

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

## ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

А.Колпаков

**Основная тенденция современного рынка силовой электроники – неуклонное повышение плотности мощности, снижение массогабаритных показателей, увеличение уровня интеграции наряду с обеспечением высочайших показателей надежности и безотказности силовых модулей [1]. Жесткая конкуренция среди производителей заставляет снижать цену компонентов. Однако это возможно лишь при отработанной технологии производства, высоком уровне стандартизации, максимальной гибкости и адаптируемости выпускаемой продукции к различным применениям.**

В последние годы основное внимание производителей силовых полупроводниковых приборов было обращено на повышение мощности и разработку технологий производства чипов, нацеленных на конкретное применение. Это привело к появлению новых типов IGBT, имеющих несомненные преимущества перед приборами, изготовленными по стандартным эпитаксиальным технологиям. При этом современные IGBT-чипы отличаются более яркой "специализацией", позволяющей удовлетворять конкретные запросы производителей различных типов преобразовательной техники.

До недавнего времени компания Semikron предлагала пять серий IGBT-модулей семейства Semitrans [2] в стандартных конструктивах с рабочим напряжением 600, 1200 и 1700 В (рис.1). В число модулей на 1200 В входят следующие серии: 123 – стандартные Non Punch Through (NPT) IGBT, 124 – Low Loss NPT-IGBT (транзисторы с низкими потерями проводимости), 125 – Ultrafast NPT-IGBT (сверхбыстрые транзисторы), 126 – Trench Field-Stop, или Trench-FS-IGBT (транзисторы со сверхнизкими потерями проводимости) и 128 – Soft Punch Through – SPT-IGBT (транзисторы с оптимизированным соотношением потерь проводимости и переключения). Основная цель производства такого многообразия компонентов – обеспечение максимально возможного числа потребителей и получение минимальных потерь мощности для каждого конкретного применения.

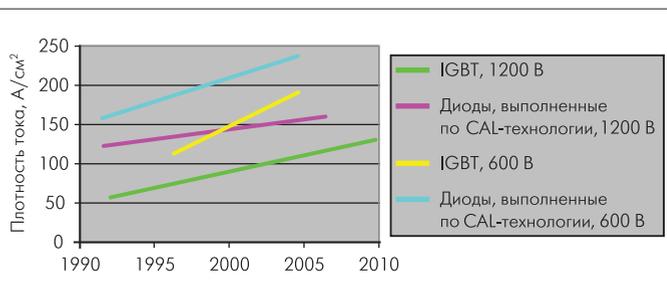
На практике можно выделить три основных типа устройств, требующих оптимального соотношения параметров силовых ключей:

- низкочастотные преобразователи (ветрогенераторы, конвертеры для энергосистем, использующих энергию солнца, некоторые типы источников бесперебойного питания). Для этих применений основной параметр – потери проводимости;
- импульсные преобразователи частоты (привод, некоторые типы источников бесперебойного питания), для которых требуются одновременно низкие потери проводимости и переключения;

- высокочастотные устройства (системы индукционного нагрева, сварочное оборудование, резонансные инверторы), определяющий параметр которых – потери переключения.

На рис.2 показаны рекомендуемые частотные диапазоны для различных модификаций модулей IGBT, выпускаемых компанией. Как видно из рисунка, Trench FS-IGBT лучше всего подходит для эксплуатации в области низких частот, Ultrafast NPT-IGBT – для высокочастотных применений, а SPT-IGBT – компромиссный тип транзисторов с оптимальным сочетанием статических и динамических характеристик. А поскольку этому типу транзисторов присуще существенное снижение потерь переключения, получаемое благодаря сокращению длительности "хвоста" тока (остаточного тока коллектора после запирающего транзистора, обусловленного рассеиванием носителей в области базы), их также целесообразно использовать в резонансных инверторах.

Высокая плотность тока, обеспечиваемая при использовании SPT- и Trench FS-IGBT-технологий, позволяет увеличивать эффективность преобразователей без применения компонентов больших типоразмеров. Все приведенные классы ключей характеризуются положительным температурным коэффициентом напряжения насыщения, что позволяет включать их параллельно.



**Рис.1. Динамика повышения плотности тока IGBT-модулей и антипараллельных диодов компании Semikron**

В новейших модулях Semitrans компании Semikron серий 126 и 128 используются чипы Trench FS-транзисторов и антипараллельные диоды, выполненные по CAL-технологии, плотность тока которых превышает 200 А/см² (см. рис.1) [3]. Следует отметить, что благодаря возросшей допустимой плотности мощности более дешевые чипы меньшей площади могут быть использованы в модулях большего токового диапазона. Например, в 1999 году номинальный ток самого мощного полумостового стандартного IGBT-модуля компании Semikron на рабочее напряжение 1200 В составлял 400 А, а сегодня выпускается модуль в том же корпусе с током 600 А.

В настоящее время габариты готового изделия в большей степени зависят от размеров пассивных компонентов, таких как



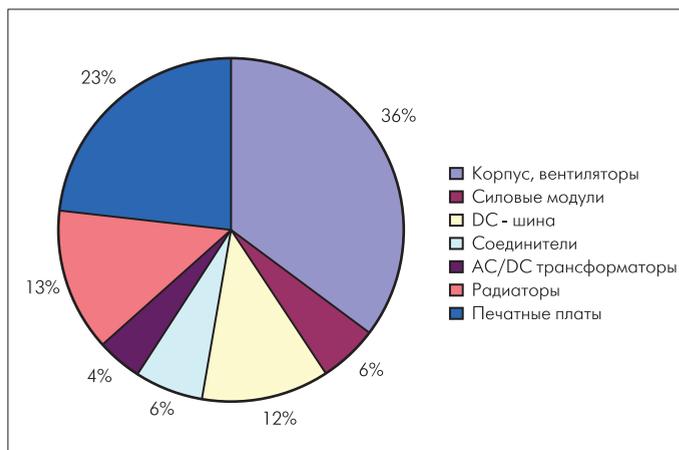
1200 В IGBT																										
128 SPT																										
126 Trench																										
125 Ultrafast																										
124 Low Loss																										
123 Standard																										
$f_{sw}$ , кГц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	

**Рис.2. Рекомендуемые рабочие частоты  $f_{sw}$  для различных модификаций модулей Semitrans**

случаев для обеспечения безотказной работы при высоких механических нагрузках, например в транспортных системах, приходится использовать дополнительные, снижающие вибрационные нагрузки элементы крепления выводов модулей и подводящих шин. Подобные конструктивные элементы, в свою очередь, начинают вносить существенный вклад в массогабаритные показатели изделия.

Еще одна проблема, связанная с отводом тепла, – постоянное наращивание плотности мощности, существенно затрудняющее разработку систем охлаждения: чем меньше корпус модуля и площадь его теплового контакта с радиатором, чем выше соотношение мощности потерь и размера модуля, тем более эффективным должен быть отвод тепла.

конденсаторы, сглаживающие индуктивности или фильтры, чем от размеров силовых модулей. Это в первую очередь справедливо для маломощных преобразователей (рис.3). По результатам исследований, проводимых Европейским центром силовой электроники (European Centre for Power Electronics – ECPE), в современном приводе мощностью 2,2 кВт силовые полупроводниковые приборы занимают только 6% общего объема, примерно такое же пространство требуется для размещения кабельных соединителей. Около 12% площади корпуса привода занимает DC-шина с банком конденсаторов, а больше всего места требуется для плат управления (примерно 23%), на которых смонтированы контроллер, драйверы затворов, источник питания и фильтр EMI [4]. Аналогичная ситуация наблюдается и для преобразователей высокой мощности: активные силовые полупроводниковые элементы становятся все меньше, а габариты пассивных компонентов, кабельных разъемов и силовых терминалов практически не изменяются. Следует также отметить, что размеры силовых чипов теперь практически не влияют на габариты модуля, которые в большей степени зависят от размеров силовых терминалов, сечение которых определяется допустимыми значениями плотности тока.

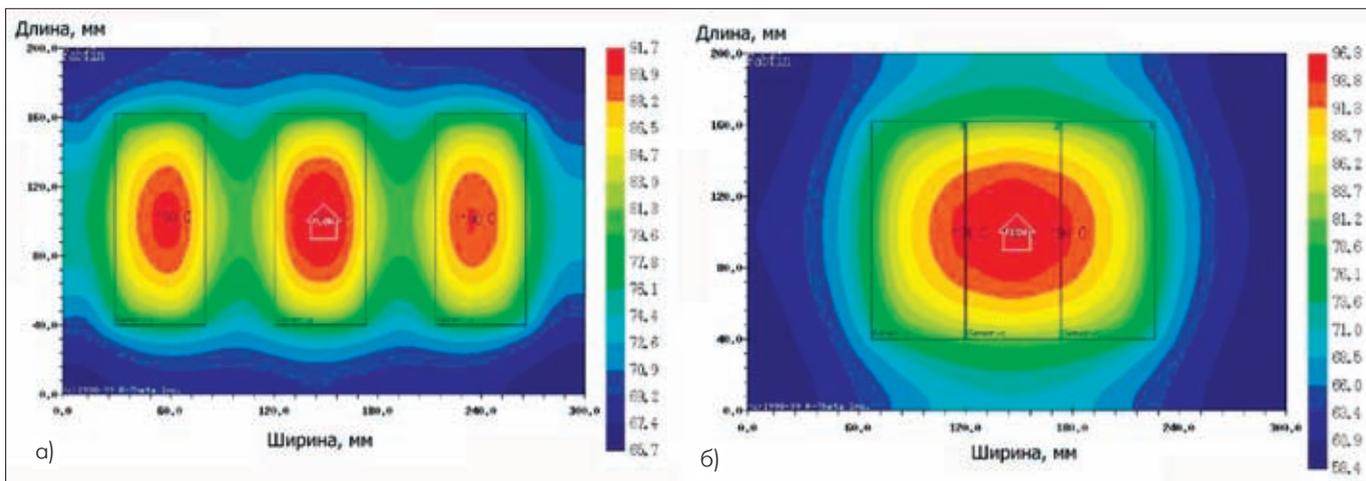


**Рис.3. Соотношение габаритных размеров компонентов современного привода мощностью 2,2 кВт**

С другой стороны, уменьшение размеров корпуса, являющегося важным элементом в процессе отвода тепла, имеет физические пределы. Кроме того, корпус модуля и его силовые выводы должны выдерживать воздействие вибрационных и ударных нагрузок, вносимых внешними цепями, кабелями и шинами, что также не позволяет бесконечно минимизировать конструктив модуля. В ряде

В системах с принудительным воздушным охлаждением, как правило, не удается использовать силовые модули при максимальной мощности, на которую они рассчитаны. Прежде всего, это связано с тем, что для обеспечения требуемой надежности при предельных условиях эксплуатации необходимо ограничивать предельную температуру кристалла, а следовательно, и радиатора. Увеличение плотности мощности возможно при условии равномерного распределения источников тепла по поверхности теплоотвода. Это реализуется, например, за счет разнесения полумостовых модулей инвертора на некоторое расстояние друг от друга или за счет замены мощного силового ключа параллельным соединением менее мощных элементов. На рис.4 показаны результаты теплового анализа трехфазного инвертора, построенного с использованием силовых ключей SEMiX [5]. На графиках распределения тепла по поверхности радиатора при установке трехфазного модуля SEMiX33 виден ярко выраженный эффект перегрева центрального полумоста из-за взаимного теплового влияния силовых ключей. Разнесение корпусов модулей всего на 5–10 мм позволяет снизить температуру кристаллов в центре на 15–20°C, что эквивалентно аналогичному снижению теплового сопротивления. Таким образом, при правильном размещении тепловыделяющих элементов на теплоотводе можно существенно повысить перегрузочную способность преобразователя. С другой стороны, использование трехфазных модулей позволяет получить более компактную конструкцию. Но в этом случае полностью реализовать мощностные характеристики можно только при жидкостном охлаждении. При таком способе перепад температуры на переходе "корпус – радиатор" оказывается гораздо меньше, чем при воздушном охлаждении. В результате эффект взаимного нагрева исключается.

Исследования тепловых характеристик конструкций стали особенно актуальными в последнее время при разработке модулей, использующих новейшие технологии IGBT. Стремление к предельному снижению габаритов силовых преобразователей, растущие требования к надежности таких устройств делают тепловой анализ конструкции еще более востребованным. Сложность и необходимость теплового расчета изделия обусловлены также и тем, что, как указывалось выше, источниками тепла являются не только силовые модули: значительная часть мощности рассеивается пассивными компонентами – конденсаторами шины питания, мощными тормозными резисторами и т.п. Существенную помощь в анализе тепловых характеристик конструкции оказывают специализированные программы теплового расчета, такие как r-theta ([www.r-theta.com](http://www.r-theta.com)), с помощью которой были получены графики, приведенные на рис.4.



**Рис.4. Распределение тепла по поверхности радиатора при использовании:**

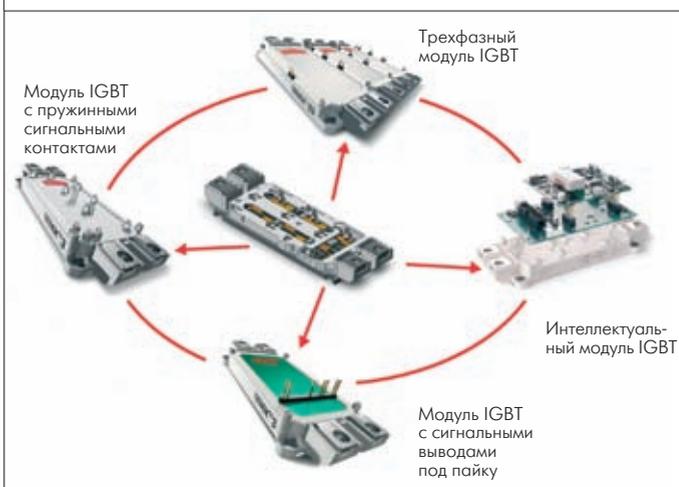
**а) полумостовых модулей SEMiX3 и б) трехфазного модуля SEMiX33. Рассеиваемая мощность в обоих случаях – 1500 Вт**

Один из возможных путей преодоления проблем, связанных с разработкой конструкций мощных преобразователей, – освоение производства специализированных "платформ", предназначенных для решения многих конкретных задач. Использование таких законченных и сертифицированных конструктивов позволяет пользователю резко сократить время разработки готового изделия, повысить его потребительские свойства и надежность. Наилучшие характеристики имеет "платформа", использующая современные, надежные силовые ключи с минимальным уровнем потерь при одинаковых с традиционными преобразователями технических параметрах: выходной мощности, напряжении питания, характеристиках управления.

Отличные возможности для проектирования малогабаритных и высокоэффективных инверторов мощностью 20–200 кВт предоставляет серия модулей SEMiX, выпущенная компанией Semikron на базе новейших SPT- и Trench-FS-IGBT. Модули SEMiX являются самыми малогабаритными для своего диапазона мощности – высота их профиля составляет всего 17 мм. Внутренняя топология SEMiX обеспечивает минимальное значение паразитных индуктивностей и распределенных сопротивлений проводников, что гарантирует хорошие динамические характеристики, а в сочетании с низким напряжением насыщения транзисторов – и минимальные потери проводимости.

На одной стороне модуля SEMiX расположены выводы для подключения силовой шины питания, что позволяет использовать ламинированные или многослойные шины простейшей конструкции с минимальной индуктивностью. На противоположной стороне расположен сдвоенный AC-терминал, служащий выходом полумоста. В результате звено постоянного тока и силовые выходы разнесены, при этом существенно упрощается конструкция преобразователя и достигается хорошая изоляция силовых и сигнальных цепей. Но самое главное, такая конструкция обеспечивает беспрепятственный доступ к сигнальным выводам силового модуля, и драйвер может быть смонтирован непосредственно на корпусе модуля в максимальной близости к цепям управления. По сравнению со стандартными конструкциями, у которых DC-терминалы находятся на поверхности корпуса, размещение этих выводов по краю модуля имеет еще одно существенное преимущество. Тяжелая DC-шина, расположенная на поверхности модуля, создает сильные механические напряжения терминалов, что особенно опасно при вибрациях и ударах. При использовании SEMiX звено постоянного тока крепится на несущей конструкции рядом с модулем.

Другая важная особенность модулей SEMiX – широкий диапазон рабочих токов. Рабочий ток модулей трех типоразмеров на напряжение 600, 1200 и 1700 В может достигать 900 А. Каждый модуль SEMiX в зависимости от типа содержит два, три или четыре параллельно соединенных полумостовых базовых элемента. Модули имеют идентичную конструкцию и отличаются только длиной. Для всех исполнений модулей может быть использована одинаковая DC-шина. Отметим также, что благодаря положительному температурному коэффициенту напряжения насыщения легко реализуется параллельное соединение модулей SEMiX. Выпуск нового поколения силовых ключей позволил Semikron предложить продукцию, которой ранее у компании не было, – стандартные модули IGBT с током свыше 900 А и с лучшими на сегодняшний день техническими характеристиками. Для наращивания тока можно использовать параллельное соединение модулей SEMiX – у компании есть положительный опыт параллельного включения до восьми модулей SEMiX 3.

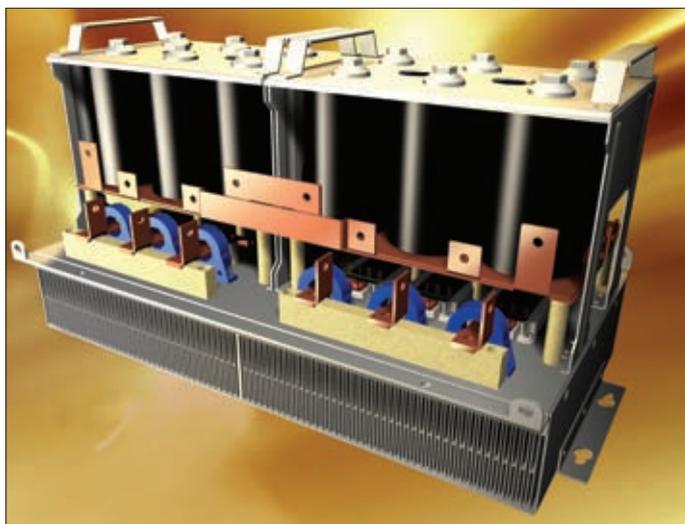


**Рис.5. Варианты исполнения модулей SEMiX**

Поскольку силовые выводы расположены на разных сторонах модуля, поверхность его свободна для размещения на ней платы управления. Минимальное расстояние между драйвером и силовыми чипами позволяет снизить паразитную индуктивность цепей управления. Многообразие версий интерфейса SEMiX (рис.5) делает его применение чрезвычайно "гибким". Модули SEMiX могут иметь обычные штырьевые сигнальные выводы под пайку для подключения драйвера собственной разработки. Модуль с пружинными контак-



тами (при этом в маркировке прибора присутствует буква s – spring) используется совместно с платой адаптера и драйвером Skyper для сборки интеллектуального IGBT-устройства. Естественно, версия с пружинными контактами может применяться и с собственной платой управления, при этом монтаж максимально упрощается благодаря отсутствию паяных соединений. Более того, расположение пружинных контактов непосредственно рядом с кристаллами способствует обеспечению оптимального динамического баланса при параллельном соединении модулей. И, наконец, существует версия "с", полностью совпадающая по расположению выводов с модулями EUPEC серии Escop+.



**Рис.6. Сборка конвертор/инвертор мощностью 300 кВт на основе SEMiX-модулей**

Разработка конструкции преобразователей средней и большой мощности – сложнейшая задача, требующая очень внимательного подхода к анализу распределенных параметров конструкции. Специалистами компании Semikron накоплен многолетний опыт проектирования мощных конверторов, создана база данных, включающая документацию на несколько тысяч выпущенных изделий. Все это позволяет компании в кратчайшие сроки выполнять уникальные работы, ориентированные на конкретного заказчика. На рис.6 показана одна из наиболее сложных и интересных разработок компании Semikron последних лет – блок конвертора/инвертора мощностью 300 кВт для ветроэнергетической установки. Преобразователь сконструирован с использованием модулей SEMiX.

Развитие технологий производства IGBT позволило в течение нескольких последних лет увеличить плотность тока чипа почти на 50%. IGBT нового поколения отличаются от предыдущих пониженным уровнем статических и динамических потерь, более высокой надежностью и, как правило, дешевле их.

Использование современных чипов при разработке новых модулей, совершенствование их конструкций, повышение уровней интеграции и "интеллекта" модулей позволяют создавать компактные силовые преобразователи с недостижимыми ранее показателями эффективности. Уменьшение массогабаритных характеристик мощных конверторов при одновременном увеличении их мощности предъявляют очень высокие требования к системам охлаждения. Разработка конструкции подобных устройств требует тщательного анализа, который немалозначим без современных средств компьютерного моделирования электрических, тепловых, магнитных процессов.

Однако параметры силовых электронных модулей по-прежнему остаются определяющими, оказывающими основное влияние на потребительские свойства и надежность готового изделия. Разработка компанией Semikron новой серии модулей SEMiX предоставляет пользователям уникальные возможности при проектировании современных конкурентоспособных мощных преобразователей мощностью до 200 кВт.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Peter Beckedahl, Aseem Wahi. Trends in the development of new power electronic modules.– SEMIKRON International, 2004.
2. Андрей Колпаков. SEMITRANS – один в пяти лицах. – Компоненты и технологии, 2003, №8.
3. Андрей Колпаков. Антипараллельные диоды SK для новых поколений IGBT. – Электронные Компоненты, 2005, №2.
4. Technology Study on Industrial Drives, 2004, ECPE.
5. Андрей Колпаков. SEMiX + SKYPER = адаптивный интеллектуальный модуль IGBT. – Силовая электроника, 2005, №1.

Подробную информацию о рассмотренных в статье модулях можно найти в Интернете по адресу [www.semikron.com](http://www.semikron.com), а также получить у официального дистрибьютора Semikron – компании "КОМПЭЛ" и на сайте [www.compel.ru](http://www.compel.ru)

#### "КОМПЭЛ"

Москва  
Тел.: (095) 995-0901  
Факс: (095) 995-0902  
E-mail: [compel@compel.ru](mailto:compel@compel.ru)

Санкт-Петербург  
Тел.: (812) 327-9404  
Факс: (812) 327-9403  
E-mail: [spb@compel.ru](mailto:spb@compel.ru)