPER 52 стало обеспечение высококачественной передачи изолированных контрольных сигналов в системах средней и большой мощности. В предлагаемой статье описаны основные характеристики нового устройства управления и обсуждены преимущества цифрового способа передачи данных.**

**Маркус Хермвиль  
(Markus Hermwille)  
Андрей Колпаков**

Andrey.Kolpakov@semikron.com

### Идеология «ядра»

Драйвер затворов MOSFET/IGBT, как связующее звено между контроллером и силовым каскадом, является одним из ключевых компонентов преобразовательного устройства. Характеристики схемы управления во многом определяют параметры силовых модулей — величину статических и динамических потерь, скорость переключения, уровень электромагнитных помех.

В статическом состоянии вход управления IGBT практически не потребляет мощности, транзисторы данного типа (как и MOSFET) относятся к классу электронных ключей, управляемых напряжением. Однако при переключении IGBT драйверу приходится коммутировать большие токи, необходимые для перезаряда емкостей затвора. Поэтому одним из основных параметров, определяющих мощность схемы управления, является величина заряда  $Q_G$  накапливаемого на емкостях  $C_{GE}$  (затвор-эмиттер) и  $C_{GC}$  (затвор-коллектор).

Главной задачей, решаемой драйвером, является преобразование слаботочного логического сигнала контроллера в сигнал управления затвором, мощности которого должно хватать для быстрого перезаряда емкостей затвора IGBT. Поскольку силовые ключи работают при напряжениях, существенно превышающих потенциалы сигналов контроллера, устройство управления затвором должно осуществлять высоковольтный сдвиг уровня или гальваническую развязку контрольных импульсов и импульсов, поступающих на затворы. Кроме того, современные драйверы немыслимы без многочисленных защитных и сервисных функций, необходимых для безотказной работы IGBT во всех режимах эксплуатации, включая аварийные.

Устройство управления затвором должно обеспечивать оптимальный баланс таких качеств, как функциональная полнота и гибкость, простота и надежность, конкурентоспособная цена. Стремясь к максимальной унификации, а, следовательно, и удешевлению продукции, компания SEMIKRON решила использовать популярную идеологию «ядра» для создания универсального модуля управления IGBT. Несколько лет назад на рынок было выпущено первое поколение устройств подобного типа, получивших название SKYPER 32 [1]. Основной концепцией, заложенной в конструкцию SKYPER, стала идея сопряжения с модулем IGBT с помощью интерфейсных плат (рис. 1), широкую гамму которых предлагает SEMIKRON.

Ядро SKYPER 32 разрабатывалось как основа для построения серии драйверов широкого применения. Оно содержит набор базовых узлов, необходимых в большинстве практических применений: блок обработки сигнала с изолированным интерфейсом,



**Рис. 1.** Сборка «драйвер SKYPER 32 — интерфейсная плата — модуль IGBT SEMiX»

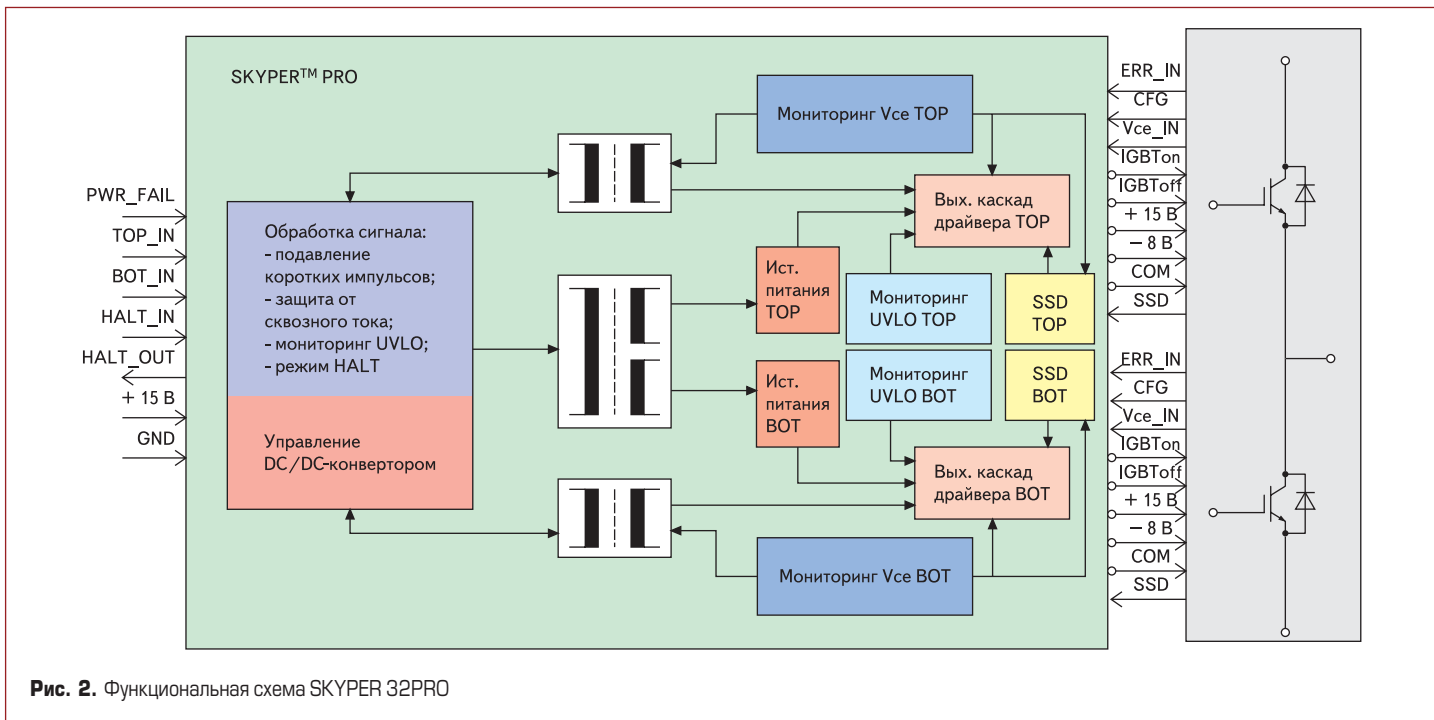


Рис. 2. Функциональная схема SKYPER 32PRO

устройство защиты и мониторинга, выходные каскады управления изолированными затворами и DC/DC-преобразователь. Блок-схема драйвера SKYPER 32PRO, отличающегося от базовой версии расширенным набором сервисных функций, показана на рис. 2.

Для работы драйвера требуется один низковольтный источник +15 В, двуполярные напряжения +15/-7 В, необходимые для питания выходных каскадов, вырабатываются встроенным DC/DC-конвертером.

Основные технические характеристики SKYPER 32:

- два канала управления;
- встроенный DC/DC-конвертор;
- гальваническая изоляция сигналов управления с помощью импульсного трансформатора (изоляция по стандарту EN50178 PD2);
- выходной ток (пиковый) — 15 А;
- заряд затвора управляемого транзистора — до 6,3 мкКл;
- рабочая частота — до 50 кГц;
- напряжение изоляции — 4 кВ;
- виды защиты: DESAT (desaturation — выход из насыщения), UVLO (Under Voltage LockOut), подавление коротких шумовых импульсов, программируемое время  $t_{dr}$ .

Благодаря использованию специализированной интегральной микросхемы (ASICs — Application Specific Integrated Circuits) количество внешних дискретных элементов сведено к минимуму. Двухканальная микросхема SKIC 2001, разработанная SEMIKRON для применения в драйверах и интеллектуальных силовых модулях серии SKiP, выполняет следующие функции:

- подавление шумовых импульсов;
- нормирование уровней и фронтов входных сигналов;
- мониторинг напряжения питания (UVLO);
- мониторинг сигналов ошибки;
- запрет одновременного включения транзисторов полумоста (функция “interlock”), формирование времени задержки переключения  $t_{dr}$ ;

- управление встроенным изолированным DC/DC-конвертером.

### Изоляция контрольных сигналов

С точки зрения силовой электроники управляющие системы, такие как микроконтроллеры, ЦСП и т. д., работают при сверхнизких уровнях сигналов, несоизмеримых с напряжениями силовых сетей. Устройство, осуществляющее потенциальную развязку импульсов управления, должно иметь не только высокие изолирующие свойства, но и хорошую помехозащищенность. В противном случае шумовые импульсы, проникающие в устройство управления через паразитные емкости изолирующих барьеров, могут достигать соответствующих логических уровней и приводить к сбою в работе цифровых схем.

В мощных преобразователях, получающих питание от промышленных сетей, к изолированному драйверу предъявляется два основных требования: высокое напряжение изоляции и стойкость к скоростным фронтам импульсов напряжения, образующихся при коммутации IGBT (в англоязычной литературе этот параметр называют  $dv/dt$  immunity). Для достижения хорошего иммунитета к  $dv/dt$  необходимо снижать емкость изолирующего перехода до предельно достижимого уровня, величина этой паразитной емкости не должна превышать нескольких пикофарад. Лучшим способом решения данной задачи является использование специальных импульсных изолирующих трансформаторов [2, 3].

### Передача импульсов по фронтам

В настоящее время в подавляющем большинстве изолирующих драйверов (в том числе и SKYPER 32) сигнальные трансформаторы используются для передачи фронтов импульсов, которые далее восстанавливаются с помощью триггерных схем.

Как правило, короткие «фронтовые» импульсы вырабатываются в первичных каскадах драйверов с помощью демпфированных последовательных резонансных контуров. Переданные через трансформатор данные детектируются и восстанавливаются специальным блоком в выходном каскаде драйвера, надежность данного способа передачи сигнала, как правило, обеспечивается за счет относительно медленной скорости детектирования.

Технология восстановления «по фронтам» пригодна только для сигналов включения и выключения, она не может быть использована, например, для передачи последовательности повторяющихся импульсов. Если один импульс передан, то перед транслированием следующего, идущего в противоположном направлении, должно пройти определенное время (так называемое время восстановления).

### Цифровая передача импульсов

Основной задачей проектирования цифрового устройства управления затвором стала разработка технологии обработки сигнала, обеспечивающей максимально надежную его трансформацию при минимальной зависимости от воздействия внешних климатических факторов и паразитных распределенных параметров компонентов схемы. Кроме того, очень важно, чтобы эти показатели сохранялись в течение всего срока эксплуатации, то есть не были подвержены влиянию так называемого эффекта старения.

В разработанной схеме для генерации импульсов заданной формы и длительности используется программируемая логическая матрица (FPGA), что позволило обеспечить независимость параметров сигналов от характеристик полупроводниковых переходов. Восстановление данных производится с помощью дифференциальной схемы, обеспечивающей высокую помехозащищенность канала передачи.

Как правило, шумы одинаково воздействуют на оба выхода импульсного трансформа-

тора. Если уровень наведенных при этом по- мех одинаков, в дифференциальной схеме они компенсируются и соотношение сигнал/шум остается удовлетворительным, даже если ам- плитуда шумовых импульсов больше чем ин- формационных.

Высокая надежность передачи сигнала дос- тигается, когда выходной ток трансформато- ра достаточно высок, а входной полный им- педанс приемника мал. В этом случае отпадает необходимость в формировании импульсов управления большей амплитуды и, соответ- ственно, не требуется источник питания с вы- соким выходным напряжением. При огово- ренном выше условии, что работа схемы не за- висит от параметров компонентов, устройство может надежно работать даже при напряже- нии питания 3,3 В.

На рис. 3 показана упрощенная схема циф- ровой передачи данных драйвера SKYPER 52. Мощный входной мостовой каскад, образо- ванный MOSFET-транзисторами, генерирует пачки импульсов переменной длительности, которые далее передаются во вторичные каска- ды с помощью изолирующего трансформато- ра. Сформированный таким образом сиг- нал принимается дифференциальным двух- пороговым компаратором и направляется далее на программируемую логическую мат- рицу для обработки и кодирования.

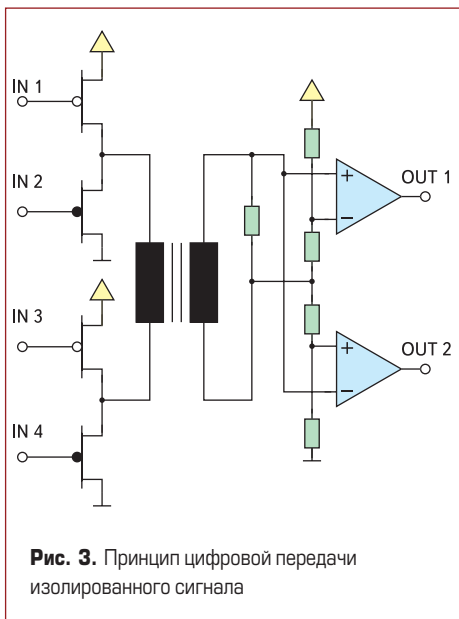


Рис. 3. Принцип цифровой передачи изолированного сигнала

Приведенная на рис. 4 последовательность импульсов, образованная задающим генера- тором, необходима для формирования при- емником одного импульса управления. Полу- мостовые каскады передатчика для упроще- ния показаны в виде логических вентилях (НВ1 и НВ2), а двухпороговый компаратор за- менен дифференциальным приемником.

Сердечник изолирующего трансформатора изготавливается из материала с высокой маг- нитной проницаемостью. Он способен намаг- ничиваться при относительно малом токе (около 10 мА), в то время как нагрузка на вто- ричную обмотку может быть намного выше. Поддерживая столь низкий ток намагничи- вания, можно уменьшать ток первичной обмот- ки практически до нуля, пока не пропадет оста-

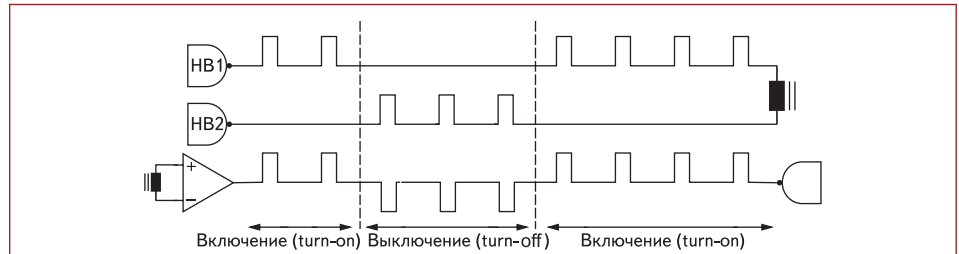


Рис. 4. Импульсная диаграмма

точная намагниченность. При этом время, ко- торое должно пройти между повторяющимися импульсами (время восстановления), ока- зывается достаточно коротким.

Благодаря низкому уровню намагничива- ния и, следовательно, малой величине запасе- мой в сердечнике энергии можно достичь зна- чения тактовой частоты около 1 МГц. Генера- ция импульсов может быть прервана сигналом счетчика в любое время, типовая последо- вательность импульсов выключения в одном из дифференциальных каналов передачи по- казана на рис. 5.

С помощью широтно-импульсной модуля- ции импульсных пакетов (изменяется длитель- ность импульса и время паузы между ними) осуществляется двунаправленная передача ин- формации между первичными и вторичны- ми каскадами драйвера. Цифровая схема пе- редачи данных позволяет вместе с сигналами управления транслировать статусные сигна- лы и информацию, получаемую от встроен- ных датчиков модуля IGBT.

### Оценка качества передачи

Метод измерений с помощью индикатор- ной, или «глазковой» диаграммы обычно используется для оценки качества передачи ин- формации в цифровых системах. В основе данного метода лежит принцип отображения информации, соответствующий восприятию

человеческого глаза (отсюда и название). Фор- ма сигнала в процессе передачи искажается, практически идеальные фронты прямоуголь- ных импульсов приобретают экспоненциаль- ную форму. Суперпозиция таких импульсов формирует напряжение, напоминающее по форме глаз.

Индикаторная диаграмма создается при наложении двух сигналов (противофазных в нашем случае), поданных на разные входы широкополосного цифрового осциллогра- фа. Полученная в результате картинка спо- собна комплексно отображать основные ха- рактеристики импульсного напряжения: из- менение амплитуды, длительность и частоту повторения, мерцание фронтов, шумовой фон и т. д. При хорошем качестве сигнала ос- циллограмма соответствует «открытому гла- зу», который будет «закрывается» по мере роста искажений.

На рис. 6 представлен фрагмент индика- торной диаграммы, полученной при иссле- довании работы цифровой системы изоли- рованной передачи импульсных сигналов SKYPER 52. Несмотря на то, что показана единичная развертка осциллограммы, кар- тинка свидетельствует о низком уровне ис- кажений и джиттера. Проведенный качест- венный анализ подтвердил, что описанная схема позволяет передавать данные с высо- кой скоростью при минимальном уровне фликкер-шумов.

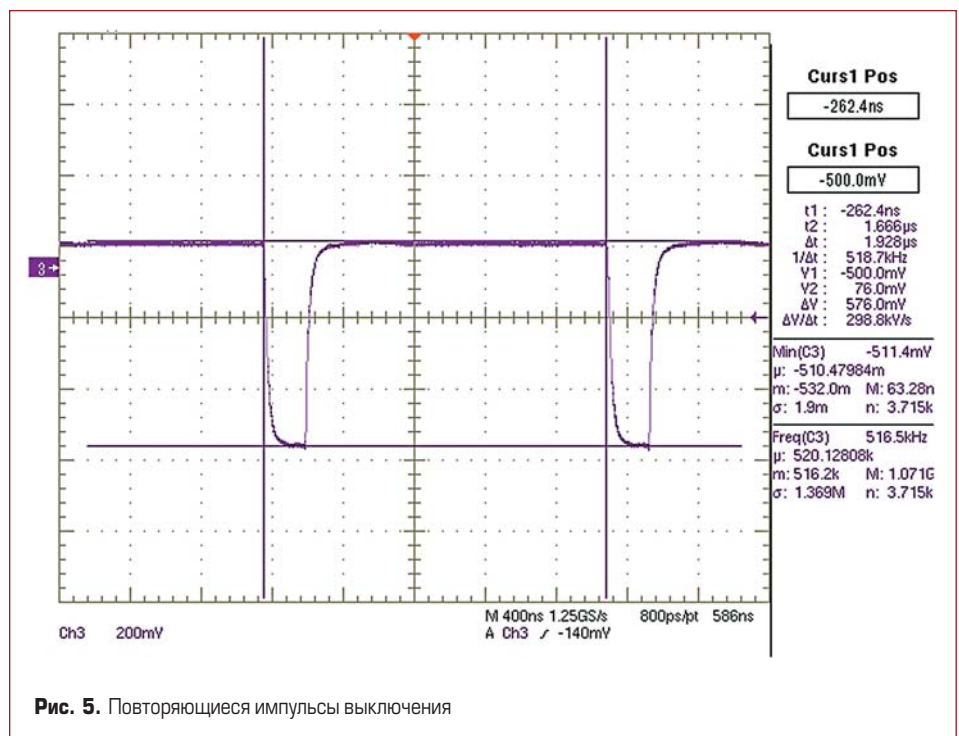


Рис. 5. Повторяющиеся импульсы выключения

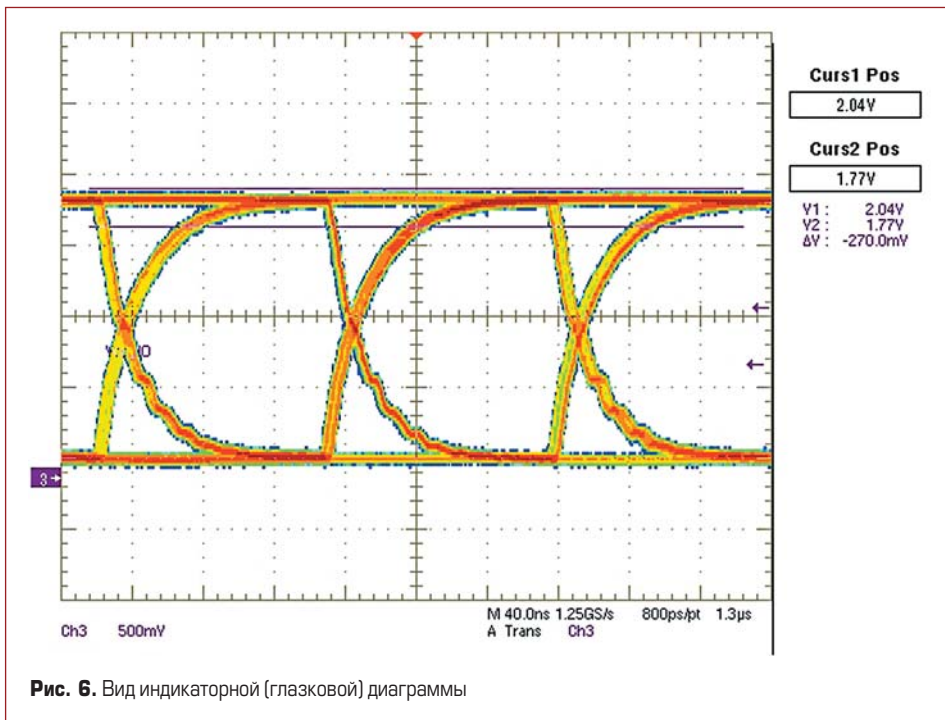


Рис. 6. Вид индикаторной (глазковой) диаграммы

### SKYPER 52 — основные особенности

Цифровой способ передачи данных использован в новейшей разработке компании SEMIKRON — мощном двухканальном драйверном ядре SKYPER 52 (рис. 7), предназначенном для управления модулями IGBT с рабочим напряжением до 1700 В. Топология платы показана на рис. 8, примечательно, что основным элементом входных и выходных каскадов устройства является программируемая логическая матрица.



Рис. 7. Внешний вид платы драйвера SKYPER 52

Изолирующий барьер формируется с помощью трех импульсных трансформаторов: два используются для передачи данных, один — для управления DC/DC-конвертером, питающим выходные каскады драйвера. Благодаря сверхнизкому значению паразитной емкости перехода (единицы пикофарад) удалось достичь хорошего иммунитета устройства к быстрым перепадам напряжения: SKYPER 52 способен надежно работать при  $dv/dt$  до 100 кВ/мкс.

Питание выходных каскадов драйвера осуществляется от изолирующего DC/DC-преобразователя, формирующего двуполярное напряжение, необходимое для управления затворами.

Основные технические характеристики SKYPER 52:

- выходной ток (пиковое значение)  $I_{out\_peak}$  — 50 А;
- напряжение управления затворами  $V_{Gon/off}$  —  $\pm 15$  В;
- выходная мощность — 9 Вт на канал;
- возможность управления длительностью времени блокировки  $t_{dt}$  и режимом запрета включения транзисторов полумоста INTERLOCK;
- мониторинг критического повышения частоты;

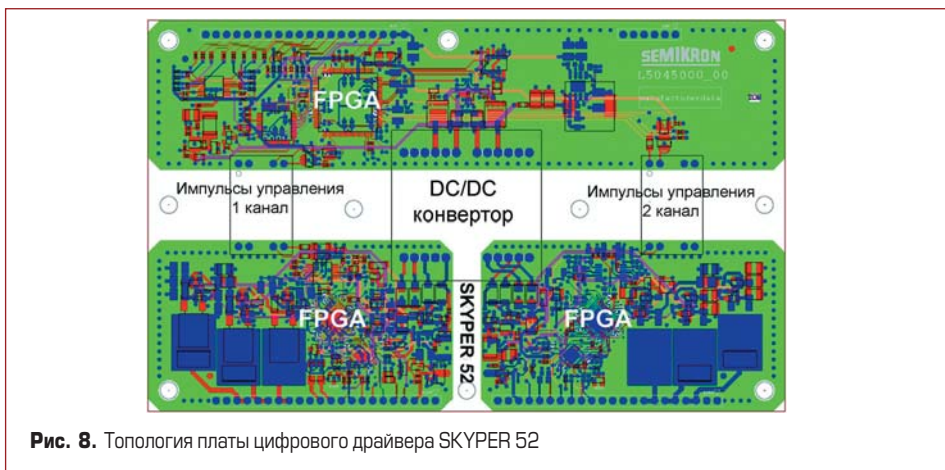


Рис. 8. Топология платы цифрового драйвера SKYPER 52

- защита от падения напряжения управления UVLO;
- динамическая защита от перегрузки по току и КЗ с индивидуальной настройкой и функцией intellectual turn-off;
- изолированная передача сенсорных сигналов (температура модуля IGBT);
- цифровая настройка блока обработки сигнала ошибки;
- диагностический CAN-интерфейс.

Цифровая схема обработки и транслирования сигнала драйвера SKYPER 52 обладает высокой гибкостью, большинство параметров может быть задано пользователем. К настраиваемым относятся характеристики схемы защиты, параметры режимов переключения и способ формирования сигнала неисправности. Сигнальные коннекторы платы SKYPER 52 расположены на ее обратной стороне, что позволяет устанавливать устройство с помощью пайки или соответствующего разъема.

### Дифференциальная обработка сигнала

Драйвер SKYPER 52 принимает логические импульсы, вырабатываемые микроконтроллером или ЦСП ( $f_{sw\_max} = 100$  кГц без ограничения скважности) и преобразует их в двуполярные сигналы управления затворами. Цифровые входы и выходы драйвера совместимы с TTL логикой со стандартными уровнями 3,3 и 5 В, они могут быть подключены непосредственно к контроллеру без использования устройств сдвига уровня или усилителей.

Для обеспечения хорошей помехозащищенности и высокой надежности при работе в применениях высокой мощности в драйвере SKYPER 52 применен метод дифференциальной обработки сигналов. Для этого цифровой сигнал передается по двум отдельным линиям и далее обрабатывается с помощью низкоимпедансного инструментального усилителя. Такая схема обеспечивает хорошее подавление синфазных шумов, и, как следствие, она имеет низкую чувствительность к электромагнитным помехам.

Изолированные сенсорные и статусные сигналы доступны на диагностическом разъеме с CAN-интерфейсом, в котором также используется дифференциальный способ передачи данных с доминантным нулевым уровнем.

### Формирование сигнала ошибки

Для индикации отказа IGBT могут быть использованы различные методы, соответственно отличаются и способы защиты от перегрузок. В большинстве практических применений в случае обнаружения аварии схема управления затворами отключает все силовые транзисторы преобразователя. Сигнал неисправности при этом передается на схему обработки сигнала ошибки драйвера и управляющий контроллер или ЦСП. Для предотвращения повторной подачи импульсов включения IGBT в состоянии КЗ канал управления должен блокироваться. Сброс сигнала ошибки производится, как правило, подачей

внешнего импульса RESET после устранения состояния неисправности.

В некоторых схемах, например, многоуровневых преобразователях, при индикации отказа не требуется отключение всех IGBT. Напротив, в этом случае силовые модули должны выключаться в определенной последовательности, задаваемой контроллером-супервизором.

Применение цифрового модуля управления затворами SKYPER 52 позволяет пользователю задавать любой алгоритм работы схемы защиты. Индивидуальная настройка режимов отключения силовых модулей с помощью интерфейса драйвера SKYPER 52 дает возможность повысить гибкость и надежность работы системы контроля преобразовательного устройства, независимо от его схемы.

### Мощный выходной каскад драйвера

На данный момент SKYPER 52 является самым мощным серийно выпускаемым двухканальным устройством управления IGBT. Выходной каскад драйвера, построенный по 2-тактной схеме на MOSFET-транзисторах, обеспечивает пиковое значение выходного тока до 50 А при среднем значении мощности 9 Вт на канал.

Входы MOSFET верхнего и нижнего плеча управляются независимыми сигналами, генерируемыми встроенным цифровым блоком. Когда один из них имеет высокий уровень, включен N-канальный полевой транзистор, P-канальный ключ открывается при низком уровне входного сигнала. Преимуществом такой логики управления является возможность

точного управления временем задержки между переключением MOSFET верхнего и нижнего плеча. Это позволяет полностью устранить нежелательный сквозной ток, который может возникнуть между шинами питания  $V_{G+}$  и  $V_{G-}$  выходного каскада при коммутации транзисторов.

Для упрощения формирования асимметричного напряжения управления SKYPER 52 имеет два выхода. Это позволяет использовать отдельные резисторы  $R_{G(on)}$  и  $R_{G(off)}$  для режимов включения и выключения без развязывающего диода, необходимого в драйверах с одним выходом. Разделение цепей управления затвором дает возможность оптимизировать основные динамические характеристики IGBT: скорость нарастания/спада сигнала, уровень перенапряжения при выключении, энергию переключения, поведение в состоянии КЗ. Важно отметить, что при этом резистор затвора не используется для ограничения сквозного тока, как это обычно делается в 2-тактных усилителях с разделенным выходом.

SKYPER 52 может управлять двумя выходными каскадами с параллельно соединенными резисторами затвора. Эта особенность может быть использована для контроля последовательности включения резисторов с целью снижения коммутационных потерь или уровня перенапряжения при выключении.

### Заключение

Рост мощностей, повышение эффективности преобразования и снижение массо-габаритных показателей — вот основные требования современного рынка силовой электроники,

диктующие условия работы производителям силовых модулей. Естественно, что для управления мощными ключами и их параллельным соединением нужны все более мощные и надежные драйверы, имеющие все большую степень «интеллекта».

Использование цифровых методов обработки позволяет повысить качество передачи изолированных сигналов, улучшить помехозащищенность и иммунитет к  $dv/dt$ , что особенно важно для применений высокой мощности.

Новый сверхмощный драйвер SKYPER 52 является первым в своем классе полностью цифровым устройством, имеющим широчайшие возможности конфигурирования. Возможность индивидуальной настройки параметров и получения статусных сигналов по последовательной шине в сочетании с высокой выходной мощностью позволяет использовать данное устройство для управления силовыми ключами в широком диапазоне мощностей и схем. ■

### Литература

1. Колпаков А. SKYPER 52 — идеология ядра // Электронные компоненты. 2006. № 6.
2. Power Modules Application Manual, SEMIKRON International.
3. Hermwille M. Plug and Play IGBT Driver Cores for Converters. Power Electronics Europe. Issue 2, 2006, pp. 10–12.
4. Hermwille M. Gate Resistor — Principles and Applications. Application Note AN-7003. November 2007, SEMIKRON.
5. Колпаков А. DriverSEL — простой и эффективный инструмент разработчика // Силовая электроника. 2005. № 2.