

# Интеграция силовых модулей – тенденции и проблемы

**Повышение степени интеграции силовых модулей — одна из основных тенденций развития современной силовой электроники. Объединение силового каскада, схемы управления и защиты, а также датчиков в составе одного изделия позволяет создать модуль, являющийся практически полностью законченным устройством. Такая интеграция порождает и массу проблем, связанных с тепловыми и электромагнитными взаимодействиями схемы управления и мощного импульсного усилителя. Однако широкие перспективы, которые открывает выпуск подобных изделий, их эксплуатационные возможности, упрощение процесса разработки, повышение надежности вынуждает производителей силовых компонентов создавать все новые типы интегральных модулей.**

**Андрей Колпаков**

kai@megachip.ru

## Модули CIB (Converter, Inverter, Brake)

На каждом этапе совершенствования интегральных модулей, повышения степени их интеграции и «интеллектуальности» приходится отвечать на следующие вопросы: какие устройства целесообразно объединять в одном модуле, какие проблемы может создать совместная работа различных узлов, как решать эти проблемы?

Первым шагом на пути создания модулей законченной конфигурации стала разработка полумостовых и трехфазных мостовых модулей, являющихся базовыми компонентами силовых каскадов различных преобразовательных устройств: приводов, вторичных источников питания, электронных блоков сварочного оборудования и т. д.

Далее были разработаны компоненты в так называемой конфигурации CIB (converter, inverter, brake), содержащие выпрямительный мост, 3-фазный IGBT-каскад инвертора и чоппер каскада торможения. Модуль CIB может также включать датчики тока и температуры. На рис. 1 показана принципиальная схема одного из модулей CIB SEMI-

KRON и фотография его платы DBC (Direct Bonded Copper — керамическая плата с медными шинами связи, нанесенными диффузионным методом) с установленными на ней силовыми кристаллами. По своей структуре модуль CIB является оптимальным компонентом для разработки привода.

В 1996 году фирма SEMIKRON выпустила на рынок первое поколение миниатюрных модулей CIB — MiniSKiiP, предназначенных для работы в диапазоне мощностей до 10 кВт. Подобные изделия выпускаются многими компаниями, в частности IXYS, FUJI, Fairchild, EUPEC, однако по уровню плотности мощности и по ряду технических характеристик модули SEMIKRON значительно превосходят конкурентов. И особенно это лидерство укрепилось с появлением модулей нового, второго поколения. Модули MiniSKiiP II отличаются применением кристаллов 3 поколения Trench IGBT, улучшенными тепловыми, электрическими и конструктивными характеристиками, расширенным диапазоном мощности.

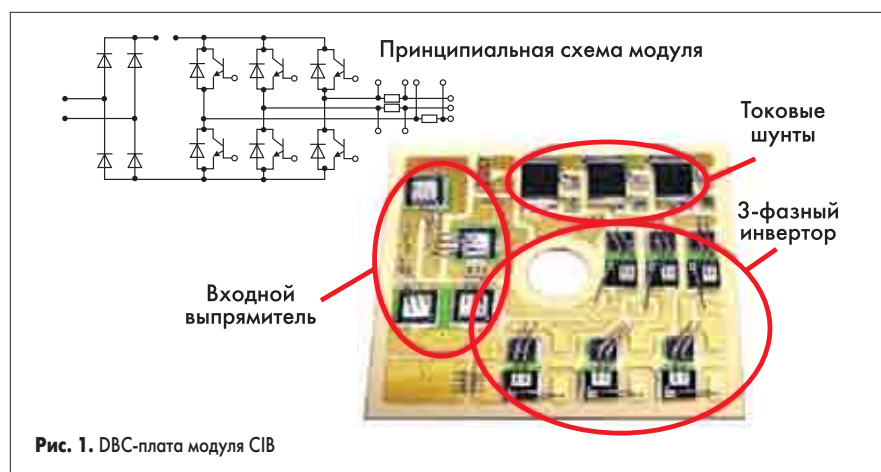


Таблица 1. Основные технические характеристики модулей MiniSKiiP II

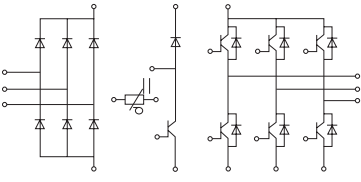
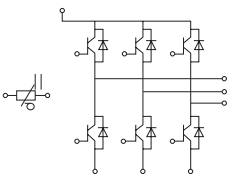
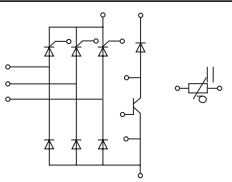
Тип модуля	Напряжение $V_{CE}$ , В	Ток $I_C$ , А	Конфигурация
Выпрямительный мост + 3-фазный инвертор IGBT + тормозной чоппер			
MiniSKiiP II-0 MiniSKiiP II-1 MiniSKiiP II-2 MiniSKiiP II-3	600 600 + 1200 600 + 1200 600 + 1200	10-20 10-30 30-50 50-100	
3-фазный инвертор IGBT			
MiniSKiiP II-0 MiniSKiiP II-1 MiniSKiiP II-2 MiniSKiiP II-3	600 600 + 1200 600 + 1200 600 + 1200	10-30 10-40 40-100 100-175	
Тиристорный мост + тормозной чоппер			
MiniSKiiP II-2 MiniSKiiP II-3	600 + 1200 600 + 1200	150 175	

Таблица 2. Сравнительные характеристики модулей CIB различных производителей

Производитель тип модуля	Схема	$V_{CE}$ , В	$I_C @ 25^\circ\text{C}$ , А	$V_{CE(sat)}$ , В	$R_{thjc} + R_{thcs}$ , °C/Вт (IGBT)
SEMIKRON SKiiP38NAB065	CIB	600	100	2,0	0,45
FUJI 7MBR100SB060	CIB	600	100	2,15	0,31 + 0,05
EUPEC BSM100GP60	CIB	600	100	2,0	0,35 + 0,02
Mitsubishi CM50MD-12	CIB	600	50	2,2	1,2
SEMIKRON SKiiP36NAB126	CIB	1200	94	1,7	0,45
FUJI 7MBR50SB120	CIB	1200	50	2,3	0,35 + 0,05
EUPEC FP75R12KE3	CIB	1200	75	1,7	0,35 + 0,02
Mitsubishi CM25MD-24	CIB	1200	25	2,7	1,2

$V_{CE}$  — максимальное рабочее напряжение;  $I_C$  — максимальный ток;  
 $V_{CE(sat)}$  — напряжение насыщения;  $R_{thjc}$  — тепловое сопротивление «кристалл — корпус».

Для подключения модуля используются пружинные контакты — «фирменные» элементы конструкции модулей SEMIKRON, временная и температурная стабильность параметров которых подтверждается многочисленными испытаниями. Конструкция контактов для модулей второго поколения была доработана в части увеличения допустимой токовой нагрузки. Для изготовления контактов применен сплав, позволивший

повысить допустимую токовую нагрузку почти в 2 раза. Каждый контакт нового модуля рассчитан на ток до 20 А, при этом его перегрев не превышает 20 °С. Для высокоточных выводов используется параллельное соединение пружинных выводов, их количество может достигать 8 для 1 силового терминала. На рис. 2 показано, как осуществляется соединение модуля MiniSKiiP II с радиатором и платой драйвера.

Для минимизации габаритов готового изделия в модулях MiniSKiiP II применена новая конструкция прижимной крышки. Теперь она не сплошная, 95% поверхности крышки составляют полости, в них могут располагаться компоненты платы управления, имеющие высоту до 3,5 мм. На рис. 2 видно, что элементы схемы управления расположены непосредственно под крышкой. Кроме того, такая конструкция способствует лучшему отводу тепла.

На рис. 3 показана функциональная схема и внешний вид разработанного SEMIKRON привода, содержащего модуль SKiiP-83ANB15 (тиристорный выпрямитель и тормозной транзистор), модуль SKiiP-83AC12I (3-фазный инвертор IGBT с датчиками фазного тока), блок конденсаторов шины питания, плату драйвера, источник питания и схему плавного заряда емкостей. Конвертор смонтирован на теплоотводе P14 производства SEMIKRON.

Конфигурация CIB наиболее подходит для построения приводов управления электродвигателями. Параметры новых модулей MiniSKiiP II позволяют расширить диапазон применения изделий данного типа до мощности 30 кВт. При этом они имеют самые малые габариты в своем классе и отличные показатели надежности. В таблице 2 даны сравнительные характеристики модулей CIB, выпускаемых различными производителями. Только по одному параметру (тепловому сопротивлению) изделия SEMIKRON несколько уступают продукции FUJI и EUPEC. Однако это компенсируется меньшими статическими и динамическими потерями кристаллов IGBT Ultrafast NPT и Fast Trench модулей MiniSKiiP II.

### Модули IPM (Intellectual Power Module)

Добавление платы управления (драйвера) явилось следующим этапом интеграции, это превратило силовой модуль в интеллектуальный силовой модуль или IPM (Intellectual Power Module). Объединение в одном конструктиве силового каскада, драйвера, выпол-

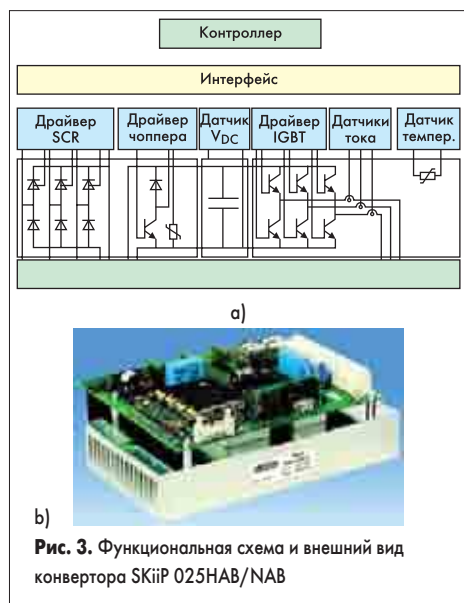


Таблица 3. Типы интеллектуальных силовых модулей IGBT на напряжение 1200/1700 В

Мощность, кВт	SEMIKRON	Toshiba	Mitsubishi
40	132GD120-318CTV (6-pack)	MIG150Q101H (HB) MIG150Q6C (6-pack)	PM150DSA120 (HB)
50	132GD120-318CTV (6-pack)	MIG200Q101H (HB) MIG200Q6C (6-pack)	PM200DSA120 (HB)
55	132GD120-318CTV (6-pack)		PM300DSA120 (HB)
65	232GD120-313CTV (6-pack)		PM300DSA120 (HB)
90	342GD120-314CTV (6-pack) 313GD122-3DUL (6-pack)		PM400HSA120 (Single)
100	513GD122-3DUL (6-pack)		PM600HSA120 (Single)
110	603GD122-3DUL (6-pack)		PM600HSA120 (Single)
125	703GD121-3DU (6-pack) 632GB120-315CTV (HB)		PM800HSA120 (Single)
150	1203GB122-2DW (HB) 1513GB122-3DL (HB)		
175	1803GB122-3DW (HB)		
200	2103GB121-3DW (HB)		
300	2403GB122-4DW (HB)		
400	2403GB122-4DW (HB)		
450	2803GB121-4DW (HB)		

Single — одиночный модуль; HB — полумостовой модуль; 6-pack — трехфазный мост.

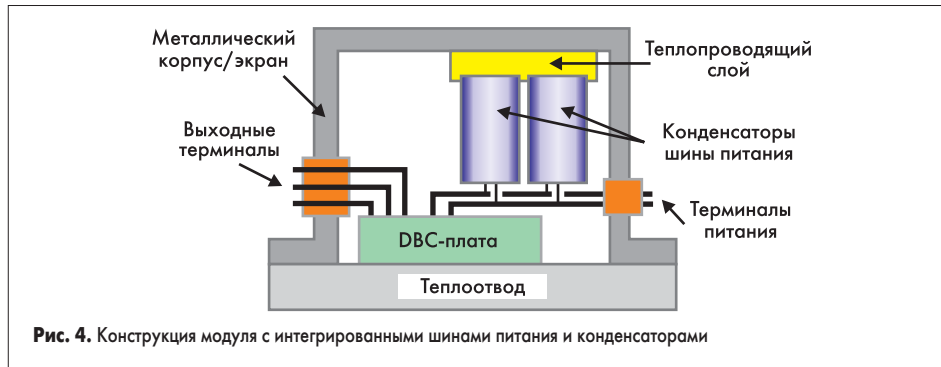


Рис. 4. Конструкция модуля с интегрированными шинами питания и конденсаторами

няющего функции управления, защиты и мониторинга, а также датчиков тока, температуры, напряжения и т. д. позволило создать устройство, обладающее хорошими электрическими и тепловыми характеристиками и высокой надежностью. Подобные изделия в настоящее время выпускаются рядом фирм, в таблице 3 приведены некоторые типы интеллектуальных силовых модулей различных производителей, соответствующих стандартному ряду мощности, указанному в I столбце.

Для превращения модуля IPM в готовое изделие необходима плата управляющего контроллера, интерфейсное устройство и блок питания. Разработка модуля, содержащего все указанные элементы, означает появление полностью законченного изделия. И такие модули уже выпускаются, например фирма International Rectifier активно продвигает свою новую разработку — платформу PI-IPM со встроенным процессором и силовым каскадом, рассчитанным на напряжение до 1200 В и ток до 50 А. Маломощные интеллектуальные модули со встроенным контроллером предлагает фирма HITACHI.

Новое семейство интеллектуальных модулей SEMIKRON получило название SKAI — SEMIKRON Automotive Inverter. В январе 2000 года американское отделение фирмы SEMIKRON получило заказ министерства энергетики США на разработку интегрального силового модуля AIPM (Automotive Integrated Power Module) для автомобилей нового поколения, создаваемых в сотрудничестве с PNGV (PNGV — Partnership for a New Generation Vehicle). Организация PNGV образована тремя крупнейшими американскими автопроизводителями для разработки технологий, необходимых для создания гибридных транспортных средств, использующих для движения комбинированный тип двигателя — внутреннего сгорания и электрический.

Одной из главных проблем, возникающих при разработке конструкции подобного изделия, является необходимость создания малогабаритной силовой шины, имеющей минимальное значение распределенной индуктивности. При выключении транзисторов инвертора наличие распределенных индуктивностей приводит к возникновению переходных перенапряжений и росту потерь. Перенапряжения, возникающие на индуктивностях линий связи, могут вызываться также и токами обратного восстановления оппозитных диодов. Пиковое значение тока

обратного восстановления  $I_{гр}$  связано с зарядом обратного восстановления  $Q_{гр}$  с помощью соотношения  $Q_{гр} = (I_{гр} \times t_{гр})/2$ , где  $t_{гр}$  — время обратного восстановления.

Наличие распределенных индуктивностей приводит к увеличению напряжения на транзисторе на величину  $L_B \times di/dt$ , где  $di/dt$  — скорость изменения тока в шине при закрытии транзистора или восстановлении диода, а  $L_B$  — индуктивность шины. Суммарное напряжение может превысить значение напряжения пробоя и вывести транзистор из строя. Наибольшую опасность процесс выключения имеет при срабатывании защиты от перегрузки по току, когда значение  $di/dt$  максимально. Именно поэтому в самых современных интеллектуальных силовых модулях выключение транзисторов в аварийном режиме производится по заданной траектории. Такой режим называется «режим плавного отключения» или SSD (Soft Shut Down).

Энергия  $E_S$ , запасаемая в паразитных индуктивностях силовых цепей, определяется в соответствии с соотношением  $E_S = L_B \times I^2/2$ . Как видно из формулы, значение энергии пропорционально квадрату рабочего тока, поэтому для схем, работающих с большими токами, уменьшение распределенных индуктивностей приобретает особое значение.

В преобразователях с низким напряжением питания и высокими выходными токами (такие устройства типичны, например, для автомобильных применений) снижение индуктивности шин и уровня перенапряжений означает возможность использования MOSFET-транзисторов с меньшим рабочим напряжением, а следовательно, и с меньшим сопротивлением канала. Таким образом, правильно сконструированная силовая шина позволяет повысить эффективность преобразователя.

Для снижения суммарного значения паразитных распределенных параметров силовых цепей необходимо предусмотреть установку батареи конденсаторов непосредственно на шинах питания. Это создает дополнительные проблемы, связанные с излучаемым конденсаторами теплом, что требует повышения эффективности работы системы охлаждения. Кроме того, электролитические конденсаторы чувствительны к механическим воздействиям, соответственно, в конструкции должен быть предусмотрен дополнительный крепеж. Возможным решением данной проблемы является установка емкостей на шину питания в непосредственной близости от силового модуля и фиксация их с помощью эластичного теплопроводящего

слоя, как показано на рис. 4. Металлический корпус данной конструкции выполняет также функции экрана, снижающего уровень электромагнитного излучения, и дополнительного теплоотвода.

На рис. 4 силовые шины питания и выходов подключены непосредственно к DBC-плате. Достоинством данного типа соединения является то, что кроме снижения индуктивности шин, тепло, выделяющееся в них из-за потерь проводимости, отводится через керамическое основание на теплоотвод.

Реализация описанного конструктива возможна при использовании технологии прижимного контакта (pressure-contact technology) SKiIP, разработанной SEMIKRON. При таком способе соединения тепловой контакт всех слоев модуля обеспечивается за счет прижима, а подключение платы управления осуществляется с помощью пружинных контактов. Испытания многократно подтвердили высокую надежность и хорошие электрические и тепловые характеристики модулей, изготовленных по технологии SKiIP [4].

Создание сложных конструкций, оптимизация параметров элементов невозможны без специализированного программного обеспечения. Существующие трехмерные CAD-программы позволяют создавать объемные модели и моделировать процессы, происходящие в конструкции, изменяя геометрию и взаимное расположение терминалов, шин, керамического основания. Разница между полученными при моделировании и измеренными характеристиками не превышает 20%. Разработка конструкции модуля SKAI с учетом получения компактного конструктива и низкого значения индуктивностей производилась с помощью программного пакета Mem Henry. На рис. 5 показаны графики динамической плотности тока на фрагменте шины питания и керамической DBC-платы, полученные в результате оптимизации геометрии конструкции.

Компьютерная проработка конструкции модуля, рассчитанного на напряжение 42 В и ток 700 А, позволила получить индуктивность шин питания, не превышающую 1 нГ! Это в 10 раз меньше распределенной индуктивности лучших серийно производимых многослойных шин. В разрабатываемом модуле DC-шины кроме своих непосредственных задач выполняют функцию терминалов питания и контактов для подключения конденсаторов, они же осуществляют тепловую

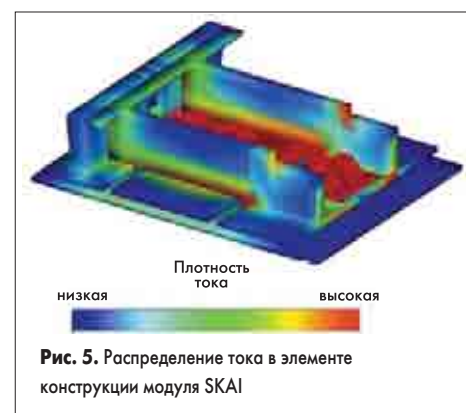


Рис. 5. Распределение тока в элементе конструкции модуля SKAI





Рис. 6. Конструкция модуля SKAI

связь с радиатором. В описанном модуле практически все элементы конструкции выполняют несколько функций, что обеспечивает минимальные габариты изделия. Например, выходные терминалы модуля (см. рис. 7) используются для защиты датчиков тока от ударов и вибраций. Конструкция модуля SKAI показана на рис. 6.

Технология «pressure-contact» SKiiP реализуется с помощью прижимной платы, имеющей эластичный слой для равномерного распределения прижимающего усилия. Эта плата имеет вертикальные направляющие конической формы, которые усиливают давление в местах установки силовых кристаллов, где градиент температуры максимален. Плата также выполняет функцию экрана для снижения уровня электромагнитного излучения. В модуле полностью отсутствуют паяные и сварные соединения, в результате чего исключаются механические напряжения из-за рассогласования коэффициентов теплового расширения сопрягающихся материалов и усталостные процессы, имеющие место в паяных сочленениях. Блок электролитических конденсаторов установлен на шины питания непосредственно над платой DBC, что позволяет свести к минимуму суммарную индуктивность шины питания.

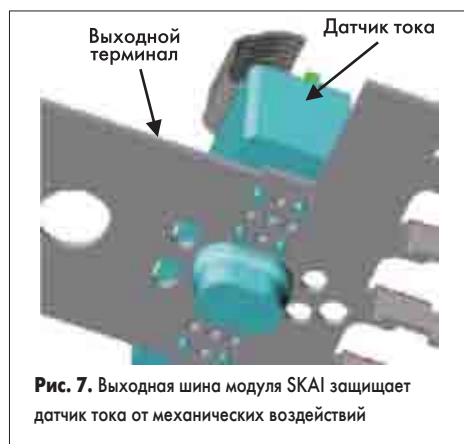


Рис. 7. Выходная шина модуля SKAI защищает датчик тока от механических воздействий

Для управления силовым каскадом модуля использован DSP-процессор, связь с которым осуществляется с помощью популярных интерфейсов CAN или RS485. Главный процессор управляет специализированным SKAI-контроллером, который получает информацию от встроенных в модуль датчиков напряжения, тока, температуры и положения ротора, формирует 3-фазный ШИМ-сигнал и осуществляет через драйвер управление 3-фазным силовым MOSFET-каскадом.

Использование встроенного в модуль процессора обеспечивает ряд преимуществ: он берет на себя часть функций драйвера, обеспечивает внешний интерфейс, позволяет адаптировать функции модуля под конкретную задачу. Естественно, что все эти преимущества проявляются в первую очередь при разработке специализированного модуля.

Как показано на рис. 6, плата драйвера и контроллера расположена над силовым каскадом. На этой же плате расположен вторичный источник питания, вырабатывающий гальванически изолированные напряжения для схемы управления и выходных каскадов драйвера. Источник питания и схема управления выделяют тепло, которое должно быть отведено на поверхность модуля. Это достигается с помощью теплопроводящего компаунда, которым заливается плата управления.



Рис. 8. Плата управления модуля SKAI

Внешний вид платы контроллера/драйвера/источника питания показан на рис. 8.

Существует еще одна проблема, связанная с возможностью возникновения электромагнитных помех, наводимых на плату драйвера мощным силовым каскадом, осуществляющим коммутацию токов с очень высокой скоростью. В качестве экрана, снижающего уровень наводимых помех, используется прижимная плата (см. рис. 6), имеющая стальную вставку, электрически соединенную с корпусом.

Объединение в одном модуле большого количества компонентов, выполняющих различные функции, имеющих различную мощность и тепловыделение, на первый взгляд должно привести к снижению надежности изделия, увеличению вероятности отказа. Такие элементы, как микропроцессор, импульсный источник питания и импульсный инвертор, как правило, плохо «уживаются» между собой из-за наличия высокочастотных помех, создающих серьезные проблемы работе процессора.

Однако на практике надежность правильно спроектированного интегрального модуля оказывается выше, чем у аналогичного изделия на дискретных компонентах. Это объясняется, прежде всего, сокращением количества соединений и уменьшением линий связи, а следовательно, и их распределенных паразитных параметров. Испытания показывают, что интегральные интеллектуальные модули SEMIKRON обладают высокой стойкостью к механическим и климатическим воздействиям, что особенно важно при эксплуатации на транспорте, где внешние воздействия яв-

ляются наиболее жесткими. Конструкция модулей SKAI обеспечивает уровень защиты IP64. На данный момент изделия прошли полный цикл испытаний на соответствие автомобильным стандартам США и международным IEC. Модули протестированы на устойчивость к воздействию повреждающих перегрузок, включая перенапряжения и многократные короткие замыкания. Испытания рабочих режимов проводились в диапазоне температур от  $-40$  до  $+105$  °C. Во всех рабочих режимах КПД модулей превышает 95%.

## Заключение

Интеграция большого количества разнообразных блоков в одном модуле, создание законченных устройств, нацеленных на решение конкретной задачи, — процесс, неизбежно происходящий в различных областях техники. Целесообразность такой интеграции определяется, с одной стороны, высокими качественными показателями интегральных модулей, повышением надежности изделия, а с другой стороны — упрощением процесса разработки и изготовления изделия. Особенно сильно эта тенденция проявляется в области производства мощных преобразовательных устройств, где стоимость ошибки проектирования чрезвычайно высока.

Путь, пройденный за 50 лет фирмой SEMIKRON, от выпуска первых дискретных силовых полупроводников до разработки интеллектуальных силовых модулей и готовых интегрированных модулей, свидетельствует о необычайно сильных позициях компании в области производства компонентов для мощных преобразовательных устройств. По данным исследований рынка силовых полупроводниковых компонентов «The worldwide market for Power Semiconductors, 2002», проведенных британским исследовательским институтом IMS (British Market Research Institute), в области производства миниатюрных модулей CIB доля рынка SEMIKRON составляет 30% в мире и более 46% — в Европе.

Разработка модуля SKAI, являющегося готовым приводом большой мощности, является серьезным достижением на пути создания законченных модулей высокой степени интеграции. Следующим шагом в планах SEMIKRON является выпуск аналогичного силового модуля для более мощных применений, предназначенного для работы от сети с напряжением 450 В.

## Литература

1. C. Daucher, C. Gobl. MiniSKiiP II — Setting the new benchmark for CIB modules in the power range of 0.37 kW to 30 kW. SEMIKRON International.
2. U. Scheuetmann. Module Integration — Challenges and Opportunities.
3. А. Колпаков SKiiP — интеллектуальные силовые IGBT-модули SEMIKRON // Компоненты и Технологии. 2003. № 1.
4. А. Колпаков Обеспечение надежности интеллектуальных силовых модулей // Электронные компоненты. 2003. № 4.