

Силовые 1700-В модули HVIGBT X-серии

с превосходной производительностью
и высокой надежностью

Высокоэффективные силовые HVIGBT-модули с блокирующим напряжением 1700 В, обеспечивающие надежные решения для железнодорожного транспорта. Для нужд железнодорожного транспорта требуются особо качественные компоненты с высокой эффективностью, особенно это касается преобразовательных приводов, которые должны иметь в своей основе надежные коммутационные устройства, устойчивые к крайне жестким условиям окружающей среды, характерной для эксплуатации железнодорожного транспорта. **Общепринятой практикой для работы непосредственно в контактной сети с напряжением постоянного тока до 1000 В или в трехуровневой конфигурации с напряжением контактной сети постоянного тока выше 1000 В является использование IGBT-модулей с блокирующим (рабочим) напряжением 1700 В.**

**Евгений Виснер
(Eugen Wiesner)**

**д-р Нильс Зольтау
(Dr. Nils Soltau)**

**Нобухико Танака
(Nobuhiko Tanaka)**

**Перевод:
Владимир Рентюк**

В связи с вышесказанным компания Mitsubishi Electric постоянно проводит работы по улучшению качества своих силовых IGBT-модулей (IGBT — Insulated Gate Bipolar Transistor, биполярный транзистор с изолированным затвором), в основе используемого компанией подхода лежат три ключевые концепции:

- Обеспечение устойчивости к воздействиям жесткой среды эксплуатации: конструкция силового

модуля выполнена с учетом достаточно большого запаса зоны безопасной работы.

- Достижение низких потерь мощности благодаря использованию кристаллов (чипов) последнего поколения.
- Контроль качества на специально выделенных производственных линиях и прослеживаемость работы модулей, то есть получение данных об их надежности из мест эксплуатации.

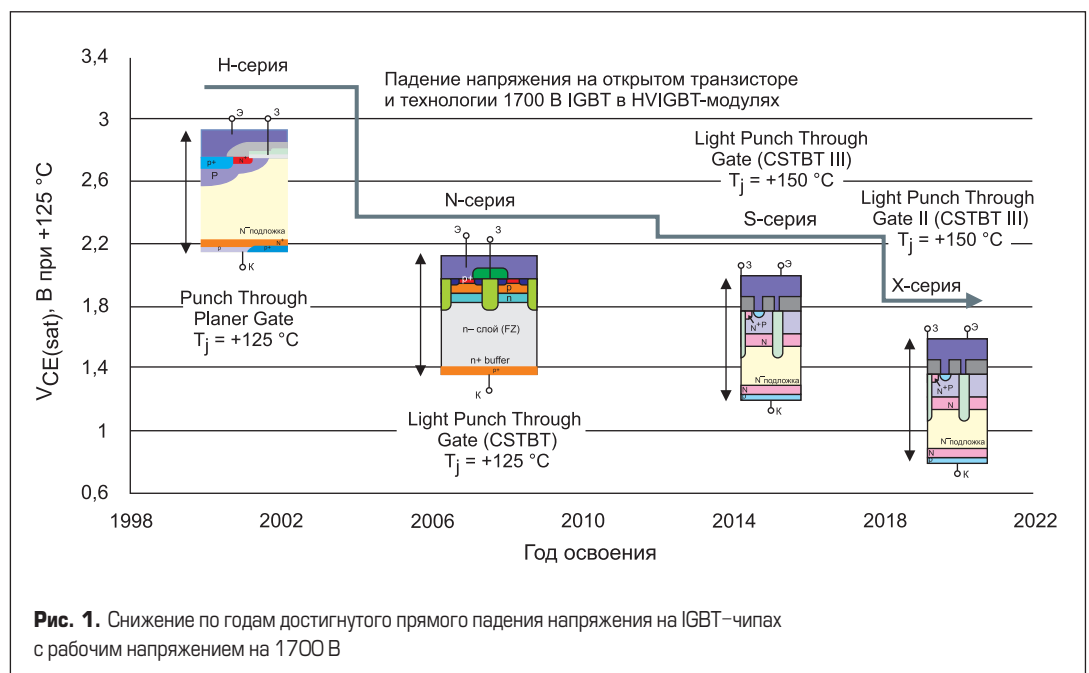


Рис. 1. Снижение по годам достигнутого прямого падения напряжения на IGBT-чипах с рабочим напряжением на 1700 В

Компания Mitsubishi Electric имеет многолетний опыт и уже достаточно долгую историю разработки модулей, в том числе и рассчитанных на рабочее напряжение 1700 В, предназначенных для эксплуатации в составе оборудования подвижного состава железных дорог, которые уже широко используются с начала текущего столетия. В этом году Mitsubishi Electric выпустила силовые 1700-В IGBT-модули последнего поколения под названием «Х-серия». Модули удовлетворяют всевозрастающим требованиям для современных железнодорожных приложений. На рис. 1 показана историческая эволюция HVIGBT-модулей (HVIGBT — High Voltage IGBT, высоковольтный биполярный транзистор с изолированным затвором) на рабочее напряжение 1700 В, указывающая на постоянное снижение прямого падения напряжения на входящих в состав модуля IGBT-транзисторах. Такое уменьшение прямого падения напряжения способствует снижению потерь мощности преобразователя. Как можно видеть из диаграммы на рис. 1, это снижение падения напряжения на IGBT-транзисторах достигалось при создании каждой новой серии. Замечательным шагом в снижении прямого падения напряжения стало внедрение в начале 2000-х годов технологии пазовой структуры затвора (Trench Gate Structure) [1].

Для дальнейшего снижения прямого падения напряжения структура IGBT-чипа была оптимизирована, при этом использовались все более тонкие базовые кристаллы. В последних 1700-В чипах Х-серии применена более современная технология чипов седьмого поколения в сочетании с дальнейшим уменьшением толщины IGBT-транзисторов. Кроме того, проведено несколько оптимизаций и на обратной стороне чипа (на стороне коллектора).

1700-В модули Х-серии представлены в виде трех комплектов. Первый — модуль в обычном корпусе с габаритными размерами 190×140 мм. Второй вариант также традиционный, с размером 130×140 мм. Третий модуль — это как раз новый модуль LV100 в стандартизованном двойном корпусе, занимающий площадь всего 140×100 мм. Полная линейка коммерчески доступных 1700-В IGBT-модулей Х-серии показана в таблице.

Сильноточные одиночные 1700-В модули HVIGBT Х-серии





Обычные корпуса с конфигурацией «1 в 1», по сравнению с предыдущей N-серией, были полностью переработаны (рис. 2). Компоновка чипа внутри модуля оптимизирована для достижения лучшей теплопроводности и увеличения срока службы в части циклов переключения под нагрузкой. Внутри модуля — новый высокоэффективный силиконовый гель. В настоящее время рабочая температура этих модулей охватывает диапазон -50...+150 °С. Новые модули Х-серии получают сертификат UL (требования по пожаробезопасности). Кроме того, они были проверены во время квалификационных испытаний на устойчивость к воздействию повышенной влажности. Это важный фактор для работы в жестких условиях, характерных для эксплуатации на подвижном железнодорожном составе и не только.

Что касается стандартного типа корпусирования, он доступен на рынке уже много лет. Так что производители преобразователей доказали достоверность данных о надежности конвертеров, имеющих этот тип корпусирования, не только в экспериментальных, но и в полевых условиях. Теперь настал черед повысить технические характеристики преобразователя, используя уже новые передовые технологии модулей Х-серии. Небольшой размер корпуса (130×140 мм) — излюбленный выбор для компактного применения в решениях с водяным охлаждением. Большой корпус (190×140 мм) с низким тепловым сопротивлением радиатора $R_{th(c-f)}$ особенно привлекателен для решений с воздушным охлаждением. На рис. 3 показан потенциал снижения потерь мощности для одного устройства Х-серии CM2400HCB-34X по сравнению с предыдущим прибором N-серии.

Двойные 1700-В модули LV100 Х-серии

Стандартный корпус для новых высоковольтных полумостовых модулей HVIGBT типа LV100 был разработан с целью решить проблемы, характерные для приборов с высокой скоростью переключения, таких как 1700-В модули Х-серии и модули на основе технологии карбида кремния (SiC). Низкоиндуктивная структура подключений данного корпуса — одно из ключевых преимуществ этого устройства (рис. 4).

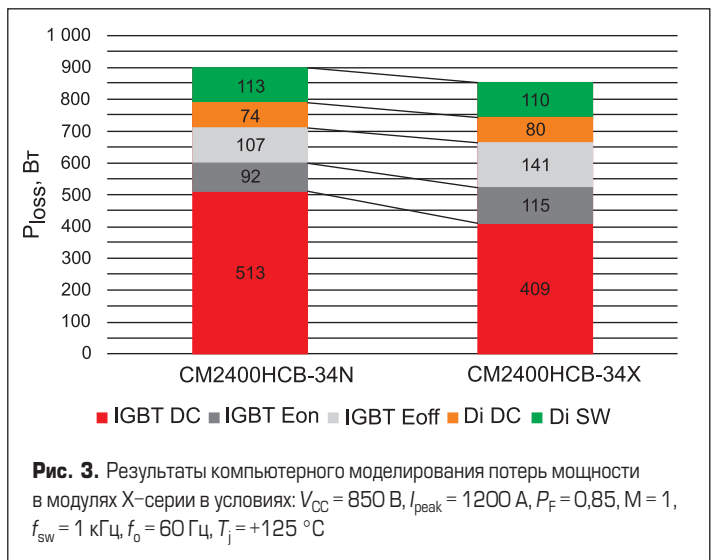

Таблица. Линейка коммерчески доступных 1700-В модулей Х-серии

Схема	Габаритные размеры и внешний вид модуля	Номинальный рабочий ток	Наименование
Одиночная «1 в 1»	 190×140 мм	2400 А 3600 А	CM2400HCB-34X CM3600HC-34X
Одиночная «1 в 1»	 130×140 мм	1600 А 2400 А	CM1600HC-34X CM2400HC-34X
Чоппер	 130×140 мм	1200 А	CM1200E4C-34X
Сдвоенная «2 в 1»	 100×140 мм	1000 А 1200 А 1200 А	CM1000DC-34X (Si) CM1200DC-34X (Si) CMH1200DC-34X (SiC hybrid)



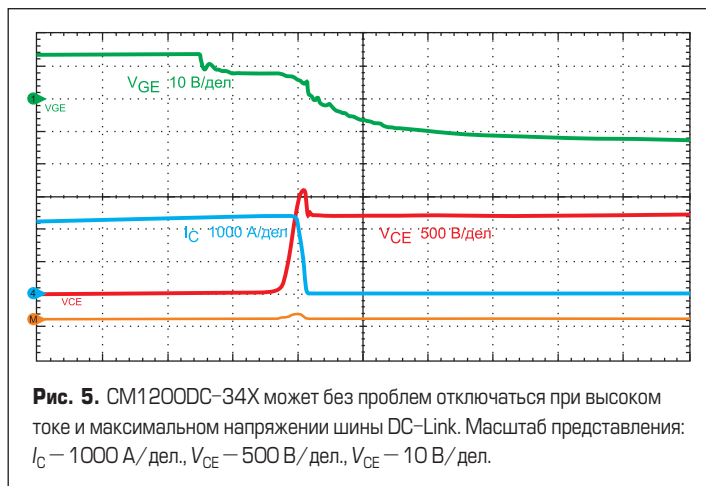
- Улучшенная производительность ток/мощность
- Высокотемпературный гель
- Основание Al-SiC
- Низкое температурное сопротивление
- Сертификат UL

Рис. 2. Особенности одиночных модулей 1700 В Х-серии

- Низкая паразитная индуктивность
- Простое параллельное включение
- Диод с улучшенными характеристиками
- Бессвинцовый припой
- Готовность к SiC-технологии

Рис. 4. Особенности двойных модулей 1700 В Х-серии



Благодаря низкой собственной индуктивности, характерной для данного варианта корпусирования, и удобной конструкции подключения шины постоянного тока DC-Link устройство можно отключить при высоком токе без увеличения сопротивления в цепи затвора. Результаты измерения характеристики выключения IGBT при максимальных условиях выключения, а именно: $V_{CC} = 1200$ В, $I_C = 2400$ А, $R_{g(off)} = R_{g(nominal)}$, $L_s = 40$ нГ и $T_j = +150$ °С, показаны на рис. 5. Даже в таких условиях выброс перенапряжения в виде характерной «иголки», оказался ниже максимального блокирующего напряжения, равного 1700 В.

Кроме того, в модуле LV100 по сравнению с предыдущей S-серией были улучшены характеристики встроенного защитного (антипараллельного) диода (FWDi), прямое падение напряжения на диоде было снижено более чем на 15%. В то же время энергия обратного восстановления была сокращена более чем на 25%.

Плотность тока модулей в корпусе LV100 для CM1200DC-34X по сравнению с устройством CM2400HC-34N была увеличена примерно на 30%, с 13,2 до 17,1 А/см². Для передачи высокого выходного тока устройство имеет три винта на выходной клемме переменного тока.

Падение напряжения на открытом IGBT-транзисторе и на его антипараллельном диоде FWDi имеет положительные температурные коэффициенты, что важно для слаженной параллельной работы модулей.

Кроме того, корпус обеспечивает гибкость масштабирования мощности преобразователя путем параллельного подключения модулей. Нельзя забывать, что этот момент также является дополнительной проблемой для разработчика преобразователя. Чтобы преодолеть ее, в сочетании с этими модулями можно использовать предлагаемую в [2] специальную испытательную установку, что облегчит выполнение поставленной задачи.

Заключение

Представленная 1700-В X-серия IGBT-модулей использует передовые технологии изготовления чипов и корпусирования. Полученные в результате объединения передовых подходов и технологий, модули обеспечивают высокую надежность в сочетании с низкими потерями мощности и предоставляют разработчику необходимую гибкость при проектировании выполненных на их основе конечных продуктов.

Литература

1. Iura S., Suekawa E., Morishita K., Koga M., Thal E. New 1700V IGBT Modules with CSTBT. PCIM Europe, 2004.
2. Dr. Weigel J. Paralleling of High Power Dual Modules: Standard Building Block Design for Evaluation of Module Related Current Mismatch. EPE'18 ECCE Europe, 2018.