

Высокоскоростные гибридные модули

с комбинацией высокоскоростных IGBT с диодами SiC-SBD

В последние годы прогрессирующими темпами растет число приложений, которым для достижения большей компактности, экономии веса и максимально высокой эффективности требуются преобразователи, действующие на высоких рабочих частотах. Учитывая такую тенденцию, все более востребованными становятся полупроводниковые устройства, способные функционировать на высоких частотах коммутации с большой скоростью переключения, гарантирующей низкие потери и высокую удельную объемную плотность мощности. Откликаясь на текущие требования рынка, компания Fuji Electric создала новейший гибридный модуль, сочетающий оптимизированные IGBT-транзисторы, работающие в паре с карбид-кремниевыми диодами с барьером Шоттки — SiC-SBD (SiC Schottky barrier diode). В статье описываются характеристики новых перспективных продуктов компании Fuji Electric — IGBT серии VW, их особенности в сравнении с традиционными модулями и преимущества новинок в системах преобразования энергии.

**Рёсукэ Усуи
(Ryosuke Usui)**

**Ёсихару Като
(Yoshiharu Kato)**

**Сейичи Такахаси
(Seiichi Takahashi)**

**Перевод и дополнения:
Владимир Рентюк**

Введение

Как известно, главной темой в борьбе с глобальным потеплением становится проблема выбросов в атмосферу углекислого газа (CO_2), вызывающих парниковый эффект. На этом фоне наиболее эффективными мерами являются уменьшение применения сжигаемого топлива (угля, газа и мазута) и увеличение потребления энергии из возобновляемых источников. Главную роль здесь играет фотоэлектрическая или солнечная энергия и энергия ветра. Однако при их использовании мы сталкиваемся с рядом ограничений, препятствующих их более широкому распространению. Основная задача в том, что нам необходимо не просто преобразовывать энергию, а делать это максимально эффективно, преодолевая присущие этим типам возобновляемых энергетических ресурсов ограничения, к которым относятся относительно низкий процент выхода энергии от фотоэлектрических преобразователей и временная нестабильность — зависимость выхода от капризов погоды и времени суток. Сказанное требует применения промежуточных систем преобразования, способных выдать в электрическую сеть уже кондиционное (согласованное по частоте и уровню) напряжение переменного тока. Причем сделать это независимо — либо непосредственно от самого источника энергии, например от солнечной панели, либо от буферного аккумулятора, обеспечивая тем самым бесперебойность поставки электрической энергии.

Все это требует максимального использования энергии, то есть повышения КПД инверторов при преобразовании солнечной энергии и энергии ветра

в электрическую, которая уже по проводам электросети потечет к потребителям. Кроме того, общий тренд современного рынка электротехнического и электронного оборудования к миниатюризации напрямую коснулся и преобразователей энергии самого широкого спектра — от бытового оборудования до электромобилей. Последнее служит еще одним движущим фактором того, что все большее число приложений выполняет преобразование мощности на частотах 20 кГц и выше, но при этом необходимо и повышение эффективности такого типа оборудования.

В ответ на вызов времени компания Fuji Electric разработала новые гибридные модули, выполненные в обычном корпусировании. Устройства содержат быстродействующие с малыми потерями биполярные транзисторы с изолированными затворами (insulated gate bipolar transistors — IGBT), которые могут эффективно работать на высоких частотах переключения в 20 кГц и выше, и не менее эффективные диоды Шоттки, реализованные по технологии карбида кремния (SiC-SBD). Оба компонента могут не только действовать на высоких частотах переключения, но и отличаются низкими потерями проводимости, а благодаря высокой скорости переключения у них также значительно уменьшены динамические потери, то есть потери при переключении. В результате по сравнению с существующими продуктами рассеиваемая мощность выполненного на их основе высокочастотного преобразователя энергии может быть снижена примерно на 50%. Это дает уверенность в том, что данные модули найдут

достойное применение в приложениях преобразователей энергии и обеспечат им нужную компактность, экономию веса и высокую эффективность.

Обзор высокоскоростных гибридных модулей

На рис. 1 показаны приложения преобразователей энергии, ориентированные на ту или иную частоту преобразования и мощность. Как можно видеть, одним из основных применений гибридных модулей с высокой скоростью переключения (далее по тексту — высокоскоростных гибридных модулей) является оборудование для преобразования энергии, используемое, например, для возобновляемых источников энергии, автомобильные приложения, источники бесперебойного питания (uninterruptible power systems, UPS) и электроприводы. Всем этим типам оборудования для достижения высокого КПД при малых массогабаритных показателях (высокой удельной плотности мощности) жизненно необходимо преобразовывать энергию на максимально высоких частотах, сохраняя при этом высокий КПД ее преобразования. Достичь компромисса помогает совершенствование уже имеющихся технологий исполнения силовых полупроводниковых приборов и освоение новых.

На рис. 2 изображен внешний вид и схемы подключения новых высокоскоростных гибридных модулей компании Fuji Electric, а в таблице 1 представлена линейка новых и разрабатываемых компанией продуктов с SiC-SBD-диодами серий V и VW (подробная информация доступна на сайте Fuji Electric [4], а технические характеристики — через имеющиеся гиперссылки).

Итак, новые высокоскоростные гибридные решения, предлагаемые компанией Fuji Electric для обеспечения совместимости с уже представленными на рынке и широко используемыми модулями, имеют тот же вариант корпусирования, что и обычные модули, выполненные на основе кремния (Si). Все типы модулей новой серии имеют конфигурацию внутренней схемы «2-в-1», которая сочетает преимущества IGBT с высокой скоростью переключения и антипараллельного SiC-SBD-диода, их иногда называют диоды обратного хода, или FWD (FWD — free wheeling diode). Что касается IGBT, они созданы на основе традиционных для IGBT технологий, но с применением кристаллов (чипов), оптимизированных специально для высокоскоростной коммутации, а в качестве антипараллельного диода используются кристаллы диода Шоттки, реализованные на основе относительно новой, но уже хорошо зарекомендовавшей себя карбид-кремниевыми технологии. Отсюда и название диодов такого типа — SiC-SBD, то есть карбид-кремниевыми диод с барьером Шоттки.

Особенности высокоскоростных гибридных модулей

Для того чтобы добиться миниатюризации и повышения эффективности устройств, ко-

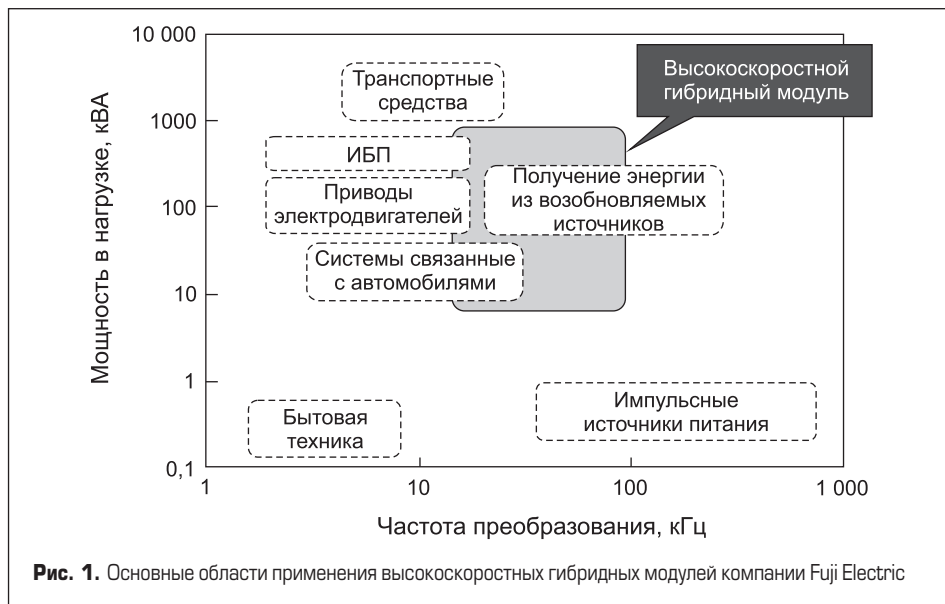


Рис. 1. Основные области применения высокоскоростных гибридных модулей компании Fuji Electric

торые выполняют преобразование энергии на высоких рабочих частотах коммутации, крайне важно улучшить показатели потерь используемых в них в качестве силовой части IGBT-модулей. Потери в таких модулях

в значительной степени зависят от характеристик полупроводниковых кристаллов IGBT и антипараллельных диодов. В этой главе кратко, но достаточно понятно описаны характеристики кристаллов IGBT и SiC-SBD,

Таблица 1. Линейка новых и разрабатываемых высокоскоростных гибридных модулей компании Fuji Electric с SiC-SBD-диодами серий V и VW

Корпус	Номинальный рабочий ток I _c , А	1200 В	1700 В	1200 В
		Гибридные IGBT-модули с диодами SiC-SBD серии V		Гибридные IGBT-модули с диодами SiC-SBD серии VW
M276	200			2MSI200VVAH-120-53 (UD)
	300	2MSI300VAH-120C-53 (New)		2MSI300VVAH-120-53 (UD)
M254	300	2MSI300VAN-120-53 (New)		2MSI300VWAN-120-53 (UD)
	450	2MSI450VAN-120-53 (New)		
	550		2MSI550VAN-170-53 (UD)	
	600	2MSI600VAN-120-53 (New)		

Примечание. (New) — новый продукт. (UD) — разрабатываемый продукт.

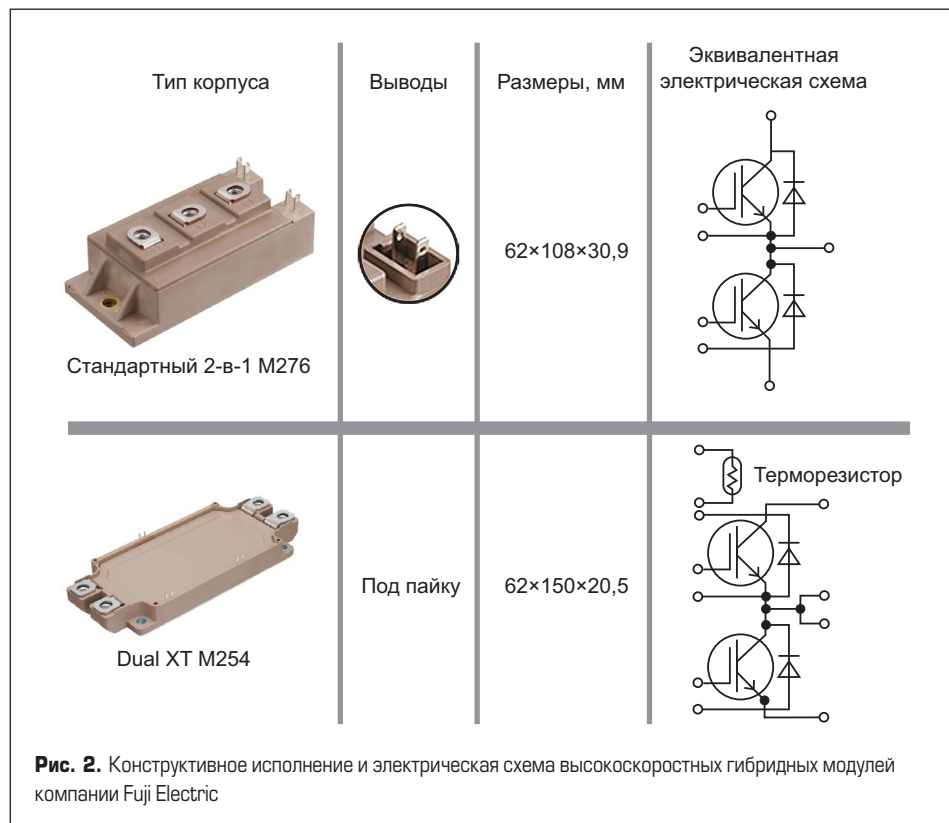
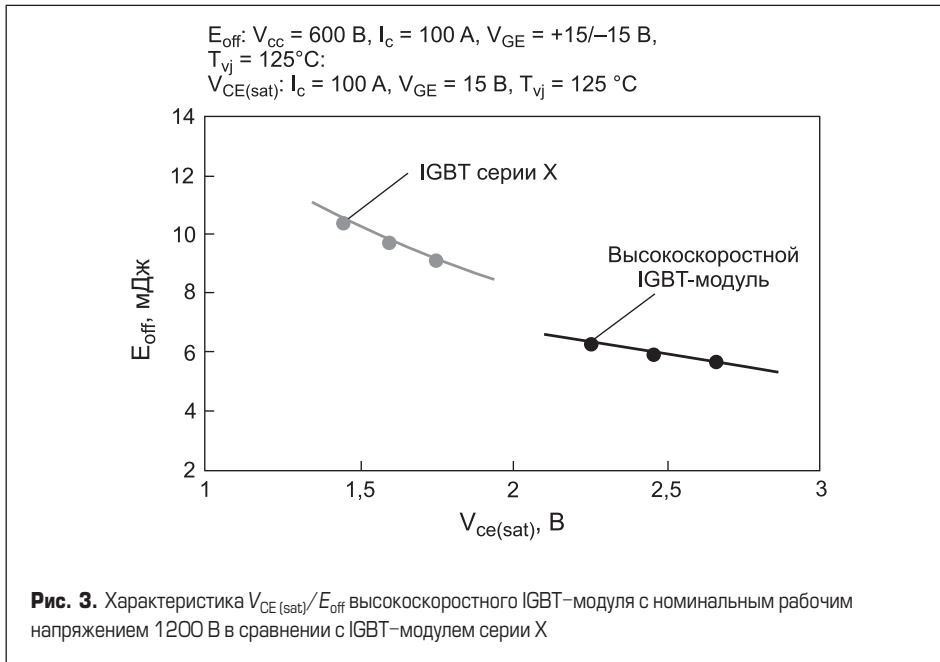


Рис. 2. Конструктивное исполнение и электрическая схема высокоскоростных гибридных модулей компании Fuji Electric



действующих в режиме высокоскоростного переключения на высоких частотах коммутации. Более широкая информация по данному вопросу представлена в [1–3].

Уменьшение потерь IGBT при высокоскоростном выключении

На рис. 3 отображена компромиссная характеристика между напряжением насыщения коллектор-эмиттер $V_{CE(sat)}$ высоко-

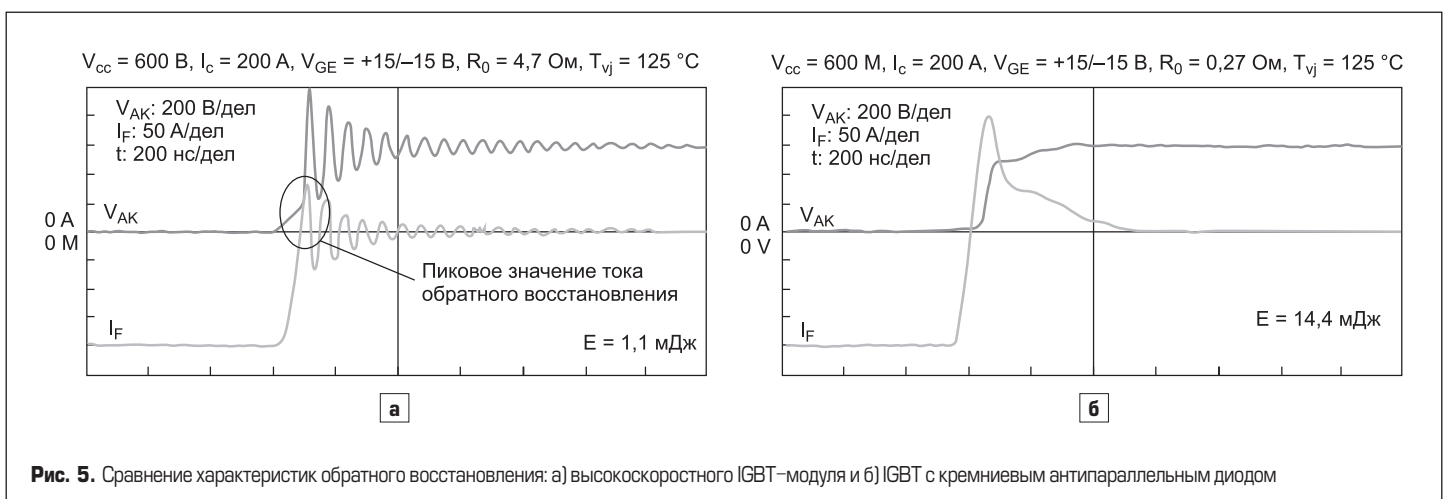
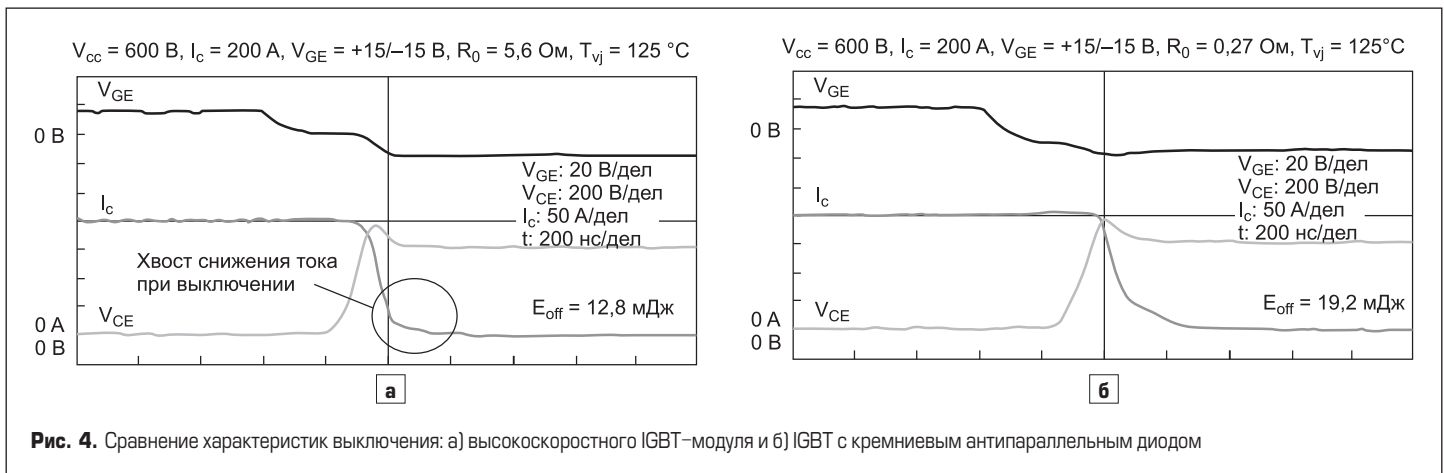
скоростного IGBT, рассчитанного на номинальное рабочее напряжение 1200 В, и затрат энергии (по факту — это потери) на выключение E_{off} . Высокоскоростной IGBT, разработанный на основе уже существующего IGBT, использует специальную активную структуру, которая значительно снижает паразитную емкость и концентрацию примесей в слое коллектора, ответственных за подавление инжекции дырок. По сравне-

нию с седьмым поколением IGBT серии X [5] это еще больше сокращает потери при отключении и имеет компромиссную характеристику $V_{CE(sat)}/E_{off}$, подходящую именно для высокоскоростного переключения [6].

На рис. 4 дано сравнение между формами сигналов выключения высокоскоростного гибридного модуля серии VW 1200 В/200 А и IGBT-модуля серии X с кремниевым антипараллельным диодом. По сравнению с модулем серии X новый высокоскоростной гибридный IGBT-модуль серии VW с карбид-кремниевыми диодом Шоттки при отключении (за счет значительного улучшения тока в хвостовой части) обеспечивает снижение затрат энергии на отключение E_{off} на 33%.

Уменьшение потерь при обратном восстановлении и потерь при включении IGBT-модуля с SiC-SBD-диодом

На рис. 5 представлено сравнение характеристики обратного восстановления высокоскоростного гибридного IGBT-модуля 1200 В/200 А и модуля серии X с кремниевым антипараллельным диодом. Высокоскоростной гибридный модуль показывает снижение пикового значения тока обратного восстановления примерно на 60%. Это объясняется тем фактом, что SiC-SBD-диод является однополярным устройством, и поэтому он не характеризуется инжекцией неосновных носителей. По сравнению с IGBT-модулями серии X, имеющими в своем составе кремниевые



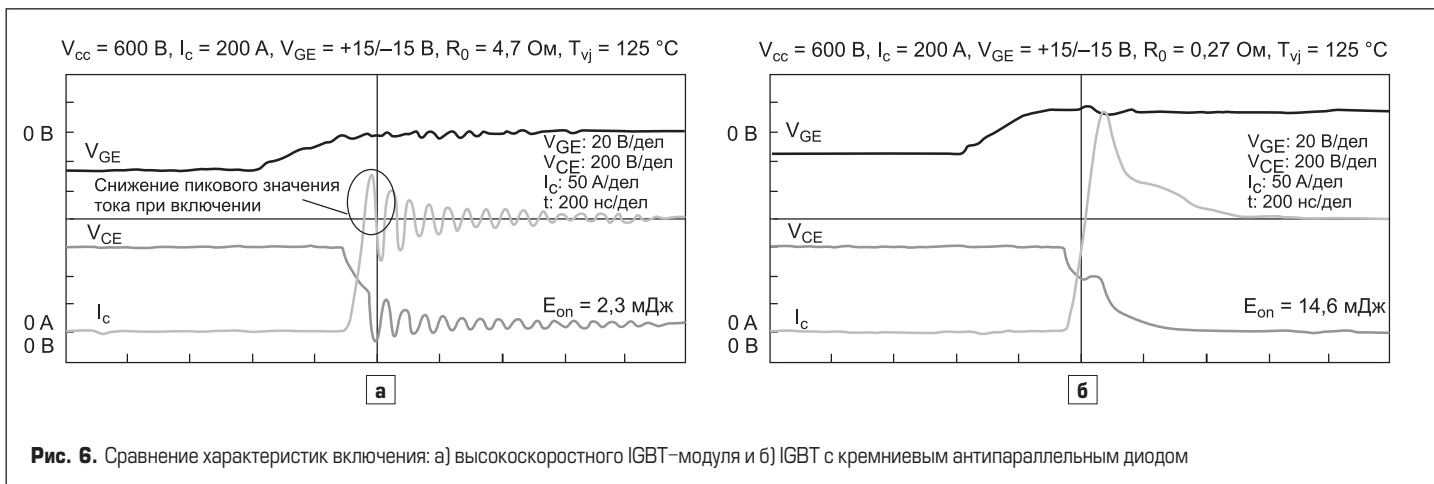


Рис. 6. Сравнение характеристик включения: а) высокоскоростного IGBT-модуля и б) IGBT с кремниевым антипараллельным диодом

антипараллельные диоды, гибридные модули сокращают затраты энергии на обратное восстановление E_{rr} на 92%!

Кроме того, пиковое значение тока обратного восстановления в антипараллельном диоде отражается в пиковом значении тока включения IGBT-модуля противоположного плеча. Поскольку пиковое значение тока включения в новых модулях, по мере того как пиковое значение обратного тока восстановления становится меньше, тоже сокращается — стало возможным снизить потери при включении [7]. На рис. 6 показано сравнение между формами напряжения и тока включения высокоскоростного гибридного IGBT-модуля 1200 В/200 А и модуля серии X с кремниевым диодом.

Как можно видеть, пиковое значение тока включения подобно тому, что мы наблюдали при анализе тока обратного восстановления, может быть уменьшено примерно на 60%, тем самым снова демонстрируя превосходство SiC-SBD-диодов над традиционными устройствами кремниевой технологии. По сравнению с IGBT-модулями серии X высокоскоростные гибридные IGBT-модули показывают снижение затрат энергии при включении E_{on} на 84%.

Эффект снижения потерь при переключении

В таблице 2 сравниваются затраты энергии высокоскоростного гибридного IGBT-модуля и модуля серии X с кремниевым антипараллельным диодом. По сравнению с IGBT-модулем серии X высокоскоростной гибридный IGBT-модуль, сочетающий преимущества высокоскоростного IGBT и SiC-SBD-диода, обеспечивает значительное снижение суммарных затрат энергии, составляющее 66%!

Эффективность использования высокоскоростных гибридных модулей

В этой части статьи в качестве примера описаны потери инвертора и температура кристаллов силовых полупроводниковых приборов. Для этого будет рассмотрена компактная система преобразования энергии

Таблица 2. Сравнение затрат энергии между высокоскоростным гибридным IGBT-модулем и IGBT-модулем серии X

	Энергия включения E_{on} , мДж	Энергия выключения E_{off} , мДж	Энергия обратного восстановления E_{rr} , мДж	Суммарная энергия, мДж
Модуль серии X	14,5	19,2	14,4	48,1
Высокоскоростной гибридный модуль	2,3	12,8	1,1	16,2
Снижение потерь, %	84	33	92	66

(Power Conversion System, PCS) небольшой мощности, выполненная с использованием высокоскоростного гибридного IGBT-модуля 1200 В/200 А в корпусе M276.

На рис. 7 показаны результаты моделирования потерь в инверторе. По сравнению с инвертором, оснащённым IGBT-модулем серии X, инвертор на базе высокоскоростного гибридного IGBT-модуля при работе на частотах переключения 20 кГц и выше показывает значительно меньшие потери на переключение и даёт существенный выигрыш, даже несмотря на небольшое увеличение потерь

в установившемся состоянии (называемых ещё «потери проводимости») P_{sat} , причина которых в более высоком значении сопротивления канала в открытом состоянии, что в свою очередь приводит к увеличению напряжения насыщения $V_{CE(sat)}$.

На рис. 8 можно видеть температуру полупроводникового перехода кристалла при его установке в инвертор. Температура перехода для высокоскоростного гибридного IGBT-модуля на частоте переключения 20 кГц была на 18 °C для IGBT и на 19 °C для антипараллельного диода ниже, чем температура

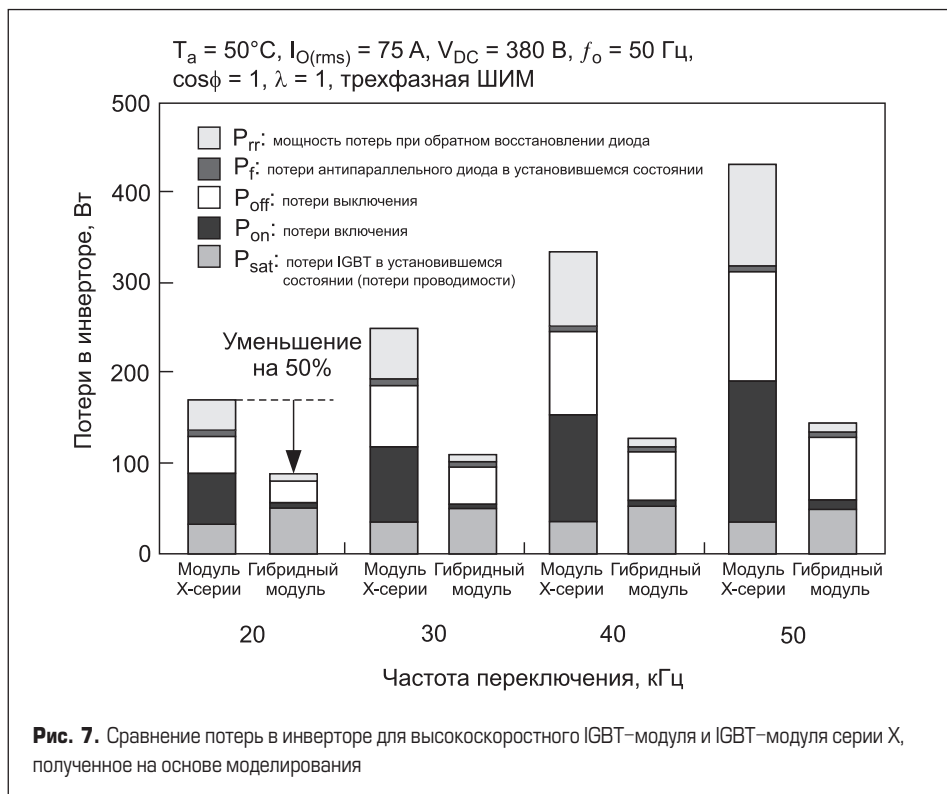
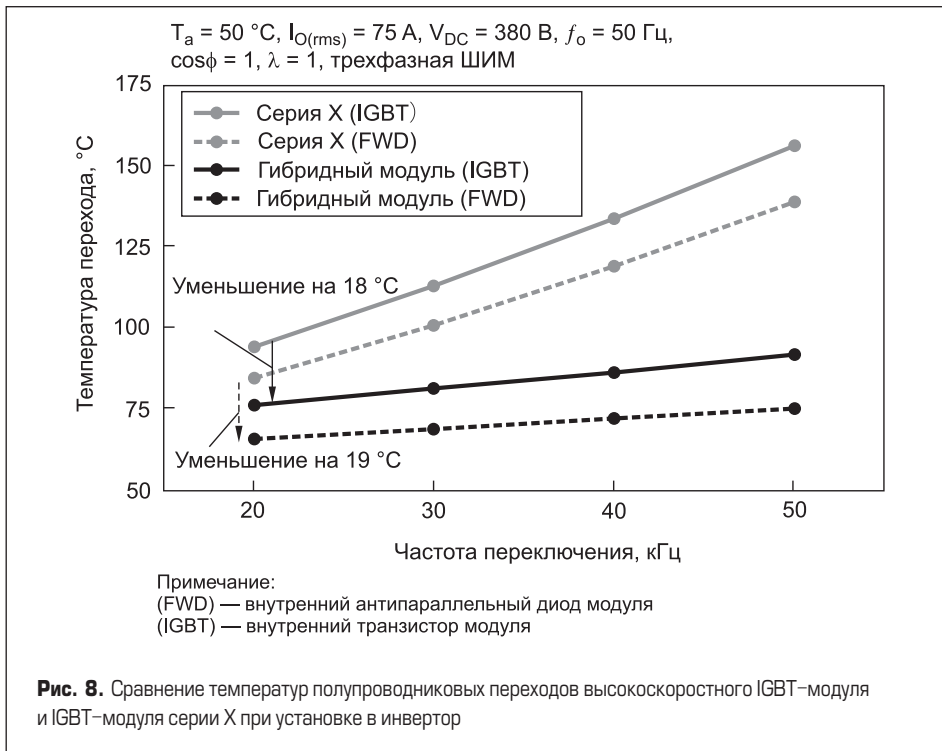


Рис. 7. Сравнение потерь в инверторе для высокоскоростного IGBT-модуля и IGBT-модуля серии X, полученное на основе моделирования

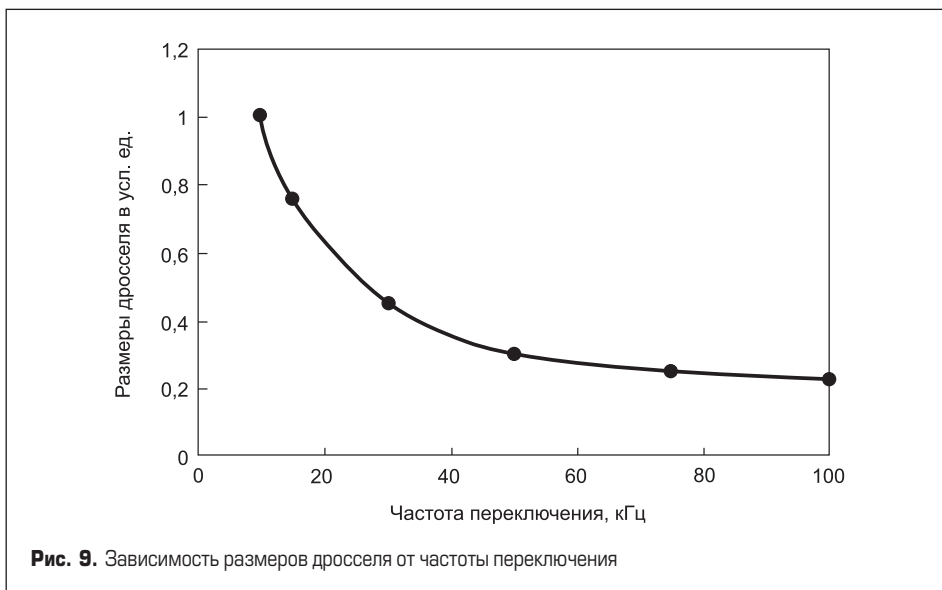


IGBT-модуля серии X с кремниевым диодом (Si). Это позволяет увеличить нагрузку инвертора и использовать преобразование энергии на более высоких частотах, что, в свою очередь, увеличивает удельную объемную плотность мощности инвертора, сократив его габариты.

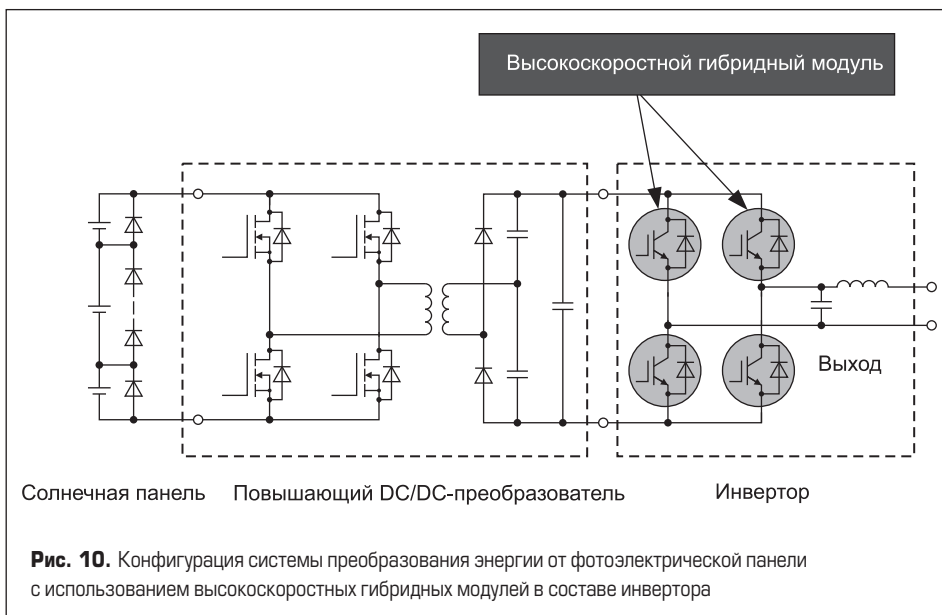
Практические примеры использования новых высокоскоростных гибридных IGBT в оборудовании для преобразования энергии

На рис. 9 показана зависимость размеров реактивного компонента (в нашем случае — дросселя) от частоты переключения. При увеличении частоты переключения с 10 до 30 кГц объем дросселя можно уменьшить примерно на 50%. Миниатюризация пассивных компонентов, таких как дроссели, позволяет с помощью высокоскоростного переключения уменьшить размер всего блока, что, скорее всего, может привести и к снижению себестоимости преобразователя.

Примеры использования высокоскоростного гибридного модуля в системах преобразования энергии и ИБП можно видеть на рис. 10 и 11. Спрос на небольшие легкие инверторы возрастает из-за распространения систем солнечной энергетики. В свою очередь резервные конфигурации питания на основе ИБП необходимы для обеспечения высокой надежности серверов и центров обработки данных. Существует растущая потребность и в миниатюрных ИБП, поскольку конфигурации с резервированием часто требуют использования нескольких систем. Благодаря применению высокоскоростных гибридных модулей оборудование становится компактным и легким, поскольку повышенная рабочая частота помогает миниатюризировать конденсаторы и дроссели для фильтров, которые, как правило, имеют большие объемы и массу. Кроме того, ожидается, что низкие потери при использовании высокой частоты помогут повысить эффективность преобразования энергии.



На рис. 12 показан пример использования высокоскоростного гибридного модуля для блока преобразования энергии, применяемого в сварочном аппарате. Здесь высокоскоростное переключение требуется в первую очередь для миниатюризации трансформатора. Это решение для преобразования энергии с высокочастотной системой изоляции может найти применение в таком оборудовании, как сварочные аппараты, плазменные резаки и печи индукционного нагрева. В приложениях подобного типа для снижения потерь и шума при высокоскоростном переключении предусмотрена система с резонансным контуром. Поскольку в схеме имеется высокоскоростное переключение на частотах 20 кГц и выше, то благодаря использованию высокоскоростного гибридного модуля резонансная часть системы может быть значительно уменьшена, что способствует миниатюризации и эффективности оборудования в целом.



Кроме того, ожидается, что модуль будет применяться и в источниках питания медицинской аппаратуры (например, источники рентгеновского излучения), а также в быстрых зарядных устройствах электромобилей и газовых турбин. Все это оборудование также требует дальнейшей миниатюризации, сокращения веса и повышения эффективности.

Заключение

В этой статье представлены новые, разрабатываемые специалистами компании Fuji Electric высокоскоростные гибридные модули серии VW, которые сочетают преимущества высокоскоростных IGBT и карбид-кремниевых диодов Шиттки — SiC-SBD. Используемый в новых модулях оптимизированный для работы с высокими скоростями переключения IGBT-транзистор снижает потери при выключении, а SiC-SBD-диод, в свою очередь, уменьшает потери при включении, тем самым позволяя модулю достигать характеристик с низкими потерями во время работы на высоких частотах.

По мере роста спроса на приложения, использующие преобразование энергии, которым требуется высокая эффективность и компактность, компания Fuji Electric планирует продолжить поиск путей для дальнейшего снижения потерь в IGBT-модулях. Создавая новые, еще более совершенные продукты, отвечающие требованиям рынка и способствующие защите окружающей среды, компания стремится внести свой вклад в экономию энергии и сокращение выбросов углекислого газа в атмосферу.

Литература

1. Винтрих А. (Wintrich A.), Николаи У. (Nicolai U.), Турски В. (Tursky W.), Райманн Т. (Reimann T.). Малоизвестные факты из жизни IGBT и FWD. Часть 1. Особенности FWD // Силовая электроника. 2012. № 5.
2. Винтрих А. (Wintrich A.), Николаи У. (Nicolai U.), Турски В. (Tursky W.), Райманн Т. (Reimann T.). Малоизвестные факты из жизни IGBT и FWD. Часть 2. IGBT // Силовая электроника. 2012. № 6.
3. Винтрих А. (Wintrich A.), Николаи У. (Nicolai U.), Турски В. (Tursky W.), Райманн Т. (Reimann T.). Малоизвестные факты из жизни IGBT и FWD. Часть 3. Прямое восстановление и реверсивный режим работы IGBT // Силовая электроника. 2012. № 7.
4. IGBT Hybrid SiC Modules. www.fujielectric.com/products/semiconductor/model/sic/hybrid.html
5. www.fujielectric.com/products/semiconductor/model/igbt/2pack.html
6. Hara Y. et al. High-Speed Discrete IGBT “High-Speed W-Series” // FUJI ELECTRIC REVIEW. 2015. Vol. 61. No. 4.
7. Onezawa T. et al. 1,700-V Withstand Voltage SiC Hybrid Module // FUJI ELECTRIC REVIEW. 2015. Vol. 61. No. 4.

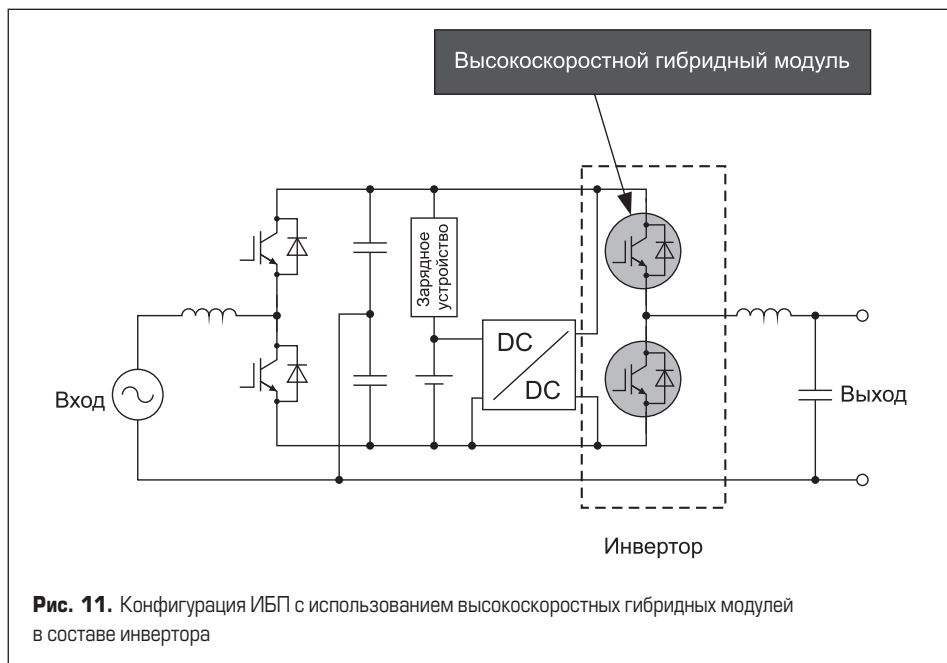


Рис. 11. Конфигурация ИБП с использованием высокоскоростных гибридных модулей в составе инвертора

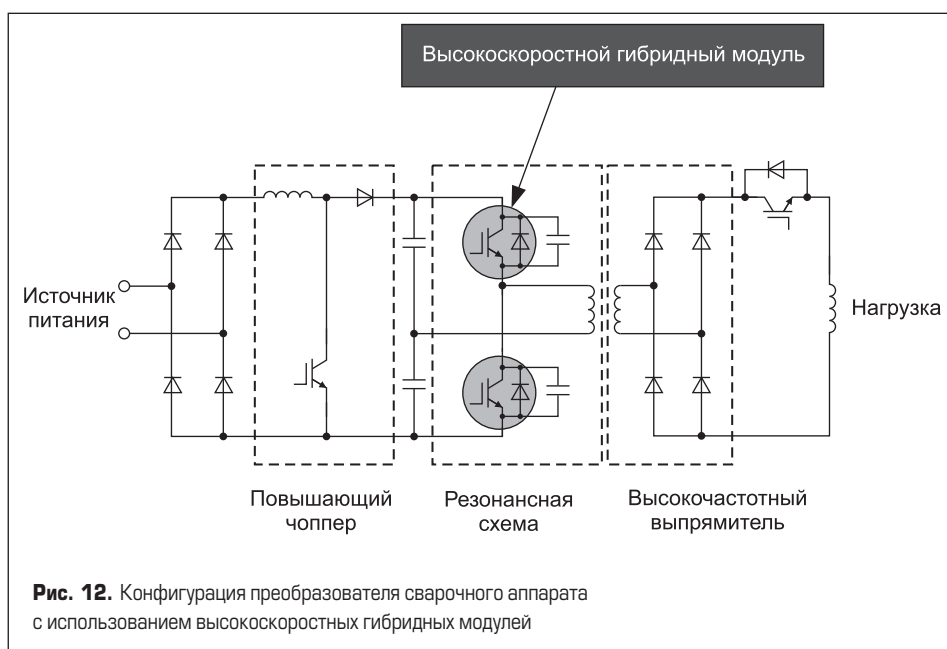


Рис. 12. Конфигурация преобразователя сварочного аппарата с использованием высокоскоростных гибридных модулей