

Сборки SEMISTACK — серийная продукция SEMIKRON

Более 45 лет французское отделение компании SEMIKRON занимается разработкой и производством узлов мощных преобразователей, содержащих силовые полупроводниковые ключи, конденсаторы, драйверы, шины, датчики. За эти годы выпущено более 15 тыс. подобных изделий, спроектированных на основании технических заданий. Создание международной проектной сети SEMIKRON позволило компании укрепить позиции мирового лидера в области производства силовых сборок для конкретного применения по требованиям, определяемым заказчиком.

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Готовые блоки и сборки для сложных и энергоёмких промышленных применений востребованы современным рынком в гораздо большей степени, чем дискретные силовые модули. Это подтверждается, в частности, тем, что на ежегодной международной выставке производителей силовой электроники PCIM (Power Control In Motion), проходящей в Нюрнберге, все больше фирм представляют не только силовые модули, но и функционально законченные узлы на их основе.

Данное утверждение достаточно справедливо и по отношению к отечественному рынку. Многие российские предприятия, находящиеся на волне промышленного роста, работающие над перспективными проектами или получившие выгодный государственный заказ, не обладают достаточным количеством времени на проведение полного цикла разработки и испытаний или не имеют соответствующих специалистов. Ни для кого не секрет, что активное развитие силовой электроники и появление новых технологий производства силовых ключей на Западе совпало по времени с глобальным кризисом в России. Одним из самых трагических последствий деструктивных процессов в промышленности стал массовый отток ведущих российских специалистов в бизнес и потеря ими квалификации.

Основные рынки и применения, для которых предназначены разрабатываемые SEMIKRON изделия, — это энергетика, транспорт и мощная приводная техника. Имея в своей базе несколько тысяч выполненных проектов, долгие годы компания производила разработку продукции только на основе технических заданий. Для заполнения стандартной формы технического задания, доступной на сайте www.semikron.com, необходимо определить следующие требования:

- область применения, конфигурация схемы, выполняемые функции;
- условия эксплуатации, уровень климатических и механических воздействий;
- 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;
- напряжение изоляции, виды защит;
- функции драйвера, тип интерфейса, опции (датчики тока, температуры, напряжение питания силовой шины);
- тип и параметры охлаждающей системы: скорость потока и температура охлаждающего воздуха или жидкости, параметры теплоотвода и т. д.;
- показатели надежности.

Следует отметить, что и теперь для заказа готового узла, даже присутствующего в базе, требуется выполнение технического задания. Это необходимо специалистам SEMIKRON для того, чтобы иметь возможность предложить заказчику наилучшее решение задачи. При этом заполнение технического задания является достаточно простой процедурой, не отнимающей много времени. Специалистами российского отделения SEMIKRON подготовлена версия бланка заказа с русскими комментариями, ее можно получить у дистрибьюторов компании и в центрах технической поддержки в Санкт-Петербурге и Новосибирске.

Создание единой и доступной базы данных выполненных проектов значительно упрощает процедуру заказа и дальнейшие отношения между разработчиками и потребителями. Осуществление этой задачи стало возможным благодаря появлению дизайнерской сети SEMIKRON. В марте 2005 года было завершено формирование международного подразделения компании, объединившего 9 исследовательских лабораторий, которые расположены в разных странах. В глобальную сеть SEMIKRON вошли дизайнерские центры, находящиеся в Южной Африке, США, Франции, Англии, Бразилии, Южной Корее, Австралии, Индии и Словении. Образование сети позволило проводить работы по проектированию готовых сборок SEMISTACK с максимальной эффективностью, качеством и уровнем сервиса.

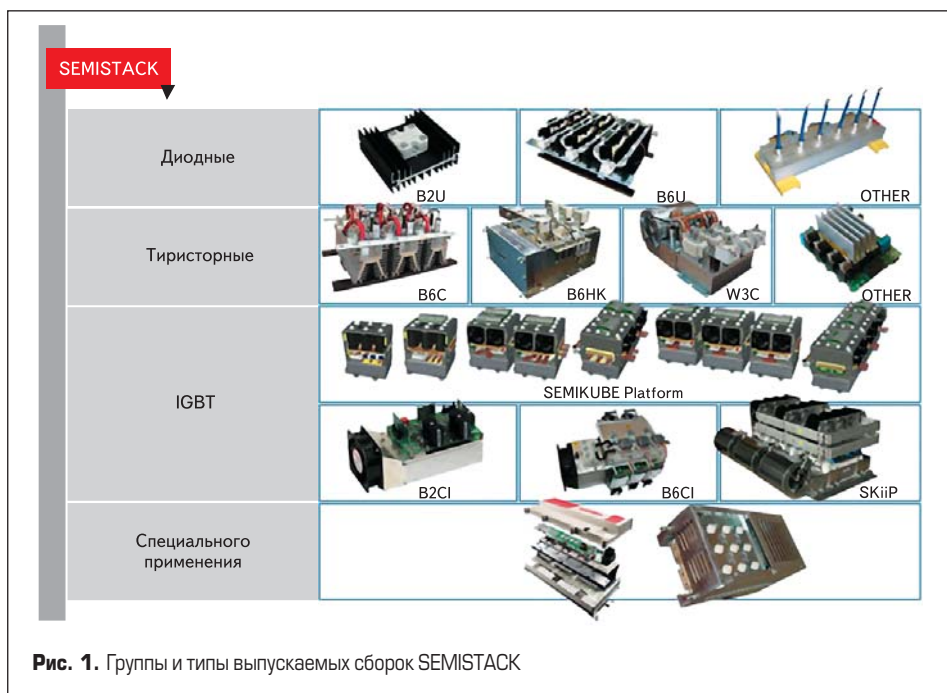


Рис. 1. Группы и типы выпускаемых сборок SEMISTACK

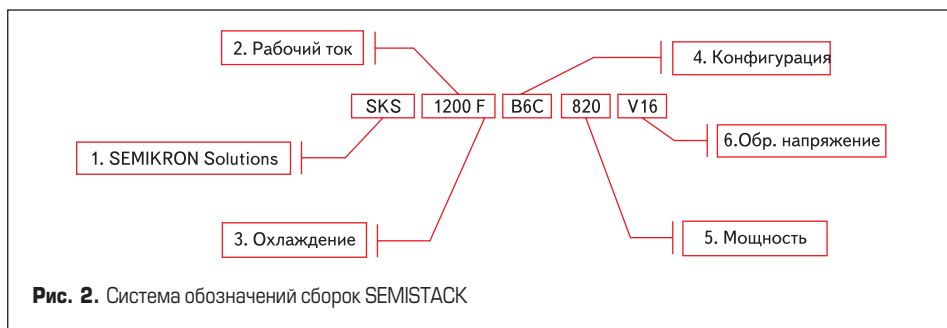


Рис. 2. Система обозначений сборок SEMISTACK

Таблица 1. Конфигурации стандартных сборок SEMISTACK

Диодные сборки			
B2U	Однофазный выпрямитель	B6U	3-фазный выпрямитель
E1UK	Однополупериодный выпрямитель	E2UK	Однофазный выпрямитель на диодной сборке с общим катодом
M3UK	3-фазный однополупериодный выпрямитель	M6UK	6-фазный выпрямитель на диодной сборке с общим катодом
Диодно-тиристорные сборки			
B2C	Однофазный управляемый выпрямитель	B6C	3-фазный управляемый выпрямитель
B2HZ	Однофазный выпрямитель с одним управляемым плечом	B6HK	3-фазный полупроводимый выпрямитель
B2HK	Однофазный полупроводимый выпрямитель	B6C2I	2×3-фазных управляемых выпрямителя в антипараллельном включении
W3C	3-фазный AC-коммутатор	W3C2/W2C	3-фазный AC-коммутатор с 2 управляемыми плечами
W1C	Однофазный AC-коммутатор		
Сборки с применением модулей IGBT / SKiIP			
B2CI	Однофазный IGBT-инвертор	B6CI	3-фазный IGBT-инвертор
B6CI(2)	4-квадрантный 3-фазный IGBT-инвертор (2×B6CI)	E1C1F	Чопперный преобразователь
C1B	Выпрямитель, инвертор, тормозной каскад		

Примечание: сборки могут представлять собой комбинацию приведенных конфигураций

Все отделения, работающие в составе сети, имеют свои «команды» инженеров-разработчиков и специалистов по применению, каждый из которых отвечает за свое направление. В составе этих групп есть и сотрудники, задачей которых является проведение испытаний и подтверждение соответствия технических характеристик заданным условиям.

Символом нового подразделения SEMIKRON стал хорошо знакомый логотип компании — тукан, но теперь он предстал в качестве повара, использующего в качестве ингредиентов силовые модули.

Номенклатура и классификация сборок SEMISTACK

Одним из важнейших результатов деятельности дизайнерской сети SEMIKRON стало создание базы данных выполненных проектов, выпуск технической документации, необходимой для размещения информации в каталоге и на сайте. Внешний вид страницы сайта www.semikron.com, посвященной сборкам SEMISTACK, на которой показаны основные классы предлагаемых изделий, приведен на рис. 1.

Номенклатура силовых блоков SEMISTACK включает 4 основные группы:

- сборки с использованием диодных модулей;
- сборки с использованием тиристорных модулей;
- сборки с использованием стандартных модулей IGBT и интеллектуальных силовых модулей SKiIP;
- сборки специального назначения.

Для спецификации сборок разработана стандартная система обозначений, показанная на рис. 2. Теперь все изделия, как разработанные ранее, так и новые, получают название, содержащее следующие группы символов:

1. Тип сборки:
 - SKS — стандартный;
 - SKAI — (SEMIKRON Advanced Integration) модуль привода электромобиля или гибридомобиля;
 - SEMKUBE — семейство модулей привода переменного тока [2–3].
2. Рабочий ток: максимальный продолжительный выходной ток без учета перегрузки. В зависимости от конфигурации схемы он обозначается в документации как I_{rms} , I_d , I_{ac} , I_{out} .
3. Система охлаждения:
 - N — естественная конвекция;
 - F — принудительное воздушное охлаждение;
 - G — блок не укомплектован системой охлаждения, она должна быть установлена заказчиком (принудительное воздушное охлаждение);
 - H — масляное охлаждение;
 - W — жидкостное охлаждение.

4. Конфигурация схемы: возможные схемы сборок и их обозначения приведены в таблице 1.

5. Мощность: максимальная выходная мощность преобразователя в кВА.

6. Обратное напряжение: пиковое обратное напряжение модулей, используемых во входных каскадах.

Подробные технические параметры сборок SEMISTACK можно получить на сайте www.semikron.com. В настоящее время предлагается несколько десятков блоков подобного типа. Для того чтобы не перегружать статью информацией, доступной в Интернете, мы привели в таблице 2 основные параметры лишь некоторых наиболее мощных блоков в каждой конфигурации. Большой интерес в данной группе вызывают сборки семейства SEMIKUBE thyristor, представляющие собой серию малогабаритных 3-фазных неуправля-



Рис. 3. Внешний вид диодно-тиристорной сборки серии SEMIKUBE thyristor

Таблица 2. Основные характеристики наиболее мощных выпрямительных сборок SEMISTACK

Тип	I_{dr} , А	V_{ac}/V_{dc} , В	Семейство модулей	Охлаждение
SKS 1900N B6U 1520 V20	1900	600/800	Presspack	Естественное
SKS 4015F B6U 4060 V24	4015	750/1010	Presspack	Естественное
SKS 1270F B6U 860 V16	1270	500/670	Presspack	Принудительное воздушное
SKS 1000N B6C 670 V16	1000	500/670	Presspack	Естественное
SKS 3420F B6C 2280 V16	3420	500/670	Presspack	Принудительное воздушное
SKS 890F B6C 600 V16	890	500/670	SEMIKUBE	Принудительное воздушное
SKS 1000N B6HK 670 V16	1000	500/670	Presspack	Естественное
SKS 750F B6HK 510 V16	750	500/670	Stud device	Принудительное воздушное
SKS 3420F B6HK 2280 V16	3420	500/670	Presspack	Принудительное воздушное
SKS 890F B6HK 600 V16	890	500/670	SEMIKUBE	Принудительное воздушное
SKS 780N W3C 670 V16	780	500	Presspack	Естественное
SKS 590F W3C 570 V16	590	500	Stud device	Принудительное воздушное
SKS 2680F W3C 2320 V16	2680	500	Presspack	Принудительное воздушное
SKS 690F W3C 600 V16	690	500	SEMIKUBE	Принудительное воздушное

Примечание:

Presspack — модули «таблеточной» конструкции,

SEMIKUBE — диодно-тиристорные модули в стандартных корпусах,

Stud device — элементы с прямым отводом тепла и электрическим контактом на теплосток,

SEMIKUBE — модули семейства SEMIKUBE thyristor

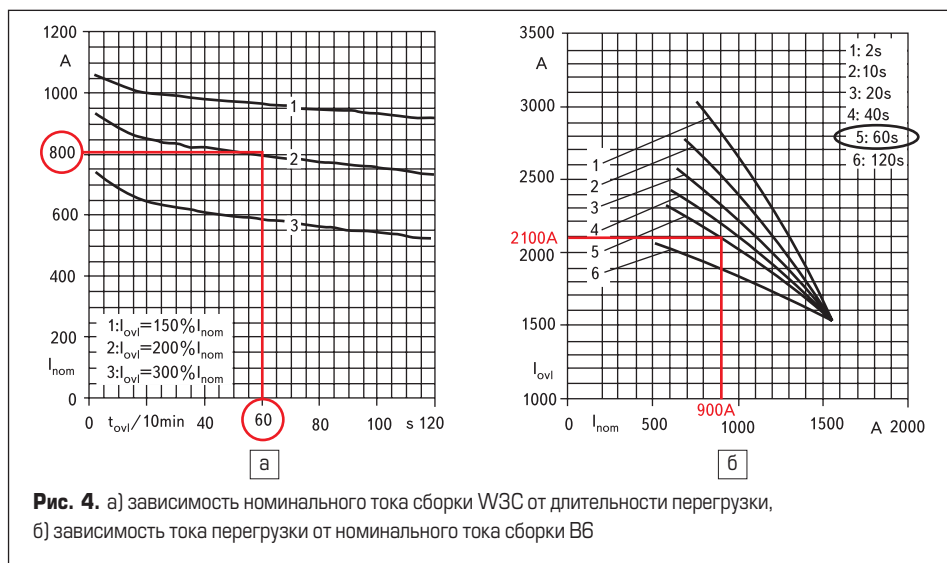


Рис. 4. а) зависимость номинального тока сборки W3C от длительности перегрузки, б) зависимость тока перегрузки от номинального тока сборки B6

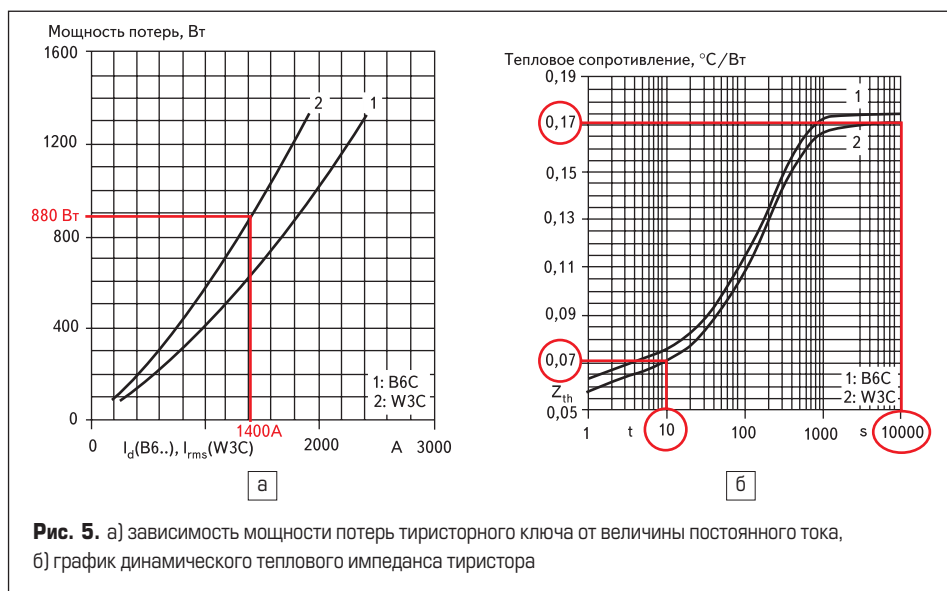


Рис. 5. а) зависимость мощности потерь тиристорного ключа от величины постоянного тока, б) график динамического теплового импеданса тиристора

емых и управляемых выпрямителей. Внешний вид модуля с креплением на DIN-рейку приведен на рис. 3.

Техническая документация на все сборки содержит необходимые значения параметров и графики, позволяющие рассчитать рабочие режимы в конкретных условиях эксплуатации.

На рис. 4 приведены графики, определяющие зависимость номинального тока от длительности перегрузки и тока перегрузки от номинального тока для диодно-тиристорных сборок в конфигурациях W3C и B6. Как, например, показывают кривые на рис. 4а, при увеличении времени двойной перегруз-

ки с 0 до 60 с допустимый ток падает с 870 до 800 А. По семейству графиков рис. 4б можно определить, что при длительности перегрузки 60 с и номинальном токе 900 А допустимый ток перегрузки составляет 2100 А.

На рис. 5 показаны графики зависимости мощности потерь тиристорного ключа от величины постоянного тока и характеристики динамического теплового импеданса для сборок в конфигурациях B6C и W3C. Приведенные кривые позволяют определить, что, например, для 3-фазного АС-коммутатора (W3C) при токе 1400 А потери мощности составляют 880 Вт. Это значение необходимо для расчета перегрева кристаллов, который определяется с помощью значения динамического теплового импеданса «кристалл — окружающая среда» Z_{thja} (рис. 5б). В данном примере $Z_{thja} = 0,07$ °С/Вт при длительности импульса проводимости $t = 10$ с. В случае, когда тиристор открыт в течение времени, значительно превышающего тепловую постоянную времени (10 000 с), динамический импеданс становится равным тепловому сопротивлению ($Z_{thja} = R_{thja} = 0,17$).

С помощью приведенных на рис. 5 кривых мы можем рассчитать перегрев кристалла тиристора при заданных номинальных условиях эксплуатации и в режиме перегрузки. Например, при $I_{nom} = 600$ А:

$$\Delta T_{nom} = R_{th} \times P_{nom} = 0,17 \times 300 = 51 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Соответственно, при температуре окружающей среды $T_{amb} = 35$ °С, температура кристалла в стационарном режиме: $T_{jnom} = 35 + 51 = 86$ °С.

При 200-процентной перегрузке в течение 10 с мощность потерь $P_{ovl} = 700$ Вт ($I_{ovl} = 1200$ А) и тепловой импеданс $Z_{thja} = 0,07$. В этом случае дополнительный перегрев определяется следующим образом:

$$\Delta T_{ovl} = Z_{th} \times (P_{ovl} - P_{nom}) = 0,07 \times 400 = 28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Таким образом, в режиме перегрузки температура кристалла может достигнуть 114 °С.

На рис. 6 показаны некоторые конфигурации блоков SEMISTACK, производимых с применением модулей IGBT и интеллектуальных силовых модулей SKiP. В таблице 3 приведены основные характеристики изделий, являющихся самыми мощными для каждого семейства. В данном классе изделий наибольшей мощностью обладают сборки 3-фазных инверторов, выполненные на основе интеллектуальных силовых модулей SKiP.

Недавно в производственной программе SEMIKRON появились модули IGBT новейшего поколения SEMiX и драйверы для управления ими SKYPER [4]. Обратите внимание на то, что на основе этих компонентов уже выпущен ряд блоков в различных конфигурациях.

Модули привода новейшего поколения SEMIKUBE [2–3] в конфигурации B6U (B6HK) + B6CI также относятся к данному типу изделий. Однако эти блоки, предназначенные для применения в инверторах мощностью до 900 кВт, представляют собой принципиально новую концепцию фирмы, поэтому есть смысл остановиться на них подробнее.

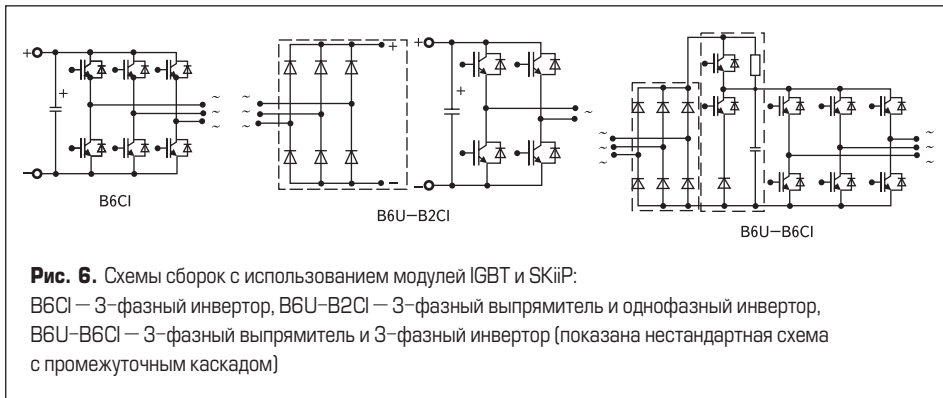


Таблица 3. Основные характеристики сборок с использованием модулей IGBT (приведены наиболее мощные варианты для каждого семейства IGBT)

Тип	I_{max} , А	V_{ac}/V_{dcmax} , В	Емкость DC-шины, мкФ	Семейство	Схема
SKS 65F B2CI 08 V12	65	240/350	8160	SEMITOP	B2CI
SKS 27F B6U+B6CI 10 V6	27	240/350	2250	SEMITOP	B6U+B6CI
SKS 29G B6CI 18 V12	29	415/600	—	MiniSKiiP	B6CI
SKS 22W B6U+B6CI 10 V12	22	440/620	940	MiniSKiiP	CIB
SKS 260F B6U+B6CI 160 V12	260	415/600	7050	SEMiX	CIB
SKS 260F B6CI(2) 160 V12-L	260	415/600	14100	SEMiX	4Q B6CI
SKS 196F CIB 120 V12	196	415/600	7050	SEMiX	CIB
SKS 400F B6CI 230 V12	400	560/800	9900	SKiiP	B6CI
SKS 1260F B6CI 740 V12	1260	560/800	39600	SKiiP	B6CI

Сборка SEMIKUBE, представляющая собой универсальную платформу инвертора привода, является первой разработкой международной дизайнерской сети SEMIKRON. Она 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 харак-

Таблица 4. Основные характеристики и внешний вид блоков SEMIKUBE

Типоразмер SEMIKUBE	1/2	1	2V	2H	3V	3H
Количество вентиляторов	1	1	1	2	1	3
Скорость потока, м ³ /ч	1000	1000	800	2000	500	3000
Максимальный выходной ток, А (непр. режим)	205	390	665	765	1050	1550
Максимальный выходной ток, А (перегрузка 110%, 60 с)	200	385	660	760	1040	1504
Максимальный выходной ток, А (перегрузка 150%, 60 с)	160	305	525	600	850	1200
Выходная мощность, кВт/л.с. (перегрузка 110%, 60 с)	110/175	220/300	375/550	400/650	560/900	890/1350
Выходная мощность, кВт/л.с. (перегрузка 150%, 60 с)	90/125	160/250	300/450	355/550	500/750	710/1100
Размеры, мм	339×275×367	469×403×411	510×774×411	758×510×411	502×1110×411	1080×502×411
Внешний вид						

Примечания:

- 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;
 - $\cos \varphi = 0,85$.
- Используемый силовой модуль — SKM400GB128D.
- Вентиляторы (SKF-16-O) предлагаются дополнительно, пользователь может применить свою систему охлаждения.
- Модуль типоразмера 3H поставляется в стандартном 1200-миллиметровом корпусе.

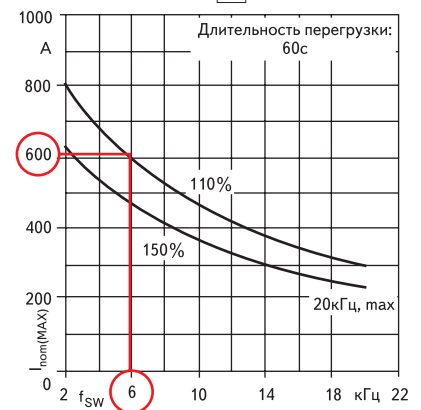
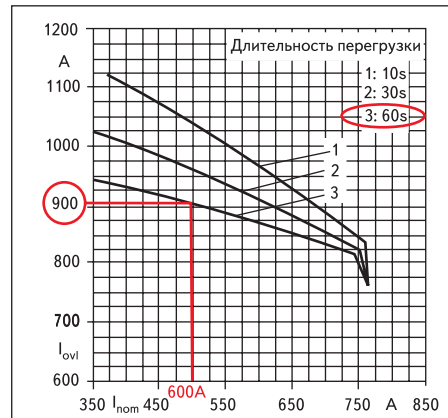


Рис. 7. а) зависимость тока перегрузки от номинального тока, б) зависимость выходного тока инвертора от частоты

теристиками эффективности и стандартных надежных механических частей;

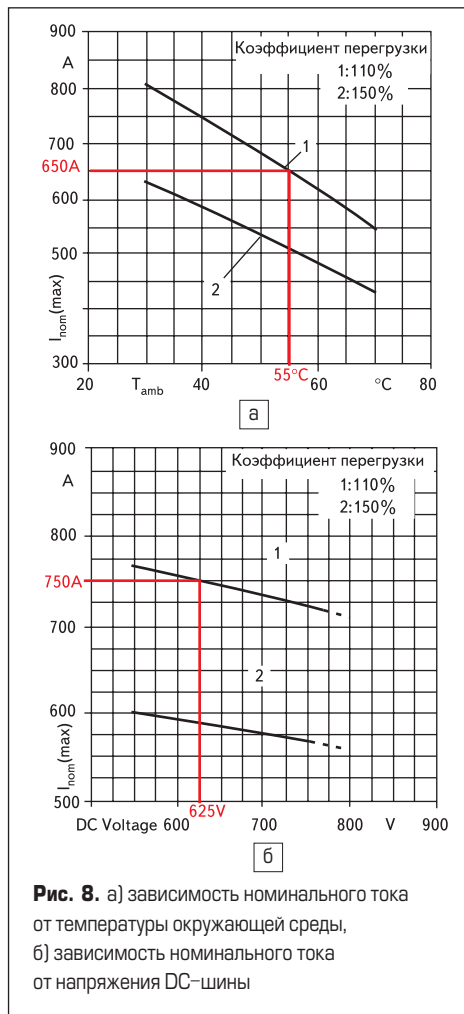
- простоту сборки, монтажа, ремонта и изменения конфигурации за счет уникальной конструкции единичных модулей и соединительных шин.

Внешний вид и основные характеристики шести выпускаемых типоразмеров SEMIKUBE приведены в таблице 4.

В документации на сборки группы IGBT, как и в предыдущем случае, приведены все графики, необходимые для расчета рабочих режимов. Например, кривые на рис. 7а позволяют определить, что при номинальном токе инвертора, равном 600 А, ток перегрузки может достигать 900 А в течение 60 с. А графики на рис. 7б характеризуют частотные свойства 3-фазного инвертора IGBT. Например, при частоте 6 кГц предельный выходной ток достигает 600 А в условиях 110-процентной перегрузки в течение 60 с.

На рис. 8 показаны графики, характеризующие нагрузочную способность инвертора при различной температуре окружающей среды и напряжении DC-шины при коэффициентах перегрузки, равных 110% и 150%.

Модули специального применения, конфигурации которых не вписываются в стандартные рамки, не зря выделены в отдельную группу сборок SEMIKRON. Данные изделия являются наиболее сложными, энергонасыщенными, они отличаются очень высоким уровнем конструкторской проработки и являются предметом особой гордости компании. Особенный интерес среди товаров группы представляю-



блоки электропривода гибридомобиля SKAI [5] и преобразователи для ветроэнергетических установок [6]. Внешний вид сборки SKAI, за которую в 2004 году компания SEMIKRON получила приз «Поставщик года» от General Motors, и 4-квadrантного модуля инвертора-конвертера для ветрогенератора мощностью 1 МВт показаны на рис. 9. Типы нестандартных сборок, их краткое описание и основные характеристики приведены в таблице 5.

Пользователи продукции SEMIKRON хорошо знают программу теплового расчета и выбора компонентов SemiSel (см. статью «Полезный софт от компании SEMIKRON» в этом номере журнала). Одновременно с созданием базы данных блоков SEMISTACK была выпущена и новая версия программы 3.0.8, предоставляющая пользователям ряд интересных дополнительных возможностей (см. рис. 10).

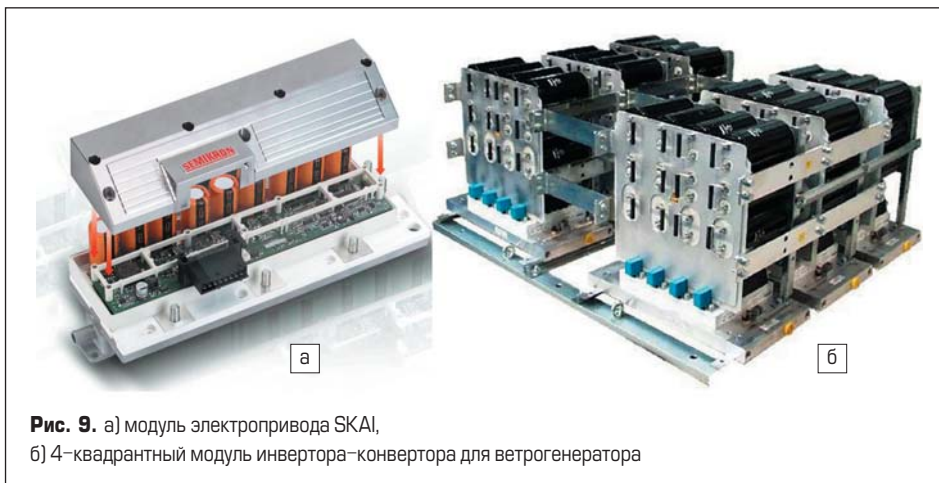


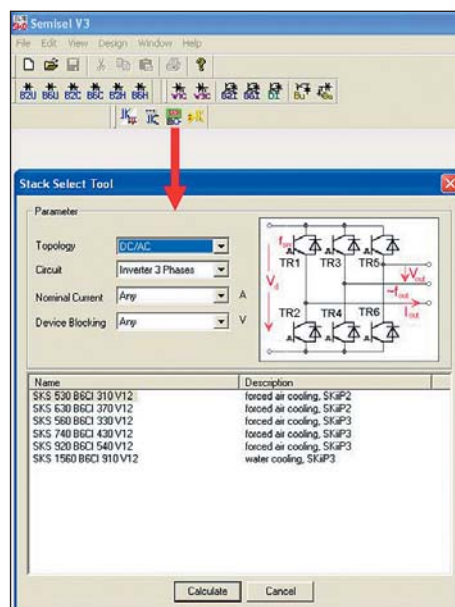
Таблица 5. Специальные конфигурации SEMISTACK

Тип	I_{max} , А	Схема	Семейство модулей	Описание
Ветроэнергетика				
700kW Wind power arm stack	660	B6CI / 4Q	SKiP	4-квadrантный 3-фазный инвертор
Электро- и гибридомобили				
SKAI 3001GD12 1452 W	300	B6CI	AIPM	1200 В IGBT-привод
SKAI 4001GD06 1452 W	400	B6CI	AIPM	600 В IGBT-привод
SKAI 5001MD15 1452 W	400	B6CI	AIPM	150 В MOSFET-привод
SKAI 6001MD10 1452 W	500	B6CI	AIPM	100 В MOSFET-привод
SKAI 7001MD075 1452 W	500	B6CI	AIPM	75 В MOSFET-привод
Промышленные применения				
HV-diode stack range	-	B6U	HV-Diode	Высоковольтные слаботочные устройства (рентгеновская, лазерная техника)
Press-fit diode stack range	30–1000A	B6U	Pressfit diode	Сильноточные применения (химия, сварка, UPS, источники питания)
Транспорт				
110 KVA Traction Auxiliary Stack	200	B6U+E1CIKF	SEMITRANS	Выпрямитель + 3 чопперных каскада
SKS 20N B6U 80 V6x16	20	B6U	Presspack	3-фазный выпрямитель, 4 кВ
SKS 50N B6U 200 V6x16	50	B6U	Presspack	3-фазный выпрямитель, 4 кВ
Системы освещения				
SKS 25G 2x W1C 6 V6	25	W1C	SEMITOP	Мощный регулятор освещения
SKS 50G 1x W1C 6 V6	50	W1C	SEMITOP	Мощный регулятор освещения

Как видно из рисунка, теперь SemiSel имеет 4 режима работы:

- Step by Step design — основная программа расчета мощности потерь и температуры кристаллов;
- StackSel — программа предварительного выбора сборки SEMISTACK на основании заданных рабочих режимов;
- Device Proposal — программа выбора силового модуля на основании заданных рабочих режимов;
- Driver Select — программа расчета режимов и выбора типа драйвера.

Внешний вид меню локальной версии SemiSel 3.0 и меню ввода исходных данных StackSel показаны на рис. 11. Таким образом, теперь пользователь имеет возможность,



задав требуемую конфигурацию схемы и значение выходного тока, получить ссылки на все сборки SEMIKRON, удовлетворяющие заданным условиям. Меню ввода исходных данных в режиме StackSel, также показанное на рис. 10 и 11, содержит 4 пункта:

- Topology — тип преобразователя (DC/AC, AC/DC, AC/AC), в данном случае выбран DC/AC;
- Circuit — схема, в данном случае это 3-фазный инвертор;
- Nominal current — номинальный ток преобразователя;
- Device Blocking voltage — обратное напряжение силовых ключей.

После нажатия на кнопку **Find** или **Calculate** мы получаем результат — ссылку на блок, параметры которого в первом приближении удовлетворяют заданным условиям. Далее, пользуясь подробным техническим описанием изделия, необходимо произвести тщательный расчет его рабочих режимов.

Заключение

Разработка конструкции преобразователей средней и большой мощности является сложнейшей задачей, требующей тщательного 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.

За годы работы фирмы в области проектирования силовых преобразовательных устройств на основании технических заданий было разработано более 15 тыс. блоков, предназначенных для применения в различных отраслях промышленности. В настоящее время SEMIKRON является мировым лидером в области производства силовых сборок. Ярким примером лидерства является то, что в 57% ветрогенераторов в энергосистемах по всему миру используются преобразователи, разработанные и изготовленные компанией SEMIKRON.

Образование единой 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. Поручая разработку дизайнерскому центру SEMIKRON, заказчик находится в постоянном контакте с непосред-

ственным разработчиком проекта, он получает помощь на всех стадиях проектирования, производства и эксплуатации готового изделия.

Одним из наиболее важных результатов работы нового подразделения SEMIKRON является формирование базы данных с технической документацией на большое количество проектов, выполненных компанией как на основании технических заданий, так и в инициативном порядке.

Литература

1. Dejan Schreiber. High Power IGBT STACKs Produced by SEMIKRON. Presentation materials.
2. SEMIKUBE — SEMISTACK inverter by SEMIKRON solution centres. Presentation materials.
3. Колпаков А. Инверторная платформа SEMIKUBE — quadratisch, praktisch, gut! // Компоненты и технологии. 2005. № 6.
4. Колпаков А. SEMiX + SKYPER = адаптивный интеллектуальный модуль IGBT // Силовая электроника. 2005. № 1.
5. Колпаков А. Модули SKAI/SKADS — предельный уровень интеграции // Силовая электроника. 2005. № 3.
6. Колпаков А. Энергия, принесенная ветром // Силовая электроника. 2005. № 3.