

Силовые интегральные модули 6-го поколения фирмы Fuji Electric

Юрий Петропавловский

Компания Fuji Electric почти 90 лет назад возникла как одно из первых немецко-японских электротехнических предприятий. Восточную сторону тогда представляла компания Furukawa Electric Co., Ltd, основателем которой был Фурукава Ичибей (Furukawa Ichibei, рис. 1). Партнером со стороны Запада выступила фирма Siemens AG, первый японский офис которой в 1887 г. основал Герман Кесслер (Hermann Kessler, рис. 2). В 1923 г. двумя фирмами было основано совместное предприятие Fuji Denki Seizo К.К. (с 1984 г. — Fuji Electric), первое слово в названии которого составлено из сочетаний букв Fu и ji (в японской транскрипции Siemens — Jiimensu) [1].

В настоящее время компания является крупным холдингом — Fuji Electric Holding Co., Ltd., состоящим из четырех головных отделений, занимающихся разработкой и производством электротехнического оборудования, оборудования для промышленной автоматизации, полупроводниковых приборов и оборудования для систем розничной торговли. Разработка и производство полупроводниковых приборов находится в компетенции Fuji Electric Device Technology Co., Ltd. Кроме того, в холдинг входят еще 33 компании различного профиля, расположенные в Японии, и 21 компания с офисами и производствами в других странах (в основном в Азии). Численность персонала холдинга — 22 799 чел. (на 31 марта 2009 г.), президент и уполномоченный директор (с 1 апреля 2010 г.) — Атсуси Асамура (Atsushi Asamura, сменил на посту Харуо Ито) [2].

В конце 2008 г. в Нюрнберге было заключено соглашение между Fuji Electric и SEMIKRON о партнерстве в области производства и сбыта силовых полупроводников [3] (рис. 3). Европейское подразделение фирмы Fuji Electric Europe GmbH находится в г. Оффенбах-на-Майне [12], интересы фирмы в России представляет компания IGBT Electronics (г. Новосибирск) [13].

Fuji Electric выпускает широкую номенклатуру силовых полупроводниковых приборов в следующих категориях: силовые модули и дискретные IGBT, микросхемы для импульсных источников питания, мощные MOSFET, выпрямительные диоды и модули для автомобильных приложений [4]. Силовые модули подразделяются на IGBT Modules PIM (Power Integrated Module), IGBT Modules 6-Pack, IGBT Modules 4-Pack, IGBT Modules 2-Pack, IGBT Modules



Рис. 1. Фурукава Ичибей, 1832–1903 гг.



Рис. 2. Герман Кесслер



Рис. 3. Представители фирм Fuji Electric и SEMIKRON Хисао Сигекане (Hisao Shigekane) и Дирк Хейденрайч (Dirk Heidenreich) на подписании договора о совместной деятельности

1-Pack. В каталоге фирмы за 2010 г. представлено более 200 наименований силовых модулей IGBT различных серий и конфигураций.

PIM выпускаются в трех сериях: S (4-е поколение, технология Planar-PT); U (5-е поколение, Trench/Planar-NPT); V (6-е поколение, Trench-FS). Впервые силовые модули серии V фирма представила в конце 2008 г. На выставке PCIM 2009 в Нюрнберге они были продемонстрированы в корпусах с пружинными выводами (рис. 4) [5]. В модулях применены Trench-FS IGBT, отличительной особенностью приборов является на-

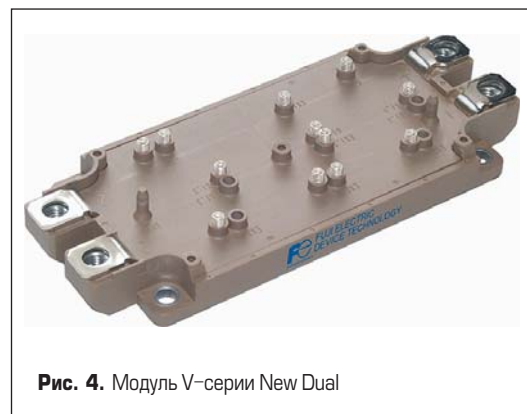


Рис. 4. Модуль V-серии New Dual

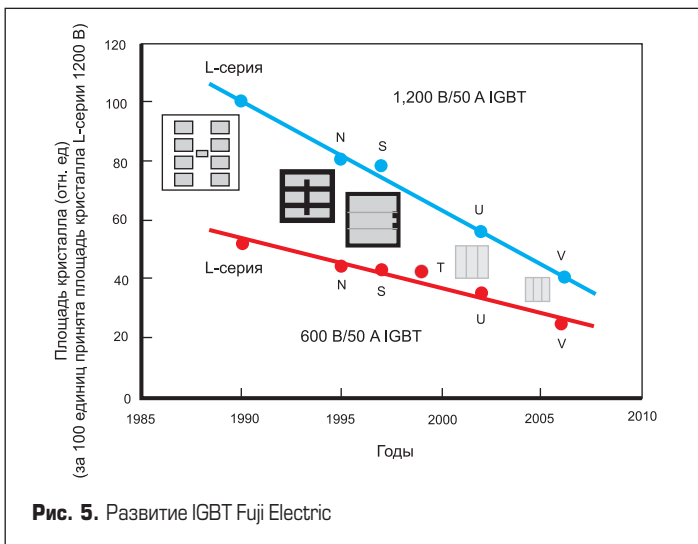


Рис. 5. Развитие IGBT Fuji Electric

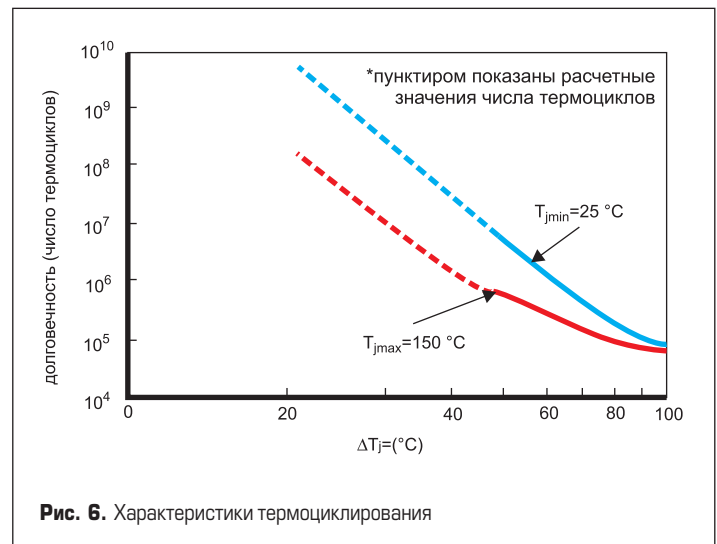


Рис. 6. Характеристики термоциклирования

личие буферного FS-слоя (Field stop layer), способствующего снижению напряжения насыщения транзистора и значительному уменьшению площади кристалла [6].

Fuji Electric разработала первую коммерческую линейку IGBT в 1988 г., и с тех пор размеры разрабатываемых кристаллов и потери мощности IGBT новых линеек модулей постоянно уменьшались (рис. 5). PIM V-серии являются последней разработкой фирмы, а ряд их параметров существенно улучшен по сравнению с характеристиками модулей предыдущих U- и S-серий, при этом размеры новейших модулей примерно на 30% меньше. Подложка новых приборов выполнена из нитрида кремния (SiN), имеющего хорошую теплопроводность, что допускает кратковременную работу модулей даже при температуре кристаллов +175 °C, а продолжительная работа возможна при температуре +150 °C. Уменьшение размеров кристаллов и корпусов позволит в конечном итоге снизить себестоимость модулей и цену инверторов, построенных на их основе. В приборах новой серии оптимизирована работа IGBT и FWD на интервале включения, в результате чего снизился уровень электромагнитных излучений, создаваемых модулями.

Модули V-серии обеспечивают высокую надежность коммутации IGBT в условиях высоких температур и надежность соединений как в исполнениях Solder Wire, так и Bond Wire. Долговечность (Lifetime) приборов при термоциклировании существенно зависит от разницы максимальной и минимальной температур кристаллов, соответствующие зависимости приведены на рис. 6, пунктиром на графиках показаны оценочные значения числа циклов. По результатам испытаний модулей был получен результат долговременной надежности 50 000 термоциклов при ΔT=+100 °C, на основе этих данных фирмой рекомендована допустимая долговременная температура кристаллов до +150 °C, при этом модули V-серии обеспечивают все заявленные параметры.

В настоящее время на предприятиях Fuji Electric обеспечено серийное производство PIM и New Dual (на июль 2010 г. в каталоге отсут-

ствовали), последние выпускаются на максимальные токи до 200 А в конфигурации «2 в 1» (одна фаза) и допускают параллельную работу трех модулей (ток до 600 А). При этом параллельные соединения не требуют каких-либо дополнительных регулировок инверторов.

Фирма планирует дальнейшее развитие линеек V-серии, разрабатываются мощные модули Econo PACK+ на токи до 550 А и напряжения до 1200 В, новые «2 в 1» на токи до 1400 А и напряжения до 1200 В (Econo PACK — зарегистрированная торговая марка фирмы Infineon Technologies AG). Разрабатываются компактные модули MiniSKiIP, монтируемые без применения пайки, на токи 8–100 А и напряжения до 1200 В (MiniSKiIP — зарегистрированная торговая марка фирмы SEMIKRON), а также чипы на напряжение 1700 В для применения в модулях Econo PACK+ [7].

Таблица. Классификационные параметры модулей

Тип модуля	I _{макс}	U _{макс}	Корпус	Размеры
7MBR50VP060-50	50	600	M719	107,5×45
7MBR75VP060-50	75	600	M719	
7MBR100VP060-50	100	600	M719	
7MBR25VM120-50	25	1200	M719	
7MBR25VP120-50	25	1200	M719	
7MBR35VM120-50	35	1200	M719	
7MBR35VP120-50	35	1200	M719	
7MBR50VM120-50	50	1200	M719	122×62
7MBR50VN120-50	50	1200	M720	
7MBR75VN120-50	75	1200	M720	
7MBR75VR120-50	75	1200	M720	
7MBR100VN120-50	100	1200	M720	
7MBR100VR120-50	100	1200	M720	
7MBR150VN120-50	150	1200	M720	
7MBR150VR120-50	150	1200	M720	107,5×45
7MBR25VW120-50	25	1200	M721	
7MBR35VW120-50	35	1200	M721	
7MBR50VW120-50	50	1200	M721	122×62
7MBR50VX120-50	50	1200	M722	
7MBR75VX120-50	75	1200	M722	
7MBR100VX120-50	100	1200	M722	

Классификационные параметры модулей V-серии из раздела IGBT Modules PIM каталога фирмы 2010 г. [8] приведены в таблице. Рассмотрим особенности некоторых модулей более подробно (использованы материалы Data Sheets для конкретных модулей).

7MBR50VP060-50 — IGBT-модуль в компактном корпусе для установки на плату с выводами для пайки (P.C. Board Mount Module). Прибор может быть использован в качестве инвертора устройств регулирования электропривода постоянного и переменного тока, сервоусилителя переменного и постоянного тока (AC and DC Servo Drive Amplifier), источников бесперебойного питания. В состав модуля входят шесть IGBT-инверторов, IGBT тормозного чоппера (Brake), трехфазный выпрямитель (Converter) и терморезистор. Приведем основные параметры IGBT-инверторов модуля (помимо указанных в таблице), в скобках даны оригинальные наименования некоторых параметров, применяемых Fuji Electric:

- максимальное напряжение затвор-эмиттер IGBT (V_{ges}) — ±20 В;
- импульсный ток коллектора (I_{cp}) — 100 А (при $t_n = 1$ мс и $T = +80$ °C);
- максимальная температура корпуса модуля (T_c — Case temperature) — +125 °C;
- максимальная мощность рассеяния на коллекторе для одного прибора (P_c — Collector power dissipation 1 device) — 200 Вт;
- напряжение насыщения коллектор-эмиттер ($V_{CE(SAT)}$ — Collector-Emitter saturation voltage) — 2,15 В (типичное значение при $T_{выб} = +125$ °C, $I_k = 50$ А, $U_{зз} = 15$ В);
- время включения/выключения (ton/t_{off} — Turn-on time/Turn-off time) — 0,36/0,52 мкс (при $U_{пит} = 300$ В, $I_k = 50$ А, $R_{затв} = 43$ Ом, $U_{зз} = ±15$ В);
- прямое напряжение на антипараллельных диодах FWD (V_F — Forward on voltage) — 1,75 В (при $I_d = 50$ А, $T_{выб} = +125$ °C);
- время восстановления обратного сопротивления диода (t_{rr} — Reverse recovery time) — не более 0,35 мкс;
- сопротивление терморезистора (R — Resistance) — 5000 Ом/495 Ом (типичные значения при $T = +25...+100$ °C);

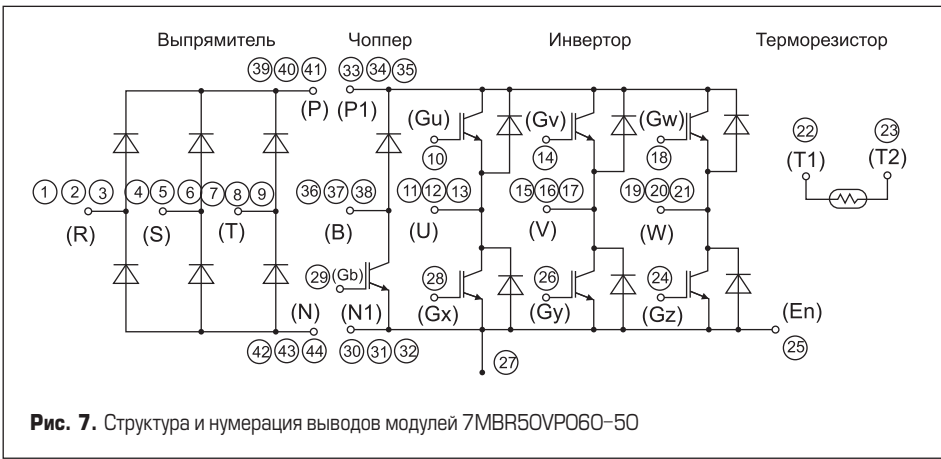


Рис. 7. Структура и нумерация выводов модулей 7MBR50VP060-50

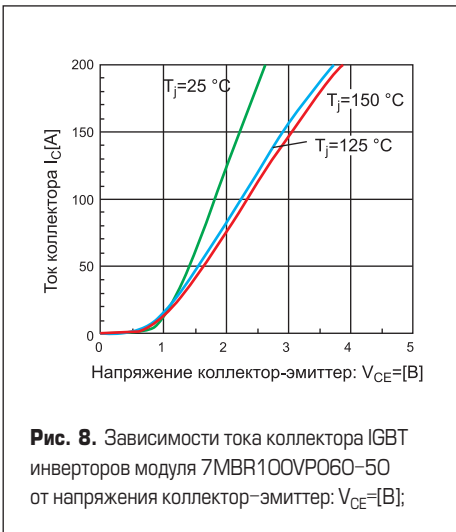


Рис. 8. Зависимости тока коллектора IGBT инверторов модуля 7MBR100VP060-50 от напряжения коллектор-эмиттер: $V_{CE}=[B]$;

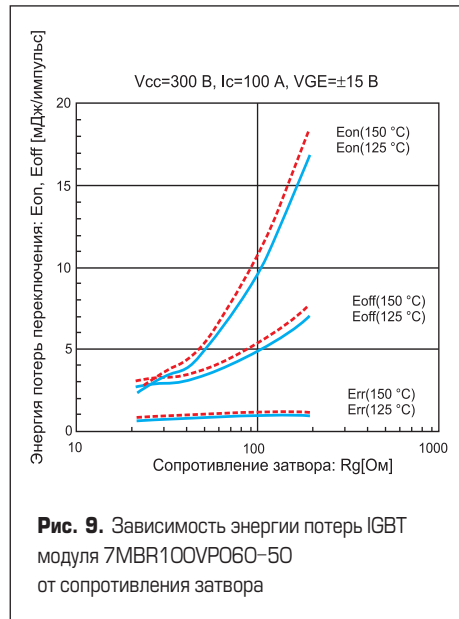


Рис. 9. Зависимость энергии потерь IGBT модуля 7MBR100VP060-50 от сопротивления затвора

- тепловое сопротивление (R_{th} — Thermal resistance, 1 device) — 0,71–1,15 °C/Вт (IGBT/FWD). Модули 7MBR75VP060-50, 7MBR100VP060-50 отличаются максимально допустимыми токами и некоторыми электрическими параметрами. Приведем значения для модуля 7MBR75VP060-50, которые отличаются от приведенных выше (в скобках указаны параметры для 7MBR100VP060-50):
- импульсный ток коллектора (I_{cp}) — 150 А (200 А);

- максимальная мощность рассеяния на коллекторе (P_c) — 300 Вт (430 Вт);
- напряжение насыщения коллектор-эмиттер ($V_{CE(SAT)}$) — 1,9 В при $T_{корп} = +125 °C$, $I_k = 75 А$, $U_{зз} = 15 В$ (2,65 В при $I_k = 100 А$, $T_{выб} = +125 °C$);
- прямое напряжение на антипараллельных диодах (V_F) — 1,8 В при $I_d = 75 А$, $T = +125 °C$ (2,1 В при $I_d = 100 А$);

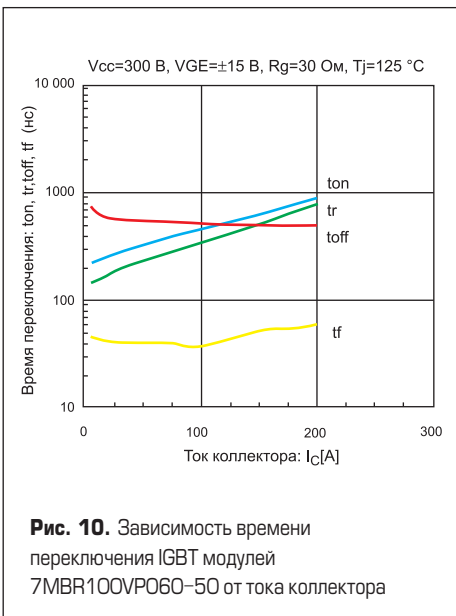


Рис. 10. Зависимость времени переключения IGBT модулей 7MBR100VP060-50 от тока коллектора

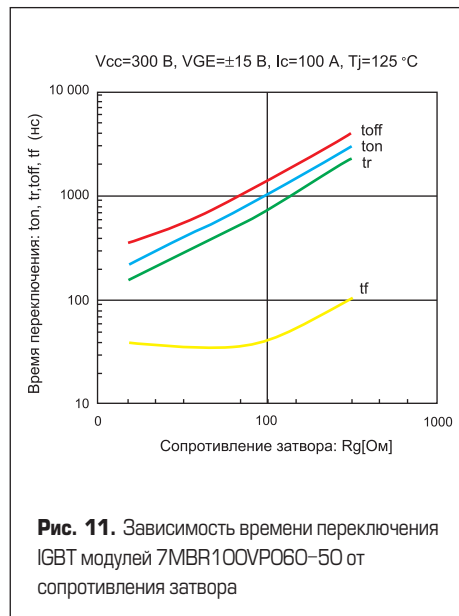


Рис. 11. Зависимость времени переключения IGBT модулей 7MBR100VP060-50 от сопротивления затвора

• тепловое сопротивление (R_{th}) — 0,5–0,95 °C/Вт (0,35–0,65 °C/Вт). Структура и нумерация выводов модулей приведены на рис. 7. Параметры диодов конверторов (трехфазных выпрямителей) 7MBR50/75/100VP060-50: $U_{np} = 1,55 В/50 А$, 1,55 В/75 А, 1,65 В/100 А соответственно; обратный ток диодов не более 1 мА. Параметры IGBT тормозных чопперов модулей 7MBR50/75/100VP060-50 практически не отличаются от соответствующих значений IGBT-инверторов.

Приведем некоторые графики и зависимости параметров модулей, необходимость в которых может возникнуть при разработке аппаратуры. На рис. 8 показаны зависимости токов коллекторов IGBT-инверторов модуля 7MBR100VP060-50 от напряжения коллектор-эмиттер при различных температурах корпуса (характеристики проводимости). Энергия потерь переключения (Switching loss) конкретных IGBT определяется, в основном, их током коллектора, температурой кристалла и сопротивлением резистора затвора транзистора. Зависимости энергии потерь IGBT-инверторов модуля 75MBR100VP060-50 от сопротивления резистора затвора при различных температурах приведены на рис. 9. На рис. 10, 11 показаны зависимости временных параметров переключения IGBT-инверторов этого же модуля от тока коллектора и сопротивления резистора затвора соответственно. Обозначения параметров на графиках: t_{on} — время задержки включения; t_{off} — время задержки выключения; t_r — время нарастания; t_f — время спада. Частотные свойства IGBT во многом определяются величиной заряда затвора. Зависимости напряжений коллектор-эмиттер и затвор-эмиттер IGBT-инверторов модуля 7MBR100VP060-50 от заряда затвора приведены на рис. 12.

7MBR25VM120-50, 7MBR25VP120-50 — интегральные силовые модули в компактных корпусах Solder Wire. Они предназначены для работы в приводах трехфазных двигателей переменного тока, сервоусилителях

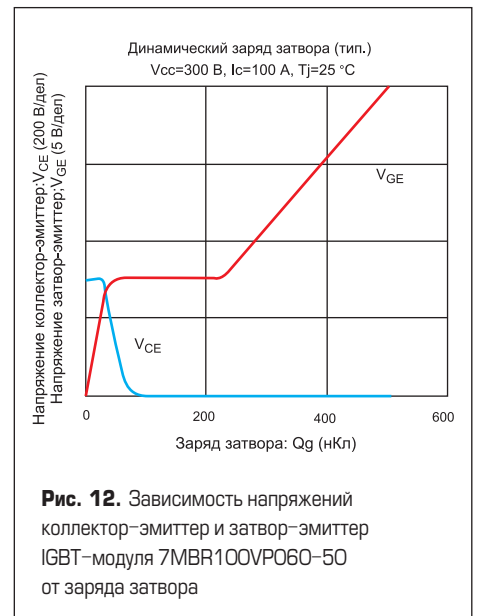


Рис. 12. Зависимость напряжений коллектор-эмиттер и затвор-эмиттер IGBT-модуля 7MBR100VP060-50 от заряда затвора

постоянного и переменного тока, источниках бесперебойного питания, рассчитанных на работу в сетях переменного напряжения 380 В и выше. В состав модулей входят шесть инверторов, тормозной чоппер, трехфазный выпрямитель и терморезистор. Основные параметры модулей:

- импульсный ток коллектора инверторов (I_{cp}) — 50 А (при $t_{и} = 1$ мс, $T = +80$ °С);
- максимальная мощность рассеяния на коллекторе (P_c) — 170 Вт (каждого IGBT);
- максимальное обратное напряжение диодов выпрямителя (V_{RRM}) — 1600 В;

- среднее значение выходного тока выпрямителя (I_o) — 25 А (50–60 Гц, синусоидальное);
- максимальное обратное напряжение диода тормозного чоппера (V_{RRM}) — 1200 В;
- напряжение насыщения IGBT-инверторов ($V_{ce(sat)}$) — 2,45 В (при $I_k = 25$ А, $T = +125$ °С, $U_{зз} = 5$ В);
- время включения/выключения (t_{on}/t_{off}) — 0,39–0,53 мкс (при $U_{пит} = 600$ В, $I_k = 25$ А, $R_3 = 39$ Ом, $U_{зз} = \pm 15$ В);
- прямое напряжение на антипараллельных диодах (V_F) — 2,1 В (при $I_{пр} = 25$ А, $T_{выб} = +125$ °С);

- время восстановления обратного сопротивления диодов (t_{rr}) — не более 0,1 мкс;
- входная емкость (C_{ies}) — 2100 пФ (типичное значение при $f = 10$ МГц, $U_{зз} = 0$ В, $U_{кз} = 10$ В);
- сопротивление терморезистора (R) — 5000/495 Ом при $T = +25...+100$ °С;
- тепловое сопротивление (R_{th}) — 0,89/1,06/0,97 °С/Вт (IGBT-инверторов/FWD-инверторов/диодов выпрямителя).

Модули 7MBR35VM120-50, 7MBR35VP120-50, 7MBR50VM120-50, 7MBR50VP120-50 отличаются максимальными выходными токами и некоторыми электрическими характеристиками. Приведем параметры 7MBR35VM120-50, 7MBR35VP120-50, отличающиеся от соответствующих значений 7MBR25VM120-50, 7MBR25VP120-50 (в скобках даны параметры для 7MBR50VM120-50, 7MBR50VP120-50):

- импульсный ток коллектора (I_{cp}) — 70 А, при $t_{и} = 1$ мс, $T = +80$ °С (100 А);
- максимальная мощность рассеяния на коллекторе (P_c) — 210 Вт (280 Вт);
- среднее значение тока выпрямителя (I_o) — 35 А (50 А), 50–60 Гц, синусоидальное;
- напряжение насыщения IGBT-инверторов ($V_{ce(sat)}$) — 2,5 В при $I_k = 35$ А, $T = +125$ °С (2,55 В при $I_k = 50$ А);
- прямое напряжение на антипараллельных диодах (V_F) — 2,15 В при $I_k = 35$ А, $T = +125$ °С (2,5 В при $I_k = 50$ А);
- тепловое сопротивление (R_{th}) — 0,72/0,91/0,89/0,88 °С/Вт (0,54/0,91/0,72/0,54) IGBT-инверторов/FWD-инверторов/IGBT-чопперов/диодов выпрямителя.

Структура и нумерация выводов модулей 7MBR25/35/50VM120-50 приведена на рис. 13, модулей 7MBR25/35/50VP120-50 — на рис. 14. На рис. 15 показаны зависимости энергии потерь переключения IGBT-инверторов модулей 7MBR50VM120-50, 7MBR50VP120-50 от тока коллектора при различных температурах. Зависимости времени восстановления обратного сопротивления t_{rr} и обратного тока I_{rr} диодов FWD модулей 7MBR50VM120-50, 7MBR50VP120-50 от прямого тока через них приведены на рис. 16.

7MBR150VN120-50, 7MBR150VR120-50 — интегральные силовые модули в корпусе Solder Wire. Их основные параметры:

- импульсный ток коллектора (I_{cp}) — 300 А (при $t_{и} = 1$ мс, $T = +80$ °С);
- максимальная мощность рассеяния на коллекторе (P_c) — 885 Вт;
- напряжение насыщения IGBT инверторов ($V_{ce(sat)}$) — 2,8 В (при $I_k = 150$ А, $T = +125$ °С);
- время включения/выключения (t_{on}/t_{off}) — 0,39–0,53 мкс (при $I_k = 150$ А, $V_{cc} = 600$ В, $R_3 = 1,8$ Ом);
- прямое напряжение на антипараллельных диодах (V_F) — 2,8 В (при $I_{пр} = 150$ А, $T = +125$ °С);
- тепловое сопротивление (R_{th}) — 0,17/0,31/0,29/0,24 °С/Вт (IGBT-инверторов/FWD инверторов/IGBT-чопперов/диодов выпрямителя).

Структура и нумерация выводов модулей 7MBR150VN120-50 и 7MBR150VR120-50

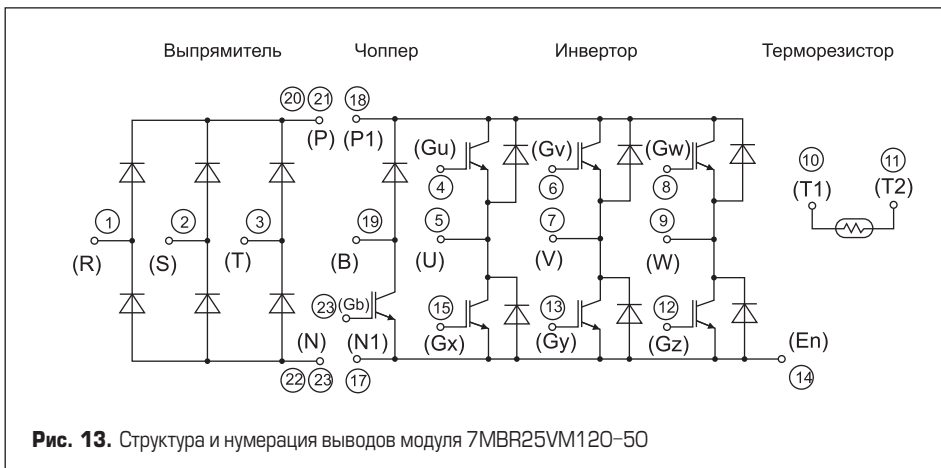


Рис. 13. Структура и нумерация выводов модуля 7MBR25VM120-50

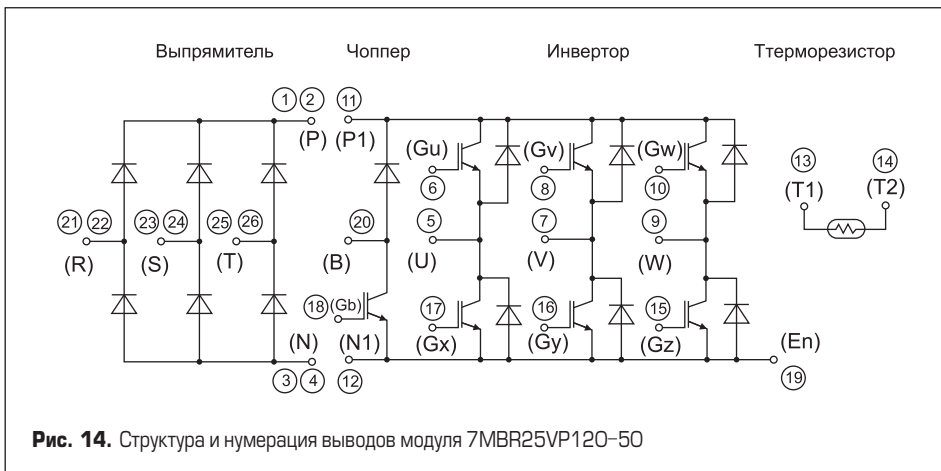


Рис. 14. Структура и нумерация выводов модуля 7MBR25VP120-50

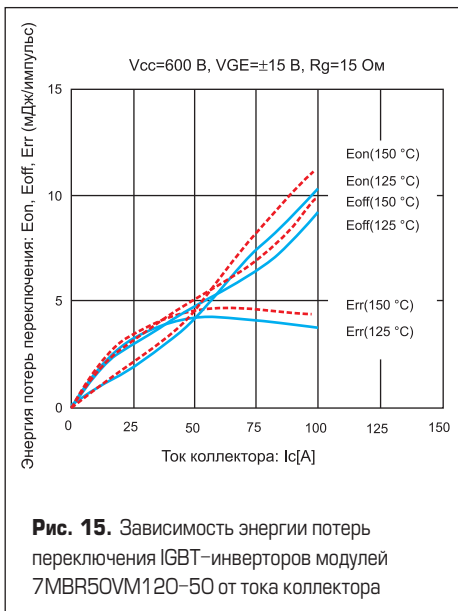


Рис. 15. Зависимость энергии потерь переключения IGBT-инверторов модулей 7MBR50VM120-50 от тока коллектора

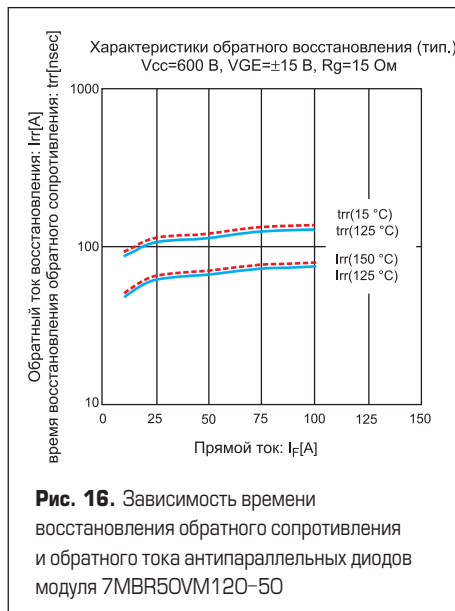


Рис. 16. Зависимость времени восстановления обратного сопротивления и обратного тока антипараллельных диодов модуля 7MBR50VM120-50

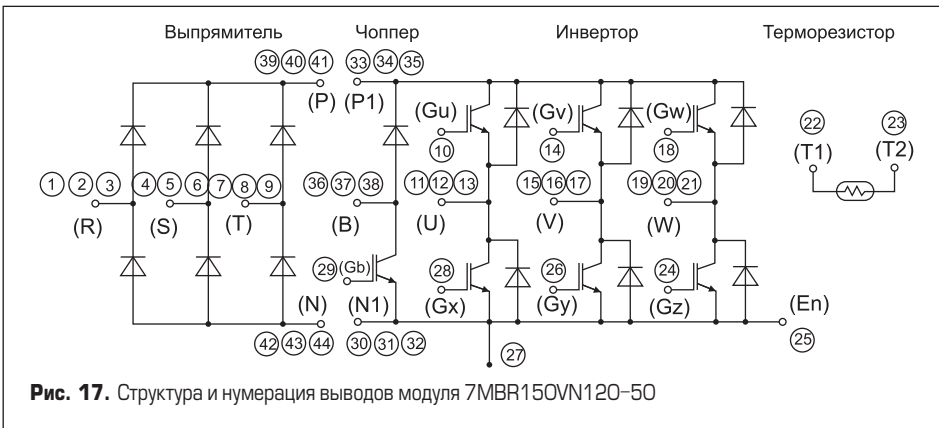


Рис. 17. Структура и нумерация выводов модуля 7MBR150VN120-50

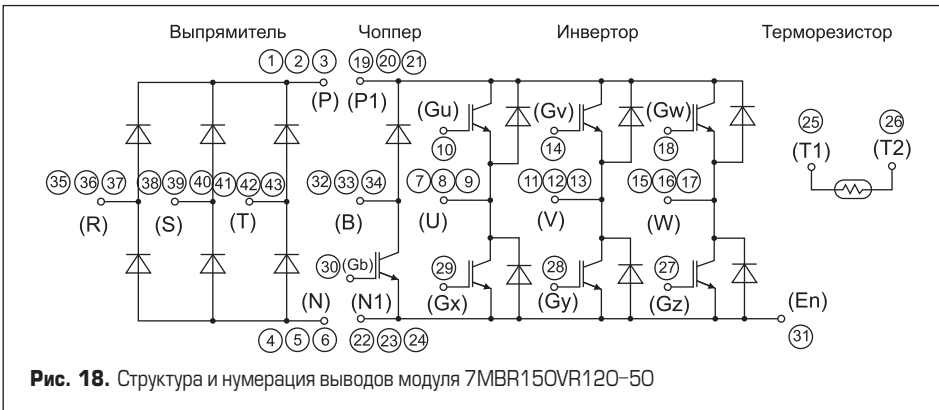


Рис. 18. Структура и нумерация выводов модуля 7MBR150VR120-50

приведены на рис. 17 и 18 соответственно. На рис. 19 показаны зависимости энергии потерь переключения модулей от тока коллектора при различных температурах.

7MBR25/35/50VW120-50, 7MBR50/75/100VX120-50 — силовые интегральные модули в компактных корпусах Bond Wire. Их основные параметры:

- импульсный ток коллектора (I_{cp}) — 200 А (при $t_n = 1$ мс, $T = +80$ °С);
- максимальная мощность рассеяния на коллекторе (P_c) — 520 Вт;
- напряжение насыщения IGBT-инверторов ($V_{ce(sat)}$) — 2,5 В (при $I_k = 100$ А, $T = +125$ °С);

- время включения/выключения (t_{on}/t_{off}) — 0,39–0,53 мкс (при $I_k = 100$ А, $V_{cc} = 600$ В, $R_z = 1,6$ Ом);
- прямое напряжение на антипараллельных диодах (V_F) — 2,3 В (при $I_{np} = 100$ А, $T = +125$ °С);
- тепловое сопротивление (R_{th}) — 0,29/0,44/0,39/0,43 °С/Вт (IGBT-инверторов/FWD-инверторов/IGBT-чопперов/диодов выпрямителя).

Фрагмент габаритного чертежа модуля 7MBR100VX120-50 показан на рис. 20.

Прямое сравнение сопоставимых параметров PIM V-, S-, U-серий, приведенных в таблицах технических характеристик, выявило преимущества модулей серии V в части тепловых параметров. Для них нормируются температуры:

- кристаллов IGBT +175 °С (+150 °С у модулей S-, U-серий);
- диодов выпрямителя +150 °С (для S и U значения не приводятся);
- корпуса +125 °С (для S и U данные отсутствуют);
- рабочая температура кристаллов в длительных режимах +150 °С (для S и U данных нет).

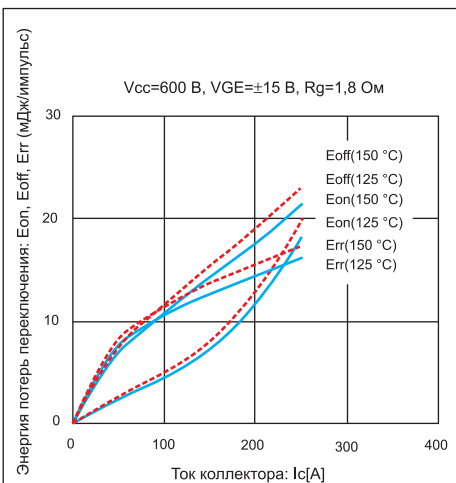


Рис. 19. Зависимость энергии потерь переключения IGBT-инверторов модулей 7MBR150VN120-50 и 7MBR150VR120-50 от тока коллектора



Рис. 20. Фрагмент габаритного чертежа модуля 7MBR100VX120-50

Кроме того, в Data Sheet для модулей V-серии приводятся значения ряда параметров при различных температурах кристаллов +25(+80)(+125)(+150) °С (для серии S — в основном при +25 °С).

Выбрать конкретные силовые модули, необходимые для разработки новой аппаратуры или ремонта и модернизации силовых агрегатов, только по информации из таблиц с техническими характеристиками непросто, поскольку разные производители силовых полупроводниковых приборов используют собственные системы обозначений параметров и методы их измерения. Руководство по применению модулей V-серии пока не выпущено, однако вполне можно использовать руководство по применению модулей U-серии [9], в котором достаточно подробно приведены методы измерения основных параметров модулей (в основном в виде графиков и формул) и особенности теплового моделирования. Очень подробно особенности выбора и сравнения параметров приборов различных производителей приведены в [10, 11].

Литература

1. History in Japan. http://www.siemens.co.jp/English/About_us/about_us007/Pages/Default.aspx
2. <http://www.fujielectric.com/news/2009/10030802.html>
3. <http://www.fujielectric.com/news/2008/08112101.html>
4. Fuji Electric Semiconductors. <http://www.fujielectric.com/device/semi/>
5. PCIM 2009 Roundup http://www.power-systemsdesign.com/index.php?option=com_content&view=article&id=212
6. Колпаков А. NPT, Trench, SPT... Что дальше? // Силовая электроника. 2006. № 3.
7. Takahashi K., Yoshiwatari S., Sekino Y. New Lineup of V-Series IGBT Modules // Fuji Electric Review. 2010. Vol. 56. № 2.
8. IGBT module PIM. <http://www.fujielectric.com/device/semi/products/powerdevices/pim.html>
9. Fuji IGBT Modules U Series. http://www.fujielectric.com/device/semi/technical/application/pdf/IGBT-U_Tech/IGBT-U_Tech_E.pdf
10. Колпаков А., Кузнецов Е. Контрольная точка, или об умении читать Data Sheet «между строк» // Электронные компоненты. 2005. № 6.
11. Колпаков А. Правильное прочтение Data Sheet: часть 2. <http://igbt-modules.blogspot.com/2008/11/datasheet-part-2.html>
12. <http://www.fujielectric-europe.de/index.html>
13. <http://www.igbt.ru/>