

# Силавые модули в корпусах PrimePACK

## С ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТЬЮ

**Повышение удельной мощности, снижение потерь и увеличение надежности — основные задачи, которые стоят перед разработчиками силавых модулей. Новые модули в корпусах PrimePACK — это результат работы специалистов Fuji Electric над оптимизацией конструкции по механическим, тепловым и электромагнитным параметрам.**

**Масахито Отсуки  
(Masahito Otsuki)**

**Питер Дитрих  
(Peter Dietrich)**

**Томас Хайнцель  
(Thomas Heinzl)**

**Перевод: Тимур Панков**

timur.pankov@fujielectric-europe.com

### Введение

До настоящего времени модули большой мощности (High Power Modules, HPM) в хорошо известных стандартных корпусах на токи 1200–3600 А и напряжения 1200–1700 В с размерами оснований 130×140 или 190×140 мм были доступны только в одноключевом исполнении. В других стандартных корпусах типа 62 мм, EconoDUAL или SEMIX3 с напряжением 1200 В максимально доступный уровень тока для модулей Fuji Electric был 600 А.

При использовании стандартных технических решений этот пробел до сих пор заполнялся только с использованием корпусов 130×140 мм HPM на ток 600, 800 и 1200 А с двумя разделенными ключами. Но и в этом случае они могут быть использованы как пара плеч только при разводке внешними шинами, что, как правило, отрицательно сказывается на частотных параметрах инвертора ввиду повышения паразитной индуктивности системы. Соединение верхнего и нижнего плеча имеет минимальную индуктивность, когда это соединение предусмотрено внутри самого модуля. Кроме того, конструкция инвертора при этом упрощается и становится более экономически выгодной.

Модули в корпусах PrimePACK имеют ряд конструктивно-технологических особенностей.

### Механические параметры

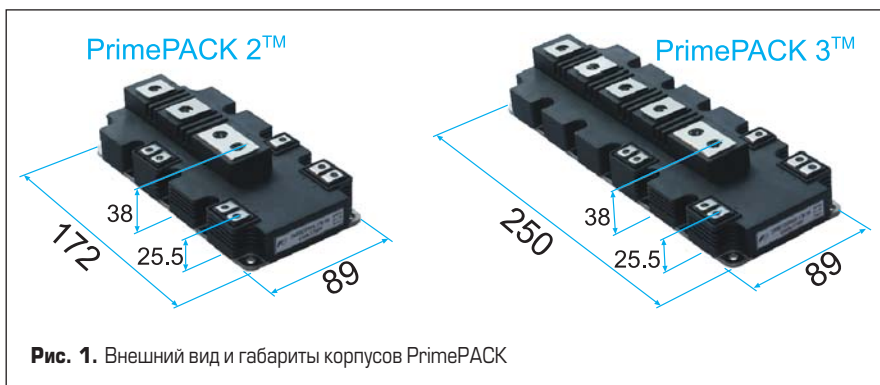
PrimePACK доступны в двух корпусах разных габаритных размеров — PP2 и PP3 (рис. 1). PP3 длиннее PP2 и имеет еще два силавых терминала. Первая пара терминалов в PP3 находится на той же позиции, как и в PP2. Поэтому есть возможность создавать инверторы разной мощности в одном общем конструктиве. В соответствии со стандартными HPM, высота модулей PrimePACK — 38 мм.

Удлиненная форма корпуса и специальное расположение терминалов позволяет монтировать модули параллельно друг другу и соединять их короткими проводниками. На обнижении корпуса спереди плата драйвера затворов может быть установлена как на верхнее, так и на нижнее плечо, и при этом не будет накрыта силавыми шинами. Терминалы с тыльной стороны остаются свободными для подключения питания. Это делает возможным использование трехслойной силавой шины для AC- и DC-подключения поверх всех терминалов. С другой стороны, при использовании двухслойной шины желательно оставить AC-терминалы свободными для раздельного подключения. Благодаря этим особенностям монтаж, проектирование и обслуживание становятся намного легче и экономически выгоднее. Механическое крепление силавых шин обеспечивается винтами M8. Для платы драйвера затвора посредством винтов M4 гарантируется качественное соединение даже в жестких условиях.

### Конструкция модуля

#### Ультразвуковая сварка

Одной из проблем создания новых корпусов является повышение удельной мощности без каких-либо



компромиссов в отношении надежности и габаритных размеров. Для снижения активных потерь на сопротивлении проводников электрические соединения внутри модуля производятся с использованием таких материалов, как медь и алюминий.

Из таблицы 1 следует, что по тепловым, электрическим и механическим параметрам медь обладает лучшими свойствами для создания внутренней разводки. До настоящего времени наиболее эффективным методом создания соединений силовых терминалов с DBC-подложками (Direct Copper Bonding) была пайка. Ультразвуковая сварка использовалась, как правило, для алюминия.

Использование припоя представляет собой ряд трудностей. Первая из них — создание соединения на химическом уровне. Наиболее серьезная проблема — это трещины при термоциклировании, вызванные разностью коэффициентов линейного расширения материалов. Такие трещины вызывают резкий рост теплового сопротивления. Еще одним слабым местом припоя является в пять раз меньшая механическая прочность по сравнению с медью.

Эти проблемы были решены благодаря разработке новой технологии, которая позволяет производить ультразвуковую сварку меди без дополнительных соединительных материалов, таких как припой. Эта технология позволяет присоединять внутренние шины модуля непосредственно к медной фольге DBC-подложки (рис. 2).

Ультразвуковая сварка значительно повышает надежность и вибропрочность соединений терминалов с подложкой модуля. На рис. 3 показан шлиф ультразвукового соединения после 300 термоциклов (пассив-

Таблица 1. Параметры материалов

Материал	Электрическое сопротивление, 10 <sup>-6</sup> Ом	Механическая прочность, Н/мм <sup>2</sup>	Теплопроводность, Вт/(мК)
Алюминий	2,5	60	240
Медь	1,5	325	390
Припой	11,5	50	68

Таблица 2. Соотношение свойств материалов

	Теплопроводность, Вт/(мК)	Толщина, мм	КТР, 10 <sup>-6</sup> /К
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18–25	0,25–0,38	7,1
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	70–90	0,32	3,4
AlN	170	0,64	4,6
Медь	360	3	16

ные циклы –40...+150 °С) без существенной деградации механической прочности.

Очевидные преимущества ультразвуковой сварки могут быть также доказаны численно. На рис. 4 показана величина разрывного усилия ультразвукового и стандартного соединения после 300 термоциклов. Разрывная сила, измеряемая в тесте, была приложена в вертикальном направлении (перпендикулярно плоскости контакта). Таким образом, новый процесс ультразвуковой сварки позволяет получить высокую механическую прочность соединения и стойкость к термоциклам.

**Материал пайки DCB**

Термические механические напряжения возникают, в основном, из-за сдвиговых сил, которые появляются в соединениях материалов с разными коэффициентами линейного расширения. Из-за сдвиговых деформаций возникают трещины, приводящие к резкому повышению теплового сопротивления. Инженеры Fuji Electric работают над увеличением стойкости к термоциклированию

модулей за счет уменьшения разности коэффициентов теплового расширения (КТР), а также путем улучшения механических параметров припоев.

В IGBT-модуле наибольшая разность КТР — между изолирующей керамической подложкой и медным основанием. Соотношение свойств для материалов приведено в таблице 2.

Fuji Electric провела много исследований по повышению надежности соединения медного основания с DCB. Наиболее широко используются бессвинцовые (RoHS) припой на основе олова и серебра. Они проходят тест 100 пассивных термоциклов (–40 °С (1 ч) ~ Н.У. (0,5 ч) ~ +150 °С (1 ч)), но не выдерживают 300 термоциклов, как показано на изображении SAT (Scanning Acoustic Tomography) на рис. 5. В 2002 г. Fuji Electric представила новый RoSH-совместимый припой с содержанием индия (In) для промышленного применения. Затем, в 2005 г., Fuji Electric разработала олово-сурьмянистый припой (Sn-Sb) для транспортного применения. Рис. 5 показывает, что соединения, выполненные при помощи этих материалов, выдерживают свыше

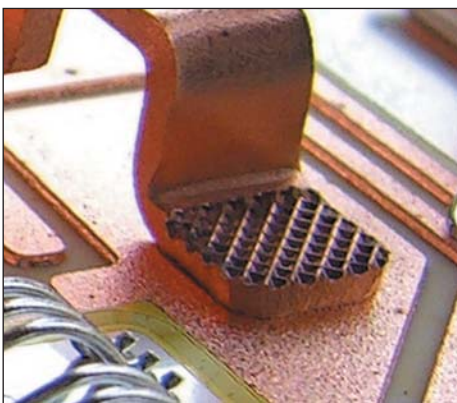


Рис. 2. Медный вывод, приваренный к DBC ультразвуковой сваркой



Рис. 3. Сечение ультразвукового соединения после 300 термоциклов (–40...+150 °С)

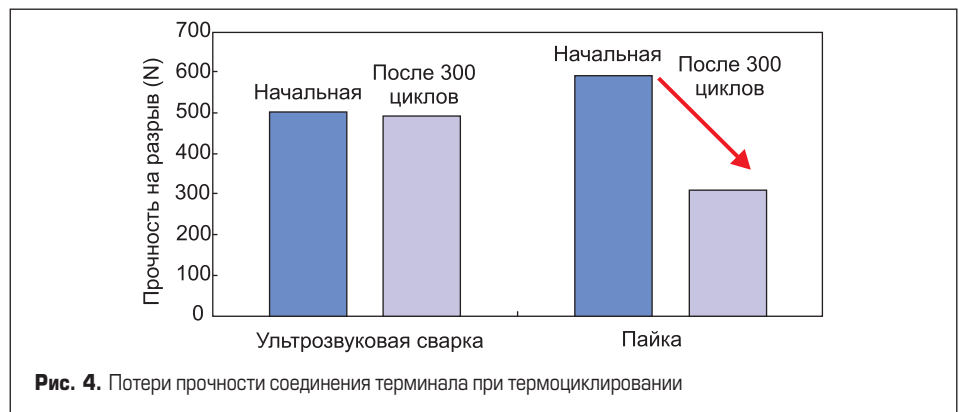


Рис. 4. Потери прочности соединения терминала при термоциклировании



Рис. 5. Сравнение площади расслоения для припоев Sn-Ag, Sn-Ag-In и Sn-Sb между медным основанием и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> DBC

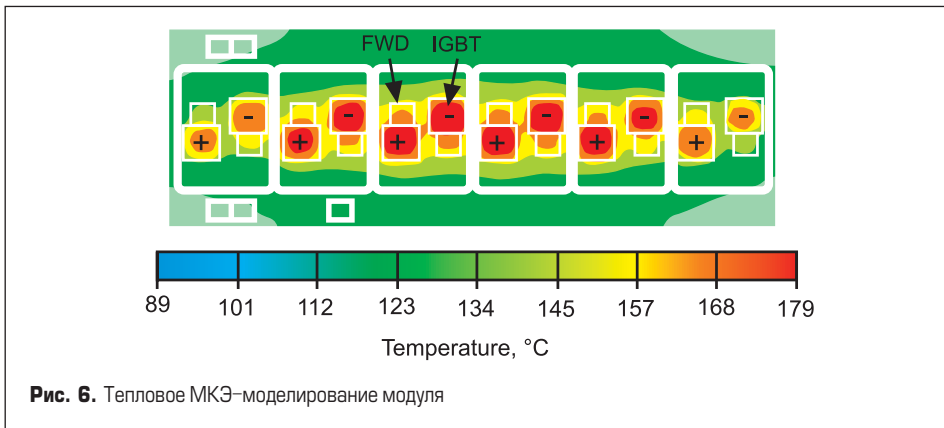


Рис. 7. Распределение теплопроводящей пасты после затяжки винтов модуля

Рис. 6. Тепловое МКЭ-моделирование модуля

300 термоциклов при одинаковых условиях теста. Причина высокой термоцикlostойкости заключается в том, что структура Sn-Ag-In и Sn-Sb не меняется при термических воздействиях. Поэтому механическая прочность остается прежней. Sn-Sb имеет более высокую температуру плавления, чем Sn-Ag-In, и, как предполагается, более высокую надежность. Соответствующие испытания еще не завершились.

Первое время Sn-Sb будет использоваться для промышленного применения в Fuji Electric PrimePACK модулях, чтобы повысить надежность для RoHS-совместимых промышленных изделий.

**Термические свойства**

**Оптимизация расположения чипов**

Еще одним важным фактором в работе модуля являются тепловые процессы. Пересечением тепловых потоков и тепловой связью между соседними IGBT и диодами на малых токах можно пренебречь. Но это правило не применимо для модулей с высокими плотностями токов, такими как PrimePACK. Здесь эффекты перекрестной тепловой связи должны приниматься во внимание для снижения воздействия на кристаллы, используемые в параллельных плечах. Поэтому кристаллы верхнего и нижнего плеч

расположены вдоль модуля для максимально возможного снижения тепловой связи. Кроме того, IGBT с антипараллельным диодом располагаются попеременно (в шахматном порядке). Это особенно важно, когда коэффициент мощности cosφ высокий (близкий к 1). Результирующее распределение температуры, показанное на рис. 6, не предполагает возникновения нежелательных горячих точек.

**Контакт к теплоотводу**

Все улучшения тепловых свойств могут быть эффективны, если результирующая мощность потерь хорошо передается в систему теплоотвода. Используемая теплопроводная паста имеет намного меньший коэффициент теплопроводности по сравнению с другими используемыми материалами, такими как медь, припой или керамика. Неравномерно нанесенная паста может стать препятствием для распространения тепла, что может приводить к перегреву модуля. Чтобы уменьшить этот эффект, основание модуля фиксируется 10 или 14 винтами М6, в зависимости от размера корпуса. Винты находятся на коротком расстоянии (39 мм) по длинной стороне и на 73 мм по ширине модуля для обеспечения наилучшего распределения давления. Качество контакта определяется равномерностью распределения теплопроводной пасты.

На рис. 7 показан модуль, смонтированный на стеклянное основание. Момент затяжки винтов 3,5 нм. Расположение винтов вдоль основания позволяет получить хорошее распределение теплопроводной пасты даже для модуля в корпусе РР3. Естественно, наилучший результат получается при нанесении пасты через трафаретную маску. В качестве демонстрации 2,1 г НТС01К были использованы на весь модуль РР3 с 40% открытых участков маски для получения результирующей толщины 50 мкм.

**Электрические характеристики**

Способность полупроводника отдавать большую мощность зависит от величины потерь мощности, максимальной температуры кристалла и теплового сопротивления. Усовершенствованное 6-е поколение IGBT, в котором используется современная Trench-gate и Field-Stop технологии, допускает работу кристалла при температуре +150 °С. Максимальная температура кристалла составляет +175 °С.

Потери мощности были снижены за счет утонения структуры кристалла, что привело к уменьшению сопротивления в открытом состоянии. Выходные характеристики IGBT 1000 А/1700 В показаны на рис. 8а, характеристики соответствующего FWD — на рис. 8б.

В PrimePACK-модулях на 1200 и на 1700 В используются кристаллы V-серии 6-го поколения Fuji. Увеличение скорости переключения модуля на кристаллах V-серии приводит к возможным всплескам напряжения

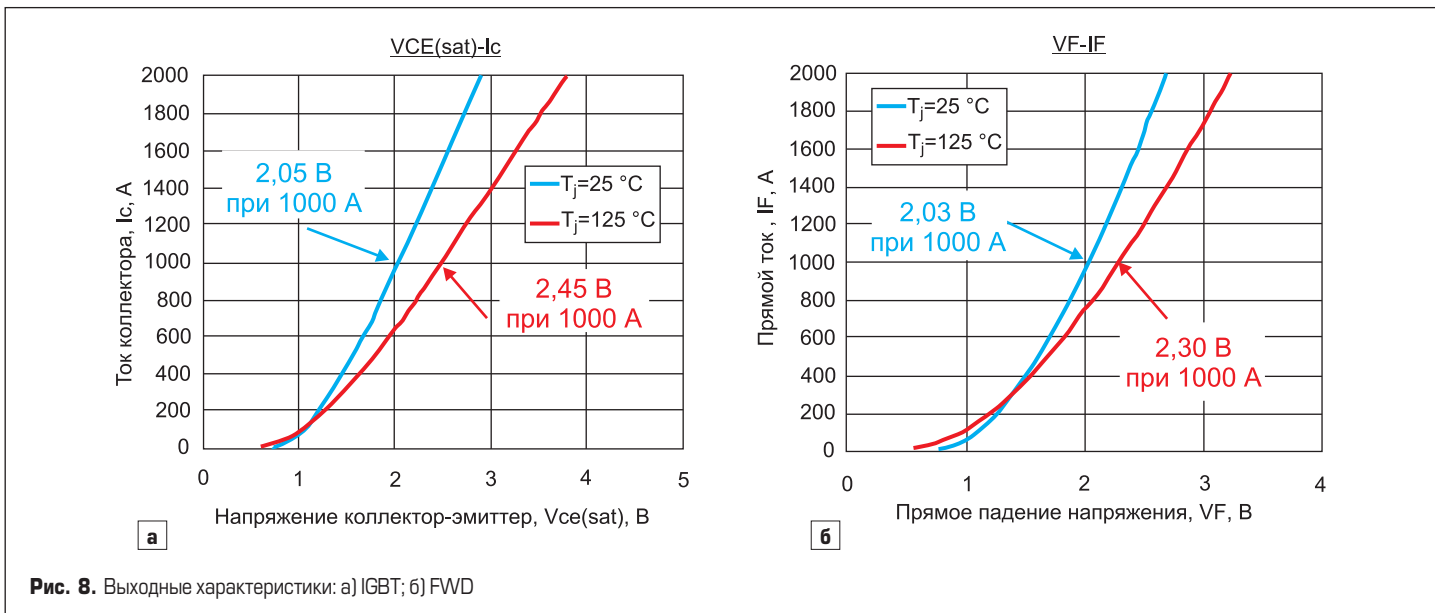


Рис. 8. Выходные характеристики: а) IGBT; б) FWD

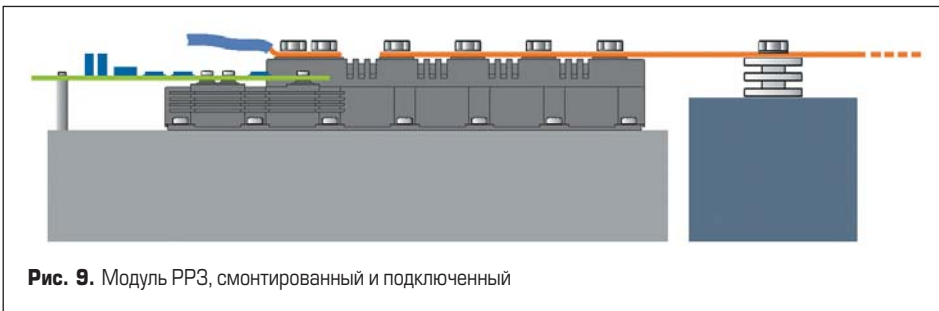


Рис. 9. Модуль PP3, смонтированный и подключенный

ввиду наличия паразитной индуктивности. И производитель модулей, и разработчик инверторов должны прикладывать совместные усилия, чтобы максимально снизить паразитную индуктивность. Низкая индуктивность может быть достигнута при использовании коротких, параллельных и близко расположенных силовых шин. Особенность конструкции PrimePACK в том, что конденсаторы могут быть присоединены напрямую при помощи относительно коротких шин (рис. 9). Тем не менее именно с равномерной и симметричной разводкой можно достигнуть максимально низкой паразитной индуктивности. Поэтому терминалы для подключения шин постоянного тока более длинного корпуса PrimePACK, называемого PP3, меняются между положительной и отрицательной шиной, как показано на рис. 10.

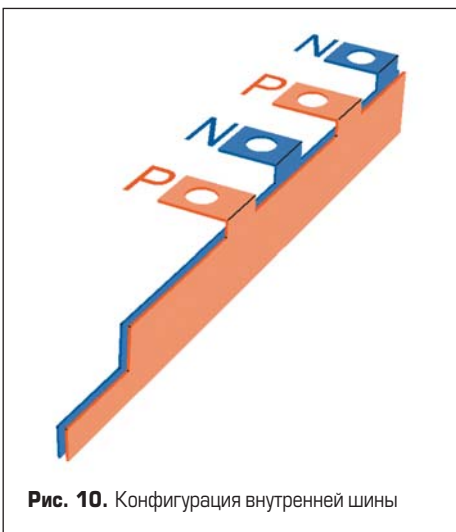


Рис. 10. Конфигурация внутренней шины

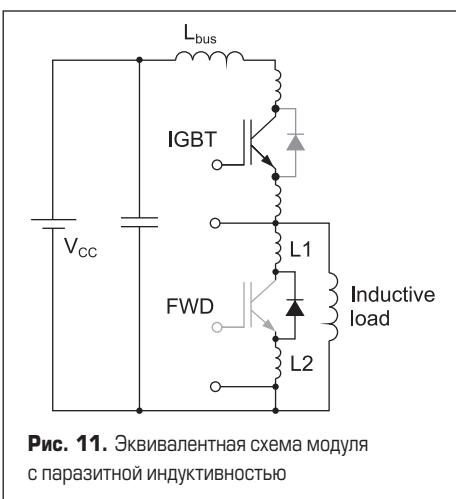


Рис. 11. Эквивалентная схема модуля с паразитной индуктивностью

Кроме того паразитную индуктивность корпуса PP3 можно легко измерить. Эквивалентная электрическая схема измерения приведена на рис. 11. Результаты измерений показаны на рис. 12. Согласно формуле:

$$L_{\sigma} = L_1 + L_2 = \Delta V / (\Delta t / \Delta I),$$

где  $L_{\sigma}$  — паразитная индуктивность одного плеча 5 нГн.

Это означает, что общая паразитная индуктивность корпуса PP3 (верхнее и нижнее плечо) составляет 10 нГн, а корпуса PP2 — 18 нГн (так как количество параллельных DBC меньше). Фактически, это лучший результат по сравнению с Fuji Electric 2 in 1 High Power Modules (HPM), который имеет индуктивность 21 нГн на один ключ без внешней разводки.

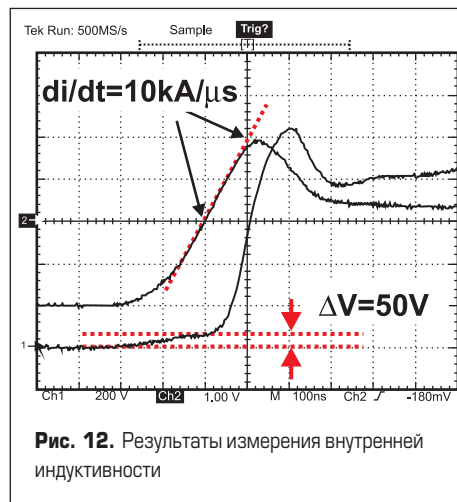


Рис. 12. Результаты измерения внутренней индуктивности

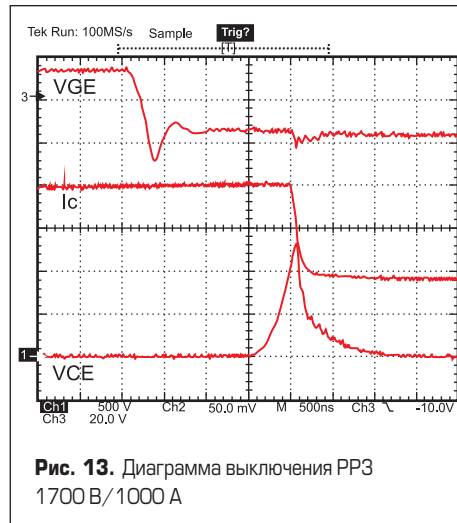


Рис. 13. Диаграмма выключения PP3 1700 В/1000 А

Процесс переключения

Диаграммы включения/выключения

Диаграммы выключения для модуля 1700 В/1000 А приведены на рис. 13. Измерения проводились при следующих условиях:  $V_{cc} = 900$  В,  $I_c = 1000$  А,  $V_{ge} = \pm 15$  В,  $T_j = +125$  °С,  $R_{g(off)} = 0,17$  Ом. Для обеспечения характеристик переключения для любых применений сопротивление было выбрано очень низким, при этом  $dv/dt = 4250$  В/мкс. Кривая выключения монотонна и не имеет точек перегиба.

В аналогичных условиях, за исключением резистора затвора, получена диаграмма включения (рис. 14). Резистор затвора подбирался для  $R_g = 0,17$  Ом. Даже в жестких условиях переключение модуля остается контролируемым. Максимальная скорость нарастания тока  $di/dt = 8750$  А/мкс.

Тест на короткое замыкание

Модуль выдерживает тест на короткое замыкание 10 мкс с постоянным напряжением  $V_{cc} = 1000$  В. Полученная диаграмма переключения приведена на рис. 15. Ток коллектора возрастает до насыщения, которое в 4–4,5 раза превосходит номинальный ток. На диаграмме видно, что после 10 мкс пики напряжения не превышают максимальное.

Применение

Представленные в статье модули очень просты в применении, имеют высокие тепловые и электрические характеристики,

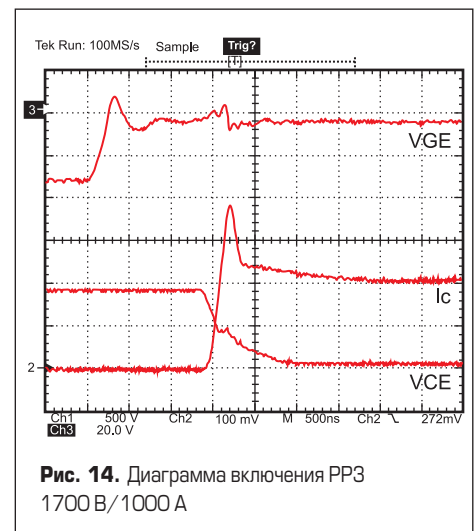


Рис. 14. Диаграмма включения PP3 1700 В/1000 А

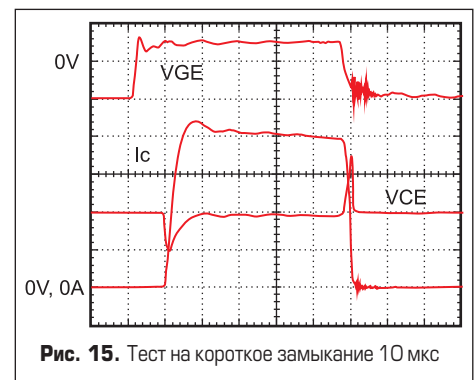


Рис. 15. Тест на короткое замыкание 10 мкс

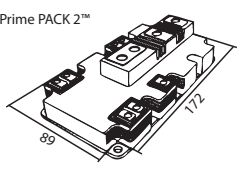
а также элементы, повышающие надежность и обеспечивающие длительный срок эксплуатации продукта. Поэтому модули подходят для широкого применения, где требуется сочетание некоторых из этих особенностей с высокой удельной мощностью. Это, в основном, инверторы для электроприводов, но также это могут быть ветрогенераторы или источники на солнечной энергии и другие изделия со сроком службы не менее 20 лет.

Перечень продукции для применения приведен в таблице 3.

**Литература**

1. Y. Nishimura, etc. The relationship between IGBT module structure and reliability. Fuji Electric Systems, Semiconductors Development Group. Matsumoto, Japan.
2. Y. Nishimura, etc. Development of ultrasonic welding for IGBT module structure. Fuji Electric Systems, Semiconductors Development Group. Matsumoto, Japan.

**Таблица 3.** Перечень продукции для применения

Тип корпуса	$V_{ce(sat)}$ В	$I_{cr}$ А	Наименование	$V_{ce(sat)}$ В	$V_{fr}$ В
 <p>Prime PACK 2™</p>	1200	600	2МВІ600VХА-120Е-50	1,85	1,8
			2МВІ900VХА-120Е-50		1,9
			2МВІ900VХА-120P-50	1,75	1,9
	1700	650	2МВІ650VХА-170Е-50	2,1	1,95
			2МВІ650VХА-170ЕА-50		1,75
			1МВІ650VХА-170ЕL-50	1,95	1,95
			1МВІ650VХА-170ЕН-50		1,95
	1200	1400	2МВІ1400VХВ-120Е-50	1,85	1,9
			2МВІ1400VХВ-120P-50		
			1МВІ1400VХВ-120PL-50	1,75	
1МВІ1400VХВ-120PH-50					
1700	1000	2МВІ1000VХВ-170Е-50	2,1	1,95	
		2МВІ1000VХВ-170ЕА-50		1,75	
		2МВІ1000VХВ-170ЕН-50		1,95	
		2МВІ1000VХВ-170ЕL-50			
		2МВІ1000VХВ-170Е-50			(в разработке)
	1400	2МВІ1400VХВ-170Е-50	2,35	2	
		2МВІ1400VХВ-170P-50	2,1	2	
		1МВІ1400VХВ-170ЕL-50	(в разработке)		
1МВІ1400VХВ-170ЕН-50					

**Примечание:** Общие параметры:  $T_{jmax} = +175$  °C;  $T_{jop} = +150$  °C;  $V_{iso} = 4$  кВ (1 мин.);  $CTI > 600$ ; основание — медь; DBC — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>