

# SEMIKUBE —

## универсальный модуль инвертора

**Расположенный во Франции дизайнерский центр SEMIKRON уже более 45 лет занимается разработкой силовых преобразователей на заказ. Недавно была создана новая международная исследовательская и конструкторская сеть SEMIKRON, предназначенная для повышения эффективности и качества работ. Первой разработкой нового подразделения явился модуль SEMIKUBE, представляющий собой универсальную платформу для построения 3-фазного инвертора IGBT.**

**Андрей Колпаков**

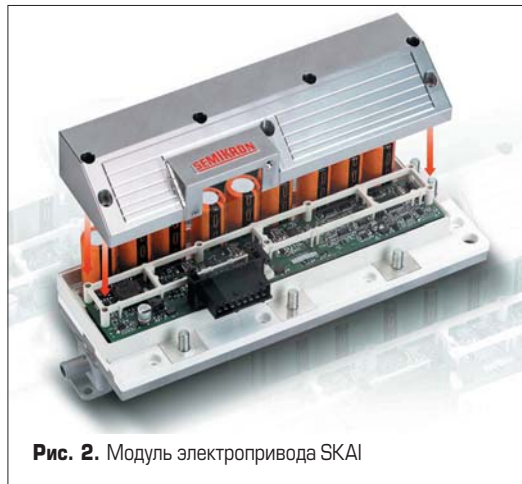
andrey.kolpakov@semikron.com

### Готовые сборки SEMISTACK

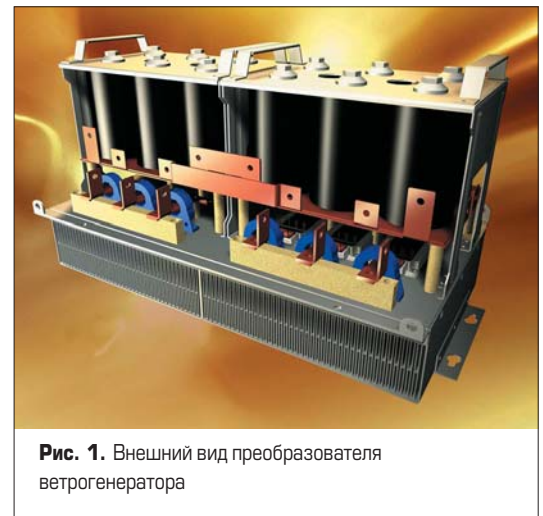
Разработка конструкции преобразователей средней и большой мощности является сложнейшей задачей, требующей очень внимательного подхода к анализу распределенных параметров конструкции. Специалистами SEMIKRON накоплен многолетний опыт проектирования мощных конверторов, создана база данных, включающая документацию на несколько тысяч выпущенных изделий. Все это позволяет компании в кратчайшие сроки выполнять уникальные работы, ориентированные на конкретного заказчика. На рис. 1 показана одна из наиболее сложных и интересных разработок SEMIKRON последних лет — модуль конвертора-инвертора для ветрогенератора. Преобразователь сконструирован с использованием новейших модулей SEMIKRON — SEMiX [6].

В январе 2000 года американское отделение фирмы SEMIKRON получило заказ министерства энергетики США на разработку интегрального силового модуля AIPM (Automotive Integrated Power Module) для гибридомобилей нового поколения, создаваемых в сотрудничестве с организацией PNGV (PNGV — Partnership for a New Generation Vehicle).

Основной задачей SEMIKRON было создание компактного и мощного низковольтного универсального модуля инвертора, способного работать в силовых установках автомобилей с гибридным приво-



**Рис. 2.** Модуль электропривода SKAI



**Рис. 1.** Внешний вид преобразователя ветрогенератора

дом, а также лифтов, погрузчиков, транспортеров и т. д. Новое семейство интеллектуальных модулей SEMIKRON, разработанных для данной задачи, получило название SKAI (SEMIKRON Automotive Inverter). Внешний вид изделия показан на рис. 2.

Подобно другим готовым конструктивным решениям, выпускаемым под маркой SEMISTACK, сборка SKAI содержит силовые ключи (MOSFET или IGBT), соединенные многослойной шиной связи, банк конденсаторов, токовые датчики и драйвер управления затворами. Кроме того, модуль SKAI включает плату управляющего процессора. Полевые и IGBT-транзисторы, используемые в модулях семейства SKAI, обеспечивают максимальный выходной ток до 650 А при температуре теплооттока 70 °С и предельном напряжении шины питания 62 и 900 В.

Использование многослойных силовых шин (Multilayer Laminated Bus Bar) позволяет решить проблемы, связанные с наличием паразитных индуктивностей, обеспечить высокую надежность изделия, минимальные потери, компактную конструкцию и хорошую электромагнитную совместимость за счет оптимизации распределенных параметров.

В ряде случаев пользователю требуется специальный конструктив, предназначенный для работы в конкретных условиях, например имеющий определенные габариты и конфигурацию. Для этих случаев SEMIKRON

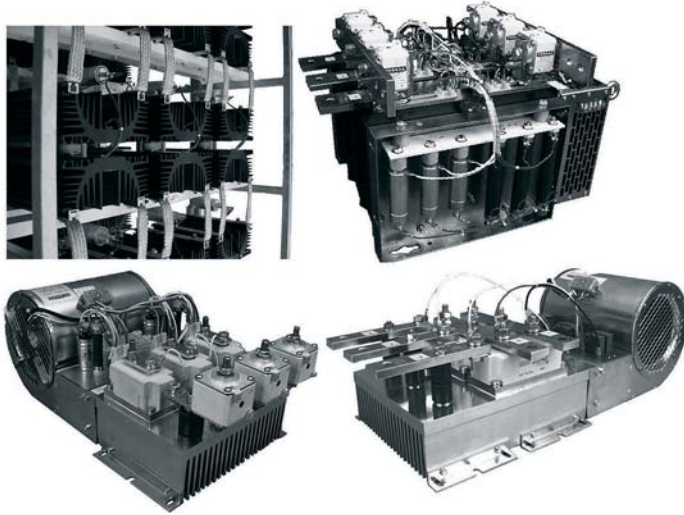


Рис. 3. SEMISTACK — управляемые и неуправляемые выпрямители

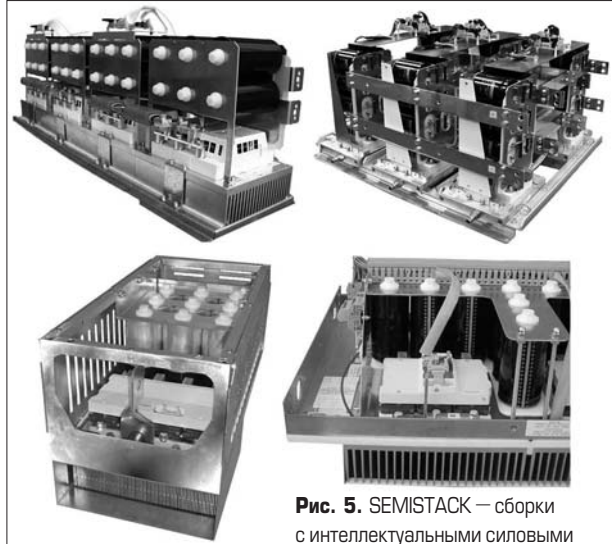


Рис. 5. SEMISTACK — сборки с интеллектуальными силовыми модулями SKiiP2/3

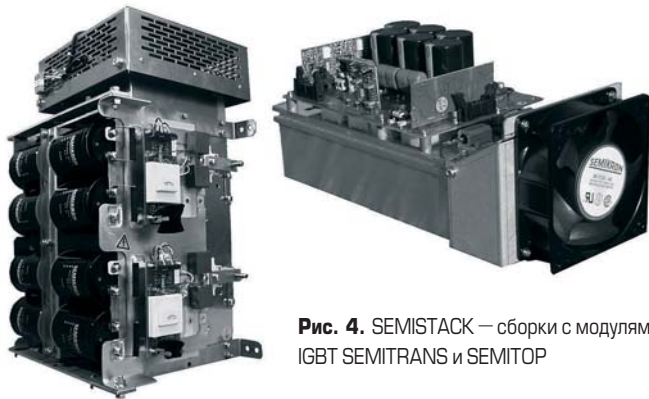


Рис. 4. SEMISTACK — сборки с модулями IGBT SEMITRANS и SEMITOP

Таблица 1. Основные характеристики выпрямительных сборок SEMISTACK

Напряжение питания, V <sub>RMS</sub>	Конфигурация	Номинальный ток, А	Выходная мощность, кВт
60–690	B2U — однофазный неуправляемый выпрямитель	200–675	12–450
	B6U — трехфазный неуправляемый выпрямитель	200–4015	150–3800
	B2HK — однофазный полупроводимый выпрямитель	100–595	80–390
	B6HK — трехфазный полупроводимый выпрямитель	150–2580	100–1700
	B2C — однофазный управляемый выпрямитель	100–260	80–170
	B6C — трехфазный управляемый выпрямитель	150–3920	100–2600
	W1C — однофазный тиристорный AC-ключ	200–1260	100–630
	W3C — трехфазный тиристорный AC-ключ	100–3000	100–2650

предлагает стандартную форму технического задания. Для заказа пользователь должен определить следующие требования к изделию:

- область применения, конфигурация схемы, выполняемые функции;
- требуемые размеры преобразователя, климатические и механические воздействия;
- характеристики питающей сети: диапазон входных напряжений, cos φ, частота входного сигнала, уровень пульсаций и перенапряжений напряжения питания;
- вид и параметры нагрузки (трансформатор, двигатель постоянного тока, двигатель переменного тока, вентильный индукторный двигатель), диапазон выходных напряжений и токов, cos φ, характеристики режима перегрузки, частота ШИМ, диапазон частот выходного сигнала;
- диапазон напряжения силовой шины постоянного тока, требуемая емкость конденсаторов;
- напряжение изоляции, виды защит;
- функции драйвера, тип интерфейса, опции (датчики тока, температуры, напряжения питания силовой шины);
- воздушное охлаждение: диапазон температур охлаждающего воздуха, допустимый уровень шума вентилятора;
- жидкостное охлаждение: тип охлаждающей жидкости, скорость потока;
- показатели надежности.

Как показала многолетняя практика, основная часть заказов может быть сведена к не-

скольким типовым конструктивам, поэтому SEMIKRON стандартизовал часть выпускаемых сборок, разбив их на 5 групп, отличающихся по конфигурации и используемым элементам. Это позволило сократить сроки разработки, упростить сборку и выпуск документации. Краткое описание стандартных модулей SEMISTACK дано ниже.

Показанные на рис. 3 сборки выпрямителей, содержащие диоды и тиристоры в «таблеточном» исполнении (capsule) или диодно-тиристорные модули SEMIPACK, рассчитаны на работу с выходным током 100–4100 А; они предназначены для применений в диапазоне мощности 10–4000 кВт. Модули могут содержать вентиляторы, предохранители, RC-снабберные цепи, термозащиты, датчики.

Показанные на рис. 4 блоки собраны на модулях IGBT, соединенных в конфигурации 3-фазного инвертора (B6CI). Основные параметры сборок SEMISTACK с модулями IGBT:

- Напряжение питания V<sub>RMS</sub> — 240/400/690 В;
- Конфигурация — B6CI;
- Номинальный ток — до 1500 А;
- Выходная мощность — до 1 МВт.

В показанных на рис. 5 блоках используются наиболее сложные и функционально законченные изделия SEMIKRON — интеллектуальные силовые модули SKiiP2 и SKiiP3 (SKiiP — SEMIKRON Integrated Intellectual Power). Разработка данного типа изделий производится в соответствии со стандартом EN50178, а их основные параметры приведены в таблице 2.

Таблица 2. Основные характеристики сборок SEMISTACK с интеллектуальными силовыми модулями SKiiP2 и SKiiP3

Напряжение питания, V <sub>RMS</sub>	Тип SKiiP	Номинальный ток*, А	Выходная мощность**, кВт
400	SKiiP 642 GB 123	390/300	230
	SKiiP 942 GB 123	530/410	310
	SKiiP 1242 GB 123	630/510	370
	SKiiP 1803 GB 123	810/680	475
	SKiiP 2013 GB 123	900/800	530
690	SKiiP 2403 GB 123	990/845	580
	SKiiP 592 GB 172	290/220	295
	SKiiP 792 GB 172	400/300	405
	SKiiP 1092 GB 172	470/375	475
	SKiiP 1803 GB 172	570/485	580
	SKiiP 2013 GB 172	640/555	650
	SKiiP 1403 GB 172	680/590	690

Примечание:

\* значение тока соответствует режиму принудительного воздушного охлаждения без параллельного соединения модулей: первая цифра — выходной ток без учета перегрузки, вторая цифра — максимальный ток с учетом 150-процентной перегрузки при частоте огибающей 2 Гц в режиме частотного регулирования с постоянным моментом.

Условия эксплуатации:

рабочая частота — 3 кГц,

температура окружающей среды — 35 °С.

\*\* выходная мощность в номинальных условиях эксплуатации при cos φ = 0,85.

Основные особенности сборок SKiiP:

- максимальная мощность в режиме принудительного воздушного охлаждения — 700 кВт (без параллельного соединения);
- максимальная мощность в режиме жидкостного охлаждения — 1 МВт (без параллельного соединения);
- использование полипропиленовых конденсаторов в шине питания;
- все необходимые виды защиты и мониторинга;
- высокая стойкость к термоциклированию, обеспечиваемая технологией SKiiP.

Следует особо отметить, что среди возможностей новой версии программы SemiSel 3.0 [5], разработанной SEMIKRON и предназначенной для автоматизированного расчета режимов работы силовых модулей, есть функция предложения сборки SEMISTACK для конфигурации, заданной пользователем.

### SEMIKUBE — платформа для построения 3-фазного инвертора IGBT



**Рис. 6.** SEMIKUBE при горизонтальном соединении единичных блоков (конфигурация B6CI, выходная мощность — до 900 кВт)

В декабре 2004 года компания SEMIKRON представила новую конструктивную платформу SEMIKUBE B6CI со сверхнизкой индуктивностью силовых шин, предназначенную для построения инверторов приводов мощностью 220–900 кВт. Новый конструктив серии SEMISTACK представляет собой компактный стандартизованный универсальный модуль, предназначенный для решения широкого круга задач. В нем использован режим принудительного воздушного охлаждения, диапазон рабочих токов составляет 300–1550 А.

Блоки SEMIKUBE содержат:

- 3-фазный инвертор IGBT;
- драйверы управления;
- охлаждаемый банк конденсаторов;
- датчики тока;
- 3-фазный выпрямитель (для типоразмеров 1, 1H и 2V);
- систему предварительного заряда конденсаторов (для типоразмеров 1, 1H и 2V).

Внешний вид и основные характеристики пяти выпускаемых типоразмеров блоков SEMIKUBE приведены в таблице 3.

Концепция, использованная при создании SEMIKUBE, включала следующие основные требования:

- в изделии должны применяться электронные силовые модули, имеющие лучшие показатели эффективности;

**Таблица 3.** Основные характеристики и внешний вид блоков SEMIKUBE

Типоразмер SEMIKUBE	1	2V	2H	3V	3H
Количество вентиляторов	1	1	2	1	3
Скорость потока, м <sup>3</sup> /час	1000	800	2000	500	3000
Максимальный выходной ток, А	385	660	770	1035	1550
Выходная мощность — 1, кВт*	220	355	400	560	900
Выходная мощность — 2, кВт**	160	280	355	500	710
Внешний вид					

Примечание:

Электрические характеристики даны для следующих условий эксплуатации:

- напряжение питания  $V_{AC} = 400$  В, 50 Гц или 460 В, 60 Гц;
- напряжение шины постоянного тока  $V_{DC} = 750$  В;
- рабочая частота  $f_{sw} = 3$  кГц;
- температура окружающей среды  $T_a = 40$  °С;
- $\cos \varphi = 0,85$ .

\* регулирование с переменным моментом (10-процентная перегрузка в течение 60 с);

\*\* регулирование с постоянным моментом (50-процентная перегрузка в течение 60 с).

- для сборки всех блоков серии должны применяться только надежные стандартные механические элементы;
- конструкция блоков должна обеспечивать возможность их соединения для наращивания мощности.

В блоках SEMIKUBE использован режим принудительного воздушного охлаждения силовых модулей и конденсаторов DC-шины, что гарантирует высокую надежность и исключает возникновение локальных перегревов в любой точке конструкции. Идеальная симметрия шин, соединяющих силовые модули, и конструкция звена постоянного тока обеспечивают оптимальное распределение тока и минимальные значения переходных перенапряжений. Во всех пяти типах SEMIKUBE применяются одинаковые крепежные и соединительные элементы. Этим обеспечивается простота установки, подключения и наращивания блоков. Три из пяти типоразмеров серии содержат полупроводниковый выпрямитель с системой предварительного заряда конденсаторов шины питания.

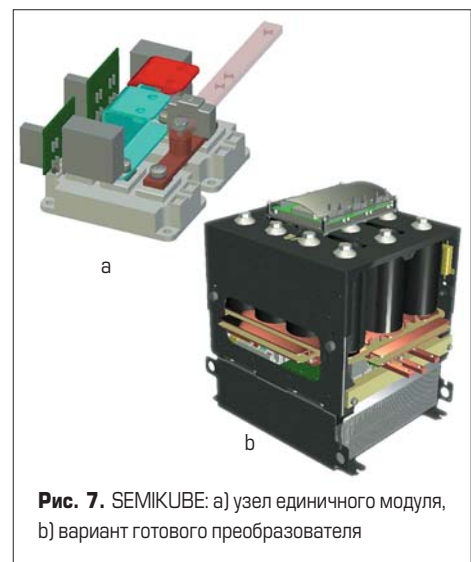
Конструктивно платформа SEMIKUBE представляет собой набор одинаковых блоков, имеющих специальные крепежные элементы для их взаимного соединения, обеспечивающего заданные механические и электрические характеристики. Для связи использованы силовые шины и коннекторы с низкой индуктивностью. Благодаря кубической форме блоков они могут быть скомпонованы в горизонтальном и вертикальном положении.

Общий вес составных частей SEMIKUBE не превышает 30 кг, а все точки крепления доступны со стороны лицевой части. Благодаря модульной конструкции блоки могут наращиваться, при этом требуется минимальное количество крепежных элементов. Простота конструкции упрощает послепродажное обслуживание готовых изделий и их замену.

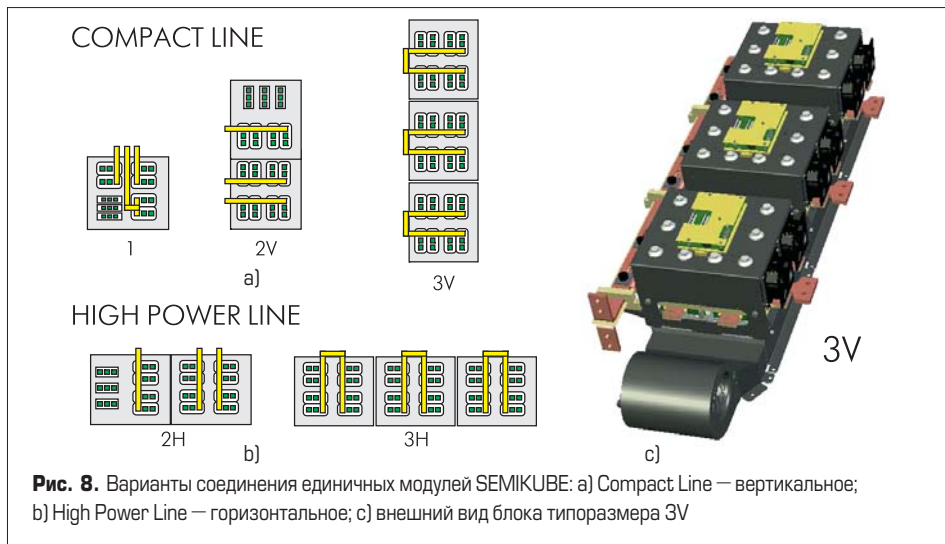
Инверторы SEMIKUBE имеют предельно малые габариты для данного класса изделий. В основе конструкции лежит единичный модуль, содержащий IGBT-транзисторы или выпрямители, DC-шину с конденсаторами, радиатор,

вентилятор, драйвер и датчик тока. В качестве силовых ключей использованы модули IGBT SEMITRANS последних поколений, выпускаемые по новейшим технологиям Trench FS со сверхнизкими потерями проводимости и SPT с оптимизированным соотношением потерь проводимости и переключения. Для управления применяются драйверы SEMIKRON семейства SKHI, имеющие гальваническую изоляцию цепей управления и все необходимые функции защиты: мониторинг напряжения насыщения  $V_{cesat}$ , фильтрацию коротких импульсов, защиту от падения питающего напряжения и от сквозного тока.

Каждый из единичных модулей SEMIKUBE содержит 4 элементарных узла, конструкция которых показана на рис. 7а. Узел состоит из двух параллельно соединенных модулей IGBT, датчика тока на основе эффекта Холла, драйвера и шин для промежуточного соединения. Элементарные узлы единичного модуля могут работать независимо, как это реализовано в 3-фазном инверторе минимальной мощности (см. рис. 8а, типоразмер 1). Все четыре узла также могут быть соединены параллельно для увеличения выходной мощности (см. рис. 8, типоразмеры 3V, 3H).



**Рис. 7.** SEMIKUBE: а) узел единичного модуля, б) вариант готового преобразователя



В окончательном виде объединенные в необходимой конфигурации единичные модули устанавливаются в корпус и снабжаются терминалами для внешнего подключения. На рис. 7б в качестве примера показан внешний вид готового преобразователя с рабочим током 400 А. Кроме инвертора IGBT он содержит 3-фазный выпрямительный мост, банк конденсаторов и систему предварительного заряда.

На рис. 8а схематически показано, как осуществляется промежуточная связь и параллельное соединение единичных модулей блоков, внешний вид и параметры которых приведены в табл. 4. В SEMIKUBE используется 2 типа соединений: вертикальное (типоразмеры 2V, 3V) и горизонтальное (типоразмеры 2H, 3H).

Блоки первого типа с вертикальным способом наращивания единичных модулей предназначены для использования в изделиях, для которых определяющим требованием являются минимальные габаритные размеры (ширина изделия не превышает 450 мм). Охлаждение вертикальных блоков серии Compact Line осуществляется одним вентилятором; максимальная выходная мощность для типоразмера 3V (см. рис. 8в) составляет 560 кВт при скорости потока охлаждающего воздуха 500 м<sup>3</sup>/ч.

В блоках серии High Power Line, как видно из их названия, главным является получение максимальной выходной мощности, которая в данном случае достигает 900 кВт для типоразмера 3H (см. рис. 6). Каждый единичный модуль в этом наиболее мощном варианте имеет собственную систему охлаждения, скорость потока охлаждающего воздуха — 1000 м<sup>3</sup>/ч.

Одним из важнейших достоинств конструкции SEMIKUBE является ее «гибкость», возможность использования любых вариантов промежуточного соединения. На рис. 9 показано одно из таких нестандартных исполнений в конфигурации «В6НК + В6СЛ», включающей 3-фазный инвертор и выпрямитель с дополнительным банком конденсаторов, охлаждаемых от вентилятора инвертора. Обратите внимание на то, что в данном случае применено «горизонтальное» соединение «вертикальных» блоков типоразмера 2V. На рисунке хорошо видны расположенные между вертикальными блоками элементы крепления: фиксация соединительных шин осуществляется с помощью двух обмоток специальных барашковых болтов.

### Заключение

Платформа SEMIKUBE является первой разработкой нового международного подразделения SEMIKRON, объединившего 9 исследовательских лабораторий, расположенных в разных странах. Глобальная сеть SEMIKRON была создана 1 марта 2005 года, в нее вошли дизайнерские центры SEMIKRON, находящиеся в Южной Африке, США, Франции, Англии, Бразилии, Южной Корее, Австралии, Индии и Словении. Создание подобной сети позволяет проводить работы по проектированию готовых сборок SEMISTACK с максимальной эффективностью, качеством и уровнем сервиса.

Основные рынки и применения, для которых предназначены разрабатываемые SEMIKRON изделия — это ветроэнергетика, транспорт, морская и мощная приводная техника. Готовые модули и блоки для данных сложных и энергоемких применений востребованы рынком гораздо больше, чем электронные компоненты. Главное, что получает заказчик, поручая разработку дизайнерскому центру SEMIKRON, — это близкий контакт с разработчиком и помощь на всех стадиях проектирования, производства и эксплуатации готового изделия.

Более 45 лет SEMIKRON разрабатывает и производит мощные преобразователи, содержащие силовые полупроводниковые ключи, конденсаторы, драйверы, шины, устройства охлаждения, датчики. За эти годы и выпущено более 15 тыс. подобных изделий, спроектированных на основании технического задания. В настоящее время SEMIKRON является мировым лидером в области производства силовых сборок для конкретного применения, по требованиям, определяемым заказчиком. Ярким примером лидерства является то, что в 57% ветрогенераторов, работающих в энергосистемах по всему миру, используются преобразователи, разработанные и изготовленные компанией SEMIKRON.

Создание новой дизайнерской сети SEMIKRON позволило объединить все имеющиеся у компании ресурсы в области проектирования, производства и маркетинга. Философией исследовательской сети является «глобальная работа в рамках локальной задачи», такая концепция позволяет максимально приблизить



все имеющиеся ресурсы к решению конкретной проблемы. Все отдельные исследовательские центры имеют свои «команды» инженеров-разработчиков и специалистов по применению, каждый из которых отвечает за свое направление. В составе этих групп есть и специалисты, занимающиеся испытанием готовых изделий, задачей которых является подтверждение соответствия технических характеристик заданным условиям.

Универсальная платформа инвертора SEMIKUBE, разработанная и испытанная новым подразделением SEMIKRON, обеспечивает:

- оптимальное использование объема модуля — SEMIKUBE не имеет аналогов по компактности, плотности мощности и уровню интеграции;
- гибкость конструкции: горизонтальное, вертикальное или смешанное расположение единичных модулей позволяет адаптировать конструкцию изделия под конкретные требования с минимальными затратами;
- высокую надежность и минимальные затраты при изготовлении за счет применения электронных элементов с лучшими характеристиками эффективности и стандартных надежных механических частей;
- простоту сборки, монтажа, ремонта и изменения конфигурации за счет уникальной конструкции единичных модулей и соединительных шин.

### Литература

1. Schreiber Dejan. High Power IGBT STACKS Produced by SEMIKRON. Presentation materials.
2. SEMIKUBE — SEMISTACK inverter by SEMIKRON solution centres. Presentation materials.
3. Колпаков А. Многослойная шина и модули SEMISTACK // Силовая электроника. 2004. № 1.
4. Колпаков А. И. Особенности проектирования частотных преобразователей средней и большой мощности // Электронные компоненты. 2003. № 6.
5. Колпаков А. Программа теплового расчета SEMISEL // Компоненты и технологии. 2002. № 9.
6. Колпаков А. SEMiX + SKYPER = адаптивный интеллектуальный модуль IGBT // Силовая электроника. 2005. № 1.