

Многослойная шина

и модули SEMISTACK от SEMIKRON

Разработка топологии соединений в преобразователях большой мощности является одним из наиболее важных и сложных этапов создания конструкции изделия. Высокие значения скоростей изменения сигнала di/dt , dv/dt , возникающие при переключении силовых модулей, приводят к появлению переходных перенапряжений, шумов и помех. Для борьбы с этим в мощных импульсных преобразователях необходимо обеспечивать минимальное значение распределенных индуктивностей силовых линий связи. Основным способом решения данной проблемы является использование многослойных силовых шин (Laminated Bus Bar).

В настоящее время готовые силовые шины для различных мощных применений выпускаются рядом зарубежных фирм. Одним из лидеров в производстве изделий данного класса является французская компания ELDRE, предлагающая широкую гамму шин для различных преобразователей. Именно такие шины используются в готовых конструктивах SEMISTACK, разрабатываемых фирмой SEMIKRON и предназначенных для максимального упрощения разработки и обеспечения надежной работы изделия.

В данной статье рассматриваются конструктивные и электрические параметры многослойных шин питания, описываются наиболее удачные варианты конструкции силовых сборок SEMISTACK, производимых фирмой SEMIKRON.

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Конструктивные и электрические характеристики шин

На рис. 1 показана одна из наиболее популярных разработок SEMIKRON — модуль 3-фазного инвертора-конвертора с выходной мощностью более 1 МВт. Данная сборка предназначена для работы в составе ветроэнергетической установки, она содержит конвертор и инвертор на интеллектуальных силовых модулях SKiiP2403GB172 с транзисторами Trench IGBT (2400 А, 1700 В), установленных на теплоотвод с жидкостным охлаждением, а также блок конденсаторов $2 \times [3 \times (4 \times 3 \text{ последовательно})]$ емкостью 3300 мкФ. Модуль может использоваться как с асинхронным ветрогенератором с фазным ротором, так и с синхронным генератором мощностью

до 1 МВт. На рисунке хорошо видны многослойные шины связи, соединяющие силовые модули и конденсаторы шины питания.

Многослойные шины необходимы для распределения энергетических потоков между силовыми компонентами мощных преобразовательных устройств. Они предназначены, прежде всего, для использования в импульсных схемах с высокими значениями коммутлируемых токов и напряжений и большими скоростями их изменения. Диапазон токов электронных устройств, при которых целесообразно применение многослойных шин, составляет 25–2500 А [3]. Основными требованиями, предъявляемыми к шинам, являются минимальные значения распределенных индуктивностей и сопротивлений проводников и большая допустимая плотность тока в сочетании с высоким напряжением изоляции слоев шины.

Современная многослойная шина представляет собой прессованную плоскую конструкцию, состоящую из медных пластин, изолированных друг от друга тонким слоем диэлектрика.

Будучи симметричной параллельной конструкцией, шина обеспечивает согласованную высокую проводимость слоев, согласованное значение распределенной емкости и низкую паразитную индуктивность. Шина общего провода может также выполнять функции экрана. Все это гарантирует минимальный уровень радиопомех, помех, излучаемых в сеть, и высокую электромагнитную совместимость изделия. Кроме того, применение плоских шин позволяет создать компактную легкую конструкцию и обеспечить хорошие тепловые характеристики.

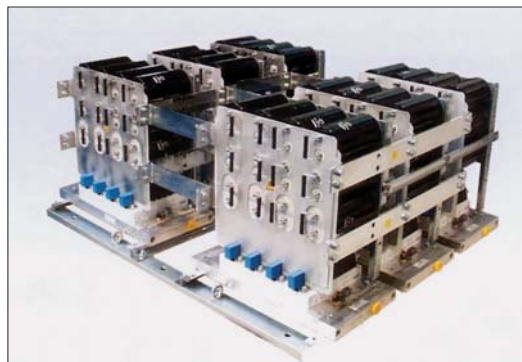


Рис. 1. Внешний вид 3-фазного инвертора-конвертора для ветротурбины мощностью 1 МВт

Для большинства практических применений допустимая плотность тока проводника составляет 5 А/мм². При добавлении каждого следующего слоя шины его сечение необходимо увеличивать на 5%. Приведенная ниже формула позволяет определить минимальное сечение A одного проводящего слоя шины, состоящей из N слоев и рассчитанной на максимальный ток I_{\max} :

$$A = 0,2I_{\max} [1 + 0,05(N - 1)]$$

Ширина и толщина проводников шины выбирается исходя из конструктивных требований. Существует только одна рекомендация: ширина должна быть по крайней мере в 2 раза больше толщины.

Как правило, многослойная силовая шина содержит проводники линии питания, общего провода и выходных цепей. Слои общего провода и провода силового питания должны быть одинаковы по геометрическим размерам и сечению. При этом обеспечивается симметрия проводимости и минимальное значение распределенной индуктивности. В качестве материала проводника обычно используется медь и медные сплавы, однако для некоторых применений шины изготавливаются из латуни, бронзы и бериллиево-медных сплавов. В окончательном виде силовая шина, состоящая из набора проводящих и изолирующих слоев, прессуется с использованием эпоксидного наполнителя для получения максимально жесткой конструкции.

Основными электрическими параметрами шины питания являются: активное сопротивление, распределенная последовательная индуктивность и распределенная емкость. Пользователя интересуют, прежде всего, активное сопротивление, определяющее потери мощности на шине и шумы, создаваемые паразитными RLC-контурами. На рис. 2 показаны конструктивные слои и эквивалентная электрическая схема многослойной шины.

Электрические характеристики шины определяются ее конструктивными параметрами. Рассмотрим базовый элемент шины: два проводящих слоя, разделенные изолятором. Для анализа используются следующие параметры: N — проводимость проводящего слоя шины; K — диэлектрическая постоянная изолятора;

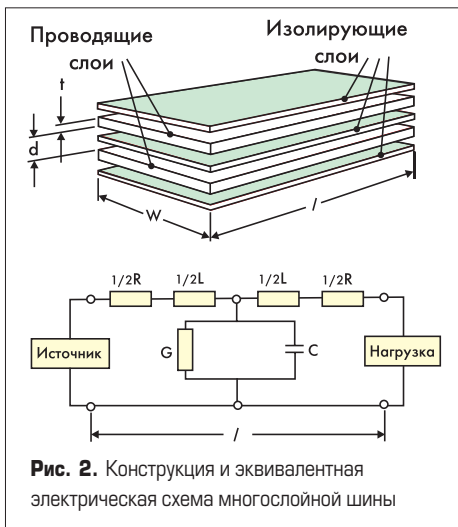


Рис. 2. Конструкция и эквивалентная электрическая схема многослойной шины

M — проницаемость;
 U — удельная диэлектрическая проводимость;
 W, l — ширина и длина шины;
 d — расстояние между проводящими слоями;
 t — толщина проводящего слоя.

На электрической схеме показаны:
 L — последовательная распределенная индуктивность;
 G — проводимость изолятора;
 R — сопротивление проводящего слоя;
 C — распределенная емкость параллельных слоев.

Распределенная емкость шины зависит в основном от ее физических размеров и диэлектрических характеристик изолятора. Она незначительно меняется при изменении частоты, что определяется стабильностью диэлектрической постоянной. Для расчета емкости шины используется следующая формула:

$$C = (0,225 K \times W \times l) / d \text{ (пФ)}$$

Для улучшения шумовых характеристик и снижения характеристического импеданса линии необходимо увеличивать распределенную емкость. Увеличение емкости достигается за счет использования диэлектриков минимальной толщины (имеющих достаточное сопротивление изоляции и напряжение пробоя) и применения диэлектриков с высокой относительной диэлектрической постоянной.

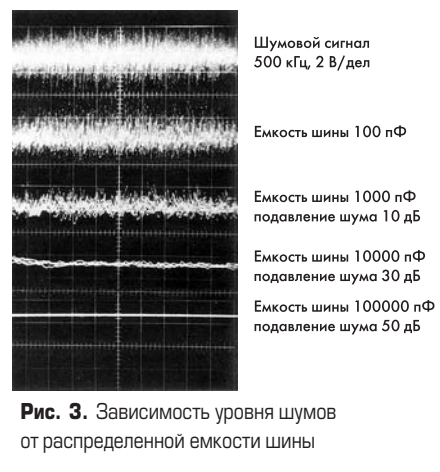


Рис. 3. Зависимость уровня шумов от распределенной емкости шины

Проводимость диэлектрического слоя G зависит от его физических размеров и удельной диэлектрической проводимости изолятора U . На параметр G большое влияние оказывают также условия эксплуатации.

$$G = (U \times W \times l) / d \text{ (МОм)}$$

Из-за наличия скин-эффекта распределенная проводимость и индуктивность шины зависят от частоты. Скин-эффект проявляется в том, что с ростом частоты проводимость смещается к поверхности проводника и глубина проникновения электромагнитной энергии определяется эффективно проводящим объемом проводника. При этом индуктивность уменьшается до некоторой величины, а сопротивление растет. Глубина поверхностного слоя SD на частоте f описывается формулой:

$$SD = \frac{1}{\sqrt{\pi \times f \times M \times N}}$$

Для меди $SD = 2,6/\sqrt{f}$, для латуни $SD = 4,95/\sqrt{f}$. Снижение распределенной индуктивности проводников приводит к уменьшению характеристического импеданса и лучшему подавлению шумов. Для минимизации индуктивности шины следует учитывать следующее:

- индуктивность уменьшается при уменьшении толщины диэлектрика d и увеличении ширины проводника W ;
- индуктивность уменьшается при увеличении частоты.

Применительно к проводникам шины различают два типа индуктивности: внутреннюю, образующуюся из-за потокоцепления в проводнике, и внешнюю, определяемую взаимной ориентацией параллельных проводников. В реальных применениях внутренней индуктивностью, как правило, можно пренебречь из-за уменьшения площади потока в результате скин-эффекта. Суммарная индуктивность L проводника параллельной шины определяется следующим образом:

$$L = \frac{14 \times l}{W} \left[d + \frac{2,6}{\sqrt{f}} \right] \text{ (нГ)}$$

Для расчета распределенного сопротивления проводника шины при температуре 20 °С постоянному току R_{DC} и переменному току R_{AC} (с учетом скин-эффекта, когда $t > 2SD$) служат следующие выражения:

$$\begin{aligned} R_{DC} &= (2 \times l) / (N \times W \times t) \text{ (Ом)} \\ R_{AC} &= (4 \times l) / (SD \times W \times N) \text{ (Ом)} \\ R_{DCc} &= (0,68 \times 10^{-6} \times 2 \times l) / (W \times t) \text{ (Ом)} \\ R_{ACc} &= (2,72 \times 10^{-6} \times l) / (W \times SD) \text{ (Ом)} \\ R_{DCb} &= (2,55 \times 10^{-6} \times 2 \times l) / (W \times t) \text{ (Ом)} \end{aligned}$$

Для вычисления сопротивления R_T при температуре T используется формула:

$$R_T = R_{20} \times (1 + 0,00393(T - 20))$$

где R_c — сопротивление медного проводника, R_b — сопротивление латунного проводника, R_{20} — сопротивление при 20 °С.

При разработке многослойной шины особое внимание следует уделять обеспечению минимально возможного импеданса. Это позволяет обеспечить хорошую электромагнитную совместимость, снизить уровень радиопомех. Характеристический импеданс двухпроводной шины можно рассчитать следующим образом:

$$Z = \sqrt{\frac{R + j\omega \times L}{G + j\omega \times C}}$$

где $\omega = 2\pi f$.

В случаях, когда соотношением сопротивления проводника R и утечки изолятора G можно пренебречь, формула для импеданса упрощается:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Таким образом, увеличение распределенной емкости шины питания и снижение ее индуктивности — основной путь уменьшения уровня шумов и помех, что иллюстрируется осциллограммами, показанными на рис. 3.

Таблица 1. Распределенные характеристики шины ELDRE

Частота, кГц	R_{AC} , Ом	L , мкГн	C , пФ
1	0,0032	0,020	6400
1000	0,019	0,006	6085
10000	0,061	0,0058	7480

Для данных испытаний шины с различным значением распределенной емкости подключались к источнику случайного шума с импедансом 900 Ом. Измерения проводились с помощью осциллографа Tektronix 535A.

Для примера приведем характеристики одной из шин, выпускаемых ELDRE, с размерами проводника $36 \times 1,5 \times 0,01$ и толщиной изоляции 0,006 (все размеры в дюймах). Сопротивление постоянного тока проводника такой шины $R_{DC} = 0,0032$ Ом.

Изолирующие слои шин ELDRE выполняются из диэлектрика AMRON. Материалами для изготовления изоляторов AMRON в зависимости от применения служат полистирольные, поливинилфторидные пленки и ароматические полиамидные полимеры. Для улучшения диэлектрических характеристик изоляторов они насыщаются фенольными или акриловыми адгезивами. Напряжение изоляции таких пленок в зависимости от материала составляет от 20 до 200 кВ/мм. Изоляция отверстий, предназначенных для размещения выводов силовых модулей и конденсаторов, осуществляется с помощью эпоксидных наполнителей.

Главная задача, решаемая силовой шиной, — связь мощных компонентов устройства при минимальном значении сопротивления и распределенной индуктивности проводника. На рис. 4, а–в показаны варианты исполнения готовых шин, предназначенных для использования в различных мощных преобразовательных устройствах. Конструкция шины определяется конфигурацией и назначением изделия. Например, шина для привода, показанная на рис. 4а, служит для подключения трех полумостовых модулей IGBT, блока электролитических конденсаторов и связи с нагрузкой и источником питания.

Особенностью шин для систем индукционного нагрева является использование жидкостного охлаждения. На рис. 4, б видна медная трубка, припаянная к одному из проводников шины. Для охлаждения применяется жидкость, участвующая в технологическом процессе.

Шина для UPS конструктивно аналогична шине для силового каскада привода. Особое внимание при разработке данной конструкции уделяется обеспечению минимальной индуктивности. Специфической особенностью данной шины является возможность установки элементов с любой стороны шины.

Многослойные шины в импульсном инверторе IGBT

Правильно рассчитанная и изготовленная шина позволяет снизить требования к снабберам и упростить снабберную схему. Напомним, что снабберы являются неотъемлемой частью схемы любого мощного преобразователя. Они необходимы для снижения уровня переходных перенапряжений, возникающих



Рис. 4. Типы силовых шин: а — шина для силового каскада частотного привода; б — шина для силового каскада блока управления индукционной печью; в — шина для силового каскада источника бесперебойного питания (UPS)

при коммутации токов из-за наличия паразитных колебательных контуров. Эти контуры образуются распределенными параметрами конструкции: индуктивностями и емкостями шин, а также распределенными параметрами компонентов инвертора: силовых транзисторов и конденсаторов. Значительное влияние параметры шины оказывают и на тепловые характеристики преобразователя, поскольку участвуют в процессе отвода тепла и сами создают потери мощности из-за наличия активного сопротивления. Типовая структура слоев шины 3-фазного инвертора показана на рис. 5: проводники для подключения выводов питания и конденсаторов (–) и (+) и выходные терминалы инвертора (AC).

Для достижения максимального эффекта соединение силовых модулей с батареей конденсаторов также производится с помощью слоев шины. На рис. 6 показан поперечный разрез полумостового каскада инвертора. Верхняя пластина соединяет транзисторы полумоста, средняя пластина является ши-

ной питания, нижняя — шиной общего провода. Две нижние шины подключены также к батарее конденсаторов. Плата драйвера установлена непосредственно на модуле, а плата снабберов — над многослойной шиной. В тех случаях, когда оптимизация топологии связей не позволяет снизить уровень перенапряжений до безопасных уровней, необходимо использовать снабберные цепи. Подробно варианты схем и параметры снабберов рассматривались ранее [4].

В простейшем случае снаббером может служить специальный высоковольтный конденсатор, подключенный к шинам питания (снабберные конденсаторы хорошо видны на рис. 1). Только такой снаббер требуется для безопасной эксплуатации интеллектуальных силовых модулей SKiiP2 SEMKRON. В общем случае номинал конденсатора снаббера C_s вычисляется исходя из значения энергии, запасенной в паразитной индуктивности проводника L при коммутации тока I_{peak} и заданного уровня перенапряжения V_{os} ,

$$V_{os} = I_{peak} \times \sqrt{\frac{L}{C_s}}$$

В документации на новейшие модули серии SKiiP3 указано, что эти компоненты могут использоваться без снабберных цепей. Это еще раз подтверждает важность и результативность проработки конструкции силового преобразователя для обеспечения его надежности.

Готовые шины SKCB для модулей SKiiP

Стремясь предложить комплексное решение задачи и максимально упростить разработку топологии силового преобразователя, SEMKRON предлагает пользователям готовые блоки SKCB, содержащие параллельно-последовательно соединенные электролитиче-

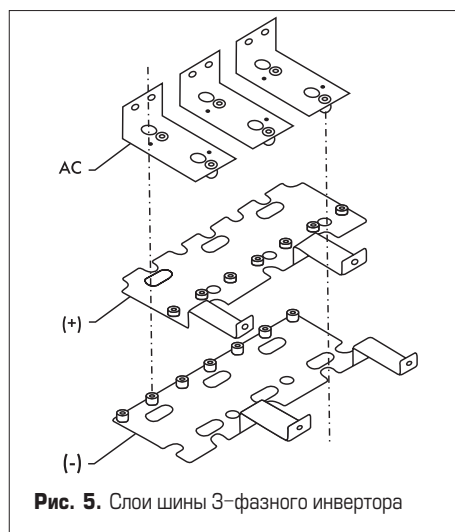


Рис. 5. Слои шины 3-фазного инвертора



Рис. 6. Вариант конструкции полумостового каскада инвертора с использованием многослойной силовой шины

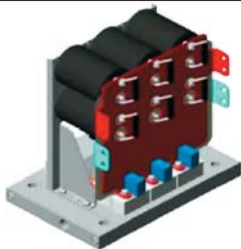


Рис. 7. Внешний вид блока конденсаторов SKCB

ческие конденсаторы, установленные на шине и снабженные балансными резисторами и снабберами. Блоки, внешний вид которых показан на рис. 7, предназначены для использования совместно с интеллектуальными силовыми модулями SKiIP. Схемы соединения конденсаторов и габаритные размеры модулей SKCB для различных конфигураций схем приведены на рис. 8.

Основные характеристики блоков SKCB:

- используемые номиналы конденсаторов: 2200 мкФ, 3300 мкФ, 4700 мкФ;
- напряжение изоляции: 4 кВ;
- балансировочные резисторы: 22/27 кОм, 11 Вт;
- снабберные конденсаторы: 0,47 мкФ × 1000 В (для SKiIP 1200 В), 0,22 мкФ × 1250 В (для SKiIP 1700 В).

В таблице 2 приведены основные технические характеристики блоков конденсаторов, схемы которых показаны на рис. 8. В таблице использованы следующие обозначения:

V_{ces} — предельное рабочее напряжение модуля SKiIP;
Fold — количество базовых полумостовых элементов модуля SKiIP;
 C_s — суммарная емкость блока;
 I_r — допустимый ток пульсаций конденсаторов;
 V_r — рабочее напряжение модуля;
 V_{rs} — допустимое напряжение перегрузки модуля.

Сборки SEMISTACK SEMIKRON



Рис. 9. Готовые сборки SEMISTACK SEMIKRON

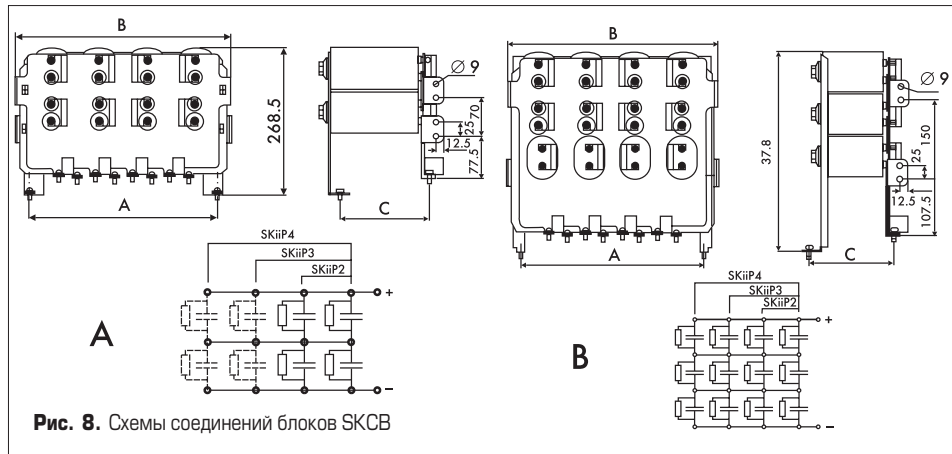


Рис. 8. Схемы соединений блоков SKCB

Таблица 2. Электрические характеристики блоков SKCB

SKiIP V_{ces} В	Fold	C_s мкФ	I_r , А (100 Гц, 85 °С)	Код	Размеры			V_r , В	V_{rs} В (30 с)	
					А	В	С			
1200, рис. 8А	2	2200	17,6	SKCB 2m2-45-2-12	158	200	147	800	900	
	3	3300	26,4	SKCB 2m2-45-3-12	235	280				
	4	4400	35,2	SKCB 2m2-45-4-12	315	360				
	1700, рис. 8В	2	3300	23,6	SKCB 3m3-45-2-12	158	200	149	800	900
		3	5000	35,4	SKCB 3m3-45-3-12	235	280			
		4	6600	47,2	SKCB 3m3-45-4-12	315	360			
		2	4700	26,8	SKCB 4m7-40-2-12	158	200			
	1700, рис. 8В	3	7000	40,2	SKCB 4m7-40-3-12	235	280	149	720	800
4		9400	53,6	SKCB 4m7-40-4-12	315	360				
2		1500	17,6	SKCB 2m2-45-2-17	158	200				
1700, рис. 8В		3	2200	26,4	SKCB 2m2-45-3-17	235	280	147	1250	1350
		4	2900	35,2	SKCB 2m2-45-4-17	315	360			
		2	2200	23,6	SKCB 3m3-45-2-17	158	200			
		3	3300	35,4	SKCB 3m3-45-3-17	235	280			
1700, рис. 8В		4	4400	47,2	SKCB 3m3-45-4-17	315	360	149	1250	1350
		2	3100	26,8	SKCB 4m7-40-2-17	158	200			
		3	4700	40,2	SKCB 4m7-40-3-17	235	280			
		4	6300	53,6	SKCB 4m7-40-4-17	315	360			

Разработка топологии преобразователей средней и большой мощности является сложнейшей задачей, требующей очень внимательного подхода к анализу распределенных параметров конструкции. Использование готовых, протестированных многослойных силовых шин позволяет обеспечить высокую надежность изделия, минимальные потери, компактную конструкцию и хорошую электромагнитную совместимость за счет оптимизации распределенных параметров — емкости и индуктивности. На рис. 9 показаны конструктивы SEMISTACK, которые фирма SEMIKRON предлагает для различных применений. Сборки SEMISTACK содержат силовые электронные компоненты SEMIKRON, соединенные многослойными шинами, батареи конденсаторов, радиаторы и вентиляторы. Все модули сертифицируются и проходят полный цикл испытаний.

На рис. 10–12 показаны модули SEMISTACK, серийно выпускаемые для различных промышленных применений. Сборка SEMIKUBE, приведенная на рис. 10, — это управляемый тиристорный выпрямитель с током до 900 А.

Модуль, изображенный на рис. 11, представляет собой 2 трехфазных инвертора с модулями SKiIP общей мощностью 2×300 кВ·А. Он интересен оригинальным расположением блока конденсаторов шины питания. На рис. 12 представлен один из модулей, выпускаемых для использования на железной дороге, — высоковольтный ди-

одный выпрямитель для тяговой подстанции с током до 2700 А.

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).



Рис. 10. Сборка SEMIKUBE



Рис. 11. Сборка SEMISTACK мощностью 2×300 кВ·А



Рис. 12. Высоковольтный выпрямитель для тяговой подстанции

Основной задачей SEMIKRON было создание компактного мощного низковольтного универсального модуля инвертора, способного работать в силовых установках автомобилей с гибридным приводом, 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 модуля показан на рис. 13.

Подобно другим готовым конструктивным решениям SEMIKRON, выпускаемым под маркой SEMISTACK, сборка SKAI содержит силовые модули MOSFET с многослойной шиной связи, блок конденсаторов, токовые датчики и драйвер управления затворами. Кроме того, модуль SKAI включает плату управляющего процессора. Для блоков SKAI были разработаны кристаллы MOSFET-транзисторов с низким сопротивлением открытого канала. Полевые транзисторы, исполь-



Рис. 13. Модуль электропривода SKAI

зуемые в SKAI, обеспечивают максимальный ток 650 А при температуре теплооттока 70 °С и номинальном напряжении 42 В.

В ряде случаев пользователю требуется конструктив, предназначенный для работы в конкретных условиях, например, имеющих определенные габариты и конфигурацию. Для этих случаев SEMIKRON предлагает программу заказа конфигурации SKiiPsel. 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, $\cos \phi$, частота входного сигнала, уровень пульсаций и перенапряжений напряжения питания;
- вид и параметры нагрузки (трансформатор, двигатель постоянного тока, двигатель переменного тока, вентильный ин-

дукторный двигатель), диапазон выходных напряжений и токов, $\cos \phi$, 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.

Литература

1. Christopher A. Dimino, Ravi Dodbballapur. A low inductance, simplified snubber, power inverter implementation. MagneteTek Drives and Systems Division. USA.
2. Whistler R. J. Power Distribution. ELDRE Corporation. PCIM Magazine. June 1999.
3. Schreiber D. High Power IGBT STACKs Produced by SEMIKRON. Presentation materials.
4. Колпаков А. Топология частотных преобразователей средней и большой мощности // Компоненты и Технологии. 2002. № 2.
5. Колпаков А. Особенности проектирования частотных преобразователей средней и большой мощности // Электронные компоненты. 2003. № 6.
6. Колпаков А. SKAI — новая разработка SEMIKRON для электротранспорта // Электронные компоненты. 2003. № 7.