

Силовые сборки SEMISTACK RE

на суше и на море

Современный рынок силовой электроники предъявляет все более жесткие требования к компонентам, предназначенным для применения в энергетике и на транспорте. Среди устройств, работающих в тяжелых условиях эксплуатации, можно назвать и тяговые приводы, используемые на судах с системой электродвижения. Внедренные компанией SEMIKRON технологии SKiiP [1] и SKiiN [2] дают возможность преодолеть существующие конструктивные ограничения и создавать компактные силовые ключи мегаваттного диапазона, обладающие высокой надежностью.

Современные преобразовательные устройства отличаются повышенными требованиями по плотности мощности, стойкости к климатическим и механическим воздействиям. Для решения этой задачи компанией SEMIKRON разработаны конструктивные платформы SEMISTACK RE и SKiiP RACK, предназначенные для создания конвертеров мощностью 0,5–5 МВт.

**Филипп ле Бретон
(Philippe Le Breton)**

**Перевод и комментарии:
Андрей Колпаков**

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Разработка преобразователей высокой мощности всегда связана с поиском компромисса между возможностями силовых ключей, особенностями конструктива и системными требованиями по массо-габаритным показателям и надежности. Как правило, существует несколько различных путей решения задачи, особенно для устройств высокой мощности. Выбор лучшего решения, наиболее полно удовлетворяющего техническим требованиям и имеющего хорошие экономические показатели, является достаточно сложной проблемой.

Производители полупроводниковых силовых модулей стараются приблизить их характеристики к параметрам «идеального ключа», отличающегося высоким рабочим напряжением, большой токнесущей способностью и низким уровнем потерь. Существует масса разновидностей полупроводниковых ключей (тиристоры, GTO, MOSFET, IGBT), имеющих свои уникальные особенности. Проектировщик должен проанализировать несколько вариантов топологий: например, для повышения мощности можно использовать параллельное соединение самих ключей или инверторных сборок, а также различные виды многоуровневых схем.

При разработке преобразовательного устройства следует уделять внимание множеству противоречивых требований по плотности мощности, надежности, электромагнитной совместимости и стоимости. Успешное решение ряда новых задач немислимо без использования инновационных полупроводниковых материалов, например карбида кремния SiC [3].

Вероятнее всего, оптимальным выбором для промышленных применений в низковольтном и средневольтном диапазоне еще долго будут оставаться IGBT, обеспечивающие наилучшее сочетание пере-

численных выше характеристик. Развитие технологий IGBT идет непрерывно, растет плотность мощности кристаллов, снижается уровень потерь, расширяется температурный диапазон.

Базовым элементом большинства преобразователей является полумостовой каскад: он может строиться на основе дискретных компонентов, тиристорных или IGBT-модулей, а также интеллектуальных силовых ключей (IPM), содержащих силовой каскад и плату управления затворами. IPM SKiiP [1] компании SEMIKRON имеет еще более высокую степень интеграции: кроме драйвера, в его состав входят датчики (ток, напряжение и температура) и радиатор. Прижимная конструкция модуля и отсутствие паяных соединений гарантируют высокую стойкость к термоциклированию, что очень важно для транспортных применений. Встроенное устройство управления, получающее сигналы от датчиков, обеспечивает быструю реакцию на аварийные режимы, что позволяет гарантировать хорошие показатели надежности на системном уровне.

В силовых ключах SKiiP 4 использованы кристаллы IGBT новейшего поколения Trench 4, в них впервые в мире внедрена технология низкотемпературного спекания [4], позволяющая полностью исключить паяные соединения — самое слабое место полупроводниковых модулей. В драйвере SKiiP 4 реализован принцип цифровой передачи данных по дифференциальному каналу, что дает возможность повысить иммунитет к dv/dt , снизить уровень джиттера до единиц наносекунд и сделать временные характеристики устройства управления независимыми от условий эксплуатации в течение всего срока службы. Устройство управления SKiiP 4 снабжено диагностическим CAN-интерфейсом.

Минимальный разброс временных параметров драйвера упрощает параллельное соединение модулей и позволяет обойтись без уравнивающих дросселей.

Датчик температуры SKiiP расположен в непосредственной близости от наиболее нагретых кристаллов, что гарантирует быструю реакцию схемы тепловой защиты. Для исключения повреждения чипов от токовых перегрузок в модулях SKiiP использованы быстродействующие датчики тока, сигнал с которых анализируется устройством защиты вместе с напряжением насыщения V_{CE_sat} . Такая комплексная схема гарантирует безопасное отключение силовых каскадов SKiiP даже при коротких замыканиях (КЗ) непосредственно на выходе модуля, то есть почти с нулевой индуктивностью цепи КЗ, что недостижимо при использовании обычных цепей защиты DESAT.

На базе IPM SKiiP 4 компанией SEMIKRON разработана инверторная платформа SEMISTACK RE, предназначенная для применения в энергетических установках и приводах высокой мощности. Широкий диапазон топологий схем, возможность выбора типа охлаждения (воздушное или жидкостное), простота параллельного соединения позволяют применять эту сборку в преобразователях мощностью 0,5–5 МВт.

Базовый конструктив SEMISTACK RE включает три фазные ячейки (рис. 1), соединенные в вертикальном положении. Каждая ячейка содержит полумостовой модуль SKiiP IPM на радиаторе, звено постоянного тока (ЗПТ) с полипропиленовыми конденсаторами и снабберами, а также терминалы для подключения АС-выходов. Элементы сборки устанавливаются на жесткой раме, связь ЗПТ с DC-терминалами осуществляется посредством низкоиндуктивных шин. Фазные блоки соединяются между собой копланарными коннекторами, позволяющими сформировать конфигурацию 2Q или 4Q, а также включить инверторы в параллель.

Сборки SEMISTACK RE удовлетворяют требованиям основных европейских стандартов, определяющих условия работы преобразователей для приводов и ветроэнергетических систем. Они проходят все необходимые тесты, предусматривающие самые жесткие механические, климатические, биологические и транспортные воздействия. Нароботка на отказ звена постоянного тока, во многом определяющего надежность всей системы, составляет 100 тыс. ч при номинальных условиях эксплуатации.

Механические и электрические характеристики блоков SEMISTACK RE позволяют устанавливать их в стандартные шкафы и создавать различные конфигурации преобразователей: трехфазный инвертор, четырехквadrантный конвертер. Возможно также параллельное соединение ячеек и подключение тормозного каскада. Выбор диапазона мощности и конфигурирование схемы для конкретного применения обеспечиваются при минимальном наборе конструктивных элементов. Выходные АС-терминалы в стан-

дартном исполнении предназначены для подключения кабелей на передней панели инвертора, опционально АС-коннекторы могут располагаться в нижней части конструкции (рис. 1).

Для работы каждой трехфазной сборки требуется свой контур отвода тепла, причем фазные блоки инвертора охлаждаются параллельно, что исключает взаимный нагрев силовых ключей. Подключение подводных и отводящих шлангов осуществляется с помощью быстросъемных штуцеров, обеспечивающих простое и надежное соединение.

Интеллектуальные модули семейства SKiiP широко известны и востребованы на рынке возобновляемых источников энергии. Сказанное подтверждается тем фактом, что более половины из 122 ГВт общей установленной мощности ветроэнергетических установок (ВЭУ) преобразуется конвертерами на базе SKiiP. В самых современных офшорных установках с полноразмерными преобразователями доля компонентов SEMIKRON превышает 80%. Производители ВЭУ требуют от поставщиков элементной базы более 20 лет гарантированной работы в тяжелых условиях эксплуатации. Для удовлетворения этим требованиям все модули SKiiP в процессе производства проходят цикл термотренировки в предельных режимах работы.

Возможности конструктива SEMISTACK RE можно продемонстрировать на следующем примере. Типовая сборка мощностью 1,5 МВт для работы с генератором DFIG (Double-Fed Induction Generator) включает в себя два инвертора с воздушным охлаждением, соединенных в конфигурации 4Q (рис. 2а). Система располагается в корпусе шириной



Рис. 1. Базовый конструктив трехфазного инвертора SEMISTACK RE мощностью 1,4 МВт с двумя вариантами АС-выходов

600 мм и высотой 1200 мм; соответственно, в стандартном 2000-мм шкафу можно разместить не только преобразователь, но и элементы коммутации, фильтры, контроллер и т. д.

На базе аналогичных ячеек с жидкостным охлаждением можно создать «полноразмерный» 4Q-преобразователь мощностью 2,5 МВт для синхронной машины с постоянными магнитами, показанный на рис. 2б. Для соединения трехфазных ячеек по DC-шине

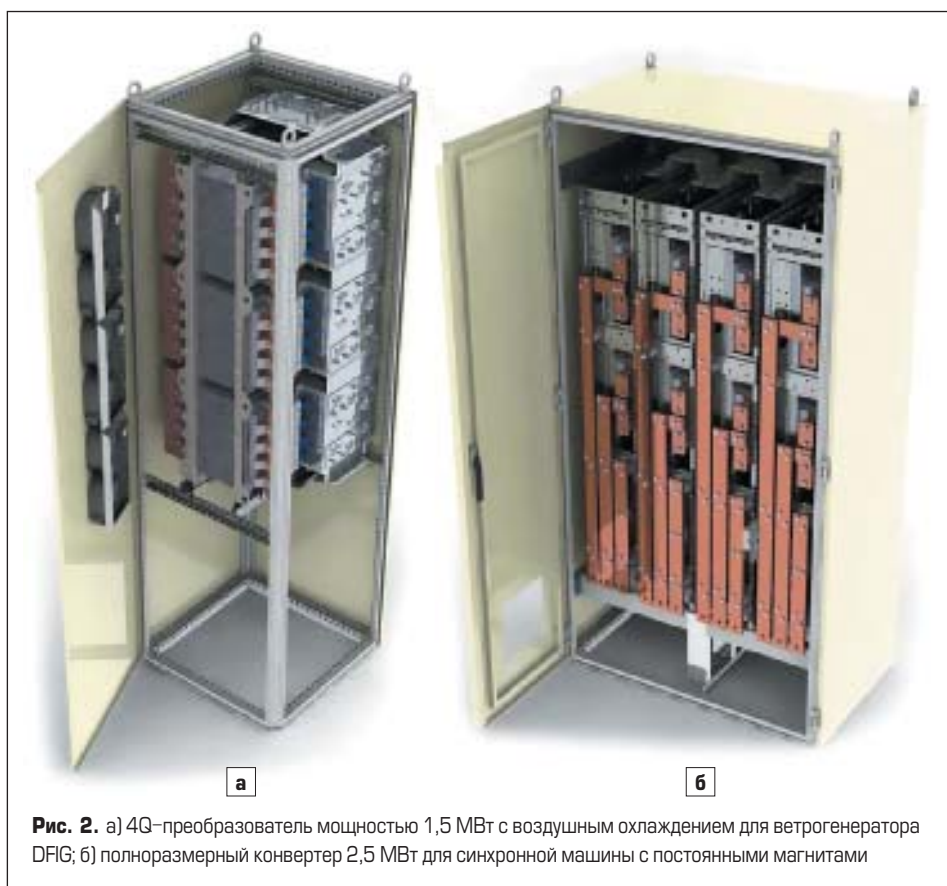


Рис. 2. а) 4Q-преобразователь мощностью 1,5 МВт с воздушным охлаждением для ветрогенератора DFIG; б) полноразмерный конвертер 2,5 МВт для синхронной машины с постоянными магнитами

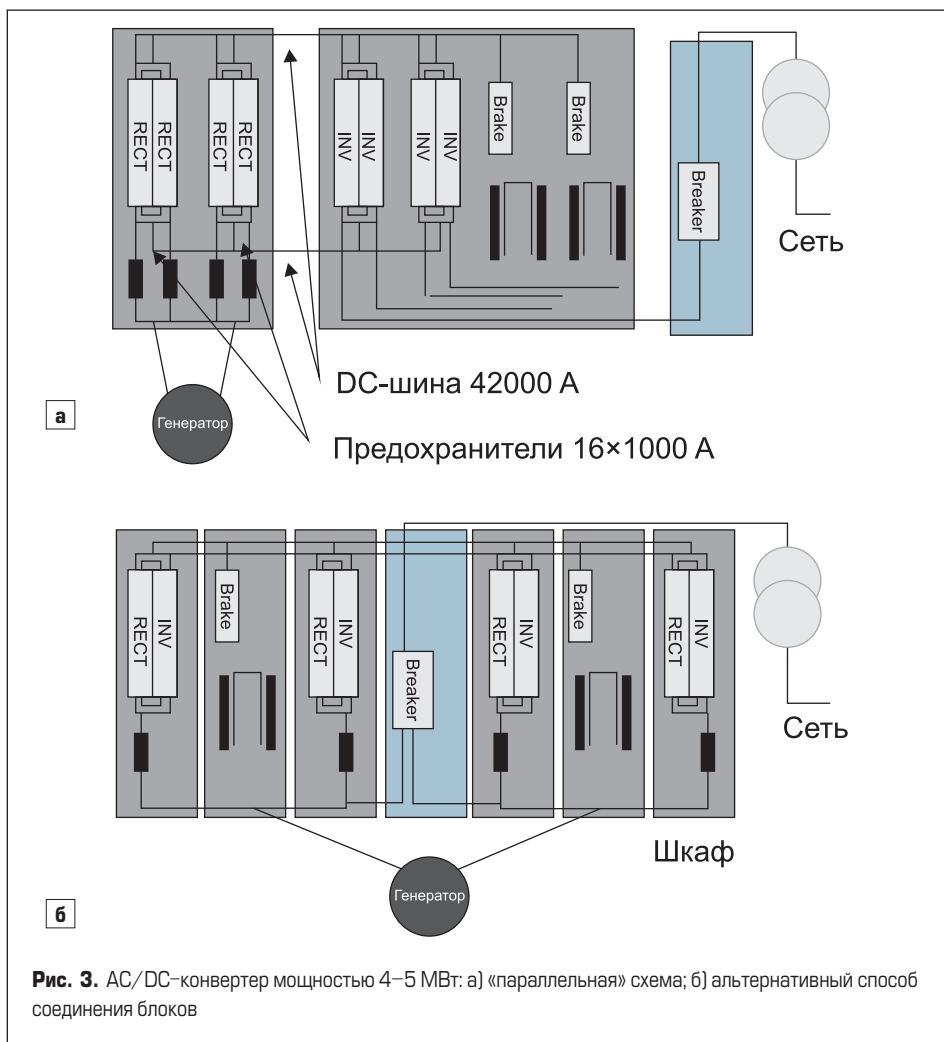


Рис. 3. AC/DC-конвертер мощностью 4–5 МВт: а) «параллельная» схема; б) альтернативный способ соединения блоков

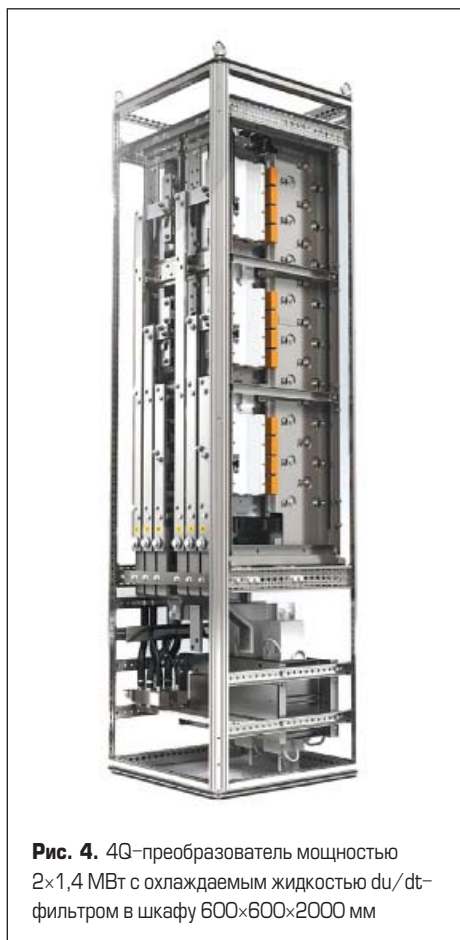


Рис. 4. 4Q-преобразователь мощностью 2×1,4 МВт с охлаждаемым жидкостью du/dt-фильтром в шкафу 600×600×2000 мм

разработаны специальные копланарные переходники, обеспечивающие минимальный уровень пульсирующих уравнивающих токов между конденсаторами ЗПТ.

Самая мощная сборка SKS B2 140 GD 69/12 U - MA PB имеет номинальный выходной ток 1400 А, что при напряжении 690 В соответствует мощности примерно 1,4 МВт. Соединение четырех сборок в параллель позволяет довести мощность трехфазного инвертора до более 5 МВт (рис. 3). Благодаря использованию цифровых драйверов с предельно низким разбросом временных характеристик и хорошему балансу токов, при параллельном соединении сборок SEMISTACK RE не требуется использования коэффициента снижения тока. Однако рекомендация по использованию уравнивающих дросселей индуктивностью не менее 2 мкГн остается в силе, причем это могут быть и соединительные кабели соответствующей длины. Для подключения выхода контроллера к сигнальным входам параллельных SKiP разработаны платы, обеспечивающие разветвление сигналов управления на два, три и четыре канала. В качестве опции на них устанавливается адаптер волоконно-оптической линии связи.

Конвертеры, работающие в современных ВЭУ, как правило, имеют 4Q-конфигурацию: один из инверторов подключается к сети, другой — к генератору. Постоянное совершенствование ветрогенераторов, направленное на повышение мощности и снижение стои-

мости, привело к массовому использованию синхронных машин с постоянными магнитами (PM) вместо устаревших асинхронных (DFIG). Это требует увеличения мощности преобразователя примерно втрое, поскольку он должен быть рассчитан на преобразование полного тока PM-генератора. Непрерывное повышение их мощности (до 10 МВт в последних разработках) обуславливает растущую потребность в соответствующих преобразовательных устройствах.

Удобство конфигурации 4Q еще и в том, что функции активного выпрямителя и выходного инвертора выполняет одна и та же трехфазная сборка, разница состоит в алгоритмах управления. Соединение конвертера с сетью осуществляется через синусоидальный LC-фильтр, выпрямитель подключается к генератору через *du/dt*-фильтр (рис. 4). При параллельном соединении сборок на выходе каждой из них устанавливается индивидуальная LC-цепь, что улучшает распределение токов. В состав системы может входить тормозной чоппер, который реализуется в таком же конструктиве. Подобное функциональное разделение требует применения мощной DC-шины между выпрямителем и инвертором, проводящей полное значение постоянного тока системы. Предохранители в DC-цепях при этом должны быть рассчитаны на номинальный ток отдельных конвертеров (рис. 3а).

Аналогичная AC-система, построенная с применением таких же блоков, но с другим способом их соединения, показана на рис. 3б. Каждый шкаф содержит свой выпрямитель, установленный непосредственно рядом с инвертором. Выходы преобразователей объединяются через индивидуальные фильтры, что улучшает баланс токов. При использовании такой конфигурации отпадает необходимость в распределении больших потоков энергии и установке очень мощных предохранителей. Энергия проходит непосредственно из AC-цепи в DC-цепь по отдельным параллельным блокам. Через DC-предохранители при этом протекает только несбалансированный уравнивающий ток между шкафами, поэтому они нормируются в соответствии с переходными режимами. Однако звенья постоянного тока шкафов по-прежнему должны соединяться между собой с помощью мощной биполярной шины.

При параллельном соединении силовых инверторов появляется возможность использования так называемого режима интерливинга, т. е. чередования фаз опорного сигнала. Это позволяет увеличить эквивалентную несущую частоту и, соответственно, снизить размеры фильтров. В таком режиме работы растет и частота пульсаций напряжения в DC-шине, что способствует их лучшему подавлению.

Увеличение нагрузочной способности за счет параллельного соединения и наращивания выходного тока низковольтных (LV) преобразователей имеет свои физические пределы: считается, что максимальная «разумная» мощность для цепей 400 В AC и 690 В AC составляет 4–6 МВт. Дальнейший рост мощности должен обеспечиваться за счет напряжения, т. е. пере-

хода в средневольтный (MV) диапазон. Это требует решения ряда схемотехнических и конструкторских задач, перехода на более высокие стандарты изоляции, использования специализированных силовых ключей, модификации систем охлаждения и пр.

Одним из наиболее интересных путей решения данной задачи является применение так называемых «многоуровневых» инверторов (Multi Level Inverter, MLI), построенных на базе стандартных низковольтных ячеек [5]. Подобные преобразователи широко используются в промышленности для построения мощных высоковольтных приводов и преобразователей ВЭУ. Так же, как параллельное соединение инверторных ячеек позволяет наращивать выходной ток, их последовательное включение дает возможность увеличивать выходное напряжение. Основной проблемой при этом является выполнение требований по изоляции, кроме того, отдельные ячейки MLI должны независимо управляться по волоконно-оптическим линиям. Для питания инверторных ячеек или объединения их выходов необходима установка специальных многообмоточных трансформаторов, рассчитанных на полную мощность системы. Однако возможность использования недорогих низковольтных силовых ключей, формирование многоступенчатого выходного сигнала с минимальными требованиями к фильтрации, отсутствие физических ограничений по наращиванию уровня напряжения делает такое решение намного более предпочтительным, чем использование дорогих высоковольтных силовых модулей. Кроме того, MLI-преобразователь может содержать «избыточные» ячейки, которые шунтируются в случае отказа, что обеспечивает очень высокую надежность многоуровневых систем.

Наличие набора типовых инверторных блоков, построенных на стандартных низковольтных силовых ключах и предназначенных для параллельного или последовательного соединения, позволяет в минимальные сроки создавать преобразовательные системы, рассчитанные на работу в широком диапазоне мощности и имеющие хорошие экономические показатели.

Новые поколения полупроводниковых технологий появляются каждые 3–5 лет, а спустя 10–12 лет они уже считаются безнадежно устаревшими. Соответственно, периодически определенные типы силовых модулей снимаются с производства, что создает проблемы для производителей конвертеров, поскольку требует поиска новых компонентов и изменения механических, тепловых и электрических характеристик преобразователей. В ряде случаев приходится проводить повторную сертификацию и доработку конструкции, например для обеспечения электромагнитной совместимости (EMC) или оптимизации режима охлаждения. С другой стороны, новые полупроводники всегда отличаются улучшенными характеристиками, и подобные доработки проводятся с целью максимального использования достоинств компонентов последних поколений.

Наглядным примером кардинальных изменений свойств полупроводниковых модулей является появление компонентов на основе карбида кремния [3] и разработка сверхмощных модулей SKiiP-X (рис. 5) на основе технологии SKiN [6], внедрение которой позволяет полностью отказаться не только от паяных и сварных соединений, но и от термопасты.

Заключение

Сборки SEMISTACK RE и SKiiP RACK прошли полный цикл квалификационных тестов, теперь это стандартные изделия с четко определенным набором технических характеристик и режимов применения. Условия проведения приемо-сдаточных испытаний соответствуют международным (европейским и UL) и собственным стандартам компании. Тесты включают проверку изоляции и электрических характеристик, многочасовую прогонку при полной нагрузке, термостратификацию, КЗ, ударные и вибрационные воздействия и т. д.

Каждый модуль SKiiP, предназначенный для установки в сборку SEMISTACK RE, проходит уникальный цикл испытаний в составе четырехквadrантного преобразователя в предельных режимах эксплуатации. Основной целью так называемого теста Burn-In является определение причин ранних отказов и их устранение, что позволяет гарантировать необходимый для энергетических применений срок службы. Модули подвергаются двум циклам воздействий с максимальной нагрузкой при температуре охлаждающей жидкости +80 °С. Силовые кристаллы при этом разогреваются до +140 °С, что создает мощный термомеханический стресс для всей конструкции SKiiP.

Общей тенденцией современного рынка мощных преобразовательных устройств яв-

ляется рост предложений готовых мощных узлов и подсистем. В полной мере это относится к преобразователям, предназначенным для работы в ветряных, солнечных и гидроэнергетических станциях, где законченные изделия гораздо более востребованы, чем дискретные силовые модули. Использование гибких базовых платформ, к которым относятся SEMISTACK RE и SKiiP RACK, предоставляет пользователям широкие возможности по выбору конфигурации схемы и диапазона мощности. Производитель готовой системы избавляется от необходимости проектировать силовую часть преобразователя, закупать комплектующие, заниматься изготовлением и испытаниями конвертера. Соответственно, исключаются риски, связанные с перечисленными этапами разработки и производства, существенно сокращается время вывода изделия на рынок.

Литература

1. Колпаков А. SKiiP 4 — новая серия IPM для применений высокой мощности // Силовая электроника. 2009. № 4.
2. Колпаков А. SKiN-технология: силовая электроника завтрашнего дня // Силовая электроника. 2013. № 1.
3. Колпаков А. Технология SiC в модулях SEMIKRON // Силовая электроника. 2014. № 1.
4. Christian Gobl. Технология низкотемпературного спекания в силовых модулях // Компоненты и технологии. 2009. № 7.
5. Колпаков А. Схемотехника мощных высоковольтных преобразователей // Силовая электроника. 2007. № 2.
6. Колпаков А. SKiiP-X — интеллектуальный модуль XXI века // Силовая электроника. 2014. № 4.



Рис. 5. Модуль SKiiP-X, 4G-инвертор 2×3,3 МВт на базе SKiiP X