

# Press-Pack IGBT

## для преобразователей большой мощности

**Технология Press-Pack IGBT изначально разрабатывалась в качестве решения для приложений большой мощности, где приходится преобразовывать единицы и десятки мегаватт электроэнергии. Выпуск новых Press-Pack IGBT 6,5 кВ позволил существенно расширить потенциальную область применения данной технологии в высоковольтных приложениях за счет снижения числа необходимых компонентов. Высокая надежность и низкие потери Press-Pack IGBT отвечают самым современным требованиям при построении эффективных преобразователей для разных областей деятельности.**

**Фрэнк Вэйкмэн  
(Frank Wakeman)**

**Эшли Голланд  
(Ashley Golland)**

**Перевод:  
Иван Полянский**

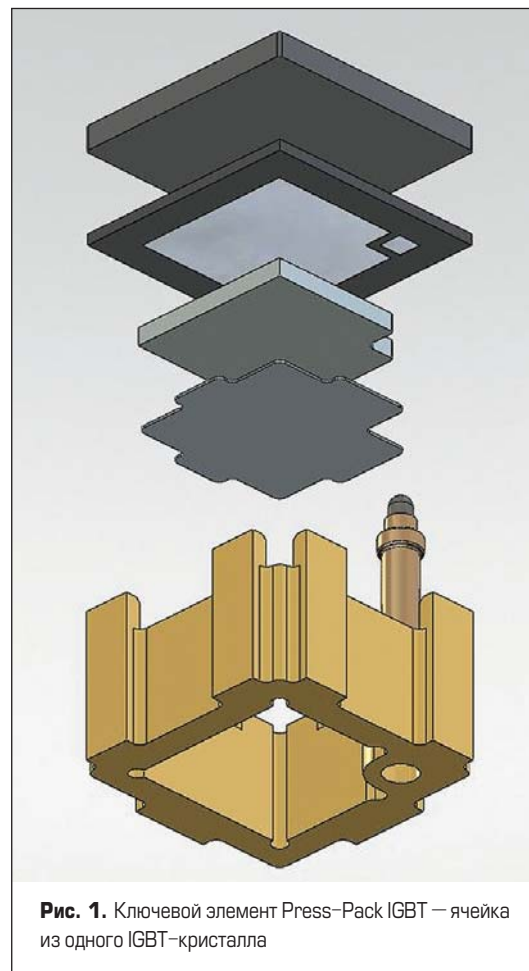
ixysrus@gmail.com

Впервые технология Press-Pack IGBT была представлена более 15 лет назад как решение для приложений с жесткой коммутацией и в условиях агрессивной внешней среды, что характерно для многих областей применения силовой электроники. Первое в Европе изделие Press-Pack IGBT предназначалось для применения в индукционном нагреве: это был IGBT на 1800 В, для средних частот коммутации при высоких тепловых нагрузках. Данное решение оказалось одновременно достаточно дорогим в производстве и довольно специфичным ввиду ориентации лишь на одно приложение. Тем не менее высокая надежность и перспективность технологии мотивировали разработку более высоковольтных и менее узконаправленных транзисторов. Первое поколение высоковольтных Press-Pack IGBT с током до 900 А создавалось для тягового привода. Особенности первых высоковольтных кристаллов приводили к необходимости применения массивных снабберов, в итоге такие IGBT лучше всего подходили лишь для замены GTO-тиристорov в различных приложениях. Второе и третье поколение Press-Pack IGBT 4,5 кВ базировалось уже на SPT-технологии, которая обеспечивала более «классические» характеристики и открывала широкие области применения в электроприводе, на судовом и железнодорожном транспорте, а также в электроэнергетике. Представленное сегодня поколение Press-Pack IGBT на 6,5 кВ видится оптимальным вариантом для построения самых современных преобразователей для электропривода на 3, 6 и 10 кВ.

### Прижимная конструкция, собираемая из малых кристаллов

Концепция, лежащая в основе технологии Press-Pack, — простота конструкции при наличии только прижимных компонентов и при полном отсутствии паяных и сварных соединений [2]. Однако для достижения поставленной цели потребовалась масса усилий в выборе и контроле качества применяемых материалов и технологических процессов. Ключевым

элементом Press-Pack IGBT является ячейка из одного IGBT-кристалла, представленная еще в первом поколении высоковольтных изделий (рис. 1). Каждый кристалл IGBT упакован в свою ячейку, которая может быть протестирована до установки в корпус, в условиях чистой комнаты. Самый крупный модуль

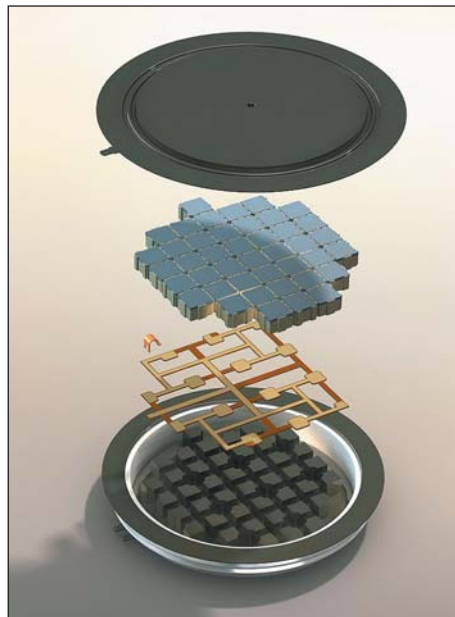


**Рис. 1.** Ключевой элемент Press-Pack IGBT — ячейка из одного IGBT-кристалла

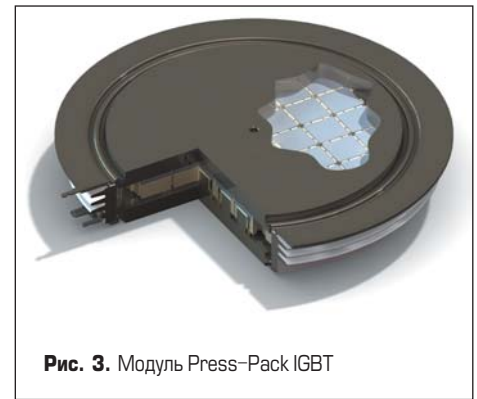
Press-Pack IGBT на базе третьего поколения кристаллов на 4,5 кВ имеет диаметр электрода 125 мм. Это означает, что в корпусе может быть установлено до 42 кристаллов в параллельном включении (рис. 2, 3). Технология прижимных модулей на базе малых кристаллов в параллельном включении без применения пайки и сварки обладает непревзойденной надежностью, опережая по устойчивости к термоциклированию как прижимные изделия с одним большим кристаллом, так и альтернативные технологии с использованием параллельного включения малых кристаллов. Полностью герметичный корпус с возможностью двухстороннего охлаждения предусматривает как воздушное, так и водяное охлаждение, а также допускает полное погружение в охлаждающую жидкость. К существенным достоинствам Press-Pack IGBT следует отнести и предсказуемость процессов в случае выхода их из строя в устойчивое короткое замыкание, что упрощает проектирование схем защиты [3].

**Третье поколение кристаллов 4,5 кВ**

Предлагаемая сегодня технология Press-Pack IGBT базируется на усовершенствованной SPT-топологии кристалла, которая широко применяется в самых различных приложениях уже более семи лет. В структуре применяемых кристаллов IGBT присутствуют как дополнительный N-слой, так и ряд улучшений топологии эмиттера, что позволило увеличить концентрацию носителей заряда под эмиттером. Улучшение характеристики распределения носителей заряда в эмиттерной области привело к сокращению прямого падения напряжения на 25% по сравнению с предыдущим поколением, на уровне 3,6 В на номинальном токе и максимальной температуре  $T_j$ , при этом удалось избежать увеличения потерь при закрывании транзистора, находящихся в обратной зависимости от прямого падения напряжения. Благодаря тонкой оптимизации буферного слоя с низкой концентрацией носителей заряда достигнут положительный температурный коэффициент прямого падения напряжения во всем диапазоне токов, что



**Рис. 2.** Структура модуля Press-Pack IGBT на базе третьего поколения кристаллов



**Рис. 3.** Модуль Press-Pack IGBT

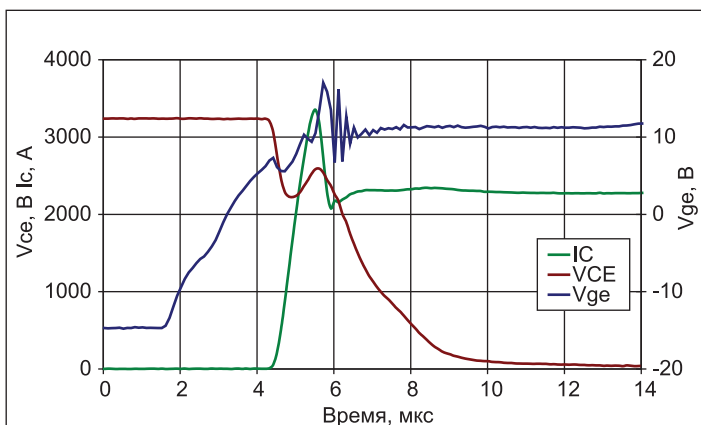
очень важно для построения модулей большой мощности и поддержания хороших параметров тока короткого замыкания и отвечает самым современным требованиям известных типовых приложений. Описанная технология позволяет получить уровень потерь проводимости в IGBT, сопоставимых с потерями в Trench-структуре, при этом обеспечивая область безопасной работы на обратном токе (RBSOA), область безопасной работы при коротком замыкании (SCSOA), плавную характеристику переключения и простоту управления, свойственную планарной топологии.

**Характеристики 2400А/4500В IGBT-модуля**

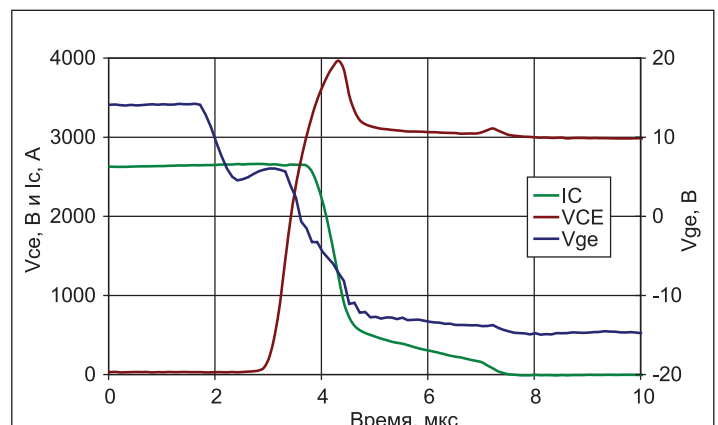
Для полного понимания всех характеристик самого большого из выпускающихся в настоящее время Press-Pack IGBT (T2400EB450) было проведено большое количество различных тестов. Данный IGBT-модуль имеет номинальный ток 2400 А, что эквивалентно плотности

тока 57 А/см<sup>2</sup>, и номинальное напряжение в звене постоянного тока 2,8 кВ, при этом обеспечивая расширенную область RBSOA, протестированную до 4800 А и 3200 В. Все характеристики переключения приведены с использованием быстрых диодов HP Sonic FRD компании IXYS UK, диаметром 87 мм — E2400TC45C, применяемых в качестве обратного диода, и измеренной внесенной индуктивности порядка 180 нГ. Температура IGBT — 125 °С, температура диода — 150 °С, если не указано иное.

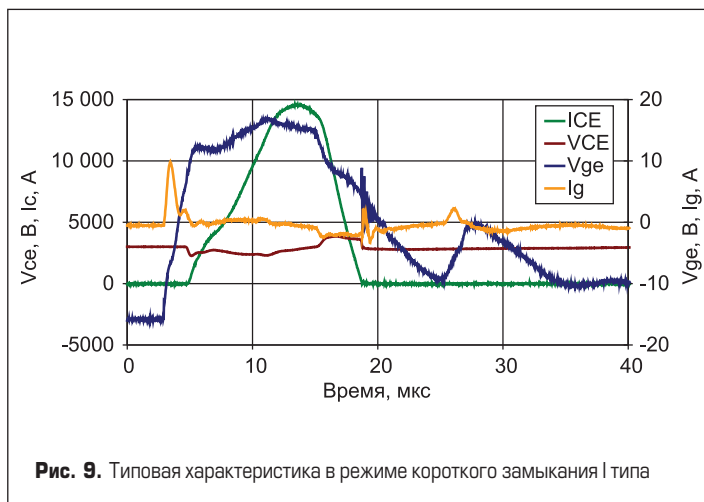
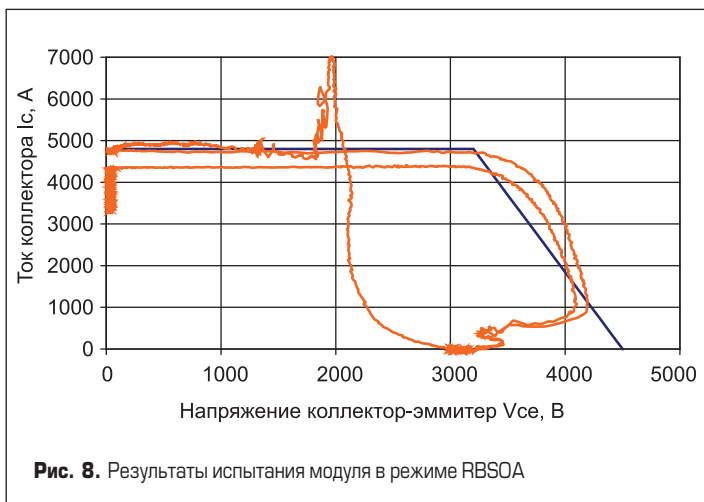
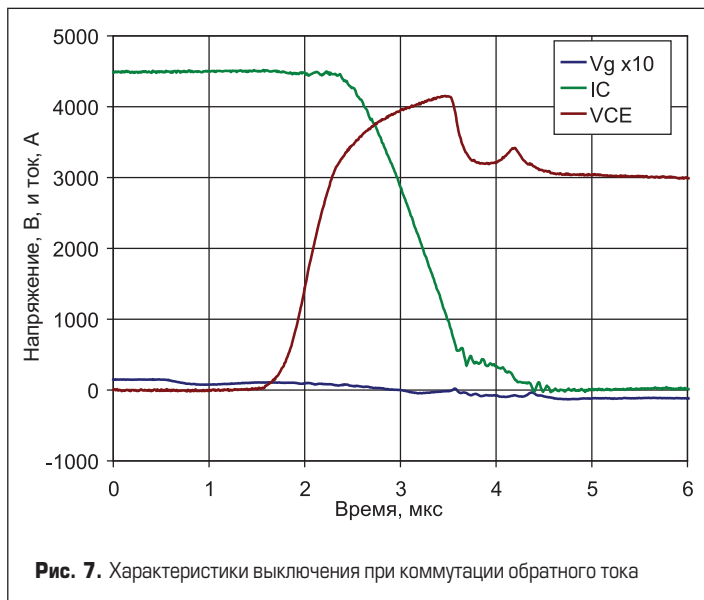
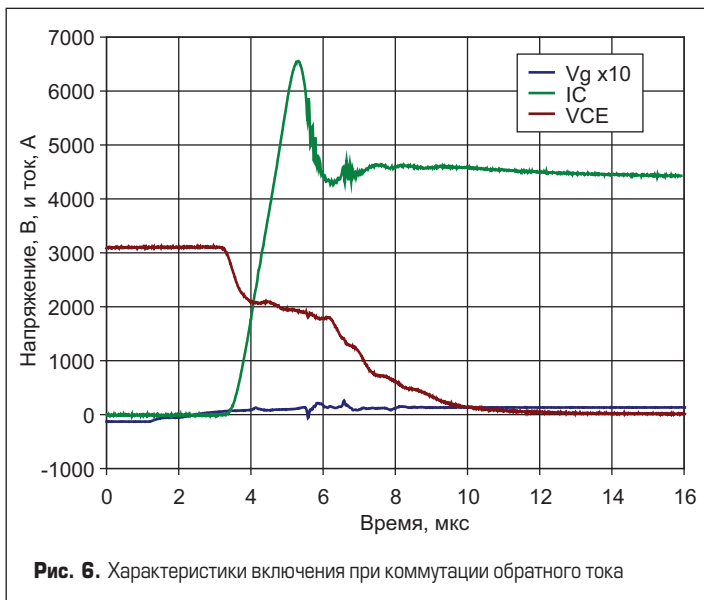
На рис. 4 показан момент включения IGBT на номинальном токе с затворным резистором 1,6 Ом и дополнительным конденсатором в цепи затвор-эмиттер номиналом 267 нФ. Очень низкая входная емкость планарной структуры обеспечивает быстрое падение напряжения. В этом случае мы имеем возможность дальнейшей оптимизации характеристики переключения как IGBT, так и диода путем изменения резистора затвора и емкости затвор-эмиттер. В нашем случае типовые потери при открытии составили 7,2 Дж. На рис. 5 представлен момент закрывания IGBT при номинальном токе и резисторе затвора 1,5 Ом, а также дополнительной емкости затвор-эмиттер 267 нФ. Очень высокая устойчивость к перегрузкам применяемых кристаллов позволяет иметь высокую скорость переключения, причем тонкая оптимизация буферного слоя гарантирует плавную характеристику выключения без выбросов напряжения и осцилляции, даже при высоких уровнях напряжения в звене постоянного тока и существенных паразитных индук-



**Рис. 4.** Момент включения IGBT на номинальном токе с затворным резистором 1,6 Ом и дополнительным конденсатором в цепи затвор-эмиттер номиналом 267 нФ



**Рис. 5.** Момент закрывания IGBT при номинальном токе и резисторе затвора 1,5 Ом, а также дополнительной емкости затвор-эмиттер 267 нФ



тивностях. В рассматриваемом случае потери при выключении составили 7,85 Дж.

Рисунки 6 и 7 показывают характеристики включения и выключения при коммутации обратного тока. Наиболее наглядно характеристики данного модуля представлены на рис. 7, демонстрирующем способность выдерживать высокую энергию в динамическом лавинном режиме за счет возможности ограничивать  $dv/dt$  и сглаживать выбросы индуцированного тока при выключении напряжения в период примерно 1,8 мкс; при этом не применяются никакие внешние снабберные и защитные цепи. Параметр RBSOA не связан линейно с напряжением устройства, поэтому получение характеристик высоковольтных приборов является предметом дополнительных исследований. При увеличении тока коммутации значение вносимой индуктивности растет за счет более массивных шин и большего корпуса модуля, что приводит к существенному увеличению энергии, накапливаемой во внешних паразитных индуктивностях, которая в свою очередь должна выдерживаться каждым из кристаллов модуля<sup>1</sup>. Применение усовершенствованной технологии кристаллов с низкими потерями в комбинации с выдающейся способностью выдерживать вы-

сокие тепловые нагрузки благодаря прижимной конструкции модуля позволяет значительно расширить привычные рамки при проектировании силовых инверторов. Больше не нужно ограничивать средний ток коммутации, скорее предел будет определяться максимальным током или импульсным значением в режиме RBSOA. Рис. 8 показывает результаты испытания модуля в режиме RBSOA двумя импульсами, выходящими за пределы рекомендованной в документации области безопасной работы. Рис. 9 демонстрирует типовую характеристику в режиме короткого замыкания I типа при напряжении в звене постоянного тока 3 кВ и номинальной длины импульса 13 мкс с применением резистора в цепи затвора номиналом 10 Ом для плавного выключения. Модуль способен выдерживать короткое замыкание I и II типа при напряжении на затворе до 18 В во всем рабочем диапазоне температур.

**Новое поколение кристаллов 6,5 кВ**

Представленное сегодня семейство Press-Pack IGBT на напряжение 6,5 кВ основано на новом кристалле IGBT, который имеет больший диаметр для обеспечения большей дистанции между элек-

тродами, сохраняя примерно такую же активную рабочую область. Структура нового кристалла основана на эффективной планарной топологии с SPT-буфером и анодом с низкой инжекцией заряда. Абсолютно такая же структура используется в кристаллах для Press-Pack IGBT 4,5 кВ, с тем лишь исключением, что для обеспечения большего напряжения изоляции применены более толстые, 30-мм корпуса. Первое из представленных устройств на 6,5 кВ выполнено в корпусе с диаметром электрода 110 мм (рис. 10) и состоит из 21 ячейки IGBT и 11 ячеек диодов, заключенных



<sup>1</sup> В идеальной ситуации индуктивность должна снижаться линейно с ростом числа кристаллов, сохраняя неизменной вносимую индуктивность на каждый кристалл.



в общий корпус, обеспечивая номинальный ток 900 А, что эквивалентно плотности тока 43 А/см<sup>2</sup>, номинальное напряжение 3,6 кВ и протестированной областью безопасной работы RBSOA до 1800 А и 4500 В. Рис. 11 показывает характеристику выключения такого IGBT в режиме RBSOA. При номинальном токе 900 А прямое падение напряжения на IGBT составит порядка 4,8 В, а на диоде — 3,8 В. При  $I_c = 900$  А,  $V_{ce} = 3,6$  кВ,  $L_s = 280$  нГ,  $R_{g(on)} = 3,9$  Ом,  $R_{g(off)} = 12$  Ом,  $C_{ge} = 68$  нФ типовые потери включения составят 6,5 Дж, а типовые потери при выключении — 5,3 Дж.

Сейчас находятся в разработке более мощные модули с диаметром электрода 132 мм и током до 1890 А, коммутируемым 44 кристаллами IGBT, включенными параллельно.

**Возможные области применения**

Большие токи и высокие значения коммутируемого напряжения делают данные IGBT-модули идеальным выбором для приложений среднего класса напряжений (3, 6, 10 кВ) мощностью в единицы и десятки мегаватт. Практически конструкция Press-Pack IGBT обеспечивает удобное конструктивное решение для построения многоуровневых преобразователей с водяным охлаждением и высокой удельной мощностью. Рис. 12 представляет типовую сборку одной фазы преобразователя на ток 1600 А и напряжение 3,3 кВ трехуровневой NPT-конфигурации на базе IGBT T2400EB450 и диода E2400TC45C семейства HP sonic FRD.

Последовательное включение Press-Pack IGBT-модулей и параллельное включение

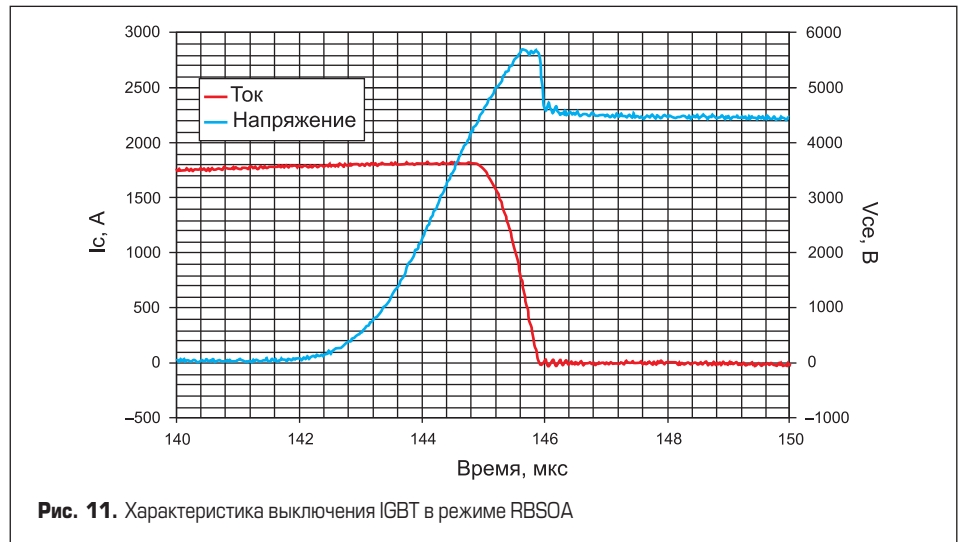


Рис. 11. Характеристика выключения IGBT в режиме RBSOA

сборок на их основе позволяет строить преобразователи до 10 кВ и мощностью в несколько десятков мегаватт. Рис. 13 показывает возможную конфигурацию преобразователя мощностью 18 МВт, 6,6 кВ для высоковольтного частотного электропривода. Данные характеристики подходят для широкого спектра приложений, таких как высокопроизводительный привод электродвигателей, преобразователи для скоростных электропоездов, железнодорожные преобразователи, преобразователи и компенсаторы реактивной мощности для электроэнергетики, а также для различных преобразователей в альтернативных источниках электроэнергии.

Особый интерес вызывает возможность применения данной технологии в новых поколениях ветрогенераторов большой мощности. В данном случае требуется уровень мощности 6–8 МВт с преобразованием энергии на 3,3 кВ как на стороне турбины, так и в точке присоединения к энергосистеме. Высокое значение

удельной мощности преобразования наряду с высочайшей надежностью и герметичностью Press-Pack IGBT делает данное решение весьма перспективным для использования в новейших решениях для ветрогенераторов.

Благодаря своим достоинствам эта технология найдет применение в тех приложениях, где есть ограничения для доступа к преобразовательной технике в режиме эксплуатации и ремонта. Такие особенности характерны, например, для судового электропривода, а также для газовой и нефтяной промышленности на удаленных объектах и перекачивающих станциях.

**Литература**

1. Wakeman F. & Golland A. Press-pack IGBTs for traction applications. Power Electronics Europe, issue 1. 2004.
2. Wakeman F. et. al. Electromechanical characteristics of a bondless pressure contact IGBT. APEC, 1999.
3. Wakeman F. et. al. Pressure contact IGBT, testing for reliability. PCIM Europe. 2000.
4. [www.ixysuk.com](http://www.ixysuk.com)

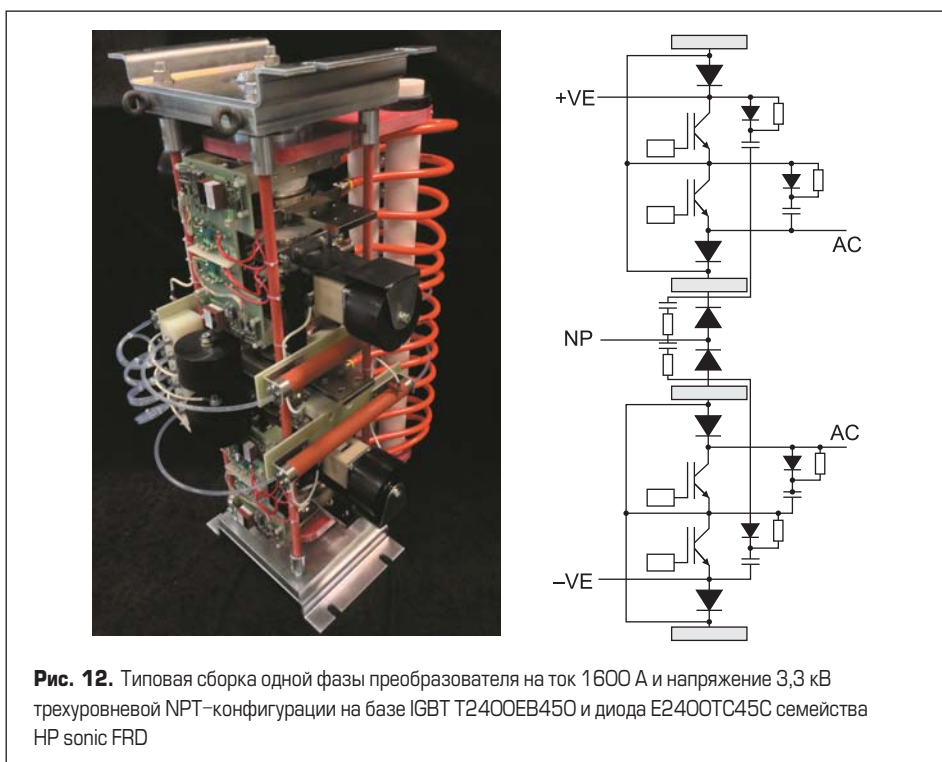


Рис. 12. Типовая сборка одной фазы преобразователя на ток 1600 А и напряжение 3,3 кВ трехуровневой NPT-конфигурации на базе IGBT T2400EB450 и диода E2400TC45C семейства HP sonic FRD

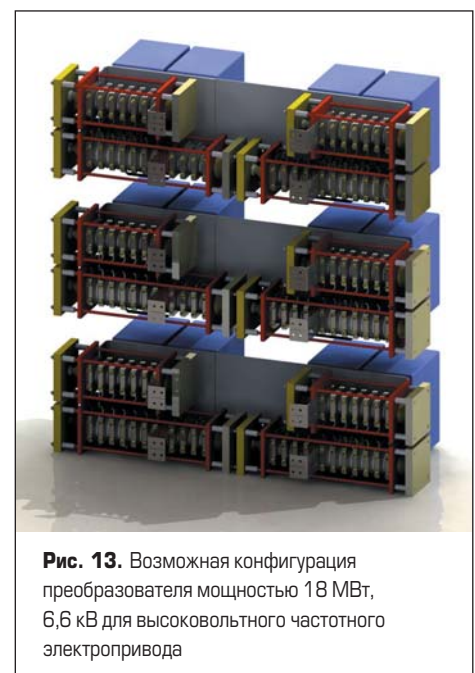


Рис. 13. Возможная конфигурация преобразователя мощностью 18 МВт, 6,6 кВ для высоковольтного частотного электропривода