

SEMiX — новое поколение низкопрофильных модулей IGBT

фирмы SEMIKRON

На выставке PCIM-2003, прошедшей в Нюрнберге в мае 2003 года, впервые было представлено новое поколение модулей IGBT SEMIKRON SEMiX, предназначенных для производства высокоэффективных малогабаритных мощных преобразователей. В этом году на PCIM-2004 можно было увидеть новые модификации SEMiX — трехфазный инвертор SEMiX 13 и интеллектуальный силовой модуль на основе модуля SEMiX 3 и новейшего драйвера SKYPER.

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Основной причиной выпуска нового семейства модулей SEMIKRON, получившего название SEMiX, были требования рынка по дальнейшему повышению эффективности пре-

образовательной техники и необходимость разработки аналогов модулей EconoPack+ (EUPEC), чрезвычайно популярных благодаря малым габаритам и высокой эффективности. Очевидно поэтому во всех материалах и презентациях, посвященных SEMiX, проводится сравнение их характеристик с параметрами модулей Econopack+.

Для решения задачи обеспечения соизмеримых и лучших параметров и получения большей мощности в аналогичном габарите специалисты SEMIKRON разработали серию низкопрофильных модулей SEMiX, внешний вид которых приведен на рис. 1. Каждый модуль содержит 2, 3 или 4 параллельно соединенных полумостовых каскада (см. рис. 2b, c, d). Модули отличаются только длиной, что упрощает разработку вариантов конструкции для изделий различной мощности. Для подключения тепловой защиты на базовой плате модулей устанавливается термодатчик с NTC характеристикой.

Керамическая DBC (Direct Bonded Copper) плата модуля SEMiX с полумостовым каскадом IGBT показана на рис. 2a. Красные области на плате определяют точки подключения пружинных сигнальных контактов модуля, являющихся «фирменным» элементом конструкции изделий SEMIKRON. Подобные контакты широко используются в модулях SEMIKRON для соединения затворов силовых транзисторов с платой управления, многочисленные испытания показали их высокую надежность и хорошую временную стабильность параметров в самых тяжелых условиях эксплуатации [3]. Специально разработанная для SEMiX топология размещения пружинных контактов и наличие непосредственной связи с выводами затвора и эмиттера каждого кристалла позволяет оптимизировать динамические характеристики параллельно соединенных транзисторов в режиме переключения и короткого замыкания (КЗ).

Обеспечение динамического баланса параллельно соединенных кристаллов является серьезной проблемой стандартных модулей, конструкция которых не позволяет обеспечить идентичность распределенных индуктивностей силовых и сигналь-

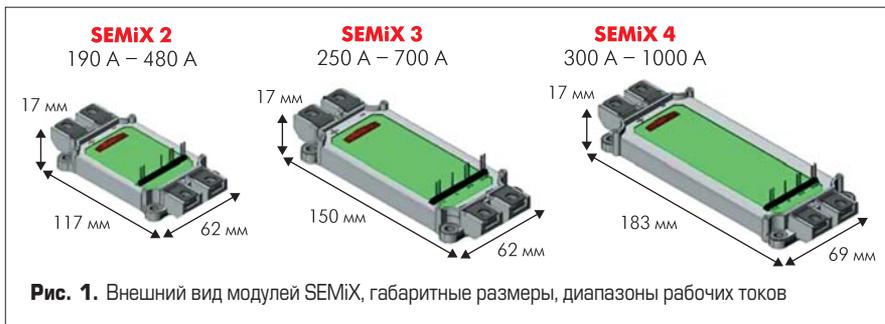


Рис. 1. Внешний вид модулей SEMiX, габаритные размеры, диапазоны рабочих токов

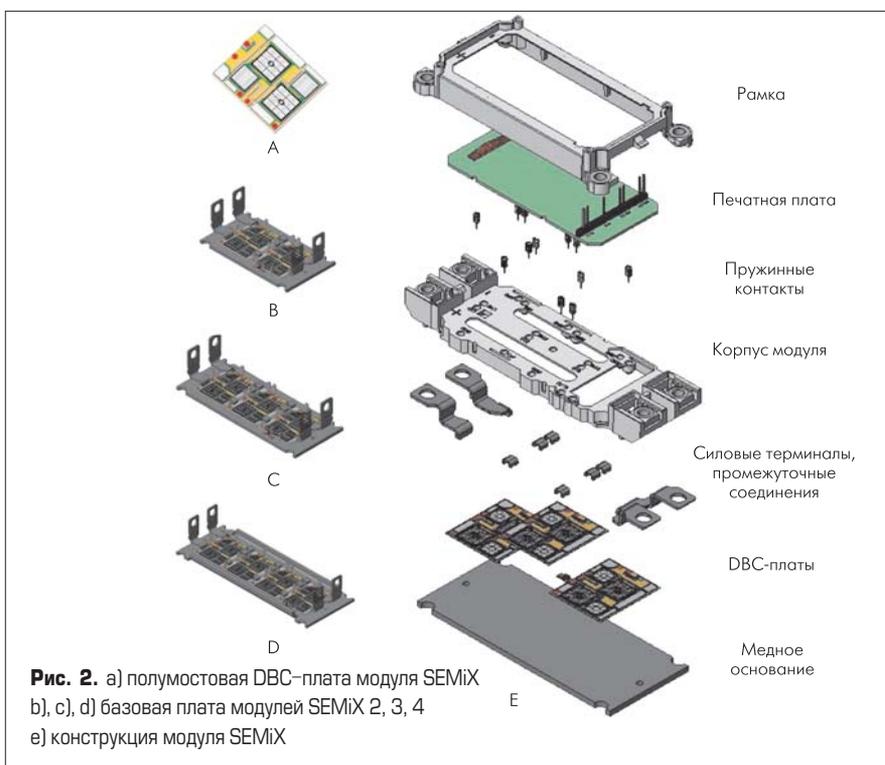


Рис. 2. а) полумостовая DBC-плата модуля SEMiX
b), c), d) базовая плата модулей SEMiX 2, 3, 4
е) конструкция модуля SEMiX

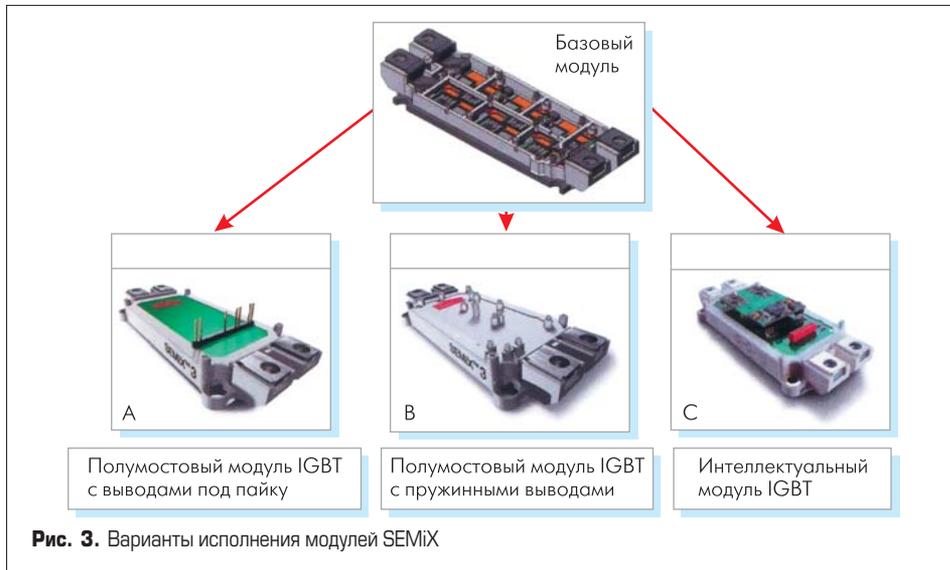


Рис. 3. Варианты исполнения модулей SEMiX

ных цепей. Несимметрия соединительных шин приводит к тому, что все транзисторы не могут переключаться одновременно и с одинаковой скоростью, что приводит к дисбалансу токов и возникновению паразитных осцилляций, что особенно опасно в режиме КЗ. Тем более важной оказывается возможность выбора положения сигнальных контактов затвора и эмиттера, кроме того, оптимальная топология силового каскада позволяет изменять сопротивление затвора в широких пределах. В обычных модулях снижение номинала резисторов затвора для уменьшения динамических потерь часто порождает проблемы, связанные с перенапряжениями и паразитными генерациями.

Пружинные сигнальные контакты SEMiX могут быть выведены наружу и зафиксированы с помощью отверстий в корпусе (рис. 3b), они также используются для соединения силового каскада с переходной платой, имеющей выводы под пайку (рис. 3a). На плате могут быть установлены резисторы затвора и элементы для защиты сигнальных выводов от динамических перенапряжений. И наконец, на базе модуля с пружинными выводами предусмотрен вариант SEMiX IPM — интеллектуальный силовой модуль (рис. 3c). На рис. 3 показаны возможные варианты исполнения SEMiX.

Особенности конструкции модулей SEMiX, использование новейших типов кристаллов SPT и Trench IGBT-транзисторов направлены на обеспечение максимальной плотности тока при минимальной высоте корпуса. Для снижения суммарных потерь мощности при высоких токах необходимо обеспечить низкое омическое сопротивление силовых терминалов и промежуточных соединений полумостовых каскадов. Очень важным параметром является также значение паразитной распределенной индуктивности выводов, влияющее на уровень перенапряжения при отключении транзисторов.

Вариант готового конструктива 3-фазного инвертора с модулями SEMiX 3 показан на рис. 7. Выводы SEMiX, предназначенные для подключения силовых шин DC и AC, размещены по разные стороны модуля. Расположение силовых терминалов по краям

упрощает установку платы драйвера и позволяет размещать ее непосредственно на модуле, как показано на рис. 3. При этом обеспечивается кратчайшая связь выходов драйвера с выводами управления силовых транзисторов.

Конструкция модуля SEMiX показана на рис. 2e. Керамические DBC-платы (материал — оксид алюминия) с кристаллами силовых транзисторов и антипараллельных диодов устанавливаются на медное основание и соединяются в параллель с помощью промежуточных U-образных плоских перемычек. Перемычки, так же как и терминалы DC и AC, подключаются к медным шинам, нанесенным на керамику, с помощью пайки. Такой способ соединения обеспечивает минимальное значение потерь проводимости и распределенных индуктивностей. Паяное соединение также позволяет обеспечить отдачу тепла с силовых выводов через керамическую DBC-плату непосредственно на медное основание и радиатор.

Спиральные пружинные контакты, зафиксированные в корпусе, осуществляют связь сигнальных выводов силовых транзисторов и термодатчика с промежуточной печатной платой или непосредственно с платой управления. Точки подключения пружинных контактов помечены красным цветом на рис. 2a и 4c. Как уже было упомянуто, выбор точек подключения контактов осуществляется для получения оптимальных динамических характеристик и минимальной взаимной связи между каскадами.

Испытания, проводимые SEMIKRON, подтверждают высокую надежность соединения с помощью спиральных пружинных контактов и долговременную стабильность параме-

тров контактов при вибрационных нагрузках и термоциклировании. Специальные тесты показали, что распределенная индуктивность пружинных сигнальных соединителей не превышает индуктивности прямых паяных выводов и практически не оказывает влияния на динамические характеристики модуля.

Для SEMiX была разработана новая конструкция базовой платы, позволяющая объединять модули в компактной 3-фазной конфигурации или включать их параллельно. На базовой плате и корпусе модуля делается выборка в виде полукруга, а крепежное отверстие образуется при установке модулей рядом друг с другом (рис. 4a, b).

Сборка модулей SEMiX производится на полностью автоматической линии. На первом этапе производится установка кристаллов на DCB-плату с помощью бессвинцовой пайки. Далее методом ультразвуковой сварки осуществляется подключение проводников (bonding), соединяющих кристалл с шинами связи, нанесенными на керамику диффузионным способом, и производится 100%-й статический контроль.

На следующей стадии производства DBC-платы и силовые терминалы напаиваются на медную базовую плату по новой для силовых модулей технологии вакуумной пайки в парах припоя. После установки на основание пластмассовой рамки корпуса с пружинными сигнальными выводами модуль заливается силиконовым гелем. На этом этапе производится 100%-й тест статических и динамических характеристик и делается лазерная маркировка.

Характеристики проводимости силовых выводов и паяных соединений модулей SEMiX проверяются по падению напряжения при пропускании в различных направлениях импульсов тока I_{test} амплитудой 440...450 А и длительностью 80 мкс. Испытания при импульсном токе необходимы для того, чтобы исключить погрешности, вносимые при нагреве токопроводящих элементов и чипов.

Напряжение насыщения V_{CEsat} IGBT или прямое напряжение V_F антипараллельного диода измеряются на терминале (TL — Terminal Level) и чипе (CL — Chip Level) при температуре кристалла T_j 25 °C и 125 °C. Результаты измерений и расчетов суммарного значения распределенного сопротивления в цепях эмиттера и коллектора R_{CC+EE} приведены в таблице 1. Сопротивление определено как разность напряжений в точках TL и CL, деленное на значение тока. Измерения показывают низкое значение паразитных сопротивлений токопроводящих цепей и их симмет-



Рис. 4. Конструкция базовой платы, внешний вид 3-фазного модуля SEMiX 33

Таблица 1. Распределенные сопротивления терминалов SEMiX

$T_{j/c}$	I_{test}, A	Путь тока	V_{CEsat} / V_F (TL), В	V_{CEsat} / V_F (CL), В	R_{CC+EE} МОм
25	447	+DC → AC (IGBT)	1,99	1,77	0,49
	448	AC → -DC (IGBT)	2,06	1,77	0,65
	450	AC → +DC (диод)	1,70	1,48	0,49
	450	-DC → AC (диод)	1,75	1,50	0,56
125	443	+DC → AC (IGBT)	2,28	1,98	0,68
	442	AC → -DC (IGBT)	2,37	1,95	0,95
	450	AC → +DC (диод)	1,79	1,48	0,69
	450	-DC → AC (диод)	1,85	1,49	0,80

ричное распределение при протекании тока в различных направлениях.

Для подтверждения качества конструкции модули SEMiX подвергались термоциклированию в соответствии с требованиями стандарта IEC 600068 (часть 2–14). После воздействия 150 термоциклов с перепадом температуры от -40 до 125 °С электрические параметры, определенные в спецификациях, оставались в пределах допусков для всех тестируемых модулей.

Для улучшения тепловых характеристик конструкции 3-фазный инвертор IGBT может быть выполнен из полумостовых модулей SEMiX, установленных раздельно на некотором расстоянии друг от друга.

Эпюры распределения температуры при раздельном расположении полумостовых модулей SEMiX 3 и в случае применения 3-фазного модуля SEMiX 33 при одинаковом уровне рассеиваемой мощности показаны на рис. 5. Красным цветом выделены зоны с максимальной температурой. Как видно

из эпюр, при разнесении корпусов модулей устраняется эффект взаимного нагрева. В центре 3-фазного модуля наблюдается зона локального перегрева, плата за компактность оказывается достаточно высока: для того, чтобы обеспечить аналогичный тепловой режим силовых кристаллов, в этом случае необходимо или применять более мощный вентилятор, или снижать выходную мощность. Тепловые расчеты и результаты измерений показывают, что разнесение модулей даже на 3 мм (5% от ширины модуля) снижает суммарное тепловое сопротивление «кристалл — окружающая среда» на 20%.

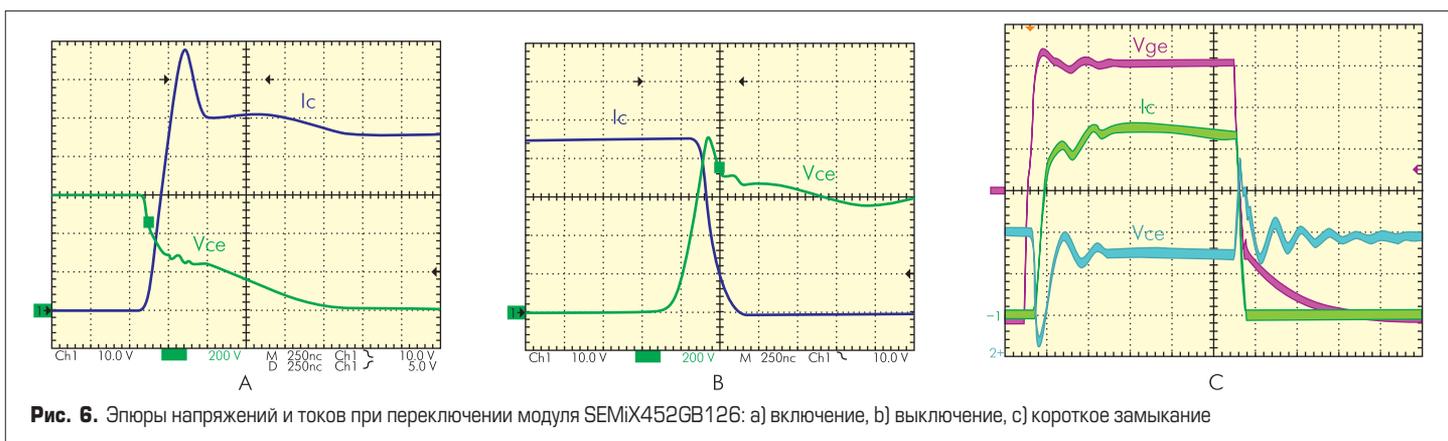
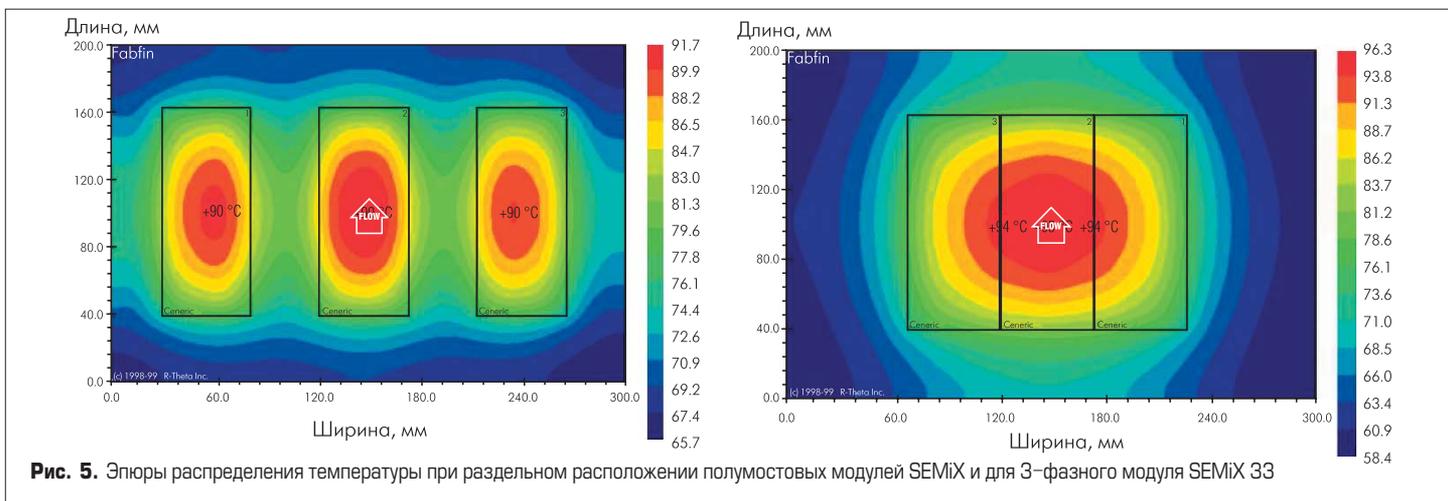
Тепловые характеристики модуля в значительной степени зависят от качества поверхности радиатора. Неравномерность поверхности теплоотвода для обеспечения заданных тепловых характеристик не должна превышать 20 мкм, шероховатость — 10 мкм, а толщина слоя теплопроводящей пасты должна составлять 50...100 мкм. SEMIKRON рекомендует использовать для своих модулей теплопроводящую силиконовую пасту марки Wacker-Chemie P12. Нанесение пасты лучше всего производить с помощью жесткого резинового ролика или трафарета, толщина слоя должна быть проконтролирована с помощью специальных измерительных калибров (например, фирмы ELCOMETER Instruments GmbH: Sechek-Kamm 5–150 мкм). При установке модулей SEMiX должны быть соблюдены все требования, указанные в инструкции по монтажу [7].

Эпюры, приведенные на рис. 6а и б, получены в результате динамических тестов модуля

SEMIX452GB126 (450 А, 1200 В) с кристаллами Trench IGBT при включении и выключении при токе коллектора 900 А, напряжении шины 600 В и температуре кристалла 125 °С.

На графике 5с показаны процессы, происходящие при коротком замыкании одного из транзисторов полумоста через кабель с нормированной распределенной индуктивностью и последующим (через 10 мкс) отключением. Ток при отключении достигает значения $I_{Cmax} = 2300 A (5 \times I_{Cnom})$, что соответствует среднему значению тока «самоограничения» для технологии Trench IGBT. При этом уровень перенапряжения на коллекторе не превышает 970 В, что считается безопасным значением для модуля с рабочим напряжением 1200 В. Благодаря оптимальному расположению сигнальных выводов аналогичные графики, полученные для других транзисторов 3-фазного инвертора, показывают близкий характер процесса переключения, а также низкую колебательность и практическое отсутствие паразитных связей между транзисторами моста. При испытаниях использовалась DC-шина, разработанная для модулей SEMiX (рис. 7). На рисунке также видны снабберные конденсаторы и гибкие кабели сечением 92 мм², подключенные к AC-терминалам.

Обратите внимание на то, что кабели подключены к выводам модуля через промежуточную пластину, закрепленную на основании с помощью втулки. Этот элемент конструкции необходим для уменьшения вибрационной нагрузки на терминалы, имеющие паяное соединение с модулем. Усилие, которое могут выдерживать силовые выводы



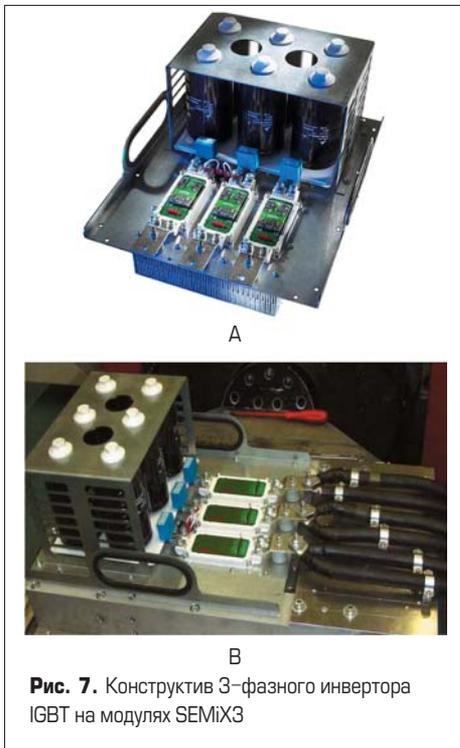


Рис. 7. Конструктив 3-фазного инвертора IGBT на модулях SEMiX3

SEMiX, согласно документации составляет 100 N в каждом направлении. Конструкция, показанная на рисунке, подвергалась специальным испытаниям на воздействие вибрации и ударов. Параметры испытаний: ускорение 1 g, частота 10...1000 Гц, длительность — 10 мин в каждом направлении. Испытания показали высокую стабильность механических параметров конструкции.

Модули SEMiX 33 и EconoPACK+ имеют схожие конструктивы. У них идентичны крепежные размеры, габаритные размеры и расположение силовых терминалов. Однако модули SEMIKRON имеют ряд существенных технологических преимуществ, что выразилось в улучшении тепловых и электрических параметров. Сравнительные характеристики модулей приведены в таблице 2а.

Немногие разработчики при расчете тепловых режимов преобразователя учитывают потери, создаваемые распределенным сопротивлением силовых выводов. Однако, например при токе 450 А, потери на выводах модуля EconoPACK+ FS450R12KE3 с сопротивлением $R_{CC+EE} = 1,1$ мОм оказываются больше 200 Вт! В модуле SEMiX 703GB126HD, где это сопротивление снижено до 0,8 мОм,

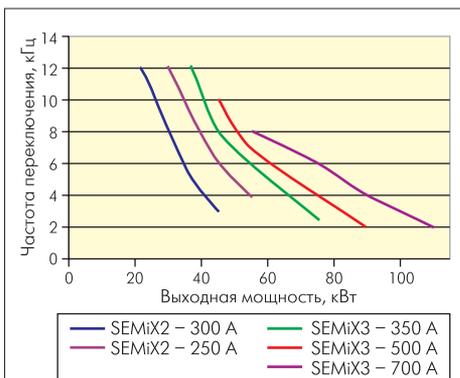


Рис. 8. Зависимость выходной мощности от частоты ШИМ

Таблица 2. а) Сравнительные характеристики модулей SEMiX 33 и EconoPACK+ (EUPEC) с рабочим напряжением 1200 В

Тип модуля	I_C , А @80 °С	$V_{CE(sat)}$, В	R_{CC+EE} мОм	R_{thjc} °С/Вт	R_{thcs} °С/Вт	E_{on+off} мДж
FS150R12KE	150	1,7	1,1	0,18	0,05	11 + 24
253GD126HD	180	1,65	0,8	0,14	0,04	17 + 21
FS225R12KE	225	1,7	1,1	0,11	0,05	15 + 36
353GD126HD	280	1,65	0,8	0,095	0,04	18 + 38
FS300R12KE	300	2	1,1	0,085	0,05	22 + 43
503GD126HD	370	1,65	0,8	0,08	0,04	29 + 48
FS450R12KE	450	1,7	1,1	0,06	0,05	33 + 65
703GD126HD	490	1,65	0,8	0,055	0,04	38 + 75

Таблица 2. б) Сравнительные характеристики модулей SEMiX 4 и CM100DU-34NF (Mitsubishi) с рабочим напряжением 1700 В

Тип модуля	I_C , А @25 °С	$V_{CE(sat)}$, В	V_f , В	C_{ies} , нФ	R_{thjc} °С/Вт	R_{thcs} °С/Вт	E_{on+off} мДж	Габариты, мм
CM100DU-34NF	1000	2,2	3,0	220	0,03	0,016*	Нет данных	150×166×35
SEMIX854GB176HD	855	2,0	2,0	40	0,03	0,03*	480 + 225	68×180×17

*Примечание: разница значений тепловых сопротивлений «корпус — теплосток» объясняется различными методиками измерения.

I_C — ток коллектора; $V_{CE(sat)}$ — напряжение насыщения «коллектор — эмиттер»;

R_{CC+EE} — сопротивление силовых выводов; R_{thjc} — тепловое сопротивление «кристалл — корпус»;

R_{thcs} — тепловое сопротивление «корпус — теплосток»; E_{on+off} — энергия потерь включения + выключения;

V_f — прямое падение напряжения на антипараллельном диоде; C_{ies} — входная емкость затвора.

выигрыш составляет около 60 Вт. При токе 300 А падение напряжения на силовых выводах за счет уменьшения контактного сопротивления уменьшается на 130 мВ, температура перегрева терминалов снижается с 85 до 40 °С.

Уменьшение значения тепловых сопротивлений «кристалл — корпус» и «корпус — теплосток» позволяет снизить температуру кристалла и, соответственно, увеличить допустимые токовые нагрузки модуля. Это в сочетании с меньшим напряжением насыщения позволяет компенсировать несколько более высокие динамические потери по сравнению с модулями EconoPACK+.

Таблица 2б демонстрирует сравнительные характеристики модулей SEMiX 854GB176HD и новейшего модуля Mitsubishi 5-го поколения CM100DU-34NF с рабочим напряжением 1700 В. Сравнение может показаться не совсем корректным, поскольку номинальный ток модуля Mitsubishi — 1000 А, а SEMIKRON — 855 А. Однако при этом статические потери модуля SEMiX будут при том же токе существенно меньше за счет меньшего напряжения насыщения IGBT и меньшего падения напряжения на диоде. Оценить соотношение динамических потерь пока невозможно, так как в технических характеристиках модуля CM100DU-34NF отсутствуют данные об энергии потерь. Однако меньшая величина входной емкости говорит о том, что потери переключения драйвера будут значительно меньше при управлении SEMiX. И кроме всего прочего, модуль SEMiX меньше и дешевле!

На рис. 8 показана зависимость максимальной выходной мощности модулей SEMiX от частоты переключения, а в таблицах 3–5 приведены основные технические характеристики выпускаемых модулей SEMiX, рассчитанных на напряжение 1200 и 1700 В. При производстве модулей SEMiX используется 2 типа технологии: Trench-IGBT, позволяющая получить сверхнизкие потери проводимости, и SPT-IGBT (Soft Punch Through) с оптимальным сочетанием потерь проводимости и переключения.

Заключение

На выставке PCIM-2004, прошедшей в Нюрнберге в мае этого года, на стенде SEMIKRON был представлен интеллектуальный модуль SEMiX IPM на базе нового драйвера SKYPER (см. рис. 10). Это унифицированное устройство управления полумостовым модулем IGBT вобрало в себя лучшие технические решения, найденные фирмой за 30 лет работы в данном направлении. Базовым устройством для разработки послужил драйвер SKH122A, выпущенный в сотнях тысяч экземпляров и доказавший свою функциональную полноту и надежность.

В SKYPER, блок-схема которого приведена на рис. 9, предусмотрены все необходимые базовые виды защит и мониторинга, а также режим плавного отключения при срабатывании защиты SSD (Soft Shut Down). Гальваническая изоляция управляющих сигналов осуществляется с помощью импульсных трансформаторов (напряжение изоляции 4 кВ) с двунаправленной передачей сигнала. Питание устройства производится от одного источника 15 В, все напряжения, необходимые для работы выходных каскадов драйвера, вырабатываются с помощью встроенного DC/DC-конвертора. Пиковый выходной ток драйвера составляет 8 А, он способен управлять модулями, имеющими заряд затвора до 6 мкКл. SKYPER выпускается в двух версиях: BASE и PREMIUM, вторая модификация дополнительно включает в себя блок защиты от перегрева (датчик Tsenso и блок «Термозащита» на рис. 9) и дополнительный вход для подключения датчика тока (IERR на рис. 9).

Специально для SKYPER выпущена интегральная микросхема (ASIC — Application Specific IC) SKIC 2001, структурная схема которой вместе с общей блок-схемой драйвера показана на рис. 9. Двухканальная микросхема SKIC 2001 выполняет следующие функции:

- подавление шумовых импульсов;
- нормирование уровней и фронтов входных сигналов;

Таблица 3. Основные характеристики модулей SEMiX 1200 В технологии SPT

Тип модуля X	$I_C, A @ 25^\circ C$	$V_{CEsat}, B @ 25^\circ C$	$E_{tot}, мДж @ 125^\circ C$	I_{CRMS}, A	$R_{thjc}, ^\circ C/Вт$	Корпус SEMiX	Схема
202GB128D	190	1,9	21	100	0,165	2	НВ
302GB128D	310	1,9	32	150	0,095	2	
352GB128D	370	1,9	42	200	0,085	2	
403GB128D	420	1,9	47	225	0,075	3	
553GB128D	540	1,9	63	300	0,06	3	
403GD128D	420	1,9	47	225	0,075	33	6-pack
553GD128D	540	1,9	63	300	0,06	33	

Таблица 4. Основные характеристики модулей SEMiX 1200 В технологии Trench

Тип модуля SEMiX	$I_C, A @ 25^\circ C$	$V_{CEsat}, B @ 25^\circ C$	$E_{tot}, мДж @ 125^\circ C$	I_{CRMS}, A	$R_{thjc}, ^\circ C/Вт$	Корпус SEMiX	Схема
252GB126HD	250	1,7	38	150	0,15	2	НВ
253GB126HD	250	1,7	38	150	0,14	3	
302GB126HD	310	1,7	50	200	0,125	2	
353GB126HD	380	1,7	56	225	0,095	3	
452GB126HD	480	1,7	75	300	0,08	2	
503GB126HD	490	1,7	75	300	0,075	3	
703GB126HD	700	1,7	113	450	0,055	3	
904GB126HD	910	1,7	152	580	0,042	4	
253GD126HD	250	1,7	38	150	0,14	33	
353GD126HD	380	1,7	56	225	0,095	33	
503GD126HD	490	1,7	75	300	0,075	33	6-pack
703GD126HD	700	1,7	113	450	0,055	33	

Таблица 5. Основные характеристики модулей SEMiX 1700 В технологии Trench

Тип модуля SEMiX	$I_C, A @ 25^\circ C$	$V_{CEsat}, B @ 25^\circ C$	$E_{tot}, мДж @ 125^\circ C$	I_{CRMS}, A	$R_{thjc}, ^\circ C/Вт$	Корпус SEMiX	Схема
252GB176HD	260	2,0	150	150	0,11	2	НВ
253GB176HD	250	2,0	150	150	0,12	3	
302GB176HD	320	2,0	200	200	0,095	2	
353GB176HD	380	2,0	225	225	0,078	3	
452GB176HD	460	2,0	300	300	0,07	2	
453GB176HD	460	2,0	300	300	0,07	3	
653GB176HD	660	2,0	450	450	0,048	3	
854GB176HD	855	2,0	705	580	0,038	4	
253GD176HD	250	2,0	150	150	0,12	33	
353GD176HD	380	2,0	225	225	0,078	33	
453GD176HD	460	2,0	300	300	0,07	33	6-pack
653GD176HD	660	2,0	450	450	0,048	33	

В таблицах использованы обозначения:

I_C — ток коллектора; V_{CEsat} — напряжение насыщения; E_{tot} — общая энергия потерь переключения; I_{CRMS} — среднеквадратичное значение тока; R_{thjc} — тепловое сопротивление «кристалл — корпус»; НВ — полумост; 6-pack — 3-фазный мост.

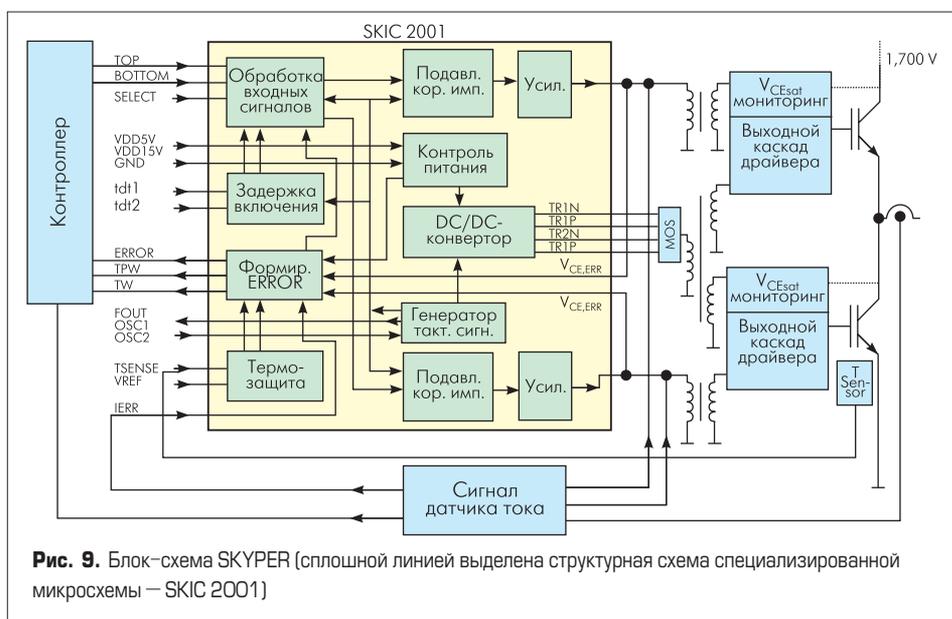


Рис. 9. Блок-схема SKYPER (сплошной линией выделена структурная схема специализированной микросхемы — SKIC 2001)

- мониторинг напряжения питания (защита UVLO);
 - мониторинг сигналов ошибки;
 - запрет одновременного включения транзисторов полумоста, формирование t_{dt} ;
 - управление встроенным изолированным DC/DC-конвертером.
- Интерфейс драйвера организован так, что логические сигналы управления объединены в функциональные группы, что упрощает



Рис. 10. Интеллектуальный силовой модуль SEMiX IPM: SKYPER + плата адаптера + модуль SEMiX 3

подключение и способствует снижению перекрестных помех. При этом для функционирования устройства достаточно подачи сигналов TOP, BOTTOM (управление затворами) и SELECT (разрешение).

Расширение гаммы производимых элементов, разработка новых поколений модулей является жесткой необходимостью, диктуемой конкуренцией на рынке электронных компонентов. С другой стороны, расширение номенклатуры и улучшение технических характеристик помогают пользователю осуществить правильный выбор, упростить разработку, сделать ее более конкурентоспособной. С этой точки зрения появление новых модулей SEMiX еще более укрепляют позиции SEMIKRON как мирового лидера в производстве компонентов силовой электроники.

Разработка модулей серии SEMiX расширила область применения силовых модулей в стандартном конструктиве до мощностей свыше 150 кВт. В модулях SEMiX применены новейшие кристаллы Trench IGBT со сверхнизкими потерями проводимости и кристаллы SPT IGBT с оптимизированным соотношением потерь проводимости и переключения. В качестве антипараллельных диодов используются диоды CAL, обеспечивающие низкие потери проводимости и плавный характер обратного восстановления. При этом SEMIKRON предлагает, как и раньше, изделия с беспрецедентными электрическими, тепловыми характеристиками и показателями надежности.

Литература

1. Thomas Stockmeier, Yvonne Manz, Jurgen Steger. Novel High Power Semiconductor Module for Trench IGBTs. SEMIKRON International.
2. Ralph Annacker, Thomas Grasshoff. A New Platform for IGBT modules. PCIM Europe July/August 2003.
3. Martin Freyberg. Power and Auxiliary Terminals for Modern Low Profile Power Modules. SEMIKRON International.
4. Колпаков А. И. Обеспечение надежности интеллектуальных силовых модулей // Электронные компоненты. 2003. № 4.
5. T. Laska, L. Lorenz. The field Stop IGBT Concept with an optimized Diode. PCIM Proceedings. 2002.
6. Mounting Instructions and Application Notes for SEMiX IGBT Modules.