

# Особенности и параметры интеллектуальных силовых модулей фирм Fuji и Semikron

**Юрий Петропавловский (Ростовская обл.)**

**В статье рассмотрены особенности устройства и функционирования интеллектуальных силовых модулей двух ведущих производителей компонентов силовой электроники. Приведены характеристики новых приборов фирм Fuji и Semikron.**

В последнее время многие производители бытовой техники и промышленного оборудования в качестве конкурентного преимущества своих изделий указывают наличие в их составе ИРМ-блока. Применение термина ИРМ (Intelligent Power Module, интеллектуальный силовой модуль) – скорее рекламный ход производителей, поскольку «интеллектуальность» бытовой техники или промышленных агрегатов воспринимается покупателями как достоинство приобретаемого оборудования.

В действительности агрегаты с инверторами на широко распространённых силовых IGBT-модулях не более «интеллектуальны», чем ИРМ. Суть их идеологии состоит в следующем. Практически в любом устройстве с IGBT-модулями присутствуют различные узлы защиты от чрезмерных токов, перегрева и выхода напряжения за пределы рабочего диапазона. Узлы защиты, схемы управления, сами IGBT и антипараллельные диоды в модулях ИРМ выполнены в едином технологическом процессе в виде интегральной или гибридной микросхемы. Такие модули потенциально более надёжны, чем IGBT-модули с внешними узлами, сформированными на печатной плате из дискретных компонентов. Кроме того, в ИРМ входят цепи преобразования уровней, позволяющие управлять IGBT с помощью низковольтных элементов, например оптронов.

Применение ИРМ позволило улучшить и ремонтпригодность аппаратуры, в которой они установлены. В ряде приложений, в частности, в системах кондиционирования воздуха, автоматических стиральных машинах, холодильных установках, электронных блоки (ЭБ) реализованы на отдельных печатных платах. Большинство изготовителей такой техники не предоставляют сервисным организациям подробную техническую

документацию ЭБ. При возникновении неисправностей в таких «чёрных ящиках» сервисные руководства рекомендуют заменять их целиком, что увеличивает стоимость и сроки ремонта агрегатов. При неисправностях ИРМ обычно требуется замена небольшой периферийной платы, на которой установлен силовой модуль, а заменять более дорогостоящую плату ЭБ нет необходимости [1]. Интегральное исполнение ИРМ позволяет увеличить общее быстродействие ЭБ и частоту управляющих ШИМ-сигналов, что даёт возможность повысить КПД оборудования и снизить уровень излучаемых помех.

Основной и весьма обширной областью применения интеллектуальных силовых модулей (далее ИСМ) является электропривод трёхфазных двигателей переменного тока в системах VFD (Variable Frequency drive) – частотно регулируемый привод (ЧРП). Промышленные приложения ЧРП: вентиляторы, механизмы подачи топлива, центрифуги, насосы, компрессоры и т.д. Основные бытовые и офисные приложения: системы кондиционирования воздуха, стиральные машины и холодильники.

При использовании ЧРП удаётся снизить потребление электроэнергии на 20...50%, кроме того, такое построение электропривода имеет ряд других достоинств. В частности, использование насосов с ЧРП позволяет увеличить межремонтные циклы, уменьшить численность обслуживающего персонала и вероятность разрыва трубопроводов, т.к. при плавном пуске двигателей насосов исключаются гидравлические удары в системах, а регулирование скорости вращения предотвращает избыточное давление в трубопроводах [2].

В основном ИСМ в интегральном или гибридном исполнении используются для привода двигателей малой и сред-

ней мощности, а некоторые из них – и приводов большой мощности. Модули выпускает ряд известных производителей силовых полупроводниковых приборов. В каталогах 2009 г. более десяти наименований ИСМ предлагают фирмы Cyntec, Fuji Electric, Infineon, IRF, Mitsubishi Electric, Powerex, Sanken, Semikron и некоторые другие.

Подразделение компании Fuji Electric Semiconductors выпускает силовые компоненты в следующих категориях: силовые IGBT-приборы, микросхемы управления для источников питания, силовые MOSFET, выпрямительные диоды, силовые компоненты для автомобильных приложений. В категории силовых IGBT-приборов в каталоге фирмы (по состоянию на июль 2009 г.) предлагается несколько десятков типов ИСМ (IGBT Modules IPM) серий U-IPM, Econo IPM, R-IPM и R-IPM3 [4].

Модули серии R выпускаются с 2003 г.; по состоянию на лето 2009 г. в каталоге фирмы представлено 40 наименований ИСМ модулей этой серии, рассчитанных на токи 15...300 А, их отличительной особенностью является применение только полупроводниковой технологии. Приборы состоят из кристаллов кремния, в объёме которого сформированы IGBT и полупроводниковые микросхемы, предназначенные для управления силовой частью модулей. Это позволило уменьшить число элементов и увеличить быстродействие схем управления. Для ИСМ серии R требуется четыре источника питания – один для нижних плеч инверторов и три независимых для верхних. В модули встроены схемы защиты от перегрузки по току (OC), от короткого замыкания (SC), от пониженного напряжения источников питания (UV) и от перегрева (OH); имеется отдельный вывод ALM, сигнализирующий о перегреве выводов модулей. В некоторые модули встроены схемы с «тормозными» IGBT (Brake).

В модулях серии R применён нетрадиционный способ контроля температуры IGBT и схем управления. Обычно контроль температуры кристаллов ИСМ осуществляется с помощью тер-

морезистора, установленного на металлическую подложку вблизи кристаллов IGBT, при этом из-за значительного термического сопротивления между терморезистором и кристаллами IGBT возникает задержка сигнала с терморезистора при резком изменении температуры. В результате возможен выход из строя модулей в некоторых аварийных ситуациях, например при заклинивании двигателя. В модулях серии R терморезистор сформирован на поверхности самого кристалла по технологии SOI (Silicon on insulator – кремний на диэлектрике) [1], что исключает такие ситуации.

Изолированная структура керамической подложки модулей позволяет устанавливать их непосредственно на теплоотвод. Выводы управления находятся на одной линии и могут подключаться через один разъём. Мощные выводы располагаются рядом, что упрощает монтаж. Силовые шины надёжно фиксируются винтами M5.

Модули серии R выпускаются в различных корпусах: P610, P611, P612, P617, P621. Основные (классификационные) данные выпускаемых модулей серий R-IPM, R-IPM3, U-IPM, Econo IPM приведены в таблице 1.

В состав модулей 7MBPxxxxRxxxx входят тормозные IGBT (всего семь силовых транзисторов), в модулях 6MBPxxxxRxxxx установлены шесть транзисторов. Номинальное напряжение питания схем управления 15 В, напряжения срабатывания схем защиты от пониженного напряжения (UV) 11,5...12,5 В, минимальная температура корпуса модулей, при которой срабатывают схемы защиты от перегрева (OH), 110°C.

Фирма подразделяет ИСМ серий R-IPM, R-IPM3 на приборы малой мощности (Small-capacity types) с током коллектора  $I_K = 15...30$  А ( $U_{кз} = 600$  В), 15 А (1200 В); средней мощности (Medium-capacity types) с током коллектора 50...150 А (600 В), 25...75 А (1200 В); большой мощности (Large-capacity types) с током  $I_K = 200...300$  А (600 В), 100...150 А (1200 В). Масса ИСМ средней мощности серии Econo снижена примерно на 40%, а необходимая площадь для монтажа (mounting area) – на 30%.

Упрощённая схема включения модулей типа 7MBPxxxxRxxxx для привода трёхфазных двигателей переменного тока приведена на рисунке 1. В состав схемы входят: верхние IGBT с антипараллельными диодами (FWD) VT<sub>up</sub>,

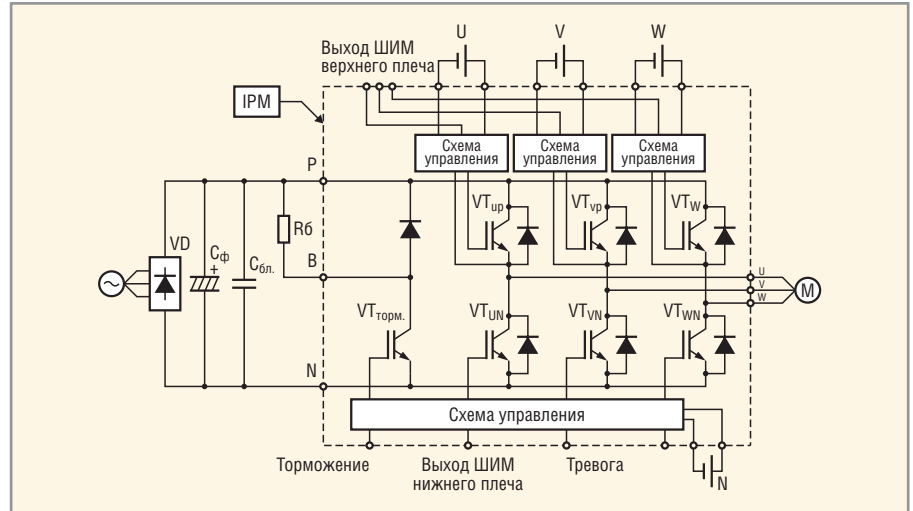


Рис. 1. Схема включения ИСМ 7MBPxxxxxx фирмы Fuji Electric

VT<sub>up</sub>, VT<sub>vp</sub>; нижние IGBT VT<sub>un</sub>, VT<sub>vn</sub>, VT<sub>wn</sub>; тормозной IGBT (Chopper) VT<sub>торм.</sub>; схемы управления верхними и нижними IGBT (Pre-Driver); источники питания верхних и нижних драй-

веров U, V, W, N; трёхфазный выпрямитель VD; конденсатор фильтра C<sub>ф</sub>; демпфирующий конденсатор (Snubber) C<sub>бл.</sub>; балластный резистор R<sub>б</sub> и двигатель переменного тока M.

Таблица 1. Основные параметры ИСМ фирмы Fuji Electric

Тип модуля	Серия	U <sub>кз</sub> , В	I <sub>к</sub> , А	U <sub>наб</sub> , В	I <sub>ос</sub> , А	Корпус	Масса, г
6MBP15RH060	R	600	15	2,7	21	P617	50
6MBP20RH060	R	600	20	2,7	30	P617	50
6MBP30RH060	R	600	30	2,7	44	P617	50
6MBP50RA060	R	600	50	2,8	75	P610	450
6MBP75RA060	R	600	75	2,8	113	P610	450
6MBP100RA060	R	600	100	2,8	150	P611	450
6MBP150RA060	R	600	150	2,8	225	P611	450
6MBP200RA060	R	600	200	2,8	300	P612	920
6MBP300RA060	R	600	300	2,8	450	P612	920
7MBP50RA060	R	600	50	2,8	75	P610	450
7MBP150RA060	R	600	150	2,8	225	P611	450
7MBP300RA060	R	600	300	2,8	450	P612	920
6MBP15RA120	R	1200	15	2,8	21	P619	85
6MBP50RA120	R	1200	50	2,6	75	P611	450
6MBP150RA120	R	1200	150	2,6	225	P612	920
7MBP25RA120	R	1200	25	2,6	38	P610	50
7MBP100RA120	R	1200	100	2,6	150	P612	920
6MBP50RTJ060	R	600	50	2,5	75	P621	450
6MBP150RTJ060	R	600	150	2,3	150	P621	450
7MBP75RTJ060	R	600	75	2,4	113	P621	450
7MBP100RTJ060	R	600	100	2,3	150	P621	450
6MBP50RJ120	R	1200	50	2,6	75	P621	450
7MBP75RJ120	R	1200	75	2,6	113	P621	450
6MBP20RTA060	R3	600	20	2,2	30	P619	85
6MBP50RTB060	R3	600	50	2,5	75	P610	440
6MBP150RTB060	R3	600	150	2,3	150	P611	450
7MBP75RTB060	R3	600	75	2,4	113	P610	440
7MBP100RTB060	R3	600	100	2,3	150	P611	450
6MBP25RU2A120	U	1200	25	2,2	38	P610	440
6MBP75RU2A120	U	1200	75	2,2	113	P611	450
7MBP50RU2A120	U	1200	50	2,2	75	P611	450
6MBP50TEA060	ECONO	600	50	2,5	75	P622	270
6MBP150TEA060	ECONO	600	150	2,3	225	P622	270
7MBP75TEA060	ECONO	600	75	2,4	113	P622	270
7MBP100TEA060	ECONO	600	100	2,3	150	P622	270
6MBP25TEA120	ECONO	1200	25	3,1	38	P622	270
6MBP75TEA120	ECONO	1200	75	3,1	113	P622	270
7MBP50TEA120	ECONO	1200	50	3,1	75	P622	270

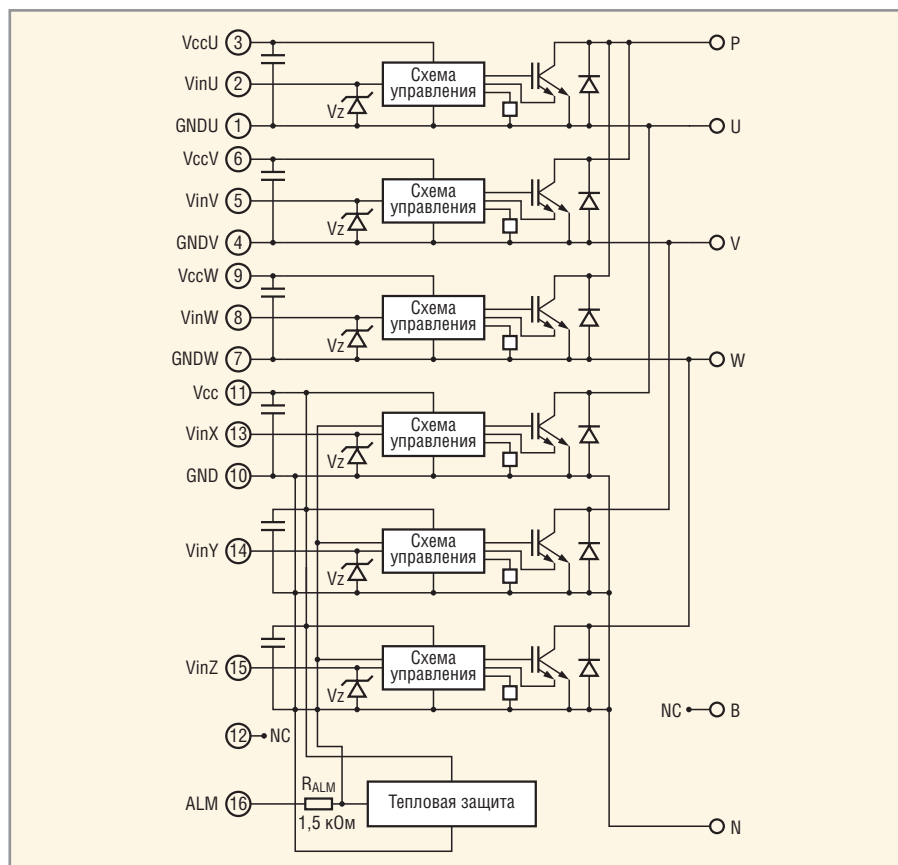


Рис. 2. Структура ИСМ 6MBVxxxxxx фирмы Fuji Electric

На верхние и нижние драйверы подаются трёхфазные управляющие ШИМ-сигналы. Скорость вращения двигателя определяется частотой модуляции, вращающий момент – её глубиной, а направление вращения – фазовыми соотношениями ШИМ-сигналов каналов U, V, W. Тормозной прерыватель включается сигналом Brake input, сигнал «тревоги», сигнализирующий о перегреве выводов модулей, снимается с вывода Alarm output.

Функциональное назначение и нумерация выводов модулей определяется типами корпусов и структурой конкретных модулей, однако аббревиатуры, обозначающие назначение выводов, в основном, одинаковы для всех ИСМ фирмы Fuji Electric.

Рассмотрим особенности наиболее мощных модулей серии R – 6MBP300RA060 и 7MBP300RA060; структура и нумерация выводов модуля с шестью IGBT приведены на рисунке 2; назначения выводов модуля:

- P, N – положительный и отрицательный терминалы силового источника питания;
- U, V, W – выходные терминалы инверторов;
- GNDU, GNDV, GNDW – корпусные шины верхних драйверов;
- GND – силовой корпус;

- Vin U, Vin V, Vin W – входы управления верхних драйверов;
- Vcc U, Vcc V, Vcc W – напряжения питания верхних драйверов;
- Vcc – напряжение питания нижнего драйвера;
- Vin X, Vin Y, Vin Z – входы управления нижних драйверов;
- ALM – выход сигнала «тревоги» от схемы защиты ОН.

В модуль 7MBP300RA060 встроен дополнительный IGBT, осуществляющий функцию тормозного прерывателя, и задействованы дополнительные выводы: B – вывод коллектора тормозного IGBT; Vin DB – вывод затвора тормозного IGBT. Основные параметры модулей:

- максимальное постоянное напряжение на выводе P 400 В;
- максимальный постоянный ток коллектора 300 А (600 А при  $T_{имп} = 1$  мс);
- максимальная мощность рассеяния 1040 Вт;
- температура корпуса  $-20...100^{\circ}\text{C}$ ;
- напряжение изоляции 2500 В;
- напряжение насыщения коллектор–эмиттер 2,8 В (при  $I_K = 300$  А);
- падение напряжения на антипараллельных диодах 3 В (при  $I_K = 300$  А);
- напряжение питания (типичное значение) 15 В, максимальное 20 В;

- входное напряжение (измеряется между выводами 2 и 1; 5 и 4; 8 и 7; 13, 14, 15, 10 и N);
- напряжение стабилизации 8 В (типичное значение);
- температура срабатывания схемы защиты от перегрева ОН  $110...125^{\circ}\text{C}$  (измеряется в определённой точке корпуса модулей);
- ток срабатывания схемы защиты от короткого замыкания и перегрузки по току SC, OC, 450 А;
- напряжение срабатывания схемы защиты от низкого напряжения Vcc UV 11...12,5 В;
- частота входных ШИМ-сигналов 1...20 кГц.

Типовая схема включения модулей 6MBPxxxRxxxx (без тормозных IGBT) в корпусах P610, P611, P612 приведена на рисунке 3. Входные ШИМ-сигналы IF подаются через изолирующие оптроны на фототранзисторы, на которые через резисторы 20 кОм подано напряжение Vcc (15 В) от отдельных источников питания Vcc. Включение IGBT происходит при низком уровне напряжения на входах модулей (выводы 2, 5, 8, 13, 14, 15). Сигнал срабатывания схемы температурной защиты снимается с вывода 16 модулей также через оптрон; выводы и B следует соединять с корпусом (вывод N).

На рисунке 4 показаны зависимости тока коллектора IGBT-модулей от напряжения  $U_{кэ}$  при различных напряжениях питания  $V_{cc}$  и температуре выводов модулей  $T_j = 125^{\circ}\text{C}$ . При снижении температуры  $U_{кэ}$  также снижается, например, при  $T = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{cc} = 15$  В и токе  $I_K = 300$  А напряжение  $U_{кэ} = 2,3$  В. Параметры переключения модулей характеризуются диаграммами, показанными на рисунке 5. Время включения  $t_{он}$  и выключения  $t_{оф}$  зависят от тока коллекторов IGBT незначительно, длительность переднего фронта  $t_f$  выходных импульсов изменяется в пределах 0,2...0,3 мкс при изменении  $I_K$  от 100 до 300 А (зависимости сняты при  $V_{cc} = 15$  В,  $V_{dc} = 300$  В,  $t_{выб} = 125^{\circ}\text{C}$ ).

На рисунке 6 приведена зависимость падения напряжения  $V_f$  на антипараллельных диодах от величины прямого тока  $I_f$  при различных температурах; соответствующие временные диаграммы показаны на рисунке 7. Особенности функционирования схем защиты модулей серий R-IPM, R-IPM3, Econo IPM, их подробные технические и конструктивные характеристики приведены в [5].

Модули серии R широко применяются в бытовых, офисных и промышленных приложениях, например, ИСМ 6MBP50RA120 установлен в наружных блоках кондиционеров «Сити Мульти» YMC-C фирмы Mitsubishi Electric. Модуль обеспечивает привод трёхфазного двигателя переменного тока компрессора системы мощностью 5,5 кВт при напряжении 380 В, 50 Гц (модель PURY-200YMF-C).

Остановимся на некоторых особенностях ИСМ различных серий. В 1997 г. компания Fuji Electric впервые разработала промышленную технологию защиты силовых IGBT от перегрева и выпустила ряд ИСМ серии R. Силовые транзисторы ИСМ этой серии приборов были выполнены по эпитаксиальной технологии РТ (Punch Through). В дальнейшем фирме удалось значительно улучшить характеристики силовых транзисторов путём перехода от эпитаксиальных пластин к пластинам FZ (Floating zone) и применения технологии NPT (Non-punch through). В 2002 г. по этой технологии были выпущены первые модули серии R-IPM3, новые приборы имели более низкие потери энергии при выключении  $P_{off}$ . Дальнейшего снижения потерь фирме удалось добиться путём перехода от планарной структуры кристаллов IGBT к структуре Trench NPT. Особенности упомянутых технологий обсуждаются в [9].

Для сравнения модулей на рисунке 8 приведены зависимости величины общих потерь (Total loss) от действующего значения тока в нагрузке для сопоставимых по мощности ИСМ серий R-IPM, R-IPM3, U-IPM 600V при частоте ШИМ-сигнала 4 кГц, температуре выводов 125°C, напряжениях питания  $E_d = 300$  В,  $V_{cc} = 15$  В и факторе мощности  $P_f = 0,85$ . На рисунке 9 приведены зависимости тока коллекторов этих модулей от  $U_{кз\ на с}$ . При увеличении частоты ШИМ-сигнала общие потери возрастают и при  $f_{ши м} = 16$  кГц составляют 88,79 Вт (R-IPM), 71,67 Вт (R-IPM3), 63,08 Вт (U-IPM) [6].

В каталоге фирмы 2009 г. модули ИСМ серии U-IPM 600V отсутствуют, а предлагаются высоковольтные приборы U-IPM 1200V, разработанные фирмой в 2006 г. В качестве примера перечислим основные параметры наиболее мощного прибора ИСМ серии U 7MBP75RU2A120 из каталога фирмы 2009 г.:

- максимальное напряжение питания силовой части 900 В;

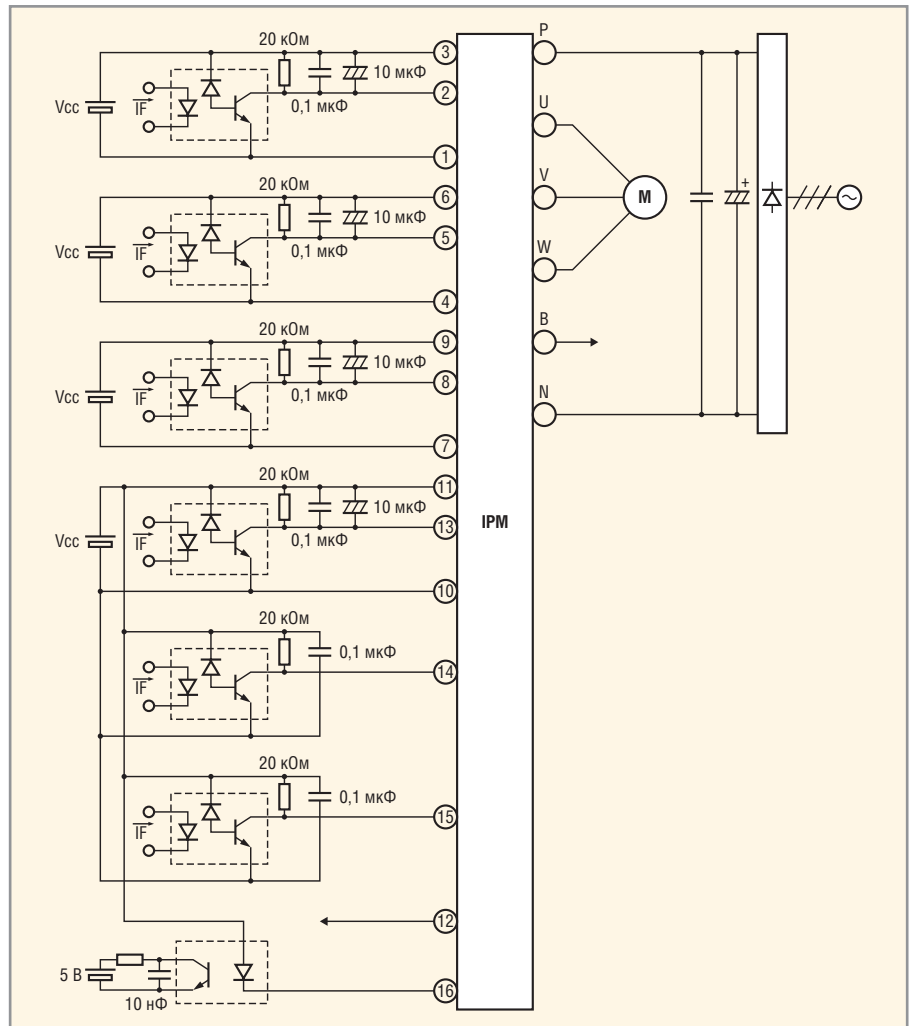


Рис. 3. Схема включения ИСМ 6MBVxxxxxxx фирмы Fuji Electric

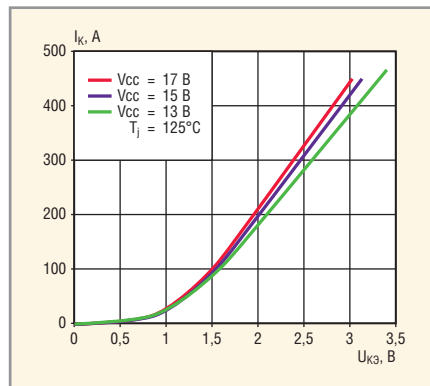


Рис. 4. Зависимость тока коллектора IGBT-модулей от напряжения  $U_{кз}$

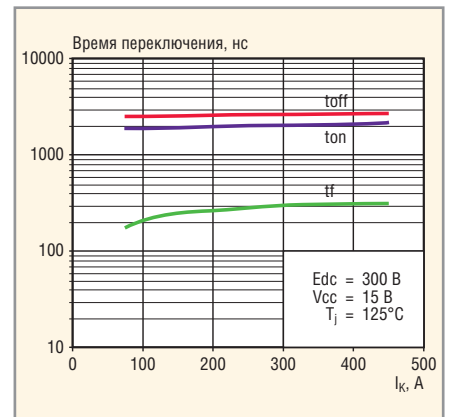


Рис. 5. Параметры переключения ИСМ

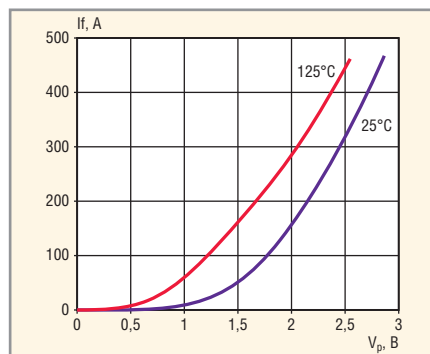


Рис. 6. Зависимость тока коллектора  $I_f$  от напряжения  $V_f$

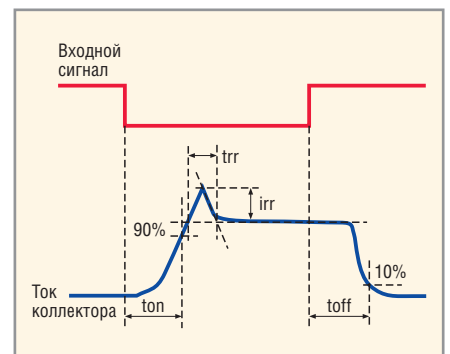


Рис. 7. Временные диаграммы входных и выходных импульсов ИСМ



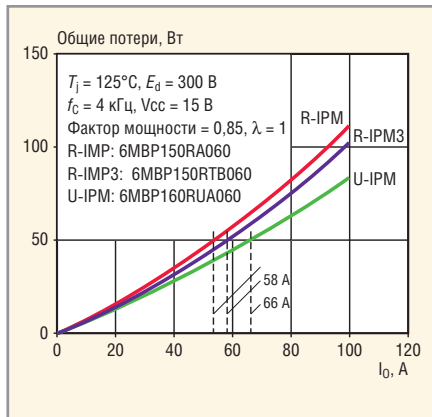


Рис. 8. Зависимость общих потерь от выходного тока для ИСМ серий R-IPM, R-IPM3, U-IPM

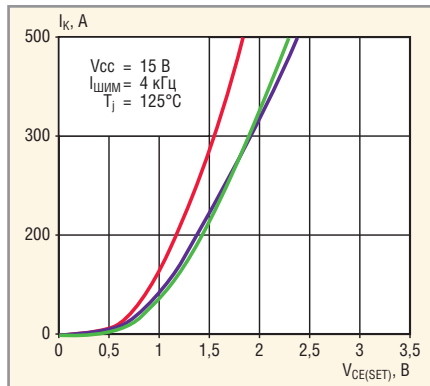


Рис. 9. Зависимость тока коллектора IGBT от напряжения  $U_{кз}$  для ИСМ серий R-IPM, R-IPM3, U-IPM



Рис. 10. Пружинные выводы модулей MiniSKiiP фирмы Semikron

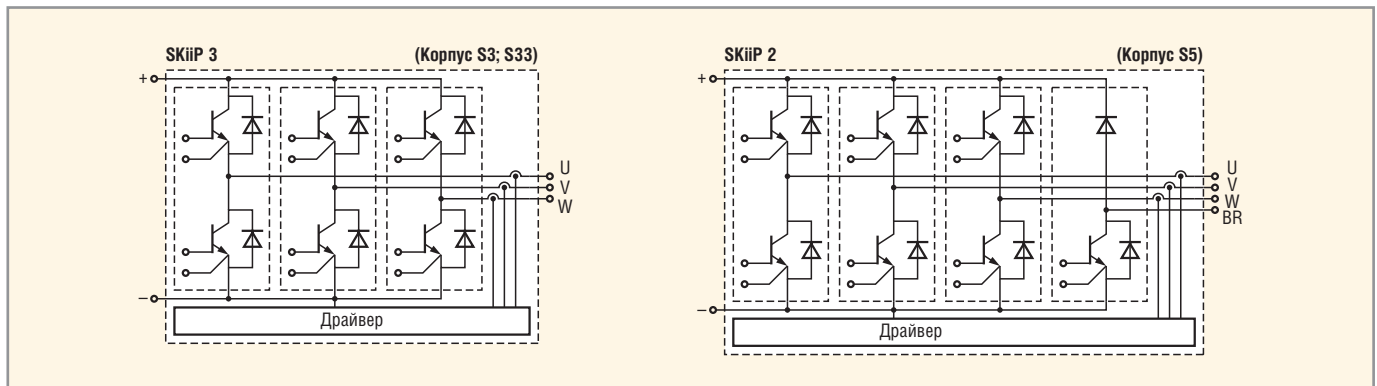


Рис. 11. Структурные схемы ИСМ SKiiP2, SKiiP3

- максимальный импульсный ток коллектора 150 А ( $T_n < 1$  мс);
- максимальная рассеиваемая мощность 403 Вт (на один IGBT);
- максимальный ток тормозного транзистора 50 А;
- максимальный прямой ток антипараллельных диодов 50 А;
- напряжение насыщения всех IGBT 1,9...2,2 В (при  $I_k = 75$  А);

- падение напряжения на антипараллельных диодах 2,1...2,4 В (при  $I_k = 75$  А);
- $t_{on}/t_{off}$  – время включения/выключения (1,2...1,8)/(2,6...3,6) мкс (при  $I_k = 75$  А,  $V_{dc} = 600$  В).

Одним из крупнейших европейских производителей силовых полупроводниковых приборов является фирма Semikron International GmbH (Германия). В ассортименте продукции фир-

мы также имеются интеллектуальные силовые модули, в том числе, приборы серии MiniSKiiP IPM в конфигурации CIB (выпрямитель-инвертор-силовой каскад), впервые показанные на выставке PCIM-2008. В приборах семейства MiniSKiiP реализованы оригинальная технология сборки pressure contact (прижимной контакт) и пружинные выводы, главным преимуществом которых является высокая стойкость к многократным перепадам температур. Это достигается за счёт отсутствия паяных соединений, которые при многократных циклах нагрева/охлаждения растрескиваются. До последнего времени это не позволяло использовать модули в тяжёлых условиях эксплуатации, например в автомобильных приводах. Внешний вид модулей серии MiniSKiiP с пружинными контактами показан на рисунке 10.

В каталог Semikron 2009 г. внесено более 50 типов ИСМ серий SKiiP2, SKiiP3, силовые IGBT в которых выполнены по технологиям SPT, NPT-IGBT, Trench-IGBT, и пять типов ИСМ серии MiniSKiiP [7]. В таблице 2 приведены основные параметры ИСМ с шестью и семью IGBT. Приведённые в таблице максимальные значения тока  $I_k$  соответствуют температуре корпуса модулей 25°C, напряжения насыщения кол-

Таблица 2. Основные параметры ИСМ фирмы Semikron

Наименование	Серия	$U_{кз}, В$	$I_k, А$	$U_{нас}, В$	$I_{макс}$	Корпус	Тип IGBT
132GD120-3DU	SKiiP 2	1200	112	3,1	150	S3	NPT-IGBT (6)
132GD120-4DU	SKiiP 2	1200	112,5	3,1	150	S5	NPT-IGBT (7)
232GD120-3DU	SKiiP 2	1200	150	3,1	200	S3	NPT-EGBT (6)
232GD120-4DU	SKiiP 2	1200	150	3,1	200	S5	NPT-IGBT (7)
292GD170-3DU	SKiiP 3	1200	188	4,3	250	S3	SPT (6)
313GD122-3DUL	SKiiP 3	1200	225	2,5	230	S33	SPT (6)
342GD120-3DU	SKiiP 2	1200	225	3,1	300	S3	NPT-IGBT (6)
342GD120-4DU	SKiiP 2	1200	225	3,1	300	S5	NPT-IGBT (7)
513GD122-3DUL	SKiiP 3	1200	357	2,5	500	S33	SPT (6)
513GD172-3DUL	SKiiP 3	1700	375	2,2	400	S33	Trench-IGBT (6)
603GD122-3DUW	SKiiP 3	1200	450	2,5	480	S33	SPT (6)
603GD172-3DUW	SKiiP 3	1700	340	2,2	450	S33	Trench-IGBT (6)
603GD172-3DUWV7	SKiiP3	1700	440	2,2	570	S33	Trench-IGBT (6)
613GD123-3DUL	SKiiP3	1200	350	1,9	600	S33	Trench-IGBT (6)
613GD123-3DULBV	SKiiP3	1200	350	1,9	470	S33	Trench-IGBT (6)
25NABI066V1	MiniSKiiP IPM	600	30	1,45	39	MiniSKiiP	Trench-Field (CIB)
26NABI066V1	MiniSKiiP IPM	600	50	1,45	59	MiniSKiiP	Trench-Field (CIB)
37NABI066V1	MiniSKiiP IPM	600	75	1,45	79	MiniSKiiP	Trench-Field (CIB)
25AC112T4V1	MiniSKiiP IPM	1200	50	1,85	72	MiniSKiiP	Trench-Field (6)

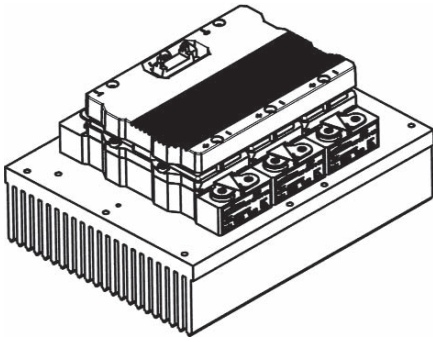


Рис. 12. Внешний вид модулей SKiiP3

лектор–эмиттер  $U_{нас}$  соответствуют температуре выводов модулей  $125^{\circ}\text{C}$ . В ИСМ-конфигурации С1В входят тормозные транзисторы (всего семь IGBT).

Упрощённые структурные схемы модулей SKiiP2/SKiiP3 с шестью и семью IGBT приведены на рисунке 11, функциональное назначение выводов определяется структурой и типами корпусов конкретных приборов. Внешний вид модуля в корпусе S33, установленного на теплоотвод с воздушным охлаждением PX16/280, показан на рисунке 12; вес модуля 2,4 кг, с теплоотводом – 7,5 кг. Фирма поставляет большое число типов теплоотводов с воздушным и водяным охлаждением. Кроме основ-

ных параметров, приведённых в таблице 2, ИСМ характеризуются большим числом показателей, необходимых для разработки аппаратуры. В качестве примера перечислим некоторые параметры модуля 342GDL120-3DU:

- максимальное напряжение питания на выводах 900 В (см. рис. 11);
- рабочая температура выводов модулей  $-40...150^{\circ}\text{C}$ ;
- напряжение изоляции 3000 В;
- напряжение насыщения при  $I_{\text{к}} = 250\text{ А}$  и температуре выводов  $25^{\circ}\text{C}$  составляет 2,6 В (при  $T = 125^{\circ}\text{C} - 3,1\text{ В}$ );
- прямое падение напряжения на антипараллельных диодах (Inverse diode) 2,1 В (при  $I_{\text{к}} = 250\text{ А}$ ,  $T = 25^{\circ}\text{C}$ );
- напряжения питания схем управления (14,4...15,6)/(20...30) В (рекомендуемые 15/24 В);
- максимальное напряжение сигналов управления (лог. 1) 15 В;
- максимальная частота входных ШИМ-сигналов 20 кГц;
- ток срабатывания системы защиты по току ОС 375 А;
- температура срабатывания защиты от перегрева ОН  $110...120^{\circ}\text{C}$ .

Особенности применения модулей SKiiP2/3 подробно изложены в руко-

водствах Modules-Explanations-SkiiP и Applications note на интернет-странице фирмы [8]. Подробная информация на ИСМ серии MiniSkiiP IPM на сайте фирмы отсутствует (на лето 2009 г.), при необходимости она предоставляется по индивидуальным заявкам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.aircon.ru/useful/magazines/pdf/mitsubishi/9/5.pdf>.
2. <http://promstore.ru/article/article-crn.html>.
3. Fuji Electric and Team Semikron Up, <http://www.semikron.com/internet/index.jsp?sekId=443>.
4. IGBT Modules IPM, <http://www.fujielectric.com/device/semi/products/powerdevices/ipm.html>.
5. Fuji IGBT-IPM Application Manual, <http://www.fujielectric.com/device/semi/technical/application/pdf/REH983a/REH983a.pdf>.
6. Kiyoshi Sekigawa, Hiroshi Endo, Hiroki Wakimoto. U-series of IGBT-IPMs (600V). Fuji Electr. Rev. 2005. Vol. 52. No. 2. PP. 48–51.
7. <http://www.semikron.com/internet/index.jsp?sekId=289&sekNav=228>.
8. <http://www.semikron.com/internet/index.jsp?sekId=413&sekNav=228>.
9. Колтаков А. NPT, TRENCH, SPT... Что дальше? Силовая электроника. 2006. № 3. С. 14–22. ©