

## Сила и интеллект (еще раз об интеллектуальности силовых модулей)

Ярким свидетельством прогресса элементной базы силовой электроники является непрерывное увеличение степени интеграции интеллектуальных модулей (IPM — Intellectual Power Module) и повышение уровня их функциональной насыщенности. Современный IPM представляет собой сложное устройство, объединяющее на одном кристалле или в одном корпусе мощный каскад, драйвер и устройство защиты.

Основными требованиями, предъявляемыми к силовому интегральному модулю, являются минимальные габариты и низкая стоимость в сочетании с высокой функциональностью, эффективностью и практически абсолютной безотказностью. Вопрос о «необходимом количестве интеллекта» и об уровне ответственности производителей IPM был достаточно подробно рассмотрен автором ранее [1]. В предлагаемой статье речь пойдет о возможностях интеллектуальных силовых ключей, содержащих интегрированные датчики тока, температуры и напряжения.

Андрей КОЛПАКОВ  
Andrey.Kolpakov@semikron.com

### Основные особенности и номенклатура модулей SKiiP

Интеллектуальные силовые модули семейства SKiiP [2, 3] (SEMİKRON Integrated Intellectual Power) были разработаны компанией SEMİKRON в начале 1990-х годов. Они объединяют в одном устройстве силовой каскад, драйвер, изолированный источник питания, датчики и радиатор. Некоторые конструктивно-технологические решения были реализованы в модулях SKiiP впервые в мире — в частности, это прижимная конструкция без базовой платы и пружинные контакты для подключения платы управления. По уровню функциональной насыщенности, диапазону мощностей и надежности ком-

поненты серии SKiiP не имеют аналогов в мире. Они выпускаются в 3 конфигурациях: полумост, 1-фазный мост и 3-фазный инвертор, диапазон рабочих токов в зависимости от исполнения составляет от 150 до 2400 А.

Базовым элементом SKiiP является полумостовой каскад IGBT (максимальный ток — 600 А), конструкция которого показана на рис. 1а. Практически все электрические и тепловые связи модуля осуществляются за счет прижима, исключением является только паяное соединение кристаллов IGBT и диодов с керамической подложкой. Равномерное давление на DCB-плату и силовые терминалы AC и DC осуществляется с помощью армированной прижимной платы и эластичной прокладки.

Наращивание тока производится путем параллельного соединения 2, 3 или 4 базовых элементов. На рис. 1б показано, как происходит объединение выходных AC-терминалов (слева) и DC-выводов питания (справа). Обратите внимание на низкоиндуктивную копланарную DC-шину и снабберные конденсаторы, установленные непосредственно на выводы питания элементов SKiiP. Следует отметить, что для надежной работы силовых ключей IGBT во всем диапазоне токов, включая ток короткого замыкания (КЗ), SEMİKRON рекомендует только такой тип снаббера.

Драйверы интеллектуальных модулей SKiiP выполняют все функции, необходимые для их безопасной работы, производя постоянный мониторинг выходного тока, напряжения силовой шины питания и температуры модуля. Соответствующие аналоговые сигналы могут быть использованы для анализа состояния системы и формирования управляющих импульсов. Гальваническая развязка входных цепей осуществляется с помощью импульсного трансформатора в соответствии с требованиями стандарта EN50178.

Этот же трансформатор использован в изолирующем DC/DC-конвертере, вырабатывающем напряжение питания для выходных каскадов драйвера. Его нагрузочные характеристики рассчитаны таким образом, чтобы обеспечить питание схемы управления и защиты, а также встроенных сенсоров.



Рис. 1. а) Прижимная конструкция модулей SKiiP; б) параллельное соединение полумостовых элементов SKiiP

Допустимые сочетания токов и напряжений, при которых обеспечивается надежная работа модулей, задается областью безопасной работы (ОБР или SOA — safe operating area). В интеллектуальных силовых ключах SKiiP благодаря наличию сенсоров, контролирующих основные режимы работы, существует возможность управления схемой защиты не по предельным электрическим параметрам, а по граничным величинам, заданным ОБР. Правильно «адаптированная» схема управления затворами, получающая оперативную информацию от датчиков, обеспечивает надежную работу силового ключа и всей системы, содержащей управляющий контроллер и исполнительный механизм.

**Датчик тока**

Сигнал, вырабатываемый встроенным датчиком тока, необходим для управления системой, кроме того, его использование позволяет повысить надежность работы схемы защиты от перегрузки и сократить время анализа аварийного состояния. Для корректной работы привода погрешность измерения тока (включая температурный дрейф) не должна превышать 1–2%.

Токовый датчик должен сохранять работоспособность во всем диапазоне рабочих токов, включая режим КЗ. В зависимости от технологии IGBT, ток короткого замыкания  $I_{SC}$  (Short Circuit Current) может превышать номинальное значение  $I_C$  в 5–10 раз. Кроме того, для обеспечения стабильности контура регулирования от схемы измерения тока требуется минимальное время отклика и широкая полоса пропускания (желательно, чтобы частота среза была не менее 100 кГц).

Резистивные токовые шунты, применяемые для измерения небольших токов (как правило, не более 30–50 А), не могут быть использованы в модулях, подобных SKiiP, из-за неоправданно высоких потерь проводимости и отсутствия гальванической изоляции. В диапазонах мощностей, составляющих десятки и сотни киловатт, наиболее подходящими являются изолированные электромагнитные датчики, например, основанные на эффекте Холла. Недостатком данных сенсоров является плохая температурная стабильность и высокая погрешность измерения. Для повышения точности и термостабильности в модулях SKiiP применяются индукционные измерители тока компенсационного типа, интегрированные с выходными АС-терминалами полумостовых элементов (рис. 1а).

Конструкция датчика тока SKiiP показана на рис. 2, а основные параметры приведены в таблице 1. Усиленный сигнал сенсорной обмотки (она расположена в зазоре сердечника с высокой магнитной проницаемостью) используется как сигнал ошибки для выработки компенсационных токов, подаваемых на первичную и вторичную обмотки. Применение для этой цели широтно-импульсной модуляции позволяет значительно снизить по-

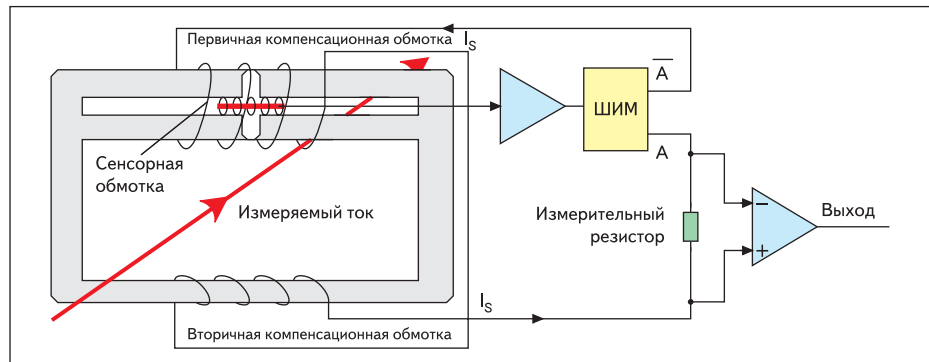


Рис. 2. Компенсационный датчик тока модуля SKiiP

Таблица 1. Основные характеристики датчиков тока SKiiP 2/3

Параметр	SKiiP 2	SKiiP 3
Коэффициент трансформации	1:2000	1:3000
Максимальный ток при $T_a = 45^\circ\text{C}$ , Arms	200	400
Максимальный ток кратковременный (2 с) при $T_a = 45^\circ\text{C}$ , Arms	250	500
Максимальный ток пиковый (10 мкс), А	3000	3000
Диапазон частот, кГц	DC...100	DC...50
Время реакции, не более, мкс	1	1
Выходное напряжение схемы измерения тока, В ( $I_C = I_{Cном}$ )	8*	8*
Выходное напряжение схемы измерения тока, В ( $I_C = 125\%I_{Cном}$ )	10*	10*

\* Примечание. Крутизна схемы измерения тока модулей SKiiP3 с платой DBC из нитрида алюминия AlN отличается от приведенной в таблице и указывается в технических характеристиках.

требление тока по сравнению с линейной схемой компенсации.

Падение напряжения, создаваемое током компенсационной обмотки  $I_S$  на измерительном резисторе, является выходным сигналом датчика тока. Его обработка и нормирование производится специализированной интегральной схемой, входящей в состав платы управления SKiiP.

Точность измерения тока зависит от таких факторов, как:

- погрешность преобразования электронной схемы датчика;
- разброс номиналов измерительного резистора;

- погрешность преобразования электронной схемы SKiiP (напряжение смещения операционного усилителя и его дрейф, разброс номиналов пассивных компонентов);
- температурный дрейф схемы измерения. Максимальная ошибка измерения тока  $\Delta I$  может быть определена с помощью следующего выражения:

$$\Delta I = I_C \times K_{io} + I_{act} (K_{ierr} - K_{io} + |\Delta L| \times TC_{err}),$$

где  $I_C$  — номинальный ток модуля;  $K_{io}$  — относительное смещение (0,35% для SKiiP 2 и 0,13% для SKiiP 3);  $K_{ierr}$  — нелинейность коэффициента преобразования (1,5% для SKiiP 2 и SKiiP 3);  $TC_{err}$  — температурный коэффициент напряжения смещения (0,001%/K для SKiiP 2 и 0,002%/K для SKiiP 3).

Наличие интегрального датчика тока позволяет сократить время реакции и повысить надежность работы схемы защиты от перегрузки, что особенно актуально для современных тонкопленочных технологий IGBT. Снижение размера кристаллов и соответствующее уменьшение их теплоемкости препятствует быстрому рассеиванию огромного количества энергии, выделяемой в режиме КЗ. Именно поэтому допустимое время нахождения в состоянии перегрузки (Short Circuit Rated Time) для новых поколений IGBT сократилось с 10 до 6 мкс.

В интеллектуальных модулях SKiiP реализована идеология защиты от перегрузки по

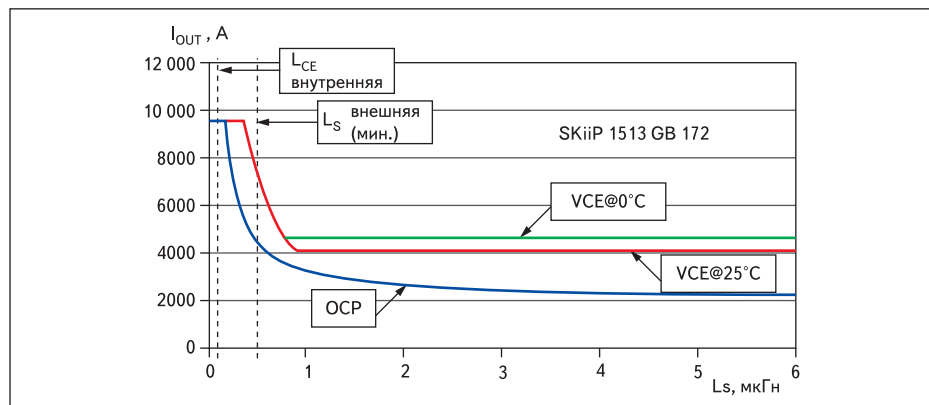


Рис. 3. Сравнение защиты от перегрузки по току OCP и DESAT

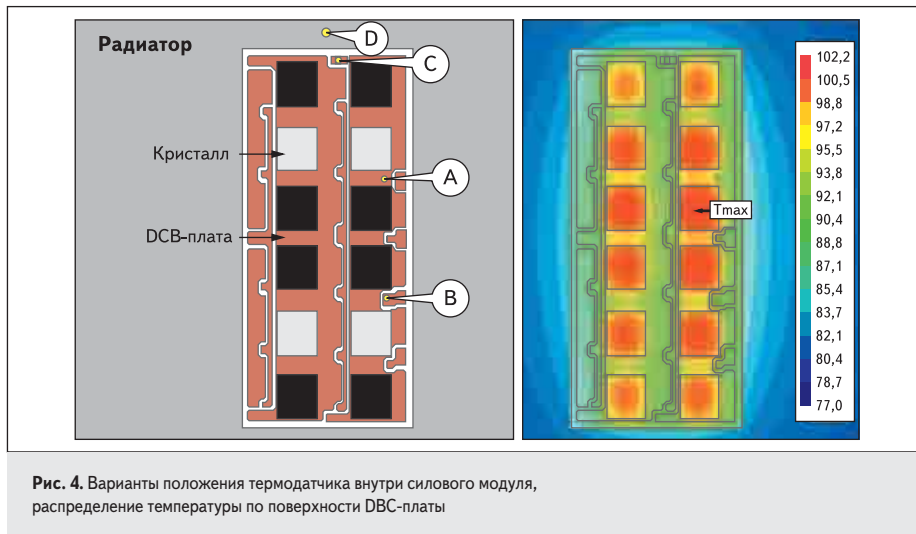


Рис. 4. Варианты положения термодатчика внутри силового модуля, распределение температуры по поверхности DBC-платы

току, названная OCP (Over Current Protection). Для работы схемы OCP используется 2 сигнала: напряжение насыщения  $V_{CEsat}$  силового транзистора и выходное напряжение датчика фазного тока, в результате чего драйвер SKiiP способен отключить IGBT уже через 2–3 мкс после обнаружения аварийного состояния. Данная защита обеспечивает безопасный режим выключения, снижение уровня переходных перенапряжений и увеличение допустимого количества срабатываний защиты от КЗ (модули SKiiP рассчитаны на 1000 аварийных отключений в течение срока службы).

Схема управления SKiiP различает два пороговых значения тока — предельное номинальное (100%  $I_C$ ), начиная с которого производится анализ неисправности и формируется контрольный сигнал, и ток перегрузки (125%  $I_C$ ). После обнаружения аварийного состояния напряжение на затворах снижается, что приводит к ограничению  $I_C$ . Если ток превышает номинальное значение более чем на 25%, отключаются все силовые транзисторы, сигналы управления игнорируются. Драйвер формирует сигнал неисправности, выход ERROR OUT (открытый коллектор) принимает уровень логической единицы.

Графики, приведенные на рис. 3, демонстрируют отличие общепринятого способа отключения транзисторов IGBT по выходу из насыщения (в англоязычной литературе он называется DESAT от англ. desaturation) и защиты OCP. Скорость нарастания тока короткого замыкания ( $di_{SC}/dt$ ) ограничена распределенной индуктивностью выходной цепи  $L_S$  в соответствии с соотношением  $V_{DC} = L_S \times di_{SC}/dt$ . Максимальное достижимое значение ISC (10 кА на рис. 3) зависит от напряжения на затворе и уровня «самоограничения» тока, определяемого технологией IGBT.

Самым опасным режимом является КЗ непосредственно на выходе модуля, при котором «внешняя» паразитная индуктивность минимальна («внутренняя» индуктивность  $L_{CE}$  является характеристикой силового ключа,

ее значение, как правило, приводится в спецификациях). Графики показывают, что для модуля SKiiP 1513 GB 172 ток отключения при  $L_S = 0,5$  мкГн может достигать 7 кА, в то время как при использовании схемы OCP он не превышает 4,5 кА. При величине  $L_S$ , превышающей 1 мкГн (КЗ на стороне нагрузки), ток выключения снижается до 4 и 2 кА соответственно.

#### Датчик температуры

Для измерения температуры силовых модулей и их защиты от перегрева применяются различные виды датчиков, наиболее распространенными из которых являются терморезисторы с отрицательным (NTC) и положительным (PTC) температурным коэффициентом.

В силовых ключах, производимых компанией SEMIKRON, устанавливаются кремниевые PTC чип-сенсоры типа SKCS, которые используются для мониторинга температуры и тепловой защиты силовых кристаллов модуля. Электронная схема драйвера преобразует сопротивление датчика в аналоговый сигнал, изменяющийся в диапазоне 0–15 В, при этом погрешность измерения не превышает 3%. При достижении температурой датчика значения  $115 \pm 5$  °C схема управления отключает силовые транзисторы, выходы **Overtemp. OUT** и **ERROR OUT** (открытые коллекторы) принимают уровень логической единицы.

Соотношение аналогового напряжения  $U_{ta}$ , формируемого драйвером SKiiP на выходе **Temp. Analog OUT**, и температуры DBC-под-

ложки приблизительно описывается следующей зависимостью:

$$U_{ta} = -2 + 0,1 \times t_{DBC}.$$

Термодатчик устанавливается методом пайки на керамическую DBC-подложку модуля рядом с силовыми кристаллами. Благодаря высокой теплопроводности оксида и нитрида алюминия, температура подложки очень близка к температуре радиатора.

Надежность работы схемы защиты от перегрева во многом зависит от положения сенсора внутри силового модуля. Место измерения температуры играет особенно важную роль в случае, когда пороговое значение задается встроенной схемой управления. Для определения оптимального положения термодатчика были проведены специальные исследования, соответствующая тепловая модель показана на рис. 4 (в данном случае анализируется режим воздушного охлаждения).

Как было указано выше, модули SKiiP не имеют базовой платы, их керамическая DBC-подложка устанавливается непосредственно на радиатор. Уровень тепловой связи силовых чипов и датчика меняется в зависимости от его положения, при анализе рассматривались следующие варианты: А (сенсор непосредственно на кристалле IGBT), В и С (сенсор в различных точках DBC-платы), D (сенсор на поверхности радиатора). В каждом варианте установки тепловое сопротивление «кристалл–датчик»  $R_{th(j-r)}$  (именно этот параметр указывается в документации SKiiP) имеет свое значение.

В состоянии теплового равновесия безопасный уровень срабатывания схемы защиты от перегрева может быть однозначно определен для любого из рассматриваемых вариантов. Если, например, температура кристалла  $T_j$  не должна превышать 140 °C, то отключение силовых транзисторов следует производить при температуре датчика 120 °C (вариант А), 110 °C (вариант В), 100 °C (вариант С) и 70 °C (вариант D).

Чем выше уровень тепловой связи между источником тепла и сенсором, тем ниже время реакции и меньше влияние системы охлаждения на процесс мониторинга температуры, именно поэтому использование интегрированных термодатчиков всегда предпочтительнее. В то же время при изменении любого параметра системы охлаждения (материал и толщина основания радиатора, температура охлаждающей среды, толщина слоя теплопро-

Таблица 2. Характеристики тепловых систем при различных вариантах положения термодатчика

А	В	С	Д
Хорошая тепловая связь с кристаллами IGBT и FWD	Допустимая тепловая связь с кристаллами IGBT и FWD	Допустимая тепловая связь с кристаллами IGBT, недостаточная с FWD	Низкий уровень тепловой связи
Малое время реакции	Среднее время реакции	Среднее время реакции (больше, чем в случае В)	—
Низкое влияние системы охлаждения на $R_{th(j-r)}$	Имеется влияние системы охлаждения на $R_{th(j-r)}$	Имеется влияние системы охлаждения на $R_{th(j-r)}$ (больше, чем в случае В)	Высокое влияние системы охлаждения на $R_{th(j-r)}$
Нет гальванической изоляции	Гальваническая изоляция обеспечивается DBC-керамикой	Гальваническая изоляция обеспечивается DBC-керамикой	Безопасный уровень изоляции



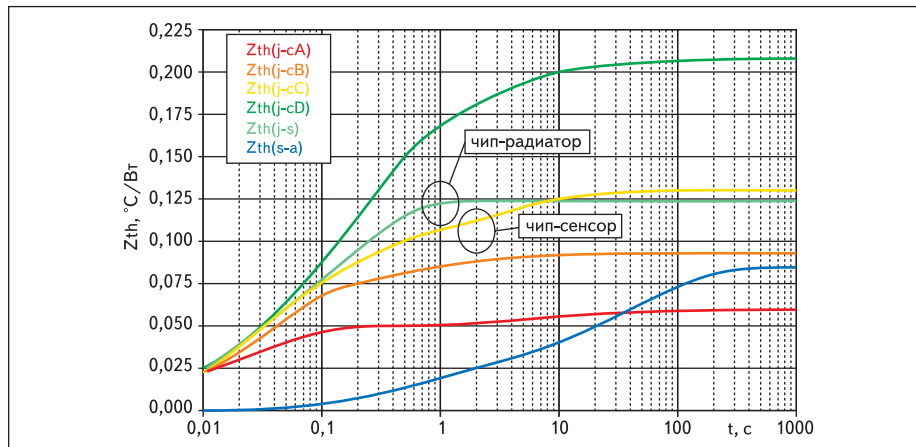


Рис. 5. Динамический тепловой импеданс кристалла при различных положениях термодатчика

водящей пасты и т. д.) приходится корректировать и пороговое значение температуры отключения. Это затрудняет правильный выбор и настройку интегрированной тепловой защиты в интеллектуальных силовых модулях. С данной точки зрения наиболее предпочтительным является использование датчика температуры для мониторинга и формирования соответствующего аналогового сигнала. Порог срабатывания схемы защиты в этом случае должен задаваться внешним контроллером в зависимости от режима работы силового модуля и способа его охлаждения.

Для того чтобы продемонстрировать влияние характеристик тепловой системы на корректность измерения температуры, толщина слоя теплопроводящей пасты была увеличена с 50 до 100 мкм. Сенсор А имеет наилучшую тепловую связь с чипом, следовательно, для этого случая значение теплового сопротивления «кристалл–датчик»  $R_{th(j-r)}$  должно быть наиболее стабильным. Действительно, его увеличение составило всего 3%, в то время как для вариантов В и С наблюдался рост  $R_{th(j-r)}$  на 7–8%. Для случая D, при котором тепловое сопротивление более всего зависит от параметров системы охлаждения, увеличение  $R_{th}$  превысило 25%.

Основным вопросом, который необходимо рассмотреть в данной связи, является возможность использования термодатчика для защиты силовых чипов от перегрева при быстром кратковременном изменении температуры. Каждый вариант установки датчика характеризуется специфической реакцией тепловой системы, которую лучше всего описывать с помощью графиков динамического теплового импеданса  $Z_{th}$  (рис. 5). Сравнение эпюр  $Z_{th(j-r)}$  для разных вариантов размещения сенсора показывает, что тепловая пара «чип–радиатор» достигает установившегося состояния примерно за 1 с, в то время как системе «чип–датчик» требуется до 100 с. Причиной этого является высокая теплоемкость радиатора и медленное распределение тепла в его объеме (измерение температуры радиатора производится в его теле непосредственно под чипом).

Для каждого типа силового полупроводника определяется величина мощности  $P_{tot}$ , которую он может рассеять в установившемся состоянии. При изменении мощности рассеяния (например, с 50 до 200%  $P_{tot}$ ) температура чипа будет повышаться с определенной скоростью. Датчик А зафиксирует заданный порог (120 °С) через 0,19 с, обеспечивая надежную тепловую защиту, а температура кристаллов ни при каких условиях не превысит предельного значения 150 °С.

При той же пороговой величине, определенной сенсорами В и С, перегрев чипов может достигнуть критических величин 160 и 170 °С, поскольку тепловая константа для этих случаев возрастает до 0,3 и 0,4 с соответственно. Задержка при использовании варианта D будет уже более 1 с, следовательно, он менее всего пригоден для защиты силовых ключей от перегрева. Таким образом, для устройств, работающих с большими коэффициентами перегрузки и при низких начальных температурах, использование стандартных термосенсоров в схемах защиты от перегрева не может полностью гарантировать предотвращение перегрева кристаллов.

Анализ основных особенностей тепловых систем, отличающихся различным положением датчика температуры, приведен в таблице 2. Сегодня наиболее предпочтительным считается вариант В, обеспечивающий сравнительно небольшое время реакции и гальваническую изоляцию. Для специализированных интеллектуальных силовых модулей с изолированным интерфейсом, обеспечивающим двунаправленную передачу сигналов, лучшим решением может быть непосредственная установка датчиков на чипы.

Надежная защита от кратковременных тепловых перегрузок является достаточно сложной задачей. Ее невозможно решить путем ограничения тока, поскольку кратковременные токовые перегрузки в пределах области безопасной работы являются допустимыми. В то же время работа при высоких значениях тока неизбежно ведет к повышению температуры полупроводниковых чипов. Как

было показано ранее, высокое время реакции термодатчиков не позволяет организовать абсолютно безопасную защиту от перегрева.

Решением проблемы является одновременное использование сигналов токовых и тепловых сенсоров и организация защиты по определенному алгоритму, исключающему критические перегрузки как по току, так и по теплу. Такую возможность предоставляют ИРМ высокой степени интеграции, к которым относятся модули SKiIP, имеющие широкие возможности мониторинга режимов. Управляющий контроллер может вычислять реальную температуру чипа  $T_j$  на основании сигналов, получаемых с датчиков, и анализа рабочих режимов схемы. Зависимость  $T_j$  от времени  $t_p$  определяется в соответствии с выражением:

$$T_j(t_p) = T_r + P_o \times R_{th(j-r)} + (P_{over} - P_o) \times Z_{th(j-r)} @ t_p,$$

где  $P_o$  — мощность рассеивания при  $t = 0$ ;  $P_{over}$  — мощность рассеивания в режиме перегрузки;  $Z_{th(j-r)}$  — динамический тепловой импеданс (его зависимость от  $t_p$  всегда приводится в технических характеристиках);  $T_r$  — температура датчика (доступна в виде аналогового сигнала на разъеме X1 модуля SKiIP).

#### Мониторинг напряжения DC-шины

Возможность измерения напряжения DC-шины  $V_{DC}$  в ряде случаев необходима для формирования управляющего сигнала контроллера. Такая информация требуется, например, в режиме динамического торможения привода или в тех случаях, когда транзисторы необходимо отключать при достижении напряжением шины критического значения. В модулях SKiIP с опцией U (о чем указывает буква U в обозначении) нормализованный аналоговый сигнал, пропорциональный  $V_{DC}$ , доступен на сигнальном разъеме DIN 41651.

Измерение напряжения шины производится с помощью дифференциального усилителя с высоким входным импедансом. Крутизна преобразования выбирается таким образом, чтобы аналоговое напряжение на выходе **Analog DC-link voltage-sense** равнялось 9 В при максимальном рекомендуемом напряжении на шине питания  $V_{DCtrip}$  (табл. 3). Погрешность преобразования не превышает 2% при температуре 25 °С.

На выходе дифференциального усилителя SKiIP установлен фильтр низких частот с постоянной времени 500 мкс. Схема измерения изготавливается и тестируется в соответствии со стандартом безопасности EN50178. Наличие опции U одновременно означает,

Таблица 3. Крутизна преобразования напряжения DC-шины и входной импеданс  $R_{in}$  измерительного усилителя модулей SKiIP 2/3

$V_{CES}, B$	$V_{DC} \leftrightarrow V_{DCanalog}$	$R_{in}, MO\Omega$	$V_{DCtrip}, B$
1200	900 В ↔ 9 В	5	900
1700	1200 В ↔ 9 В	6,5	1200

что, кроме мониторинга напряжения шины питания, драйвер SKiiP осуществляет отключение всех IGBT-транзисторов модуля при достижении  $V_{DC}$  уровня 900/1200 В для модулей с рабочим напряжением 1200/1700 В.

В модулях SKiiP с конфигурацией GDL (3-фазный инвертор с тормозным каскадом) имеется встроенный контроллер, осуществляющий функцию управления тормозным транзистором. Входным сигналом контроллера служит напряжение, пропорциональное  $V_{DC}$ , измеряемое дифференциальным усилителем опции U.

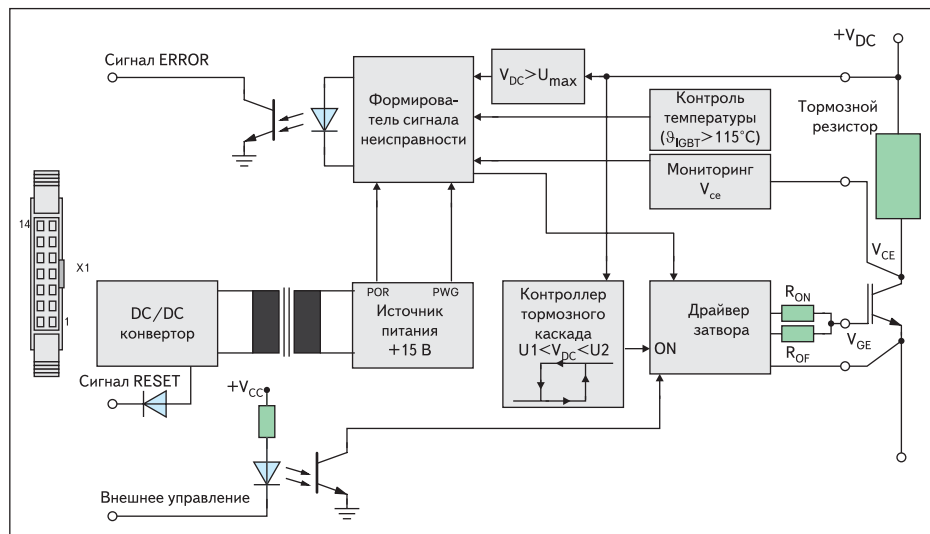
**Таблица 4.** Пороговые напряжения срабатывания тормозного каскада SKiiP GDL

Параметр	SKiiP версия E (сетевое напряжение $U_{\text{лине}} = 400 \text{ VAC}$ )	SKiiP версия A (сетевое напряжение $U_{\text{лине}} = 460 \text{ VAC}$ )
$U_{Z_{\text{max}}}$	730 В	860 В
$U_{Z_{\text{on}}}$ (чоппер включен)	681 В	802 В
$U_{Z_{\text{off}}}$ (чоппер выключен)	667 В	786 В

Схема управления тормозным каскадом модулей SKiiP GDL показана на рис. 6. Встроенный контроллер чоппера SKiiP включает и выключает тормозной транзистор с гистерезисом, величина которого зависит от исполнения модуля (E или A). Уровни напряжения шины  $U_{Z_{\text{on}}}$  и  $U_{Z_{\text{off}}}$ , при которых производится коммутация, приведены в таблице 4 (минимальное время включенного состояния составляет 30 мкс). При достижении напряжением шины предельного значения  $U_{Z_{\text{max}}}$  тормозной транзистор отключается независимо от наличия контрольного сигнала.

## Заключение

Использование интеллектуальных силовых модулей особенно целесообразно в области средних и больших мощностей, где конструктивные и технологические проблемы стоят наиболее остро, а эксперименты и макетирование обходятся слишком дорого. Наибольшую ценность имеют ИРМ, представляющие собой законченное схемно-конструкторское решение, к которым относятся



**Рис. 6.** Схема работы тормозного каскада SKiiP GDL



**Рис. 7.** Конвертер ветрогенератора мощностью 1,5 МВт на основе модулей SKiiP

интеллектуальные силовые ключи, производимые компанией SEMIKRON.

Применение модулей SKiiP, рассчитанных на рабочий ток до 2400 А и имеющих все основные конфигурации (полумост, 1-фазный мост, 3-фазный мост), позволяет создавать широкий класс силовых преобразовательных устройств, отличающихся высокой надежностью, хорошими тепловыми характеристиками и беспрецедентной стойкостью к термоциклированию. Для построения готового изделия на основе SKiiP требуется только зве-

но постоянного тока, соединительные шины (также поставляемые компанией SEMIKRON в качестве аксессуаров) и управляющий контроллер.

Широкий диапазон мощностей и высокий уровень интеграции дает возможность успешно использовать модули SKiiP в энергоемких применениях, таких как транспорт, частотно-регулируемый привод и энергетика. Ярким примером сказанному может быть тот факт, что силовые ключи SKiiP являются базовым элементом для построения подавляющего количества силовых преобразователей ветроэнергетических станций (рис. 7). Общая мощность таких конвертеров, работающих в настоящее время в энергосистемах по всему миру, превышает 20 ГВт.

Одним из основных отличий компонентов семейства SKiiP от интеллектуальных силовых модулей, выпускаемых ведущими мировыми производителями, является наличие интегрированных датчиков тока фазы, температуры теплоотвода и напряжения DC-шины. Информация, получаемая с этих сенсоров, поступает на встроенную схему управления, где преобразуется в аналоговые гальванически изолированные сигналы. Они могут быть использованы для мониторинга режимов работы преобразователя, управления им и создания гибкой системы защиты, обеспечивающей функционирование изделия в рамках безопасных режимов работы. ■

## Литература

1. Колпаков А. И. SKiiP против IPM, или Сколько интеллекта нужно модулю // Электронные компоненты. 2003. № 9/10.
2. SKiiP Modules Explanations. SEMIKRON International, 2007.
3. SKiiP Application Notes. SEMIKRON International, 2004.
4. Arendt Wintrich. Sensor Applications in Power Modules. SEMIKRON Elektronik, 2007.