

# Современные IGBT-продукты

## для силовой электроники компании Infineon

Юрий Петропавловский

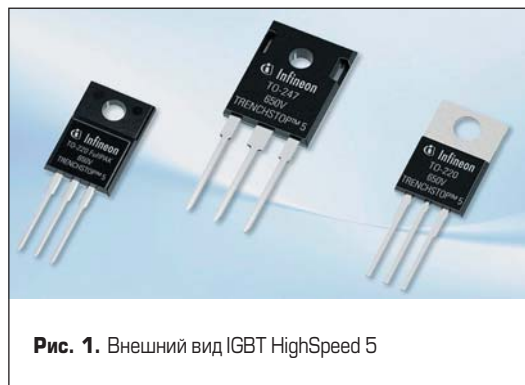


Рис. 1. Внешний вид IGBT HighSpeed 5

Компания Infineon Technologies AG (г. Нойбиберг, Германия) является одним из крупнейших производителей силовых полупроводниковых приборов, модулей и блоков. Ее продукцию во многих городах России представляют крупные дистрибьюторы электронных компонентов: EBV Elektronik, RUTRONIK, Silica, «Симметрон», ЭФО, PT Electronics. Силовые приборы для промышленных приложений компании предлагает офис продаж Infineon RUS LLC в Москве.

В каталоге компании 2014 г. силовые продукты представлены в следующих категориях: IGBT, MOSFET, микросхемы управления питанием, силовые модули, узлы и системы, ключи верхнего и нижнего плеча, продукты на основе карбида кремния. Силовые приборы также представлены в категориях микросхем для автомобильной электроники, дискретных полупроводниковых приборов, стабилизаторов напряжения и драйверов светодиодов [1].

### IGBT-продукты

В данную категорию включены дискретные IGBT с антипараллельными диодами (десятки типов), дискретные приборы семейства HighSpeed 5 и IGBT-модули различных серий, в том числе MIPAQ, CIPOS, SmartPIM, SmartPACK. В категорию также включены IGBT для автомобильных приложений, чипы и приборы без антипараллельных диодов.

Одной из последних новинок компании являются IGBT семейства HighSpeed 5, выполненные по технологии TRENCHSTOP 5 с рабочим напряжением 650 В и током коллектора 8–50 А. Приборы выпускаются в корпусах TO-220, TO-220 FullPAK, TO-247,

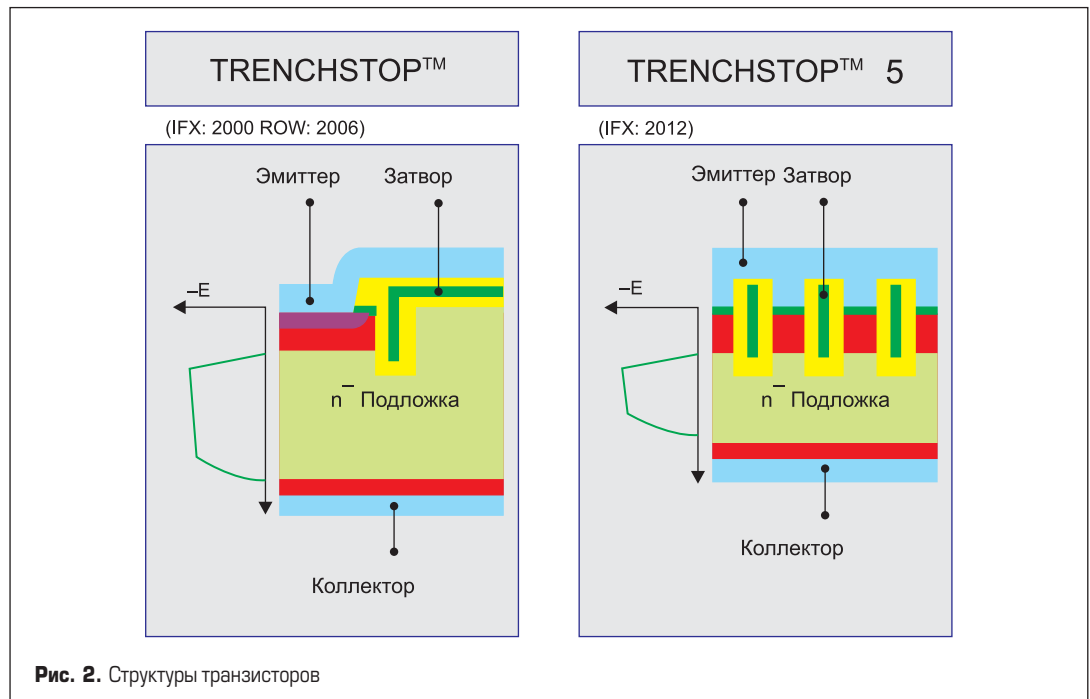


Рис. 2. Структуры транзисторов

их внешний вид показан на рис. 1. Компания называет новые транзисторы лучшими в своем классе с точки зрения производительности и эффективности в сочетании с высокой надежностью. Приборы оптимизированы для применения в корректорах мощности и ключах с ШИМ. Они могут быть использованы в источниках бесперебойного питания (ИБП), корректорах коэффициента мощности (ККМ), инверторах для солнечной энергетики и сварочных аппаратах. На рис. 2 показаны структуры IGBT TRENCHSTOP и TRENCHSTOP 5. Основные особенности и преимущества приборов в сравнении с транзисторами предыдущего поколения семейства HighSpeed 3:

- в 2,5 раза меньше заряд затвора и вдвое снижены потери при коммутации;
- на 200 мВ меньше напряжение насыщения и на 50 В больше рабочее напряжение;
- высокие возможные частоты коммутации (до 70 кГц);
- высокая плотность мощности, надежность и мягкие характеристики коммутации;
- время обратного восстановления 50 нс;
- встроенный антипараллельный диод семейства RAPID или диод на основе карбида кремния;
- малая выходная емкость;
- высокая эффективность при малых нагрузках (до 40% от максимальной).

Классификационные параметры приборов HighSpeed 5 приведены в таблице 1.

Приборы с окончаниями в названиях F5 и H5 отличаются параметрами переключения. На рис. 3 приведены соответствующие диаграммы токов и напряжений переключения инвертора для преобразования энергии солнечных батарей мощностью 2 кВт в сравнении с характеристиками приборов предыдущего поколения H3. Приборы исполнения H5 с диодами типа RAPID оптимизированы для использования их в качестве замены приборов предыдущих поколений — каких-либо изменений схем и режимов не требуется, оптимальная величина резистора в цепи затвора  $R_{g\ on} = 5$  Ом. Исполнения F5 в сравнении с H5 отличаются несколько меньшей индуктивностью и применением SiC-диодов, что повышает эффективность преобразователей примерно на 1%, однако для получения нужного эффекта в цепи затвора необходим сплит-резистор ( $R_{g\ off}$ ). Потери переключения приборов серии значительно меньше, чем у приборов предыдущих поколений, и сравнимы с потерями полевых транзисторов. На рис. 4 приведены зависимости потерь включения от сопротивления затвора приборов HighSpeed 5 в сравнении с потерями других приборов [2].

При использовании приборов в ККМ эффективность преобразования может быть увеличена на 0,6% для исполнений H5 и на 1,7% для исполнений F5 по сравнению с приборами предыдущего поколения H3. На рис. 5 показаны зависимости эффективности ККМ с частотой коммутации 70 кГц от выходной мощности для различных типов приборов и различных значений  $R_{g\ on}/R_{g\ off}$  (рис. 6) [3].

Таблица 1. Классификационные параметры приборов HighSpeed 5

Тип прибора	$I_{кр}, А$	$U_{кз\ насс}, В$	$C_{вх}, пФ$	$Q_{зr}, нКл$	$E_{общ}, мДж$	$t_{фr}, нс$	$t_{cr}, нс$	Корпус	Режим измерения ( $I_{кр}, А$ )
IGP40N65F5	40	1,6	2500	95	0,46	13	16	TO-220-3	20
IGW40N65F5								TO-247-3	
IGP40N65H5		1,65			0,51	12	13	TO-220-3	
IGW40N65H5								TO-247-3	
IGW50N65F5	50	1,6	3000	120	0,65	15	18	TO-247-3	25
IGW50N65H5		1,65			0,7			TO-220-3	
IKA08N65F5	8	1,6	500	22	0,09	5	20	TO-220-3	4
IKA08N65H5		1,65			0,1			15	
IKA15N65F5	15	1,6	930	38	0,17	7	16	TO-220-3 FP	7,5
IKA15N65H5		1,65							
IKP08N65F5	8	1,6	500	22	0,09	5	20	TO-220-3	4
IKP08N65H5		1,65			50				
IKP15N65F5	15	1,6	930	38	0,17	7	16	TO-220-3	7,5
IKP15N65H5		1,65							
IKP40N65F5	40	1,6	2500	95	0,46	13	16	TO-220-3	20
IKW40N65F5								TO-247-3	
IKP40N65H5		1,65			0,51	12	13	TO-220-3	
IKW40N65H5								TO-247-3	
IKW50N65F5	50	1,6	3000	120	0,65	15	18	TO-247-3	25
IKW50N65H5		1,65			0,7				

Примечания: приборы IGP, IGW содержат только IGBT, в остальные интегрированы антипараллельные диоды серии RAPID ( $t_{rr}$  от 41 до 52 нс) или SiC;  $t_b$  — время нарастания;  $t_c$  — время спада; потери переключения  $E_{общ}$  включают «хвост» и обратное восстановление диодов; значения параметров действительны при температуре +25 °С.

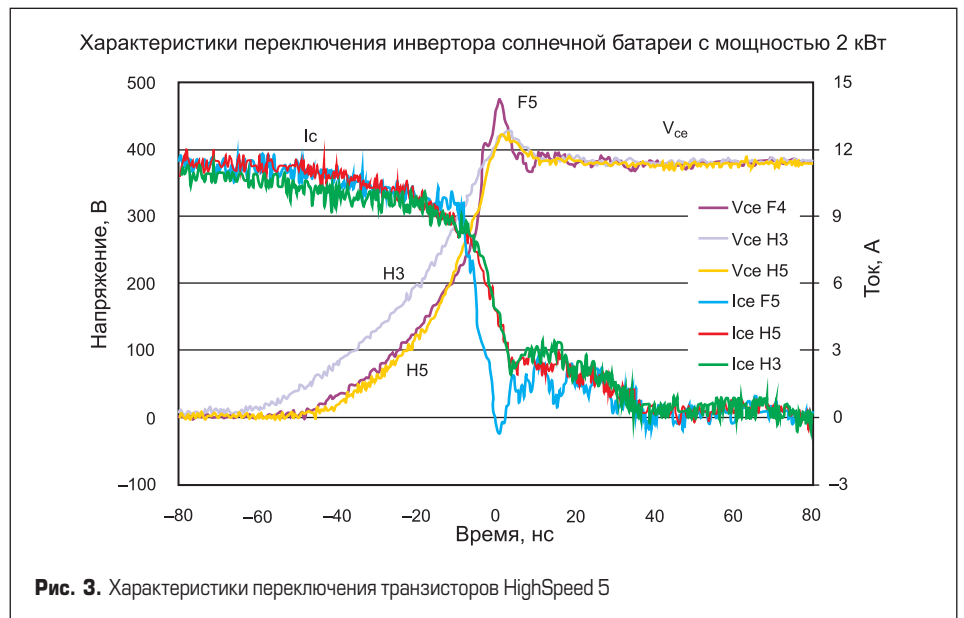


Рис. 3. Характеристики переключения транзисторов HighSpeed 5

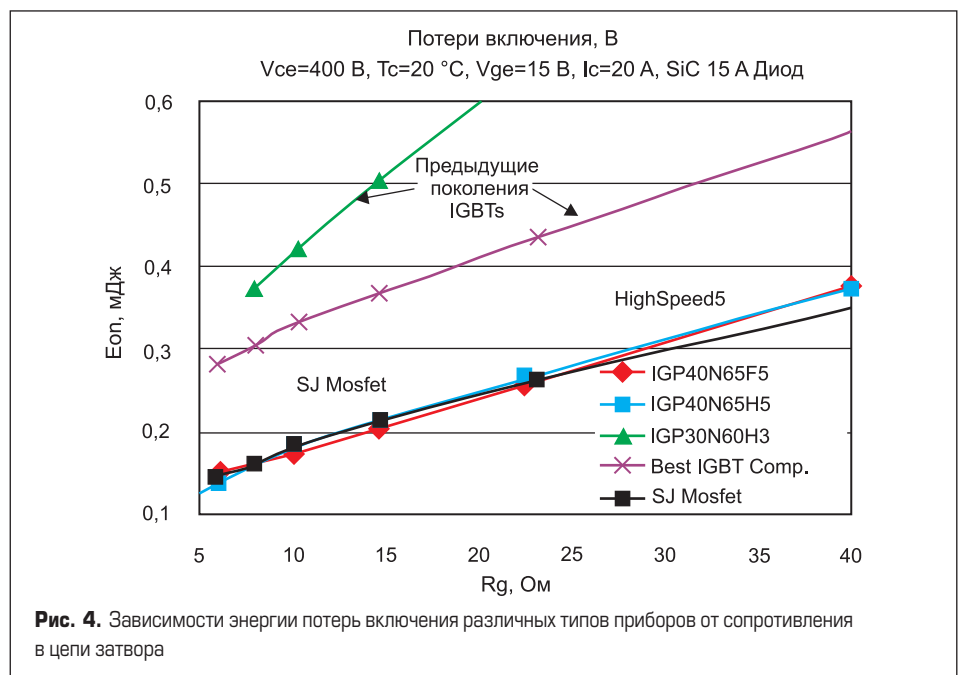
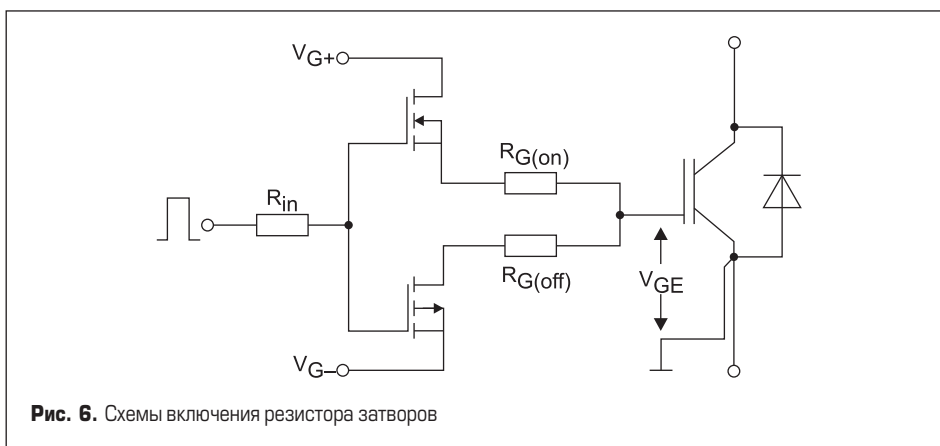
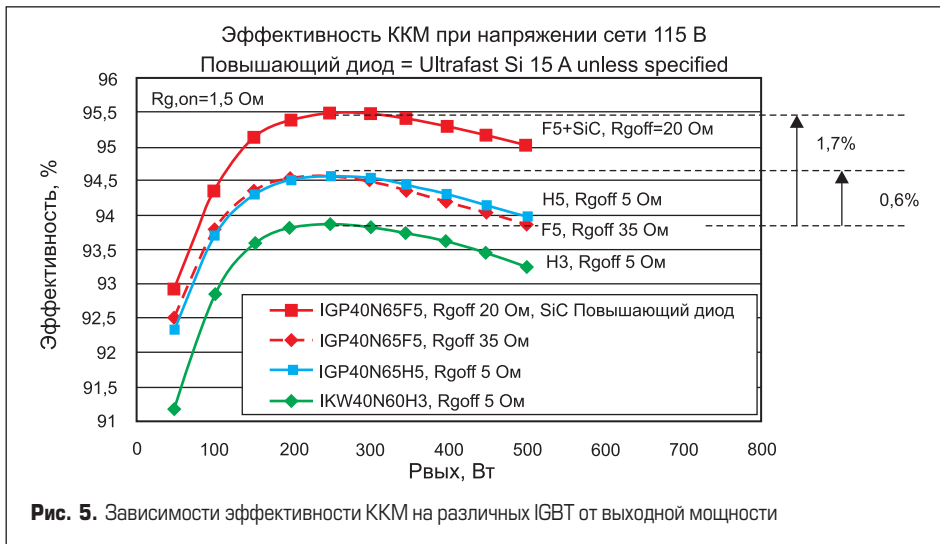


Рис. 4. Зависимости энергии потерь включения различных типов приборов от сопротивления в цепи затвора



**IGBT-модули**

Номенклатура IGBT-модулей, выпускаемая компанией, чрезвычайно широка, в каталоге 2014 г. представлены одиночные, двоянные, полумостовые и трехфазные модули, в состав которых могут входить по несколько параллельно или последовательно соединенных IGBT с антипараллельными диодами.

Одной из последних разработок компании является серия IHV KE3 (IHV 6,5 кВ) силовых модулей большой мощности на рабочее напряжение 6500 В и рабочие токи 250–750 А. Представленные в 2013 г. приборы серии могут состоять из одного (рис. 7), двух (рис. 8) и трех (рис. 9) параллельно соединенных IGBT с антипараллельными диодами, конфигурации приборов — одиночный ключ (один и три IGBT

с диодами), двоянный ключ (два IGBT с диодами), чоппер (IGBT с диодом + отдельный диод). В двоянных приборах затворы транзисторов соединены, а коллекторы и эмиттеры выведены отдельно, в строенных приборах электроды всех трех транзисторов соединены параллельно, в состав серии также входят диодные модули, состоящие из двух отдельных диодов.

Приборы серии выполнены по технологии Trench Field Stop для IGBT и ECD (Emitter Controlled Diode) для диодов и обеспечивают повышенную производительность за счет уменьшения потерь проводимости, а также большую на 25% плотность тока при использовании стандартных корпусов IHV. Модули удовлетворяют самым высоким требованиям по надежности при циклических режимах работы, что является важнейшим требованием при работе в составе

тяговых электроприводов. При производстве приборов используются новые композитные материалы: алюминиевый сплав, армированный частицами карбида кремния (AlSiC), для основания и нитрид алюминия (AlN) для подложки, что улучшает термодинамические свойства и электрическую прочность изоляции.

К основным областям применения модулей относятся тяговые частотно-регулируемые преобразователи для железнодорожного транспорта и промышленные преобразователи, питаемые постоянным напряжением 3 кВ и переменным 2,3 кВ. В этих приложениях до недавнего времени использовались GTO и IGCT, использование новых IGBT Infineon вместо них позволяет упростить схемотехнические и конструктивные решения и повысить надежность приводов.

Первичное напряжение 3000 В в тяговых сетях может иметь разброс ±20%, а на практике еще больше из-за рекуперативного торможения. Благодаря своей устойчивости к высоким запирающим напряжениям модули серии надежно выдерживают пики индуктивных перенапряжений, что обеспечивает безопасное отключение при скоростях нарастания тока до 10 кА/мкс и паразитных индуктивностях рассеяния до 200 нГн. Использование модулей также эффективно для промышленных преобразователей, питающих электродвигатели таких приложений, как насосы, вентиляторы, компрессоры, экструдеры и конвейерные системы для металлургической, горнодобывающей, водоочистной, цементной, химической и бумажной промышленности, а также в машиностроении и строительстве.

По присоединительным размерам новые модули IHV 6,5 кВ идентичны уже существующим модулям IHV, что обеспечивает их легкую замену. При проектировании модулей была осуществлена модернизация для получения необходимых величин воздушного зазора и длины пути тока утечки. Модули разработаны в соответствии со стандартом EN50124-1 (категория перенапряжения OV2) исходя из номинального напряжения изоляции 10,2 кВ, при этом воздушный зазор и длина пути тока утечки составили 26 и 56 мм соответственно. Классификационные параметры IGBT-модулей серии IHV 6,5 кВ из каталога компании 2014 г. приведены в таблице 2, значения параметров действительны при T<sub>j</sub> = +125 °С. Основные особенности и параметры модулей (кроме приведенных в таблице 2):





Рис. 10. Внешний вид модуля MIPAQ

Таблица 2. Классификационные параметры IGBT модулей серии IHV 6,5 кВ

Тип прибора	$I_{кр}$ , А	$E_{вкл}$ , мДж	$E_{выкл}$ , мДж	$Q_2$ , мкКл	$C_{вх}$ , нФ	Размеры, мм	Примечания
FD250R65KE3-K	250	2200	1400	10	69	130×140×48	чоппер
FD500R65KE3-K	500	4300	2800	20	135	140×190×48	чоппер
FZ250R65KE3	250	2200	1400	10	69	73×140×48	одиночный ключ
FZ400R65KE3	400	3450	2250	17	110	130×140×48	сдвоенный ключ
FZ500R65KE3	500	4300	2800	20	135	130×140×48	сдвоенный ключ
FZ600R65KE3	600	5200	3400	25	160	140×190×48	строенный ключ
FZ750R65KE3	750	6500	4200	31	205	140×190×48	строенный ключ

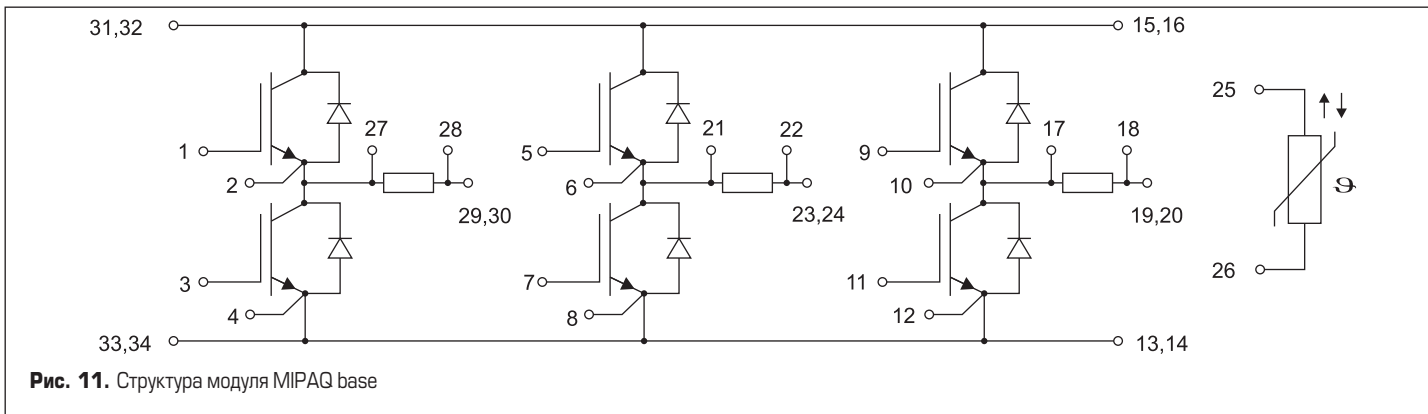


Рис. 11. Структура модуля MIPAQ base

- высокая надежность, удельная мощность и прочность конструкции;
- расширенные диапазоны рабочих температур и хранения —  $-50(-55) \dots +125$  °С;
- малое напряжение насыщения «коллектор-эмиттер»  $U_{к нас} = 3 В/3,7 В$  при  $T_{vj} = +25/+125$  °С;
- малое время нарастания/спада импульсов —  $0,4/0,5$  мкс при  $T_{vj} = +125$  °С;
- тепловое сопротивление корпус/теплоотвод —  $8,7 \dots 26,5$  К/кВт (в зависимости от типа прибора).

Особенности других типов силовых IGBT модулей Infineon приведены в [4, 5].

В 2012–2013 гг. компания представила новые модификации силовых модулей, выполненных по технологии MIPAQ, — MIPAQ base и MIPAQ serve, в то же время выведя из производства модификацию MIPAQ sense. В состав модулей MIPAQ base интегрированы шесть IGBT (три полумоста) с антипараллельными диодами и терморезистор с отрицательным коэффициентом сопротивления, а также балластными резисторами на выходах полумостов (токовые шунты). Модули выполнены в стандартных корпусах ECONO3-4 по технологии IGBT4-T4/E4, внешний вид приборов показан на рис. 10, структура и нумерация выводов приведены на рис. 11.

**Силовые модули MIPAQ serve**

Модули MIPAQ serve объединяют силовую часть из шести IGBT с антипараллельными диодами, токовыми шунтами, систему управления с электрически изолированным логическим входным интерфейсом и схему цифрового измерения температуры встроенного терморезистора с отрицательным ТКС. Модули выполнены в корпусах MIPAQ-3 (EconoPACK 4), внешний вид приборов показан на рис. 12, упрощенная структура модулей приведена на рис. 13. Внешние сигналы управления поступают на входной 22-контактный

разъем X2 типа 87832-22 (Molex-connector). Логические схемы модуля от драйверов верхних и нижних плеч гальванически отделяют специальные трансформаторы без магнитных сердечников (Coreless Transformer, CLT). Положительные

и отрицательные напряжения питания IGBT-модуля поступают с силовых шин (DC-Busbar ±), подключенных к силовой сети напряжением до 1200 В. Напряжения смещения на затворы верхних ключей подаются от отдельного изолиро-



Рис. 12. Внешний вид модуля MIPAQ serve

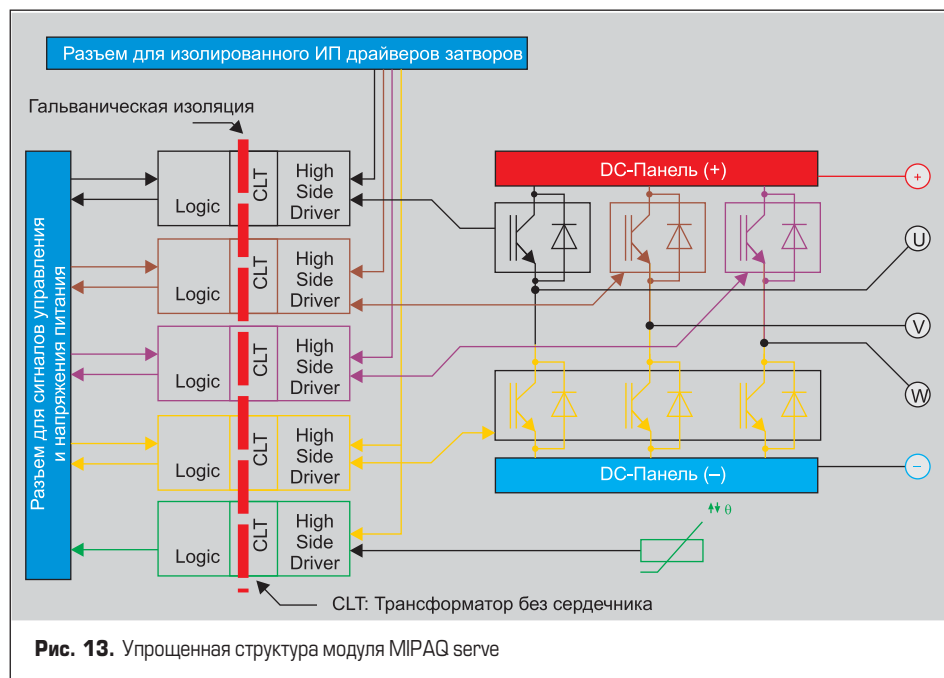


Рис. 13. Упрощенная структура модуля MIPAQ serve



Рис. 14. Микросхема 1ED02012-FA

ванного источника питания через 22-контактный разъем X1 типа 43045-22 (Molex-connector). Основное напряжение питания и нагрузка подключаются к винтовым терминалам с резьбой М6. Основные особенности и параметры модулей:

- шестикомпонентный силовой модуль с блоком электронного управления;
- гальванически изолированный драйвер на основе технологии CLT с интегральным трансформатором без магнитного сердечника;
- цифровой измеритель температуры базовой платы модуля на основе терморезистора NTC;
- несинхронность включения/выключения всех IGBT модуля не более 20 нс;
- рейтинговые напряжения/ток — 1200 В/100 А (IFS100V12PT4), 1200 В/150 А (IFS150V12PT4), 1200 В/200 А (IFS200V12PT4);
- встроенные схемы защиты от перегрева, коротких замыканий, пониженного напряжения всех источников питания, сбоев передачи управляющих сигналов;
- соответствие стандартам IEC61800-5-1 (по гальванической изоляции), UL94, RoHS;
- максимальное напряжение на силовой шине питания — 850 В;
- напряжение насыщения «коллектор-эмиттер» IGBT — 2,1 В (при  $T_{vj} = +150\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $I_k = 100\text{--}200\text{ А}$ );
- энергия потерь включения/выключения  $E_{on}/E_{off} = 21,3/20\text{ мДж}$  (IFS200V12PT4,  $T_{vj} = +150\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $I_k = 200\text{ А}$ );
- диапазон температур окружающей среды  $-40\text{...}+65\text{ }^\circ\text{C}$ , влажность Rel H — 5–85 %;
- виброустойчивость до 12g, ударопрочность до 10g, класс защиты IP00;
- тепловое сопротивление «кристалл IGBT-корпус» — 0,15 К/Вт.

Применяемые методы изоляции драйверов от высоковольтных цепей силовых инверторов с помощью оптронов, трансформаторов и преобразователей уровней в настоящее время дополняются использованием интегральных трансформаторов без сердечников (CLT). Разработка технологии таких трансформаторов в компании Infineon была направлена на использование достоинств традиционных решений и в то же время устранение присутствующих им недостатков. К основным достоинствам CLT относятся: обеспечение высокого качества изоляции, гарантирующее абсолютную надежность на протяжении всего срока эксплуатации; миниатюрные размеры; хорошая совместимость с логическими схемами

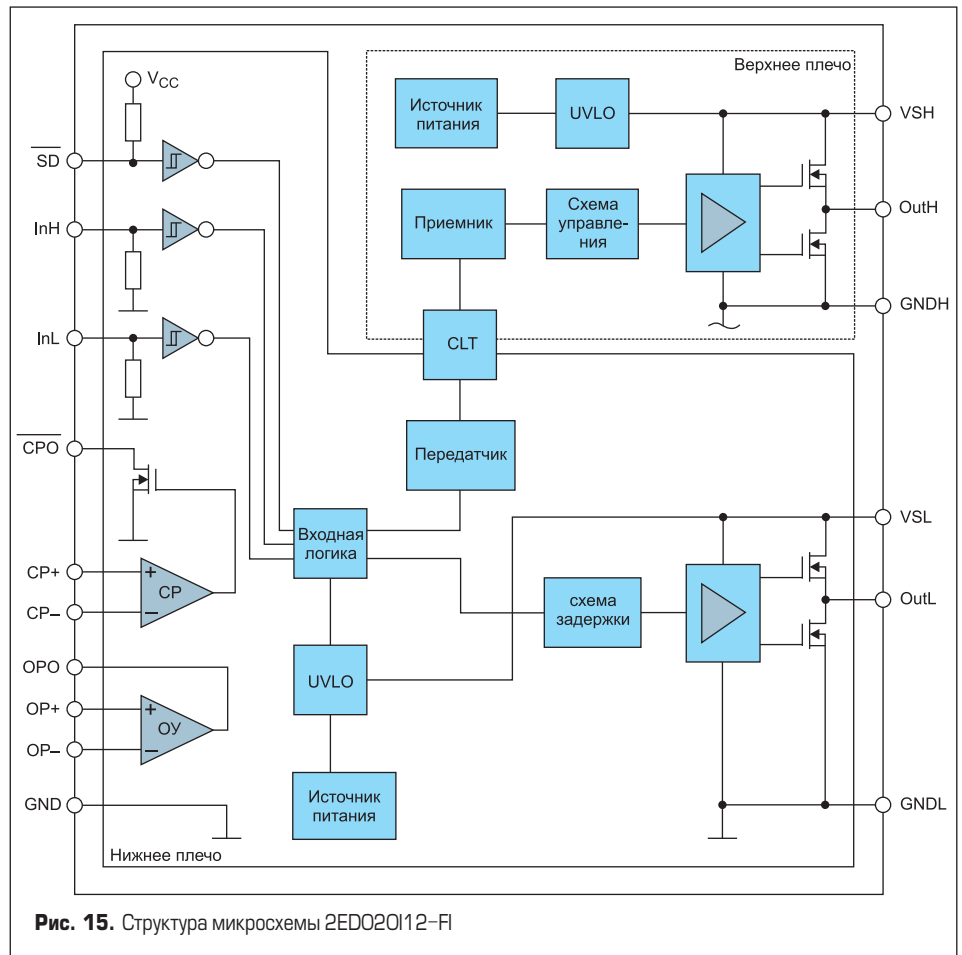


Рис. 15. Структура микросхемы 2ED02012-FI

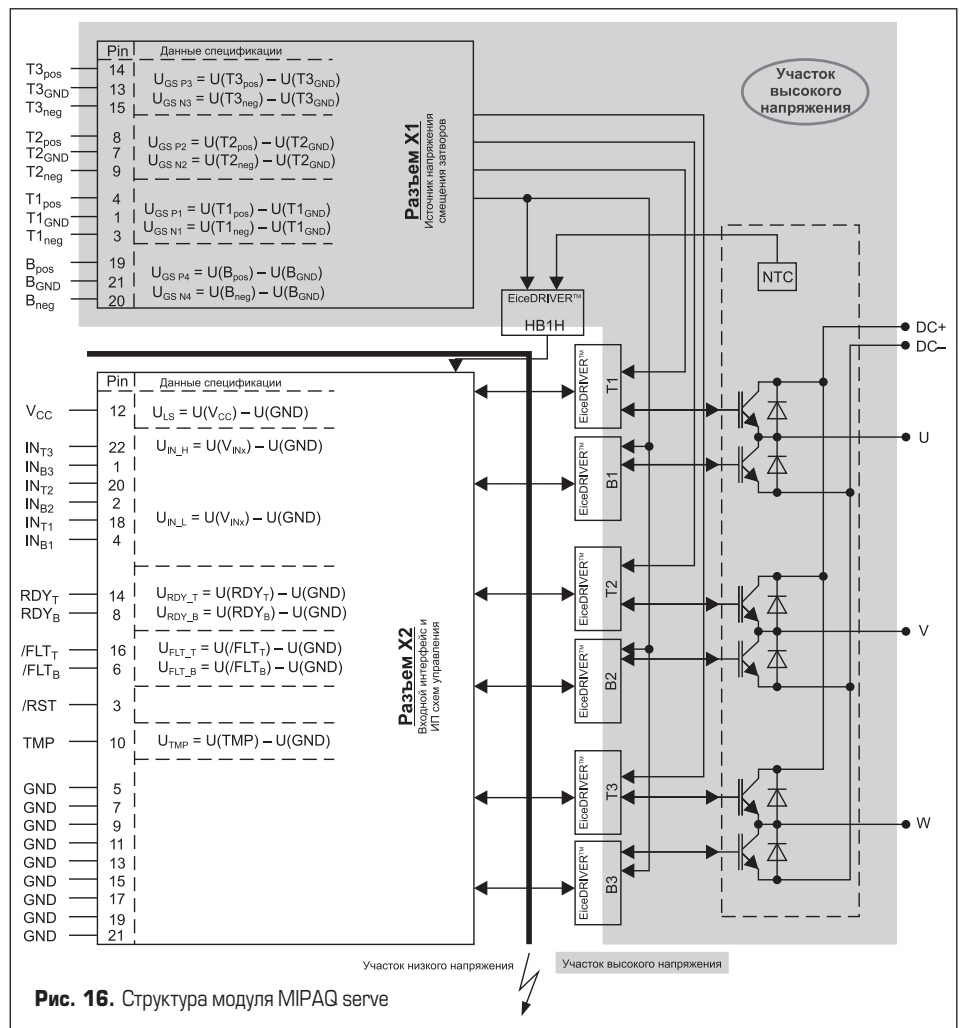


Рис. 16. Структура модуля MIPAQ serve

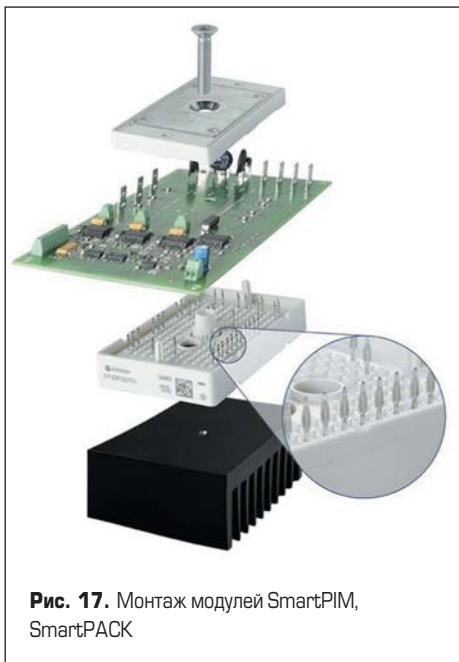


Рис. 17. Монтаж модулей SmartPIM, SmartPACK

управления; стойкость к электромагнитным помехам со значительной скоростью нарастания напряжения; невысокая стоимость производства. Особенности, параметры, методика расчета печатных трансформаторов без сердечника в приложении к драйверам затворов подробно описаны в статье, опубликованной в журнале *IEEE Circuits and Systems* [6].

Первая микросхема драйвера на основе CLT компании с запатентованным логотипом EiceDRIVER — 1ED020I12-FA (рис. 14)

была представлена в 2007 г. Позже был выпущен двудвойной драйвер 2ED020I12-FI. Микросхемы семейства EiceDRIVER (ED, ED-C, ED-E, ED-S) обеспечивают гальваническую развязку и двунаправленную передачу сигналов с очень малыми задержками распространения и высокую надежность при работе в экстремальных условиях эксплуатации.

Микросхема 2ED020I12-FI, выполненная в DIP-корпусе PG-DSO-18-2 с габаритами 12,8×7,6×2,45 мм, характеризуется следующими основными параметрами: полный диапазон рабочих напряжений ±1200 В; напряжение питания 14–18 В; выходной ток драйверов затворов от +1 до –2 А; совместимость с входными ТТЛ-уровнями 3,3 и 5 В. Структура микросхемы приведена на рис. 15, аналогичные структуры драйверов применены и в модулях MIPAQ serve (EiceDRIVER, T1–T3, B1–B3 на структурной схеме рис. 16).

**Модули SmartPIM и SmartPACK**

В 2013 г. компания запустила в производство несколько новых типов силовых модулей семейства SmartPIM и SmartPACK. Эти приборы позволяют реализовывать более дешевые, компактные и технологичные преобразователи за счет упрощения процесса их монтажа и повышения надежности. Новые модули используют уже известную технологию монтажа PressFIT (без пайки) в сочетании с усовершенствованной технологией корпусирования. Надежность контактов модулей со втулками печатных плат обеспечивается за счет отсутствия доступа воздуха

(газа) в зону контакта, и тем самым обеспечивается отсутствие коррозии со снижением проводимости при длительной эксплуатации и термоциклировании. В результате интенсивность отказов контактных соединений, выполненных по технологии PressFIT, в несколько раз меньше, чем при использовании пайки. Составные части корпусов модулей обеспечивают высокую надежность при монтаже и последующей эксплуатации. Монтаж производится практически за одну операцию — выводы типа PressFIT модулей подключаются к печатной плате, сама плата при этом фиксируется, а модуль монтируется на радиатор и прижимается фиксирующей крышкой, вся сборка закрепляется одним винтом — так, как показано на рис. 17. Модули рассчитаны на номинальные токи до 75 А в конфигурации Pack и до 35 А в конфигурации PIM при напряжениях 600 и 1200 В. Для обеспечения низкого теплового сопротивления подложка модулей выполнена из оксида алюминия.

В каталоге компании 2014 г. представлены следующие типы модулей:

- FS75R07U1E4 — 650 В/75 А;
- FS50R07U1E4 — 650 В/50 А;
- FP50R07U1E4 — 650 В/50 А;
- FP35R12U1T4 — 1200 В/35 А;
- FP30R07U1E4 — 650 В/30 А;
- FP25R12U1T4 — 1200 В/25 А.

В приборы FS интегрированы шесть IGBT (Trench IGBT 4) с антипараллельными диодами, терморезистор с отрицательным ТКС (рис. 18); в приборы FP — шесть IGBT с антипараллельными диодами, терморезистор с отрицательным ТКС и трехфазный выпря-

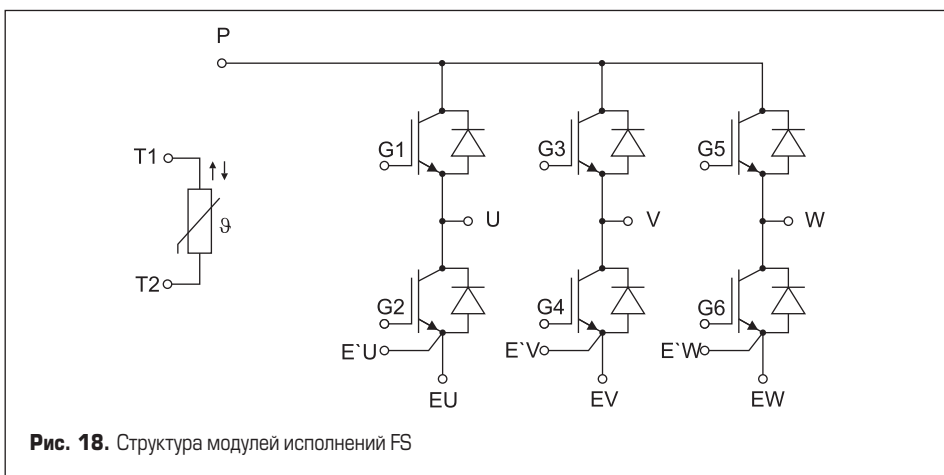


Рис. 18. Структура модулей исполнений FS

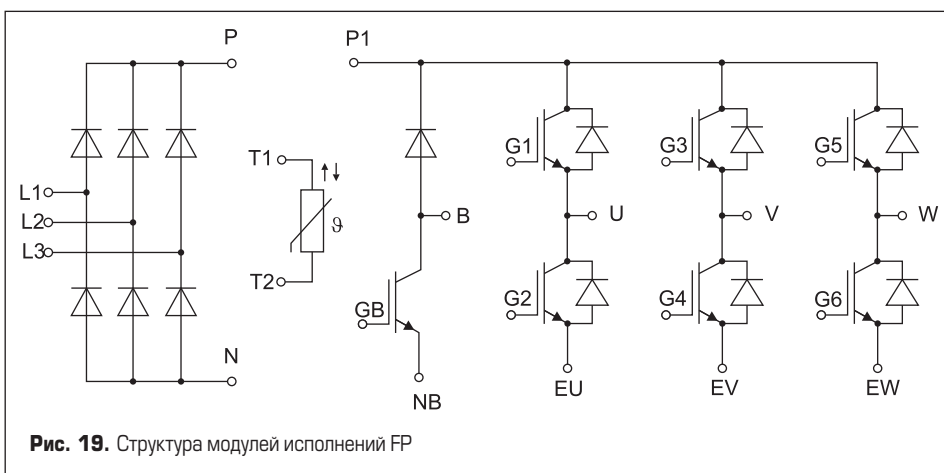


Рис. 19. Структура модулей исполнений FP

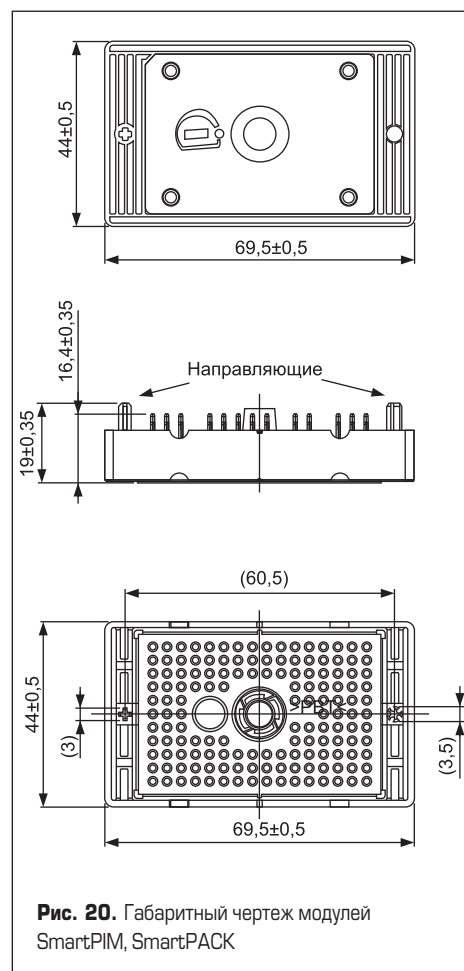


Рис. 20. Габаритный чертеж модулей SmartPIM, SmartPACK

мительный мост (рис. 19). Все модули выполнены в одинаковых корпусах, их габаритные чертежи приведены на рис. 20, фиксирующая крышка в состав модулей не входит и заказывается отдельно. Основные особенности и параметры приборов:

- простой, безопасный и быстрый монтаж;
- высокая надежность и стойкость к термодетерминации;
- отсутствие влияния газов и паров на надежность контактных пар (выводы модулей/пистоны печатных плат);
- максимальная мощность рассеяния IGBT при  $T_{vj} = +175\text{ °C}$  — 275 Вт (для FS75R07UE4);
- напряжение насыщения  $U_{ce\ sat} = 1,75\text{ В}$  ( $T_{vj} = +150\text{ °C}$ ,  $I_k = 75\text{ А}$ );

- заряд затвора  $Q_g = 0,75\text{ мкКн}$  ( $U_{ge} = \pm 15\text{ В}$ ), входная емкость — 4600 пФ;
  - время нарастания/спада на индуктивной нагрузке — 0,026/0,067 мкс ( $T_{vj} = +150\text{ °C}$ ,  $I_k = 75\text{ А}$ );
  - энергия включения/выключения на импульсе  $E_{on}/E_{off} = 1,05/3,15\text{ мДж}$  ( $T_{vj} = +150\text{ °C}$ ,  $I_k = 75\text{ А}$ );
  - тепловое сопротивление переход/корпус — 0,5 К/Вт;
  - напряжение изоляции — 2500 В, RMS/50 Гц.
- Основные области применения модулей: промышленный привод, ИБП (UPS), источники питания, солнечные инверторы, системы кондиционирования, сварка, индукционный нагрев.

## Литература

1. [www.infineon.com/cms/en/product/index.html](http://www.infineon.com/cms/en/product/index.html)
2. [www.infineon.com/cms/en/product/channel.html?channel=db3a30433a747525013aacd6322d6563#Documents](http://www.infineon.com/cms/en/product/channel.html?channel=db3a30433a747525013aacd6322d6563#Documents)
3. [www.semikron.com/skcompub/en/AN-7003\\_Gate\\_Resistor-Principles\\_and\\_Applications\\_rev00.pdf](http://www.semikron.com/skcompub/en/AN-7003_Gate_Resistor-Principles_and_Applications_rev00.pdf)
4. Юдин А. IGBT-модули большой мощности для тяговых преобразователей производства компании Infineon // Силовая электроника. 2008. № 2.
5. Бербец А. Силовые IGBT-модули Infineon Technologies // Силовая электроника. 2008. №2.
6. [www3.nd.edu/~stjoseph/newscas/CAS\\_Sept00.pdf](http://www3.nd.edu/~stjoseph/newscas/CAS_Sept00.pdf)