Седьмое поколение IGBT-модулей «Мицубиси Электрик»

с блокирующим напряжением 1,7 кВ

Основными требованиями, предъявляемыми к общепромышленным системам электроприводов и источникам питания, являются высокая надежность, эффективность и большая плотность мощности при конкурентной стоимости. Главный фактор для достижения всех перечисленных свойств — уровень потерь мощности в ключах. Снижение потерь позволяет сократить температуру кристаллов. В результате увеличивается срок службы модулей и уменьшаются габариты системы охлаждения. Для удовлетворения вышеперечисленных требований компанией «Мицубиси Электрик» была разработана линейка IGBT–модулей с кристаллами седьмого поколения на 1,7 кВ.

Масаоми Миязава (Masaomi Miyazawa)

Томас Радке (Thomas Radke)

Нарендер Лакшманан (Narender Lakshmanan)

Виктор Толстопятов

victor.tolstopyatov@mer.mee.com

Введение

Седьмое поколение промышленных IGBT-модулей «Мицубиси Электрик» NX7 для классов напряжений 650 и 1200 В было анонсировано в 2015 году. За неполные три года присутствия на рынке данная серия модулей получила широкое распространение и доказала свою эффективность. За счет уникальной технологии корпусирования без использования керамики (которая подробно была описана в [1]), а также кристаллов последнего поколения модули серии NX7 отличаются низкими потерями, высокой тепловой производительностью при сравнительно низкой стоимости. В 2018 году данная серия модулей получила свое логическое продолжение, и в массовое производство поступили IGBT-модули с блокирующим напряжением 1700 В.

Как известно, увеличение частоты ШИМ транзисторных модулей позволяет не только уменьшить габариты выходных фильтров преобразователя, но и повысить синусоидальность выходного напряжения инвертора, что, в свою очередь, снижает потери в двигателе за счет меньшего числа паразитных гармоник. К сожалению, доступные в данный момент на рынке IGBT-модули в классе напряжения 1700 В редко позволяют разработчикам поднять частоту ШИМ выше 1–1,5 кГц. Именно поэтому при разработке линейки модулей NX7 основной задачей, которую ставили перед собой разработчики, было снижение динамических потерь при переключении транзисторов и обратном восстановлении диодов. Для решения этой проблемы в модулях используются новейшие траншейные IGBT-кристаллы и диоды, выполненные по технологии RFC (Relaxed Field of Cathode — катод с ослабленным полем), обеспечивающей его «мягкое» восстановление.

Сегодня в массовое производство поступили модули в диапазоне номинальных токов 100–600 А, также в разработке находятся модули с током до 1200 А.

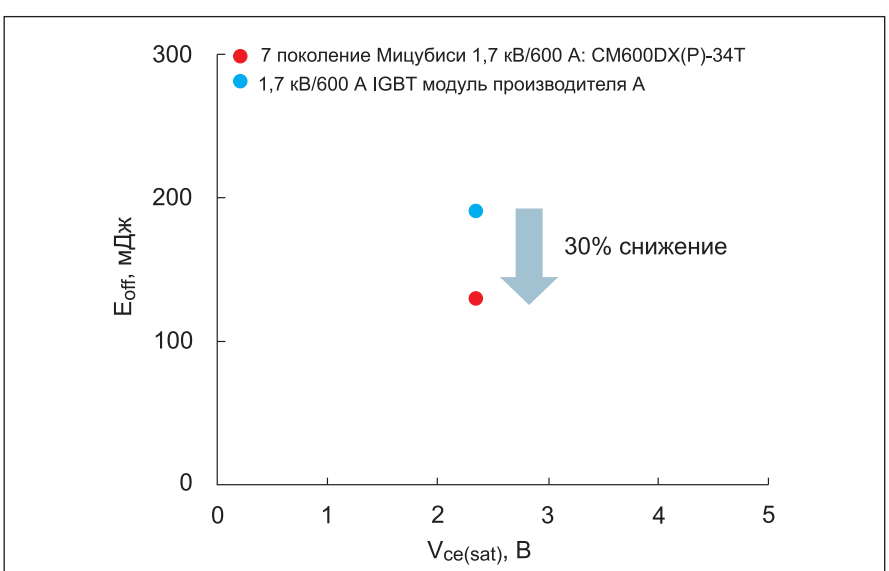

Рис. 1. Сравнение потерь V_{CEsat} и E_{off} в транзисторе

Производительность кристаллов седьмого поколения

Первые кристаллы транзисторов траншейного типа (CSTBT — Carrier Stored Trench Gate Bipolar Transistor) анонсированы компанией «Мицубиси Электрик» в 1996 году [2]. От поколения к поколению толщина чипов IGBT и диодов уменьшалась, а структура оптимизировалась с целью уменьшения как статических, так и динамических потерь. Текущее поколение, уже седьмое по счету, обладает лучшими показателями производительности в сравнении не только с пред-

ыдущими сериями, но и с другими конкурентными решениями, доступными на рынке.

Кристаллы IGBT

Благодаря измененной МОП-структуре, новой технологии пассивации, а также уменьшенной толщине чипов (более подробно в [1]) в седьмом поколении транзисторов были снижены потери и достигнут отличный контроль над процессом выключения тока путем изменения сопротивления затвора R_{OFF}. Последняя особенность важна для уменьшения электромагнитных помех (ЭМП) в устройстве. Приведем сравнение потерь V_{CEsat} и E_{off} на 600 А кристалле новой серии с условно средним показателем чипов модулей других производителей (А) (рис. 1). Из рисунка видно, что потери на выключение E_{off} в новых модулях на 30% меньше при том же падении напряжения на кристалле.

Кристаллы диода

Чипы диодов выполнены с использованием уже упомянутой RFC-технологии. Она позволяет снизить потери в диоде за счет более быстрого процесса обратного восстановления, избежав при этом нежелательных осцилляций тока. Эта уникальная структура представляет собой, по сути, классический диод, состоящий из последовательных слоев кремния с *p*- и *n*-проводимостью, на катод которого частично помещен слой с дырочной (*p*) проводимостью (рис. 2). В результате в ходе восстановления диода в *p-n*-переход инжектируются дырки со стороны катода и форма тока приобретает апериодический характер (рис. 3).

Итоговые потери в диоде наглядно показаны на рис. 4, из которого видно, что энергия восстановления E_{rr} приблизительно на 50% ниже в сравнении с классическими диодами. Меньший заряд восстановления Q_{rr} также снижает потери на включение противопоставленного IGBT-транзистора.

Суммарные потери в модулях

Симуляция потерь в модуле была выполнена с использованием свободно распространяемой программной среды Melcosim [3]. На рис. 5 приведены суммарные потери в модулях с рабочим током 600 А и блокирующим напряжением 1700 В: CM600DX(P)-34T [4] и производителя А. Из рисунка видно, что при типовых значениях ШИМ-частоты 2 кГц суммарные потери в модуле седьмого поколения приблизительно на 30% ниже. Основное снижение потерь при этом осуществляется за счет меньших динамических потерь в диоде и IGBT-транзисторе. Для радиатора охлаждения с тепловым сопротивлением $R_{th(s-a)}$ = 90 К/кВт результирующая температура IGBT-чипов T_j на 22 °С ниже при прочих равных условиях. Другими словами, если привести температуру кристаллов к одному значению, то результирующий выходной ток в случае с модулем CM600DX(P)-34T будет на 30% выше.

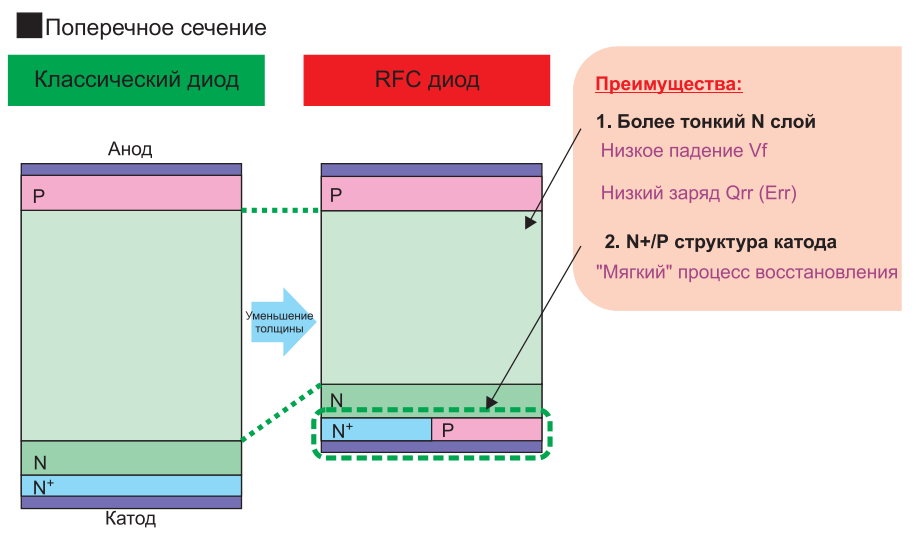

Рис. 2. Схематичное изображение поперечного сечения RFC–диода

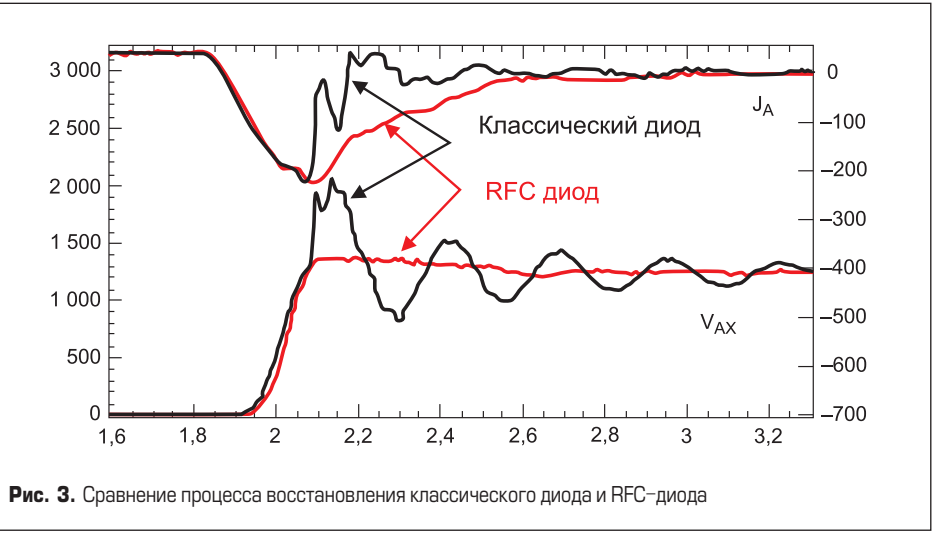

Рис. 3. Сравнение процесса восстановления классического диода и RFC–диода

Зависимость суммарных потерь в модулях как функция частоты переключения ШИМ показана на рис. 6. График демонстрирует, что с ростом частоты ШИМ разница в потерях становится больше. К примеру, потери в модуле производителя А на 2 кГц находятся приблизительно на том же уровне, что потери в модуле CM600DX(P)-34T на 4 кГц. В итоге при прочих равных условиях частота коммутации с модулями седьмой серии может быть

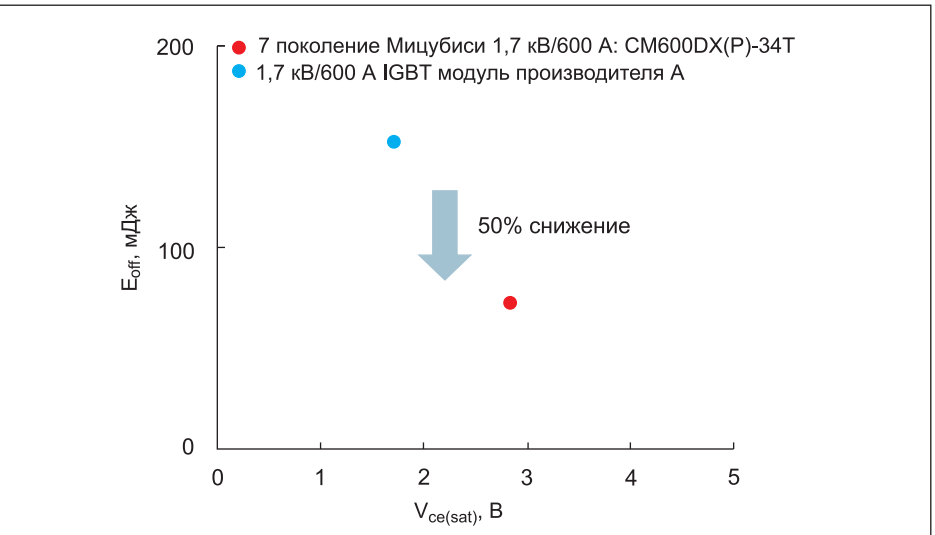

Рис. 4. Сравнение потерь V_F и E_{rr} в диоде

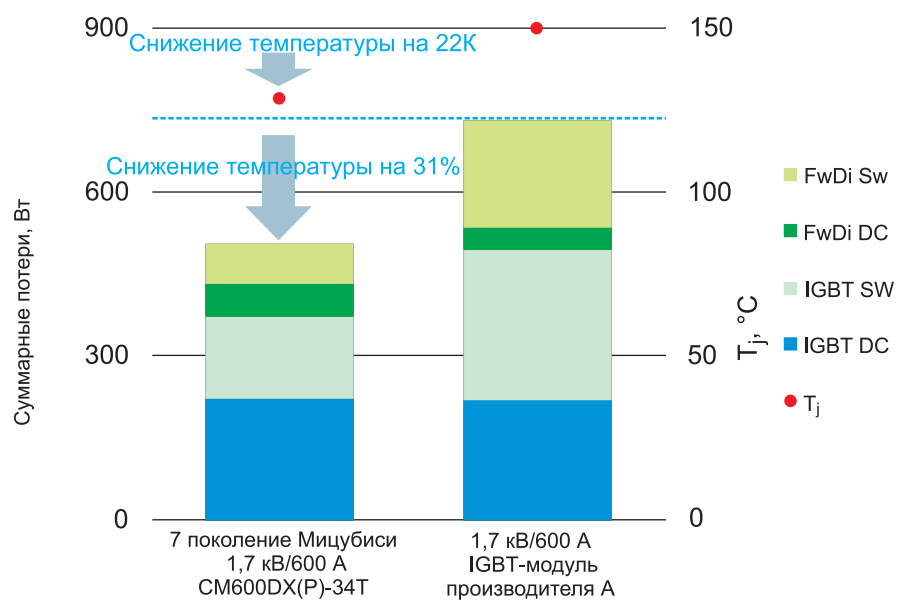

Рис. 5. Сравнение суммарных потерь в модулях (V_{CC} = 1000 В; I_O = 270 А; f_c = 2 кГц; cos(φ) = 0,8; M = 1; T_a = +40 °C; $R_{th(s-a)}$ = 90 К/кВт, R_G мин)

фактически удвоена. Увеличение частоты ШИМ позволяет ощутимо уменьшить размеры вторичных пассивных элементов (например, фильтрующих дросселей).

Расширенный модельный ряд

Для максимального удовлетворения всем потребностям рынка компания «Мицубиси Электрик» разработала широкую линейку IGBT-модулей класса напряжения 1,7 кВ. В таблице представлено 12 типов модулей в конструктиве низкопрофильных корпусов NX с номинальным током 100–600 А, а также шесть модулей в классических корпусах с током 75–400 А. Приборы в конструктиве NX доступны в двух модификациях: с традиционными управляющими выводами под пайку, с пружинными выводами (Press Fit), не требующими пайки при сборке. Данная технология позволяет ускорить монтаж печатной платы драйвера.

Все силовые модули седьмой серии типа NX выполнены по технологии SLC (Solid Cover — «жесткое покрытие») без использования керамики, за счет чего достигается высокое число длинных термоциклов, а следовательно, более длительный срок службы. Также с помощью данной технологии была уменьшена внутренняя индуктивность модуля за счет отсутствия проводников, которые в классических модулях используются для соединения керамических пластин между собой. Более подробно об этом рассказано в [1].

Что касается модулей в стандартных корпусах (табл.), из-за их меньшей площади использование технологии SLC в них нецелесообразно. Поэтому здесь предусмотрено прямое соединение керамики из нитрида кремния с медным основанием без помощи пайки, что также увеличивает количество длинных термоциклов и срок службы модуля [5]. Внутренняя индуктивность модуля уменьшена за счет улучшенной конструкции внутренних шин, а расстояние между силовыми выводами изменено на 28 мм, что является стандартом на европейском рынке.

Все модули седьмой серии опционально доступны для заказа с преднанесенным термоинтерфейсом PC-TIM (Phase Change Termal Interface Material — термоинтерфейс с изменяемой фазой). Использование таких IGBT позволяет еще больше упростить сборку преобразователя.

Помимо приборов в корпусах NX, в разработке находится полумостовой модуль с большим рейтингом тока. Новый корпус, показанный на рис. 7, имеет размеры 100×144×40 мм и оснащен кристаллами седьмого поколения, рассчитанными на рабочий ток до 1200 А в классе напряжения 1,7 кВ. Данный модуль имеет оптимизированный для параллельного включения конструктив (симметричное исполнение, низкая внутренняя индуктивность) для тех случаев, когда необходим еще больший выходной ток инвертора. Технология корпусирования используется та же, что и для модулей линейки NX7 (SLC-структура без керамики), за счет чего обеспечивается большое количество термоциклов, а следовательно, более длинный срок службы.

Заключение

Резюмируя сказанное, можно сделать вывод, что IGBT-кристаллы седьмого поколения на 1700 В имеют на 30% лучшие характеристики V_{CEsat} и E_{off}, а потери на восстановление диодов E_{rr} снижены на 50%. С использованием новых модулей сокращение суммарных потерь составляет около 30%. В сравнении с модулями других производителей, доступными на рынке, IGBT-приборы седьмой серии позволяют при прочих равных условиях снизить температуру кристаллов на 22 °C либо вдвое увеличить частоту ШИМ.

В сумме в классе напряжения 1,7 кВ представлено 18 приборов в различных конструк-

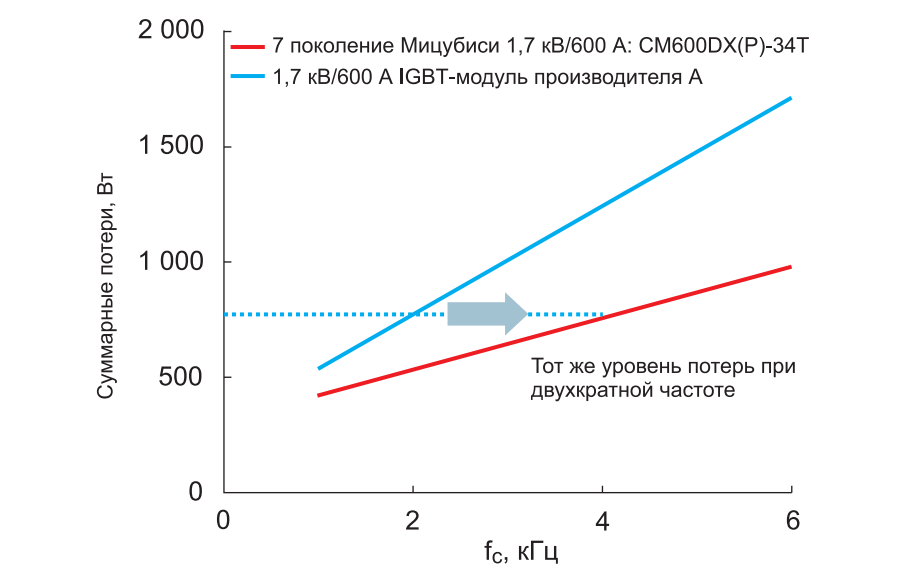

Рис. 6. Зависимость суммарных потерь в модулях от частоты ШИМ (V_{CC} = 1000 В; I_O = 270 А; cos(φ) = 0,8; M = 1; T_a = +40 °C; $R_{th(s-a)}$ = 90 К/кВт; R_G мин)

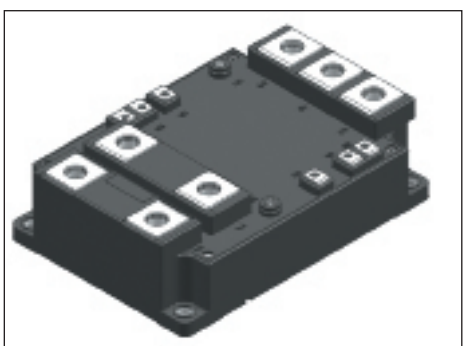

Рис. 7. IGBT-модуль увеличенной мощности в новом корпусе

тивных исполнениях, охватывающих широкий диапазон токов. Также в разработке находятся более мощные модули в новых корпусах, которые обеспечат еще больший охват токов для покрытия всех потребностей рынка силовых полупроводников.

Литература

1. Толстопятов В., Радке Т., Масуда К. Седьмое поколение IGBT-модулей с новой SLC-технологией // Силовая электроника. 2015. № 4.
2. Takahashi H. et al. Carrier Stored Trench-Gate Bipolar Transistor (CSTBT) — A Novel Power Device for High Voltage Application. Maui, USA, ISPSD, 1996.
3. Melcosim Simulation software. www.mitsubishielectric.com/semiconductors/simulator/index.html
4. Datasheet CM600DX(P)-34T www.mitsubishielectric.com/semiconductors/php/oPartProfile.php?FILENAME=cm600dx-34t_e.pdf&FOLDER=/product/powermodule/igbt/t_series
5. Miyazawa M. et al. 7th Generation IGBT Module for Industrial Applications. Nuremberg, Germany, PCIM Europe, 2014.

Таблица. Доступные IGBT-модули седьмой серии

Тип корпуса	Модель	Ток, А	Класс напряжения	Топология	Размеры Ш×Д (мм)	Внешний вид
Низкопрофильный корпус типа NX	CM100TX(P)-34T	100	1,7 кВ	6 в 1	62×122	
	CM150TX(P)-34T	150				
	CM225TX(P)-34T	225		2 в 1	62×152	
Выводы управления под пайку/ пружинные	CM300TX(P)-34T	300				
	CM450TX(P)-34T	450				
	CM600TX(P)-34T	600				
Стандартный корпус	CM75DY-34T	75			34×94	
	CM100DY-34T	100				
	CM150DY-34T	150			48×94	
	CM200DY-34T	200				
	CM300DY-34T	300			62×108	
	CM400DY-34T	400				

* символ «P» означает Press-Fit Pin – пружинные выводы, не требующие пайки. Например, CM600DXP-34T.