

# Дискретный или интегральный? Концепции построения силовых конверторов

В статье рассматриваются два основных подхода к проектированию силовых преобразователей, отличающихся выбором элементной базы. В первом случае разработчик сам определяет набор необходимых дискретных компонентов и отвечает на все вопросы, связанные с проектированием готового изделия и обеспечением его надежности. Во втором для создания привода используются интеллектуальные модули высокой степени интеграции (IPM), содержащие все основные элементы и выполняющие большинство функций. При использовании IPM проблемы тестирования и обеспечения надежности во многом перекладываются на плечи производителя элементной базы. Для решения вопроса о целесообразности использования того или другого подхода необходимо провести их сравнение по различным показателям. В применении к электроприводу важнейшими критериями являются плотность мощности, эффективность, а также стойкость к термоциклированию.

Роберт Б. ИНДЕРКА (Robert B. INDERKA)  
Рик В. де ДОНКЕР (Rik W. De DONCKER)  
Перевод: Андрей КОЛПАКОВ  
Andrey.Kolpakov@semikron.com

## Введение

Производители электрических транспортных средств предъявляют к конструкции привода 3 основных требования, самым важным из которых для них при прочих равных условиях является низкая стоимость. На втором месте стоит надежность работы системы, и наконец, третьим и наиболее критичным для разработчиков является требование обеспечения высокой эффективности преобразования и конкурентных технических характеристик.

В последние годы производителями электронного оборудования для электропривода достигнуты большие успехи в решении указанных проблем. Кроме традиционных подходов к построению преоб-

разователей для асинхронных, синхронных и вентильных индукторных машин, активно развиваются и новые альтернативные решения. Главным отличием современного подхода к проектированию является широкое использование интегральных компонентов с высокой функциональной насыщенностью, позволяющее строить конвертор с применением минимального количества элементов. Примером является семейство интеллектуальных модулей SKiP, производимое компанией SEMIKRON. Кроме силового каскада, эти компоненты содержат устройство управления затворами, схему защиты, датчики и систему охлаждения. С помощью таких IPM можно создавать системы, к которым применим компьютерный термин "Plug-and-Play".

Для выбора правильного решения необходимо проанализировать технические характеристики системы, показатели надежности, а также ее общую стоимость с учетом расходов на комплектующие, разработку и производство. Мы проведем сравнение на примере 4-фазного привода ВИРД (вентильного индукторного реактивного двигателя) мощностью 30 кВт [1–4].

## Основные узлы преобразователя

Основные компоненты классического инвертора привода показаны на рис. 1.

Как правило, звено постоянного тока инвертора (ЗПТ) привода работает при напряжении 100–600 В, таким образом, при

мощности 50 кВт выходной ток инвертора составляет 80–500 А. Лучшими силовыми ключами для построения подобной схемы являются IGBT-транзисторы, управляемые от специализированных драйверов затворов.

При разработке DC-шины чаще всего используются электролитические или пленочные конденсаторы. Основным достоинством первых является низкая удельная стоимость, однако в последние годы пленочные емкости приобретают все большую популярность благодаря более высокому допустимому току пульсаций и большему рабочему напряжению.

Для отвода тепла от полупроводниковых модулей и двигателя целесообразнее всего использовать жидкостную систему охлаждения. Такой способ отвода тепла обеспечивает минимальное значение теплового сопротивления радиатора и, соответственно, максимальную отдачу мощности силовых ключей. При этом конструкция привода оказывает

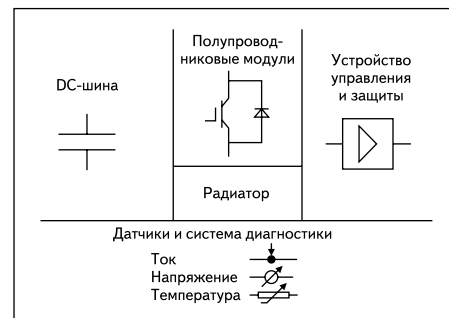
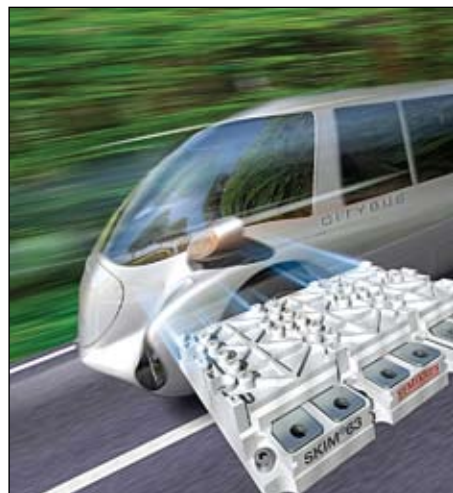


Рис. 1. Основные элементы силового конвертора

ся предельно компактной, однако очевидным недостатком решения является необходимость использования автономного замкнутого контура охлаждения.

Корректное управление приводом возможно при наличии информации о его текущем состоянии, поэтому в состав преобразователя должны быть включены датчики фазных токов, температуры и напряжения DC-шины.

Поскольку электрическое транспортное средство, как правило, имеет батарейное питание или резервный аккумулятор, то система должна содержать зарядное устройство, функции которого может выполнять основной инвертор.

### Конвертор на дискретных модулях

На рынке представлено большое количество модулей с различными конфигурациями и характеристиками, выпускаемых ведущими мировыми производителями: SEMIKRON, Infineon, Mitsubishi, Fuji. Задача разработчика — выбор электронных компонентов, наилучшим образом удовлетворяющих заданным условиям. При этом к элементам разных классов предъявляются различные требования, например, силовые ключи должны иметь минимальный уровень статических и динамических потерь для повышения эффективности преобразования. Для управления IGBT необходим драйвер, обеспечивающий требуемые токи перезаряда затворов и выполняющий определенный набор защитных и сервисных функций.

Еще одной проблемой, которую следует решать в начале проектирования, является определение оптимальной конфигурации схемы, например, решение вопроса о целесообразности включения зарядного устройства в состав инвертора.

Преимуществом дискретного решения считается простота и дешевизна замены компонента в случае его отказа. Однако, как показывает практика, выход из строя силового модуля имеет намного более фатальные последствия, чем это может показаться на первый взгляд.

Одно из важнейших требований к инвертору привода — высокая эффективность преобразования, которую могут обеспечить только силовые ключи с низким уровнем потерь проводимости и переключения. Известную проблему при выборе IGBT создает несоответствие технических характеристик и методик их нормирования у различных производителей [5]. В результате этого простое сопоставление цифр, приведенных в спецификациях, не всегда приводит к правильным выводам. Проблема в графическом виде представлена на рис. 2, где показана разница измеренных и справочных выходных характеристик одного из серийно производимых IGBT. Тестируемый модуль класса NPT IGBT имеет рабочее напряжение 600 В и номинальный ток коллектора 600 А. На приведенных графиках видно, что разни-

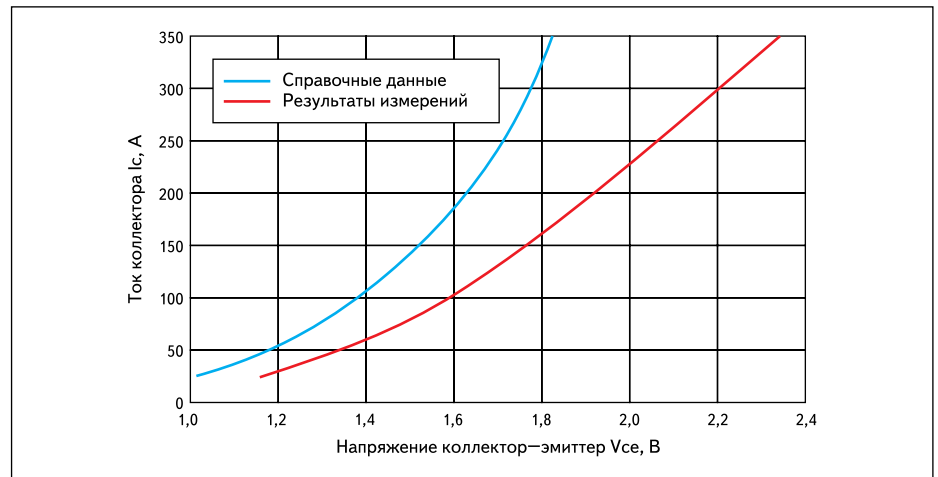


Рис. 2. Сравнение измеренных и справочных выходных характеристик IGBT при Tj = 125 °С и Vce = 15 В

ца значений напряжения насыщения Vce при токе 350 А составляет около 400 мВ, при этом ошибка в определении мощности рассеяния достигает 140 Вт!

Степень «истинности» справочных характеристик у некоторых производителей достаточно высока, однако, чтобы ее оценить, необходимы глубокие знания, опыт и соответствующая аппаратура. Для проведения корректного сопоставления и выбора требуется проводить измерения статических и динамических параметров, что также не всегда представляется возможным [1].

В настоящее время существует инструмент, позволяющий с высокой достоверностью оценить эффективность работы силового ключа в конкретных условиях. Это программы теплового моделирования, предлагаемые ведущими мировыми производителями IGBT [6]. Отметим, что только программа SemiSEL, разработанная компанией SEMIKRON, способна проводить анализ схемы управления SRM машиной, привод которой рассматривается в статье.

### Интегральный конвертор

На рынке широко представлены преобразователи различного класса и назначения, собранные на компонентах разного уровня интеграции. До настоящего времени интеллектуальные силовые модули чаще всего используются в маломощных системах (1–10 кВт), поскольку IPM данного диапазона мощности наиболее доступны.

Первая степень интеграции приводного модуля заключается в объединении в одном корпусе выпрямителя и инвертора, в состав может также входить тормозной транзистор. Большой популярностью на европейском рынке пользуется серия силовых ключей MiniSKiiP в конфигурации CIB (выпрямитель + инвертор + тормозной каскад), предназначенных для разработки приводов мощностью до 15 кВт.

Интеллектуальные силовые модули (IPM), находящиеся на следующей ступени функцио-

нальной насыщенности, имеют в своем составе драйвер управления затворами. Примером такого решения является новое семейство MiniIPM, выпущенное SEMIKRON в 2009 г. [7]. Модули MiniIPM содержат монокристалльный драйвер, осуществляющий управление затворами и защиту IGBT от токовых перегрузок. При его разработке использовалась технология SOI, полностью исключающая защелкивание при всех условиях эксплуатации. К сожалению, мощность подобных компонентов, не превышающая 10–15 кВт, не позволяет использовать их в тяговых приводах.

Непрерывное развитие технологий силовой электроники, использование новых материалов и производственных процессов позволяют создавать IPM, удовлетворяющие требованиям транспортной электроники как по нагрузочным характеристикам, так и по надежности. В начале 90-х годов компания SEMIKRON начала производство мощных интеллектуальных модулей SKiiP с токовым диапазоном 150–2400 А. Компоненты семейства SKiiP имеют в своем составе не только силовой каскад и плату управления, но также различные датчики (тока, температуры, напряжения DC-шины) и теплоотвод. Плата драйвера содержит схему обработки сигналов датчиков, таким образом, на выходном разъеме пользователь имеет всю информацию, необходимую для формирования управляющих сигналов. Благодаря этому для создания законченной системы привода на базе модуля SKiiP требуется только DC-шина, управляющий контроллер, источник питания и двигатель. Необходимо отметить, что SEMIKRON поставляет в качестве опции блок звена постоянного тока для всех вариантов SKiiP. Максимальная мощность привода при использовании одного модуля SKiiP 3 на фазу составляет 1 МВт, а для компонентов нового, 4-го поколения — 1,8 МВт (в режиме жидкостного охлаждения).

Использование дискретных силовых ключей требует больших временных затрат на разработку и испытания привода.

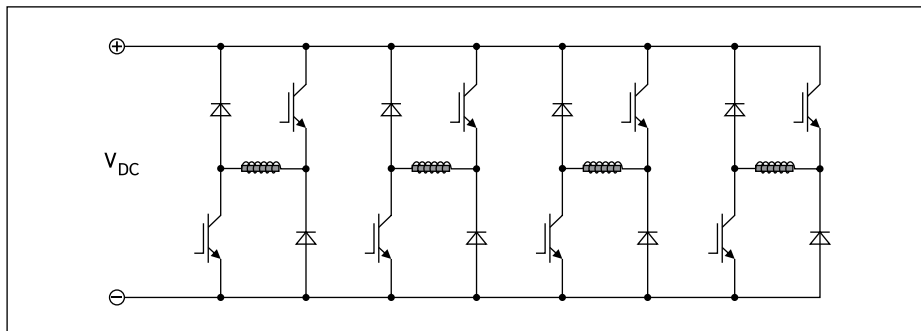


Рис. 3. Схема инвертора для управления 4-фазной SRM-машиной

Конструктор должен выбрать подходящий драйвер, радиатор, рассчитать систему охлаждения. Вследствие этого на рынке транспортных электроприводов растет популярность компонентов высокой степени интеграции. Применение IPM позволяет существенно сократить время проектирования и вывода изделия на рынок, упростить процесс разработки, сборки и обслуживания. В ряде случаев себестоимость привода на основе интеллектуальных модулей может оказаться даже ниже, чем у дискретного изделия. При этом показатели надежности интегрального привода, его ремонтопригодность, как правило, выше. С учетом этих факторов интегральное изделие оказывается более привлекательным как для разработчика, так и для пользователя.

### Инвертор вентильного индукторного привода

При разработке привода 4-фазного вентильного индукторного двигателя (SRM) использована широко известная схема неперекрывающегося H-моста (рис. 3) с жидкостным охлаждением. Такая схема позволяет уменьшить свойственные SRM-моторам пульсации момента, при этом работа электрической машины в двигательном и генераторном режиме обеспечивается при минимальном количестве компонентов [2].

Было изготовлено 2 преобразователя, содержащих по два H-мостовых каскада: первый с применением стандартных полумостовых модулей, для второго использовались IPM SKiiP. По результатам разработки и испытаний опытных образцов проведено сравнение технических и экономических показателей обоих решений.

### Инвертор привода SRM на дискретных модулях

Промышленность пока что не выпускает готовых модулей в конфигурации «асимметричный мост» для рассматриваемого диапазона мощности, поэтому для построения схемы можно использовать чопперы конфигурации GAL/GAR или одиночные ключи (GA) и диоды. Стоимость комплектации при этом отличается несущественно, однако во втором случае для размещения компонентов требуется больше места.

Для получения максимальной эффективности преобразования силовые ключи отбирались по параметрам с помощью сравнительных тестов. По результатам измерения статических (рис. 4) и динамических потерь при работе в показанной схеме был выбран модуль MBM600GS6C (рабочее напряжение 600 В, номинальный ток 600 А). Управление IGBT осуществляется от полумостового драйвера SKH123/12 производства SEMIKRON.

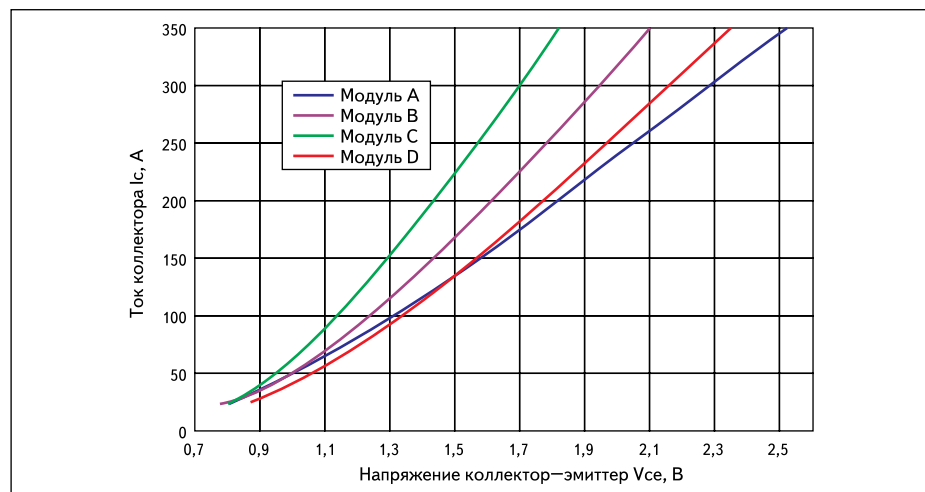


Рис. 4. Выходные характеристики четырех типов дискретных модулей IGBT при  $T_j = 125^\circ\text{C}$  и  $V_{ce} = 15\text{ В}$

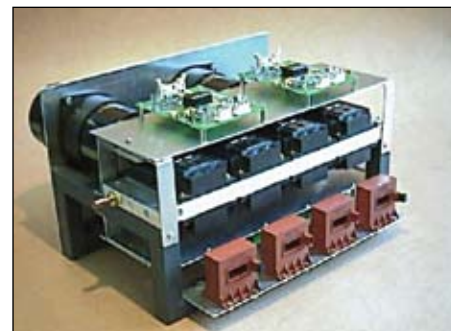


Рис. 5. Внешний вид сборки преобразователя с дискретными модулями IGBT

Внешний вид сборки представлен на рис. 5. Модули IGBT установлены на двух сторонах радиатора с жидкостным охлаждением, что позволило сделать сборку предельно компактной. Драйверы SKH123 расположены на верхней панели устройства, 4 датчика тока Vacuum Schmelze (VAC) находятся в передней ее части. Звено постоянного тока спроектировано с использованием четырех электролитических конденсаторов Hitachi GXH2G103, соединенных параллельно (суммарная емкость — 10 мФ). С целью снижения распределенной индуктивности DC-шина выполнена из двух копланарных пластин, разделенных тонким слоем диэлектрика.

### Инвертор привода SRM на модулях SKiiP

Во втором преобразователе, спроектированном по тем же техническим требованиям, использованы интеллектуальные модули SKiiP. Как было отмечено выше, в их состав входит силовой каскад, плата управления и защиты, датчики, радиатор. Конструкция SKiiP и возможности полуавтоматической линии сборки дают широкие возможности по конфигурированию схемы, поэтому по заданию заказчика был изготовлен специализированный модуль SKiiP 582GHU-060 по схеме, приведенной на рис. 3. Расчеты и моделирование тепловых режимов позволили найти оптимальное соотношение между количеством чипов IGBT и диодов, обеспечивающее минимальный уровень потерь.

Внешний вид преобразователя показан на рис. 6. Обратите внимание на простейшую



Рис. 6. Внешний вид сборки преобразователя со специализированным IPM SKiiP

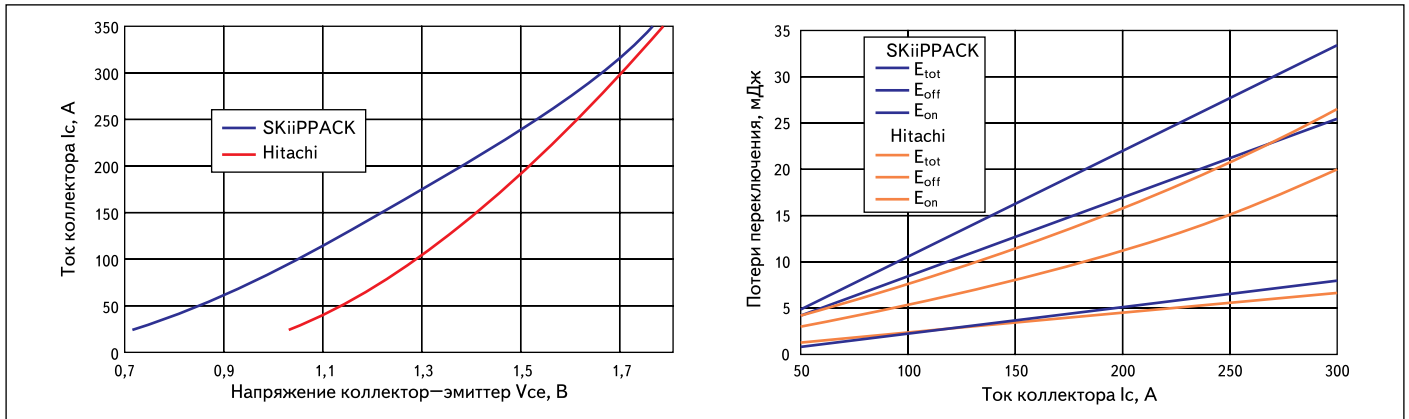


Рис. 7. Выходные характеристики и энергия динамических потерь для модулей SKiiP и Hitachi при  $T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$  и  $V_{ce} = 15\text{ В}$

конструкцию DC-шины, в которой применены три алюминиевых электролитических конденсатора Siemens-Matsushita B43584 общей емкостью 6,8 мФ.

**Сравнение технических и экономических показателей**

Практически сложно провести абсолютно корректное сравнение двух представленных в статье идеологий построения конвертора. Оба обсуждаемых конвертора разрабатывались в одно и то же время и на основе одного технического задания. Однако сопоставление не может быть полностью достоверным, хотя бы потому, что технологии стандартных модулей IGBT и интеллектуальных IPM SKiiP непрерывно совершенствуются и меняются, появляются новые конструктивы модулей и конфигурации схем. Однако в рамках данной статьи сравнение производится на основании того факта, что оба преобразователя имеют разные концепции, но одинаковое назначение: привод вентиляционного индукторного двигателя номинальной/пиковой мощностью 30/50 кВт. Кроме того, силовые каскады конверторов построены на ключах одного класса напряжения и тока.

Выбранные для разработки модули SEMIKRON и HITACHI были протестированы по многим важным параметрам, в частности были измерены значения статических и динамических потерь, результаты этих измерений представлены на рис. 7.

Как видно из представленных графиков, силовые ключи класса SKiiP имеют меньшие потери проводимости, но несколько большие потери переключения. Необходимо отметить, что с 2009 г. в серию запущено четвертое поколение SKiiP с кристаллами IGBT нового поколения Trench 4 [8]. Энергия переключения  $E_{sw}$  у этих чипов уменьшена более чем на 30%, соответственно, если бы в разработке были использованы ключи SKiiP 4, графики выглядели бы иначе. Однако на момент разработки оба типа тестируемых модулей в данной схеме на фоне компонентов других производителей показали заметные преимущества.

Измеренные характеристики использовались при моделировании, проведенном средствами программы MATLAB, показавшей высокую достоверность при анализе эффективности привода SRM-машины во всех статических режимах. Аналитические выводы (рис. 8) с высокой точностью совпали с ре-

зультатами, полученными при испытаниях системы на мощности 100 кВт [3], небольшие отклонения были выявлены только при изменении частоты коммутации.

Показатели КПД у обоих конверторов очень близки, поскольку в обоих типах силовых модулей использованы одинаковые технологии NPT IGBT. Вес сборок без учета звена постоянного тока составляет 10 и 14 кг для дискретного и интегрального варианта соответственно, удельные массо-габаритные показатели приведены в таблице. Наиболее ощутимая разница рассматриваемых подходов к проектированию заключается в таких важных для современного производства показателях, как простота и стоимость разработки и обслуживания, время выхода на рынок, надежность. По этим характеристикам интеллектуальные модули высокой степени интеграции имеют очевидные преимущества.

Необходимо отметить, что с увеличением тока нагрузки выигрыш от применения компонентов класса IPM возрастает. Максимальная мощность 3-фазного инвертора при использовании IPM SKiiP 2403GB172-4DW составляет 1 МВт. Появление на рынке 4-й генерации этих ключей

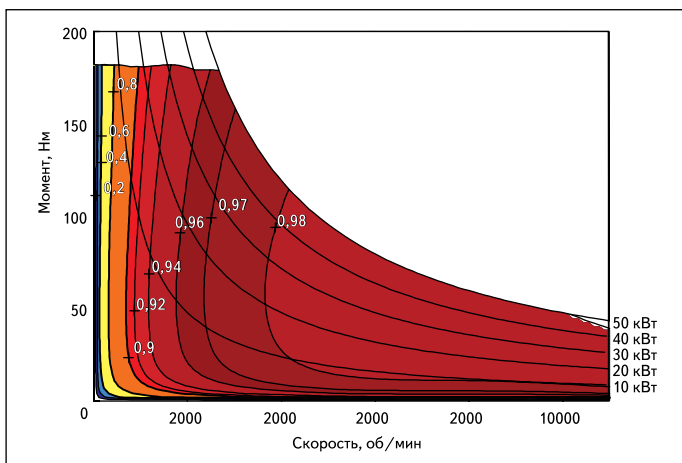


Рис. 8. Эффективность преобразования в зависимости от режима работы привода при  $V_{dc} = 300\text{ В}$

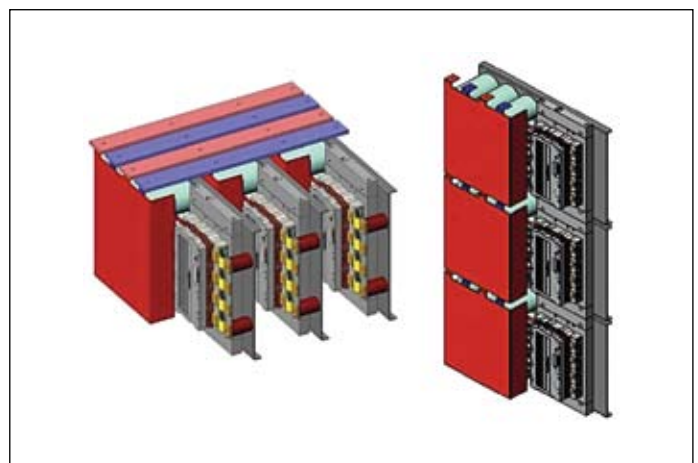


Рис. 9. Варианты конструкции 3-фазного инвертора мощностью 1,5 МВт на модулях SKiiP 4



Таблица. Основные удельные показатели дискретного и интегрального конвертора

Характеристика	Дискретные модули	SKiiP 3	SKiiP 4*
Технология IGBT	NPT	NPT	TRENCH 4
$I_{\text{ном}}/V_{\text{CES}}$	600 А/600 В	500 А/600 В	2400 А/1700 В
Максимальное соотношение мощность/вес (без DC-шины), кВА/кг	36,0	21,4	21,4
Объем, л	7,3	7,5	113
Максимальная плотность мощности, кВА/л	6,8	6,7	19
Общая стоимость комплектующих (относительно SKiiP 3)	0,8	1	
Относительная стоимость IGBT, %	64	—	
Относительная стоимость драйвера, %	16	—	
Относительная стоимость радиатора, %	14	—	
Относительная стоимость датчиков, %	6	—	
Расходы на разработку и подготовку производства (относительно SKiiP 3)	1,5–2	1	
Производственные расходы (относительно SKiiP 3)	1,5–2	1	

Примечание. \* — удельные характеристики SKiiP 4 даны для сравнения.

чей позволяет увеличить мощность инвертора до 1,8 МВт, соответственно растут и удельные показатели, что отражено в последнем столбце таблицы. Варианты конструкции 3-фазного инвертора, имеющего плотность мощности 18–19 кВА/л, показаны на рис. 9.

### Заключение

Детальное сравнение двух рассмотренных в статье подходов к выбору элементной базы показывает, что обе концепции имеют право на жизнь. Выбор зависит от многих факторов, среди которых мощность конвертора, требования к надежности и ремонтпригодности, время проектирования, доступность на рынке и др. Однако, по мнению авторов статьи, в случае, когда силовой каскад не является це-

нообразующим элементом преобразователя, применение ИРМ более предпочтительно.

Следует отметить, что использование интегральных модулей позволяет снизить стоимость изделия и время его выхода на рынок при мелкосерийном и опытном производстве. В этом случае конструктор может рассматривать ИРМ как элемент класса “Plug and Play”, сосредотачивая усилия на отработке программного обеспечения. При крупносерийном производстве силовые ключи высокой степени интеграции имеют очевидные преимущества в том случае, когда высокая надежность в тяжелых условиях эксплуатации является доминирующим требованием. Сказанное подтверждается тем фактом, что модули семейства SKiiP наиболее популярны в таких сложных

отраслях промышленности, как энергетика и транспортный привод.

С другой стороны, использование дискретных компонентов позволяет сделать процесс проектирования более гибким и адаптированным к требованиям технического задания. Широкие возможности, предоставляемые ИРМ высокой степени интеграции, в некоторых случаях могут оказаться избыточными. ■

### Литература

1. Menne M., Reinert J., de Doncker R. W. Energy-Efficiency Evaluation of Traction Drives for Electric Vehicles // EVS-15. 1998.
2. Inderka R., Menne M., de Doncker R. W. Generator Operation of a Switched Reluctance Machine Drive for Electric Vehicles // EPE. 1999.
3. Reinert J., Inderka R., Menne M., de Doncker R. W. Optimizing Performance in Switched Reluctance Drives // EVS-15. 1998.
4. Reinert J. Optimierung der Betriebseigenschaften von Antrieben mit Geschalteter Reluktanzmaschine // Aachener Beiträge des ISEA Band 22, Dissertation der RWTH Aachen, Verlag der Augustinus Buchhandlung. 1998.
5. Колпаков А. Контрольная точка // Электронные компоненты. 2005. № 6.
6. Колпаков А. IPOSIM, MELCOSIM, SEMISEL // Силовая электроника. 2005. № 1.
7. Колпаков А. MiniIPM — руководство по эксплуатации // Компоненты и технологии. 2009. № 9.
8. Колпаков А. SKiiP 4 — новая серия ИРМ высокой мощности // Силовая электроника. 2009. № 4.