

Модули SEMITOR

как альтернатива дискретным корпусам TO

Основные усилия разработчиков компании SEMIKRON направлены на удовлетворение жесточайшим требованиям, предъявляемым к современным силовым электронным компонентам. Прежде всего, это требования по надежности, энергосбережению и электромагнитной совместимости. Компания SEMIKRON известна в первую очередь благодаря своим уникальным разработкам в области компонентов высокой мощности. Однако в производственной программе фирмы имеются модули SEMITOR, предназначенные для использования в маломощных применениях.

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

В производственной программе SEMIKRON малогабаритные модули SEMITOR являются самыми популярными. Они рассматриваются как альтернатива дискретным транзисторам в корпусах TO — наиболее популярным компонентам для разработки и производства преобразователей мощностью до 3–5 кВт. Модули SEMITOR выпускаются по уникальной прижимной технологии SKiP, разработанной SEMIKRON и позволяющей обеспечить хорошие тепловые характеристики и высокие показатели надежности.

Особенности модулей SEMITOR

Низкое тепловое сопротивление «кристалл – теплосток» R_{thjc}

Модули SEMITOR не имеют базовой несущей платы, соответственно, отсутствует градиент температуры, создаваемый тепловым сопротивлением R_{thcs} «корпус — теплоотвод». В основании модуля находится керамическая DCB-плата из оксида алюминия Al_2O_3 , на которой расположены силовые кристаллы IGBT. Прижимная технология SKiP предусматривает, что керамическое основание располагается непосредственно на радиаторе и тепловая связь с ним осуществляется только с помощью механического прижима. При этом за счет оптимального распределения прижимающего усилия и исключения базовой платы обеспечивается низкое тепловое сопротивление «кристалл — теплосток» и, соответственно, высокое значение плотности тока. Для модулей SEMITOR не определяется значение теплового сопротивления «кристалл — корпус» R_{thjc} , поскольку отсутствует корпус, как теплопроводящий элемент конструкции.

Высокая устойчивость к термоциклированию

Как показали результаты многочисленных испытаний на воздействие повторяющихся перепадов температуры (термоциклирование), основной причиной отказов модулей стандартной конструкции является разрушение связи между керамической

DCB-платой и медным основанием модуля. Это является следствием существенной разницы в коэффициентах теплового расширения материалов керамики (оксид алюминия или нитрид алюминия) и меди. Исключение базовой платы из конструкции модуля решает эту проблему в принципе, обеспечивая значительное увеличение количества термоциклов, которое может выдержать модуль, не выходя из строя.

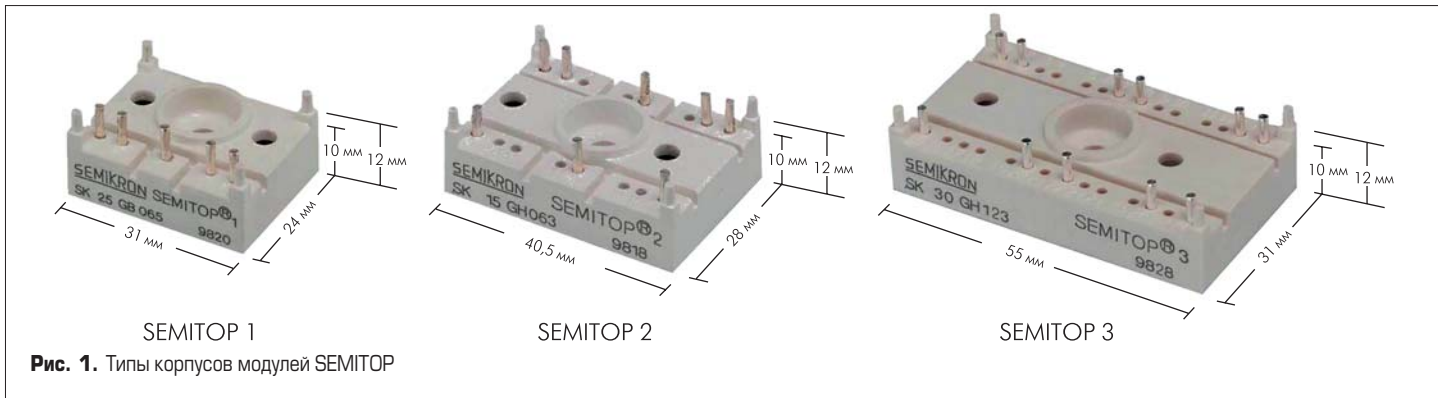
Новейшие технологии кристаллов

В модулях IGBT SEMITOR используются кристаллы NPT IGBT-транзисторов производства ABB и кристаллы антипараллельных диодов CAL, разработанные фирмой SEMIKRON. Гомогенная структура NPT IGBT имеет очевидные достоинства, в частности, это высокая стойкость к короткому замыканию, положительный температурный коэффициент напряжения насыщения, прямоугольная область безопасной работы RBSOA (Reverse Biased Safe Operating Area). Диоды CAL (Controlled Axial Lifetime) достаточно хорошо согласованы по своим характеристикам с NPT-транзисторами, обеспечивают минимальные потери проводимости и переключения. Их особенностью является плавный процесс обратного восстановления, способствующий минимизации уровня радиопомех. В модулях SEMITOR также применяются кристаллы UltraFast MOSFET-транзисторов, а в каскадах выпрямителей используются диоды и тиристоры с высоким значением тока перегрузки.

Простая и удобная конструкция

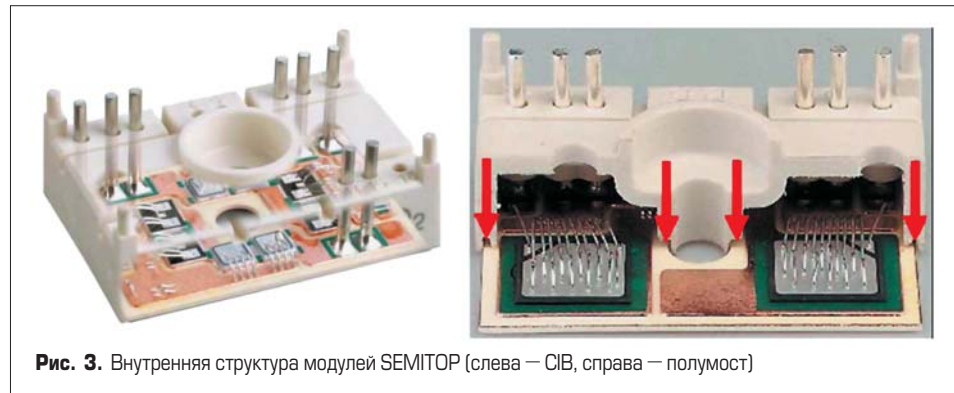
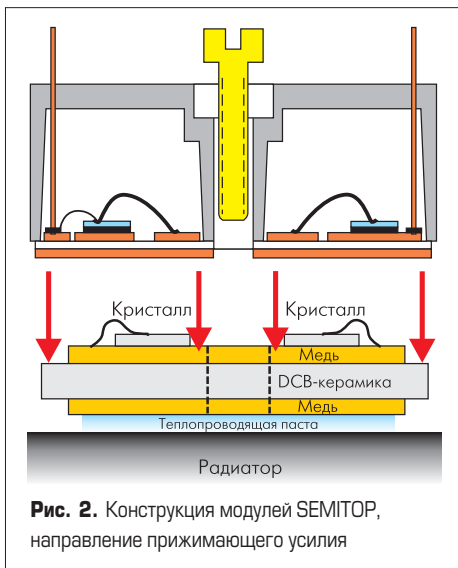
Для установки на радиатор модулей SEMITOR во всех исполнениях служит один крепежный винт. Равномерное распределение прижимного усилия и хороший отвод тепла обеспечиваются конструкцией корпуса модуля. Оптимальное взаимное расположение силовых кристаллов транзисторов и диодов позволяет получить минимальное значение распределенной индуктивности силовых шин.

Внешний вид и размеры трех типов SEMITOR приведены на рис. 1. Модули SEMITOR выпускают-



ся практически во всех известных конфигурациях схем, что позволяет пользователю выбрать для себя элемент с требуемой схемой. Один модуль SEMITOP заменяет от 2 до 12 корпусов ТО. Тип конфигурации элемента включен в его обозначение, возможные варианты приведены ниже:

- Тиристорные, диодные модули:
 - KD — полумост;
 - ND — два диода с общим анодом;
 - KQ — однофазный АС-ключ;
 - KT — полумост;
 - UT — трехфазный АС-ключ;
 - NT — два тиристора с общим анодом;
 - KH, KL — полупроводимый полумост;
 - V/D — однофазный/трехфазный диодный мост;
 - VT/DT — однофазный/трехфазный тиристорный мост;
 - BH/DH — однофазный/трехфазный полупроводимый мост.
- Модули MOSFET/IGBT (первая буква G — IGBT, M — MOSFET):
 - GA — одиночный ключ;
 - GB/GH/GD — полумост/мост/3-фазный мост;
 - GAN — несимметричный полумост;
 - GAL/GAR — чоппер нижнего/верхнего плеча;
 - GM — два IGBT-транзистора с общим эмиттером.
- Модули CIB (Converter — Inverter — Brake):
 - BGD/DGD — 1/3-фазный выпрямитель, чоппер, 3-фазный инвертор;
 - BGB — 1-фазный выпрямитель, полумост;



- DGL — 3-фазный выпрямитель, чоппер;
- DGH — 3-фазный выпрямитель, чоппер верхнего и нижнего плеча.

SEMIKRON является пионером в разработке и производстве модулей прижимной конструкции, изготовленных по технологии «pressure-contact» без базовой платы. Большинство модулей SEMIKRON, в том числе и наиболее популярные интеллектуальные силовые модули SKiIP с током до 2400 А, изготавливаются по данной технологии, позволяющей получить отличные тепловые характеристики и обеспечить высокую стойкость изделия к воздействию тепловых ударов.

Конструкция модулей SEMITOP и направление прижимающего усилия показаны на рис. 2 и 3. Кристаллы IGBT-транзисторов и CAL-диодов установлены на керамической плате из оксида алюминия Al_2O_3 толщиной 0,63 мм. На керамику методом диффузии нанесены медные слои толщиной 0,3 мм: сверху это шины связи, снизу выполняется сплошное — нижний слой выполняет функции экрана и улучшает теплоотдачу. По сравнению с транзисторами в изолированных корпусах TO-220 модули SEMITOP с аналогичным размером кристалла имеют на 30% меньшее тепловое сопротивление «кристалл — теплоотвод», как показано на рис. 4 (типичные значения для кристалла 18 мм²). Преимущество в тепловых характеристиках наблюдается при всех размерах используемых кристаллов, что демонстрируют графики, приведенные на рис. 5. На рисунке показаны измеренные и справочные (datasheet) значения R_{thjs} .

Меньшее значение теплового сопротивления означает, прежде всего, что транзисторы с тем же размером кристалла допускают большее значение тока или имеют меньший перегрев при аналогичном токе. Из-за отсутствия базовой платы для модулей SEMITOP

в технических характеристиках определяется только тепловое сопротивление R_{thjs} («кристалл — теплоотвод»). Тепловые модели SEMITOP включены в базу моделей программы автоматического теплового расчета SemiSel, что позволяет пользователю без особых усилий выбрать элемент для своей схемы и проанализировать режимы его работы в конкретных условиях эксплуатации.

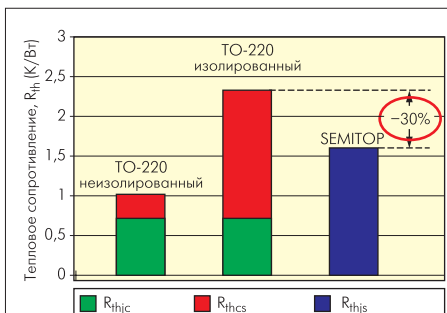


Рис. 4. Соотношение тепловых сопротивлений модулей SEMITOP и транзисторов в корпусах TO-220
 R_{thjc} — сопротивление «кристалл — корпус»
 R_{thcs} — сопротивление «корпус — теплоотвод»
 R_{thjs} — сопротивление «кристалл — теплоотвод»

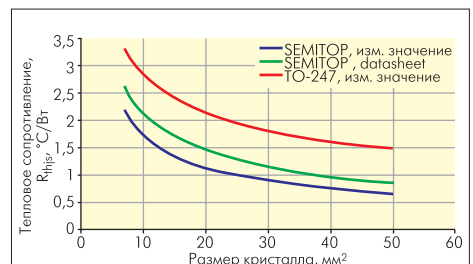


Рис. 5. Зависимость теплового сопротивления R_{thjs} от размеров кристалла для модулей SEMITOP и транзисторов в корпусах TO-247

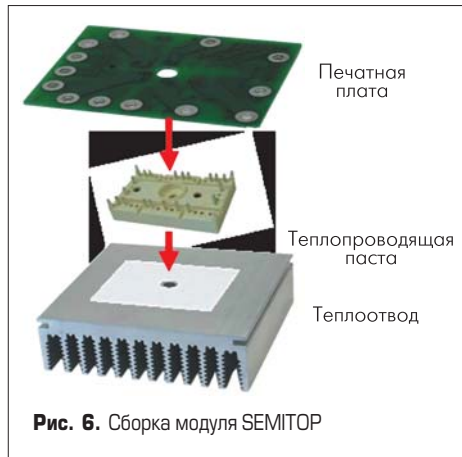


Рис. 6. Сборка модуля SEMITOP

В качестве примера, демонстрирующего преимущества тепловых характеристик «безбазового» модуля, можно привести сравнение теплового сопротивления R_{thjh} «кристалл — теплоотвод» транзистора новейшего поколения NPT³ IXER 35N120D1 фирмы IXYS в изолированном корпусе ISOPLUS-247 и модуля SEMITOP 2 SK 40 GB 123. Данное сравнение корректно еще и потому, что площадь основания модуля SEMITOP 2 (40×28 мм), содержащего 2 транзистора в полумостовом включении, соизмерима с местом, занимаемым 2 транзисторами в корпусе ISOPLUS-247 (40×32 мм). Эти изделия имеют сходные электрические характеристики, но тепловое сопротивление R_{thjh} для транзистора равно 1,2 C/Вт (номинальное значение), а у модуля SEMITOP $R_{thjh} = 1,0$ C/Вт (максимальное значение).

При сборке модулей SEMITOP допускается два способа монтажа: распайка модулей на печатной плате с последующим креплением к радиатору и установка модулей на радиатор с последующим монтажом на печатную плату, как показано на рис. 6.

Применение модулей с керамическим основанием накладывает особые требования на качество поверхности радиатора. Неравномерность поверхности теплоотвода для обеспечения заданных тепловых характеристик не должна превышать 20 мкм, шероховатость — 6 мкм, а толщина слоя теплопроводящей пасты должна составлять 20...25 мкм для модулей SEMITOP 1, 30...35 мкм для SEMITOP 2, 40...55 мкм для SEMITOP 3. SEMIKRON рекомендует использовать для своих модулей теплопроводящую пасту марки Wacker-Chemie P12. Нанесение пасты луч-

Таблица 1. Основные характеристики модулей SEMITOP 3 CIB ($V_{CES} = 600$ В)

Тип	$I_D, A (T_h = 80^\circ C)$	Выпр. мост	$I_C \text{ brake}, A (T_h = 80^\circ C)$	$I_C \text{ inverter} (T_h = 80^\circ C)$	$f_{swmax}, \text{кГц}$
SK 8 BGD 063	32	B2U	7	7	25...30
SK 10 BGD 063	50		10	12	20...25
SK 15 BGD 063	50		10	15	20...25
SK 20 BGD 063	50		10	20	15...20
SK 25 BGD 063	50		10	25	15...20
SK 8 DGD 063	46		B6U	7	7
SK 10 DGD 063	68	10		12	20...25
SK 15 DGD 063	68	10		15	20...25
SK 20 DGD 063	68	10		20	15...20
SK 25 DGD 063	68	10		25	15...20

Примечания:

I_D — ток диодов выпрямительного моста;

B2U, B6U — конфигурация выпрямительного моста (1-фазный, 3-фазный);

I_C — ток коллектора транзисторов IGBT, brake — тормозной транзистор, inverter — 3-фазный инвертор.



Рис. 7. Теплопроводящая поверхность модуля SEMITOP с сухим теплопроводящим компаундом в исходном состоянии (внизу) и после нагрева (вверху)

ше всего производить с помощью жесткого резинового ролика или трафарета, толщина слоя должна быть проконтролирована с помощью специальных измерительных калибров (например, фирмы Fa. ELCOMETER Instruments GmbH).

Для того чтобы упростить технологический процесс нанесения пасты для модулей SEMITOP в качестве опции предлагается специальный сухой теплопроводящий компаунд, наносимый на поверхность модуля с помощью «точечного» трафарета (см. рис. 7).

После установки модуля на радиатор он нагревается до температуры 43 °С, и сухой компаунд растекается по поверхности модуля, вытесняя воздух и заполняя все полости. Особый способ нанесения компаунда гарантирует его равномерное распределение по поверхности. При этом толщина слоя выдерживается на необходимом уровне с высокой точностью. Специальный термогравиметрический анализ теплового контакта показал, что тепловые характеристики компаунда остаются стабильными при температуре до 400 °С.

Наиболее интересной для разработчиков конфигурацией модуля является схема CIB (Converter, Inverter, Brake), объединяющая выпрямительный мост, 3-фазный инвертор и каскад торможения. Схема CIB является базовой для построения привода; специально для данного применения фирмой SEMIKRON выпущено новое поколение модулей SEMITOP CIB (внешний вид модуля показан в левой части рис. 3), имеющих следующие основные отличия от серийно выпускаемых изделий:

- допустимая плотность тока повышена на 50%;
- габариты снижены на 34%;
- повышена стойкость к термоциклированию;
- снижено тепловое сопротивление;
- уменьшено значение распределенной индуктивности шин за счет оптимизации топологии.

Ожидается, что стоимость новых компонентов по сравнению с модулями, имеющими аналогичные характеристики, должна быть меньше на 20%. Этому способствует в первую очередь то, что при производстве новых изделий используются отработанные и проверенные технологические процессы. Единственное конструктивное отличие новых модулей состоит в том, что в них применен многослойный монтаж: дополнительные переходные платы упрощают топологию соединений и способствуют снижению паразитных индуктивностей. При этом поверхность основной DCB-платы более эффективно используется для размещения силовых шин и отдачи тепла на радиатор.

Основные технические характеристики модулей нового поколения приведены в таблице 1. Таблица 2 демонстрирует, как модули меньшего типоразмера SEMITOP 2 могут заменить по значению предельного тока выпускаемые в настоящее время модули SEMITOP 3.

Как и все компоненты, производимые SEMIKRON, модули SEMITOP проходят 100%-й выходной контроль. В таблице 3 приведены виды и условия испытаний на надежность, которым подвергаются после изготовления модули SEMITOP.

Таблица 2. Сравнительные характеристики выпускаемых модулей SEMITOP 3 и SEMITOP 2 нового поколения

SEMITOP 3		SEMITOP 2			
MOSFET					
Современное поколение	$I_{D,A} (T_h = 80^\circ C)$	V_{DSS}, B	Новое поколение		
			$I_{D,A} (T_h = 80^\circ C)$		
			V_{DSS}, B		
			SK 70 MD 075	70	75
SK 115 MD 10	60	100	SK 60 MD 10	60	100
			SK 30 MD 20	30	200
IGBT					
Современное поколение	$I_{C,A} (T_h = 80^\circ C)$	V_{CES}, B	Новое поколение		
			$I_{C,A} (T_h = 80^\circ C)$		
			V_{CES}, B		
SK 8 GD 063	8	600	SK 9 GD 063	8	600
SK 13 GD 063	13	600	SK 14 GD 063	13	600
SK 15 GD 063	15	600	SK 16 GD 063	15	600
SK 25 GD 063	25	600	SK 20 GD 063	20	600
SK 10 GD 123	11	1200	SK 8 GD 126	8A	1200
SK 20 GD 123	15	1200	SK 11 GD 123	11	1200
SK 30 GD 123	22	1200	SK 15 GD 126	15	1200

Примечания:

I_D — ток стока транзисторов MOSFET;

I_C — ток коллектора транзисторов IGBT;

V_{DSS} — напряжение «сток-исток» транзисторов MOSFET;

V_{CES} — напряжение «коллектор-эмиттер» транзисторов IGBT.

Таблица 3. Виды и условия испытаний модулей SEMITOP

Испытание	Условия испытаний	Стандарт
Повышенная температура при повышенном напряжении на выпрямителе СІВ	$t = 125^\circ\text{C}$ $V_{\text{DC}} = 0,66V_{\text{max}}$ $T_1 = 1000 \text{ ч}$	SEMIKRON
Повышенная температура при повышенном напряжении на инверторе СІВ	$t = 125^\circ\text{C}$ $V_{\text{CE}} = V_{\text{max}}$ $T_1 = 1000 \text{ ч}$	IEC 147-4 DIN 41 794
Повышенная температура при повышенном напряжении на затворе	$t = 125^\circ\text{C}$ $\pm V_{\text{GE}} = 20 \text{ В}$ $T_1 = 1000 \text{ ч}$	DIN 45 930 CECC 50 012
Повышенная температура хранения	$t = 125^\circ\text{C}$ $T_1 = 1000 \text{ ч}$	DIN IEC 68-2-2
Пониженная температура хранения	$t = -40^\circ\text{C}$ $T_1 = 1000 \text{ ч}$	DIN IEC 68-2-1
Повышенная влажность, повышенная температура хранения	$t = 85^\circ\text{C}$, $H = 85\%RH$ $T_1 = 1000 \text{ ч}$	DIN IEC 68-2-3
Повышенная влажность, обратное напряжение	$t = 85^\circ\text{C}$, $H = 85\%RH$ $V_{\text{CE}}, V_{\text{DC}} = 80 \text{ В}$ $T_1 = 1000 \text{ ч}$	DIN 45 930 CECC 50 012
Термоциклирование	100 циклов $-40^\circ\text{C}/+125^\circ\text{C}$	DIN IEC 68-2-14
Циклическая нагрузка мощностью	20000 циклов $\Delta t_1 = 125\text{K}$	IEC 147-4 DIN 41 794

Заключение

Дискретные транзисторы и маломощные модули MOSFET/IGBT находят широкое применение в изделиях бытовой техники: стиральных машинах, кондиционерах, пылесосах, системах управления освещением и т. д.

Несомненным преимуществом интегральных модулей является то, что транзисторы в них соединены в определенной конфигурации, что упрощает сборку и обеспечивает минимальное значение распределенных индуктивностей и, следовательно, уменьшение переходных перенапряжений при переключении. Данное преимущество наглядно демонстрирует рис. 8, на котором показан процесс сборки 3-фазного инвертора в случае применения дискретных транзисторов и модуля SEMITOP. При использовании транзисторов необходимо большее количество крепежных элементов и изолирующих подложек, требуется строгий контроль сопротивления изоляции и напряжения пробоя. Сам процесс соединения транзисторов неизбежно удорожает сборку, а наличие распределенных индуктивностей проводов приводит к появлению переходных перенапряжений.

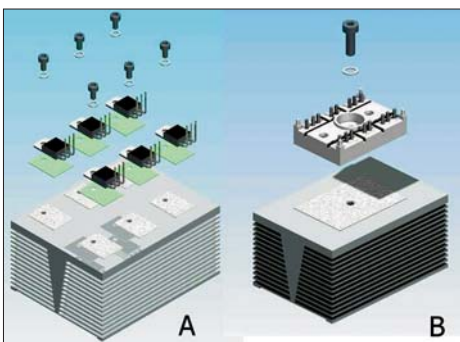


Рис. 8. Сборка 3-фазного инвертора: А — дискретные транзисторы TO-220, В — модуль SEMITOP

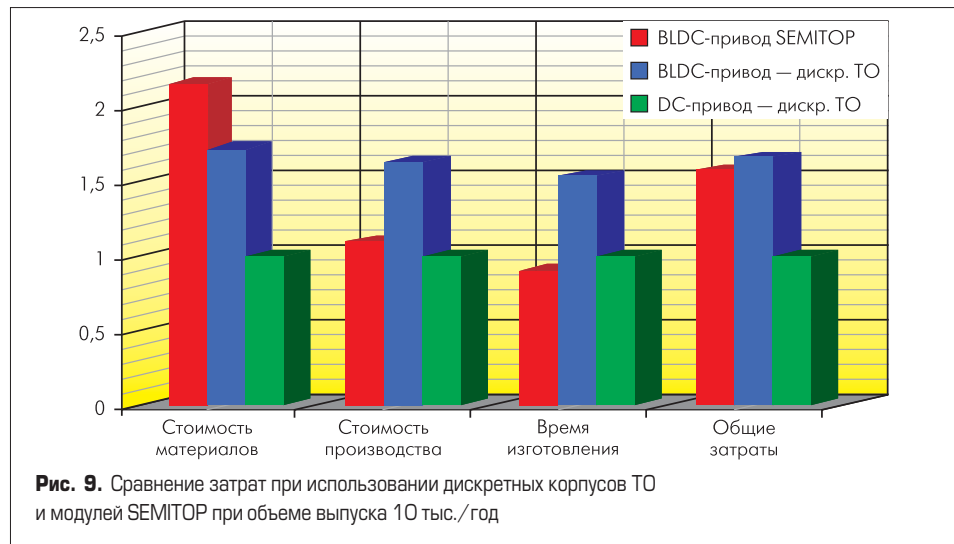


Рис. 9. Сравнение затрат при использовании дискретных корпусов ТО и модулей SEMITOP при объеме выпуска 10 тыс./год

Общие затраты при использовании дискретных транзисторов и модулей SEMITOP можно сравнить с помощью графиков, приведенных на рис. 9. Расчеты расходов производились для объема выпуска 10 тыс./год, за единицу приняты расходы на изготовление привода двигателя постоянного тока на дискретных транзисторах (DC-привод). Обратите внимание, что стоимость материалов при использовании интегрального модуля выше, чем при использовании транзисторов ТО. Например, при изготовлении 3-фазного инвертора привода бесколлекторного двигателя постоянного тока (BLDC — Brushless DC drive) стоимость комплектующих при использовании модулей выше примерно на 25%. Подобная разница всегда имеет место при сравнении стоимости интегрального модуля и набора дискретных компонентов. Однако, с учетом расходов на разработку и изготовление, стоимость изделия с модулем может оказаться ниже. При этом здесь не учитываются такие параметры, как надежность изделия и уровень электромагнитной совместимости, которые при применении интегральных компонентов неизбежно оказываются выше.

Изделия, аналогичные модулям SEMITOP, выпускаются рядом фирм, это, например, серии EasyPACK и EasyPIM (EUPEC) или FlowPACK и FlowPIM (Tycos). При прочих равных условиях компоненты SEMIKRON выгодно отличает их «безбазовая» конструкция, обеспечивающая компонентам высокие показатели надежности, особенно в жестких условиях эксплуатации. Модули SEMITOP широко применяются в продукции компаний Segway, LG Electronics, ALCATEL. По данным исследований рынка силовых полупроводниковых компонентов «The world-

wide market for Power Semiconductors, 2002», проведенных британским исследовательским институтом IMS (British Market Research Institute), в области производства миниатюрных модулей СІВ доля рынка SEMIKRON составляет 30% в мире и более 46% — в Европе. Существенным достоинством модулей SEMITOP является необычайно высокое количество конфигураций, перекрывающих практически все потребности разработчиков. Если рынок предъявляет новые требования — SEMIKRON реагирует соответственно и в его производственной программе появляются новые компоненты. Например, рост популярности вентиляльных индукторных двигателей привел к разработке модуля SEMITOP SK 25 GAD 063 со схемой, ориентированной на данный тип двигателей (рис. 10).

Многие производители электронной аппаратуры справедливо считают, что на этапе разработки использование дискретных компонентов более оправдано. Однако снижение издержек при серийном производстве, упрощение процесса изготовления и более высокие показатели надежности, несомненно, стоят того, чтобы в конечном итоге отдать предпочтение интегральным модулям.

Литература

1. SEMITOP. Cool Components. SEMIKRON International.
2. SEMITOP. Mounting instructions. SEMIKRON International.
3. Thomas Grasshoff. SEMITOP presentation materials. SEMIKRON International.
4. Колпаков А.И. Принципы работы и особенности программы теплового расчета SEMISEL // Электронные компоненты. 2004. № 6.

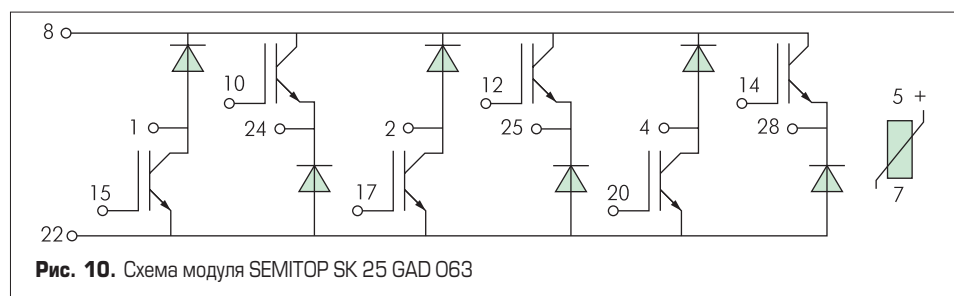


Рис. 10. Схема модуля SEMITOP SK 25 GAD 063