

IGCT: отличные характеристики

и различные подходы к их улучшению

Биполярный тиристор с коммутируемым затвором (Integrated Gate-Commutated Thyristor, IGCT) был впервые представлен 15 лет назад и зарекомендовал себя как предпочтительное решение для ряда применений в области силовой электроники (рис. 1). Их общей особенностью является уровень номинальной мощности, составляющей мегаватты: от питания промышленных приводов и устройств тягового энергоснабжения до управления качеством электроэнергии и силовых выключателей. В данной статье основное внимание уделено особенностям, благодаря которым IGCT столь привлекателен для устройств высокой мощности.

Мартин Арнольд
(Martin Arnold)

Бьорн Бэклунд
(Björn Backlund)

Мунаф Рахимо
(Munaf Rahimo)

Тобиас Викастрём
(Tobias Wikström)

Особенности IGCT

Конструкция IGCT имеет ряд отличительных особенностей. Ниже рассмотрены некоторые особенности приборов, их влияние на конструкцию оборудования и соответствующие преимущества для потребителя.

Асимметричные тиристоры и тиристоры с обратной проводимостью (со встроенным диодом)

Компания АББ предлагает два типа IGCT: асимметричные и с обратной проводимостью (RC). Асимметричные IGCT управляют самыми высокими уровнями мощности. Предлагаются стандартные асимметричные IGCT и новые модели HPT-IGCT с улучшенной коммутирующей способностью. Использование асимметричных IGCT позволяет выбрать оптимальные обратные диоды для конкретного применения. RC-IGCT имеют встроенные обратные диоды и потому дают возможность создавать компактные конструкции сборок. RC-IGCT были спроектированы для приводов с частичной рекуперацией энергии в сеть.



Рис. 1. Семейство продуктов IGCT

Приборы 45-го и 65-го класса при силе выключаемого импульсного тока 520–5000 А

Компания АББ производит IGCT на различные номинальные напряжения. Приборы 45-го и 65-го класса идеально подходят для трехуровневых инверторов, предназначенных для напряжения сети 3300 и 4160 В (таблица 1). Наличие различных размеров

Таблица 1. Рекомендуемое запирающее напряжение для полупроводников высокой мощности, используемых в трехуровневых инверторах напряжения

Номинальное напряжение сети, В	Номинальное напряжение звена постоянного тока, В	Рекомендуемое повторяющееся импульсное напряжение, В
2300*	1,9	3,3
3300**	2	3,3
3300*	2,7	4,5
4160*	3,4	5,5
6000	4,9	8
6600*	5,4	8,5
6900*	5,6	9
7200*	5,9	9,5

Примечание: * — действующее значение; ** — постоянный ток.

IGCT позволяет производителям приводов производить серии инверторов, охватывающих определенный диапазон мощности, всего лишь путем выбора соответствующего IGCT.

Выходная мощность преобразователя в 8 МВт может быть достигнута в двухуровневом инверторе с использованием НРТ-IGCT 45-го класса (91 мм в диаметре), как показано на рис. 2. Сглаживание кривых для устройств не-НРТ в области более низких частот обусловлено ограничениями области безопасной работы (ОБР). Мощность трехуровневых инверторов может достигать значений, в два раза превышающих мощность двухуровневых. Соответственно, преобразователи с номинальной мощностью 10 МВт и выше могут быть реализованы без необходимости параллельного и/или последовательного соединения приборов.

Интегрированный драйвер

Формирователь импульсов, часто называемый драйвером, играет очень важную роль в работе прибора и поэтому является неотъемлемой частью IGCT. Нет необходимости в покупке драйвера, а его применение даже может стать причиной ухудшения рабочих характеристик устройства. Для управления IGCT необходим только источник питания и два оптоволоконных кабеля. IGCT можно рассматривать как Plug&Play устройство, хотя описание мегаваттных устройств с такой точки зрения может показаться необычным.

Низкие потери во включенном состоянии

Благодаря своей конструкции необлученный IGCT характеризуется низким падением напряжения и, следовательно, низкими потерями во включенном состоянии. Это делает IGCT очень хорошим решением для ряда статических и гибридных выключателей, а также перспективной альтернативой для многоуровневых преобразователей высокой мощности. Тем не менее традиционные области применения требуют оптимального соотношения потерь во включенном и выключенном состояниях. Взаимосвязь между ними определяется облучением выпрямительного элемента (ВЭ) тиристора. Компания АББ предлагает IGCT, обладающие низкими потерями во включенном состоянии, низкими потерями при выключении, а также с оптимальным соотношением потерь.

Полностью прижимной корпус для эффективного двухстороннего охлаждения

Конструкция корпуса IGCT позволяет монтировать устройство непосредственно между двумя теплоотводами и таким образом обеспечивает эффективное двухстороннее охлаждение. Кроме того, отсутствие необходимости в нанесении толстых слоев термокомпанда гарантирует очень низкое тепловое сопротивление системы охлаждения. Достигается высокая плотность мощности для узлов преобразователя и, соответственно, уменьшается

пространство, необходимое для преобразователя с данной номинальной характеристикой — по сравнению с преобразователями на основе силовых компонентов с изолированным корпусом.

Полностью прижимной (ПП) корпус, обеспечивающий устойчивость к циклическим нагрузкам

За много лет применения герметичный ПП корпус IGCT показал превосходную надежность и способность выдерживать циклические нагрузки в многочисленных областях применения. В конструкции корпуса — всего лишь несколько слоев тщательно подобранных материалов, благодаря чему он не имеет таких недостатков, как непропаи и отрыв проводников, присущие другим технологиям сборки силовых приборов. Тщательно подобранные покрытия и используемые материалы уже сами по себе гарантируют умеренный механический износ прибора из-за колебаний температуры при работе в условиях повторной кратковременной нагрузки. Благодаря этому IGCT хорошо подходит для областей применения, характеризующихся жесткими условиями работы, как, например, приводы сталепрокатных станков, шахтных подъемных установок, судовых установок и т. д.

Перспективы совершенствования

В настоящее время ведется ряд разработок, направленных как на улучшение характеристик IGCT в существующих областях применения, так и на использование IGCT в новых. Ниже более подробно описаны некоторые из таких разработок и рассмотрены их перспективы.

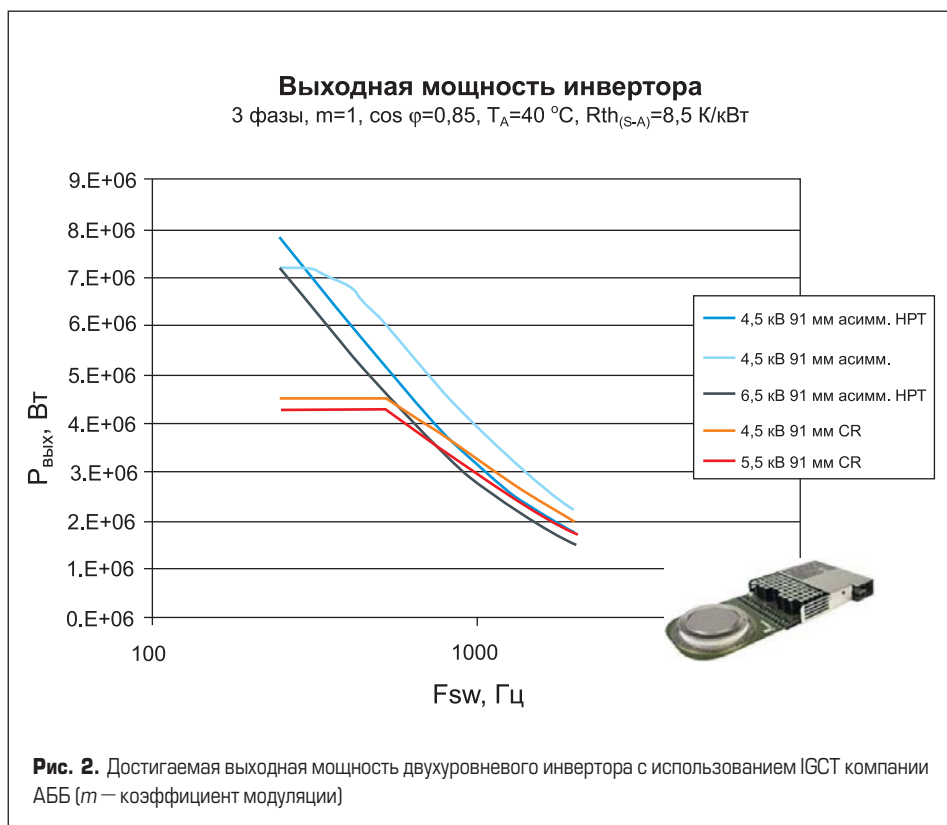
Повышение температуры ВЭ

Одним из возможных способов повышения выходной мощности существующих преобразователей является повышение температуры ВЭ используемых силовых полупроводниковых приборов. При непрерывной работе система охлаждения может наложить ограничения на дополнительные потери, возникающие из-за более высокой температуры прибора. В то же время для кратковременных перегрузок увеличение температуры является возможным решением, так как увеличение средней мощности и требований к системе охлаждения ограничено. Важным является то, что полупроводник может выдерживать перегрузку в течение ограниченного периода времени, благодаря чему не требует увеличения габарита преобразователя.

Для достижения способности НРТ-IGCT выдерживать перегрузки реализован ряд конструктивных решений, направленных на повышение рабочей температуры с +125 до +140 °С. Профиль легирования в гофрированной р-базе ВЭ НРТ-IGCT, был оптимизирован таким образом, чтобы ОБР охватывала диапазон температур 0...+140 °С. Кроме того, была улучшена устойчивость к термомеханическому износу внутренних поверхностей, таких как металлизация ВЭ. Эти меры сделали допустимыми более резкие колебания температуры во время повторно-кратковременной работы прибора при +140 °С. В настоящее время начаты испытания примененных решений, и первые результаты выглядят многообещающе.

Симметричные IGCT

Для некоторых устройств переменного тока и инверторов тока необходимы ключи



чи, одинаково держащие прямое и обратное напряжение. Несмотря на то, что данное требование может быть реализовано путем последовательного соединения асимметричных IGCT с быстродействующим диодом, предпочтительным является применение симметричного IGCT. Так как требования к рабочим характеристикам и некоторым режимам работы симметричных IGCT существенно отличаются от требований к асимметричным IGCT, то для их создания необходимы серьезные исследования. Компания АББ провела их и создала первый симметричный IGCT, который в настоящее время проходит всесторонние испытания. Новая линейка продукции рассчитана на напряжение 6500 В, что превосходно подходит для сети переменного тока напряжением 2300 В (таблица 2).

150-мм IGCT

Постоянно растущие мощности делают целесообразным увеличение размеров ВЭ. Улучшенная масштабируемость технологии НРТ компании АББ в сочетании с достижениями в области развития биполярной технологии, направленными на увеличение размеров ВЭ, позволяет создавать приборы, размеры которых превышают стандартные 91 мм. Тиристоры с размером ВЭ 150 мм уже представлены на рынке. На основе используемой для них производственной базы недавно были созданы первые проводящие в обратном направлении 150-мм НРТ-IGCT 45-го класса. Прототип с драйвером показан на рис. 3.

Испытания первых образцов на 4500 В показали хорошую коммутационную способность (рис. 4). Это является явным признаком того, что ВЭ, корпус и вентиль обладают заданными характеристиками в отношении однородности и абсолютной индуктивности.

С помощью данного RC-IGCT появляется возможность создания трехуровневых инверторов с мощностью до 20 МВт без необходимости параллельного или последовательного соединения силовых полупроводниковых приборов. Однако перед выпуском продукции на рынок еще необходимо выполнить некоторый объем конструкторских работ. Требуется доработать корпус и драйвер, а также определить наилучшее соотношение площадей IGCT-диод. Кроме того, перед производством первых образцов необходимо провести обширные электрические тесты и испытания на надежность.

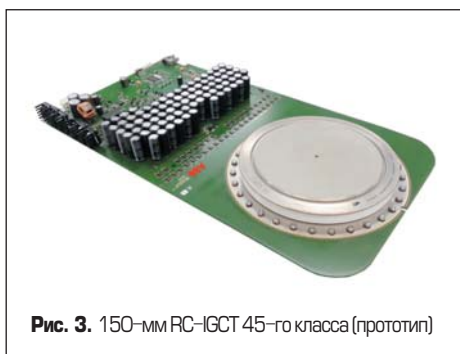


Рис. 3. 150-мм RC-IGCT 45-го класса (прототип)

Таблица 2. Рекомендуемое запирающее напряжение для полупроводников высокой мощности, используемых в инверторах тока

Номинальное напряжение в сети, В	Номинальное импульсное напряжение сети переменного тока, В	Рекомендуемое повторяющееся запирающее напряжение, В
2300*	3,7	6,5
3300*	5,4	9

Примечание: * — действующее значение

Падение напряжения 1 В

Сегодня наблюдается четкая тенденция использования многоуровневой топологии для большинства областей применения силовой электроники. Многоуровневые преобразователи работают при достаточно низкой частоте переключений, но, в то же время, должны обладать высокой токонесящей способностью и/или высоким КПД. Благодаря низким по-

терям IGCT на электропроводность и высокой устойчивости к постоянному переключению, IGCT идеально подходят для таких областей применения. На рис. 5 показано, как 4500-В 91-мм IGCT может быть изменен с учетом различных требований, а также показано сравнение с передовым ПП-модулем IGBT.

Существует некоторая свобода выбора напряжения прибора для многоуровневых си-

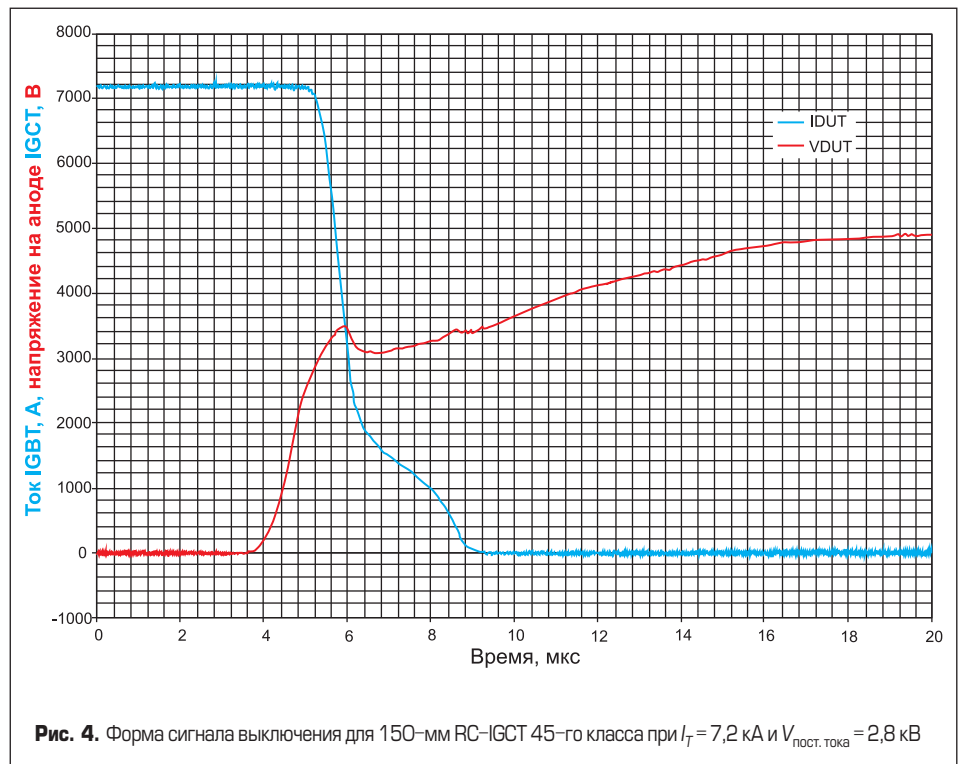


Рис. 4. Форма сигнала выключения для 150-мм RC-IGCT 45-го класса при $I_T = 7,2$ кА и $V_{\text{пост. тока}} = 2,8$ кВ

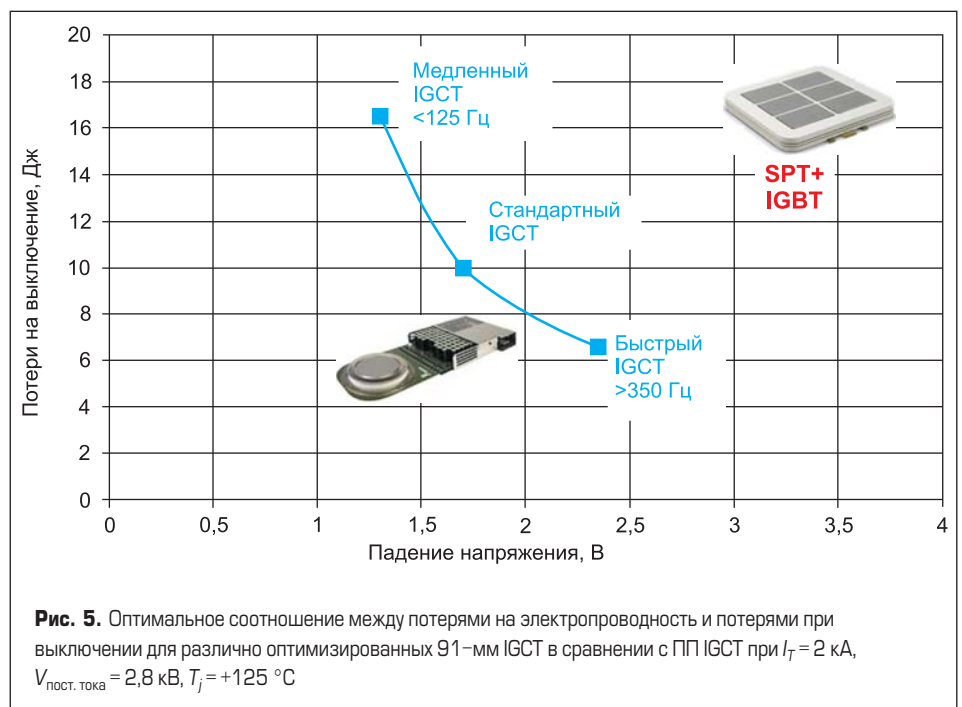
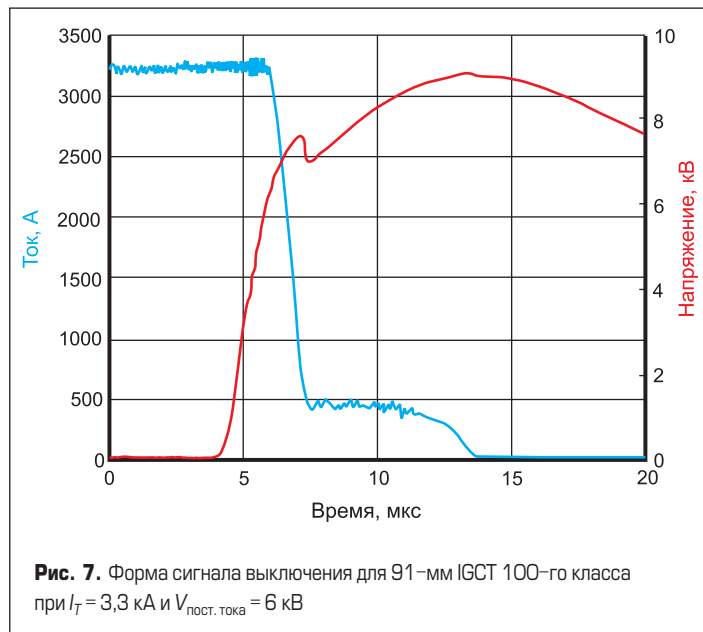
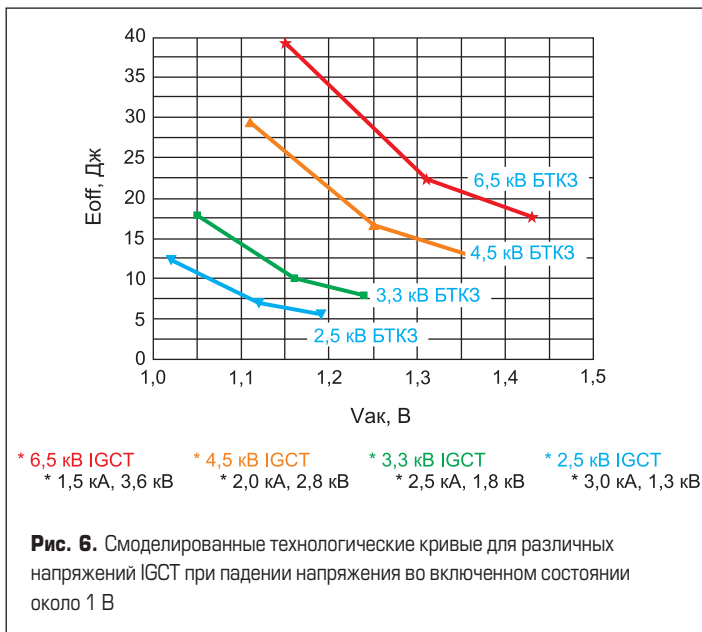


Рис. 5. Оптимальное соотношение между потерями на электропроводность и потерями при выключении для различно оптимизированных 91-мм IGCT в сравнении с ПП IGCT при $I_T = 2$ кА, $V_{\text{пост. тока}} = 2,8$ кВ, $T_j = +125$ °С



стем. Были проведены моделирование и ряд экспериментов, направленных на установление характеристик, при которых падение напряжения во включенном состоянии будет составлять около 1 В. Результаты показаны на рис. 6. По ним проектировщики могут получить информацию об оптимизации многоуровневых преобразователей в отношении минимальных суммарных потерь инвертора для данной топологии, напряжения системы и тока.

Создание приборов повышенного напряжения

По данным, приведенным в таблице 1, видно, что создание трехуровневых преобразователей на напряжения сети 6–7,2 кВ без последовательного соединения ИГСТ возможно с ИГСТ 100-го класса по напряжению.

С целью подтверждения, что создание ИГСТ с более высоким номинальным напряжением возможно, был создан прото-

тип ИГСТ 100-го класса. Его форма сигнала выключения показана на рис. 7. Высокое напряжение класса прибора требует достаточно толстого кремниевого ВЭ, что, в свою очередь, приводит к достаточно большим потерям при переключении и на электропроводность. Такие приборы могут использоваться в приводах для электрических машин, работающих с умеренными скоростями вращения.