

Продолжение. Начало в № 5'2009

Электронная компонентная база силовых устройств.

Часть 3

Рассмотрены применяемые в настоящее время полупроводниковые силовые компоненты: полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET) и биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT). Особое внимание уделено интегрированным силовым модулям (IPM). Сделан обзор компонентов и отечественного, и зарубежного производства.

Владимир Ланцов

vvlantsov@list.ru

Саркис Эраносян, к. т. н.

sergera840@mail.ru

В работе [1] указывается, что, несмотря на очень широкую номенклатуру компонентов для силовых устройств (СУ), в рамках разумных ограничений возможно дать обзор компонентной базы для наиболее широко распространенных классов СУ, интересующий читателей. Это касается, прежде всего, компонентов для импульсных источников вторичного электропитания (ИВЭ), различных инверторов и преобразователей, регуляторов напряжения, устройств управления электроприводом промышленного и специального назначения и т. п. В основном предметом рассмотрения выбраны силовые электронные компоненты для применения в импульсных ИВЭ с мощностью более 500 Вт, для электроприводов и других СУ с мощностью до 40 кВт, а в некоторых случаях — до 100 кВт. То есть главным образом рассматриваются характеристики и особенности силовых электронных ключей на токи от 10–20 до 200–250 А и более, с напряжениями от 100 до 1200–4500 В и более, как отечественного, так и зарубежного производства. Для иллюстрации возможностей силовых приборов будут также приведены некоторые параметры приборов на напряжения более 2000 В и токи более 1000 А. Непосредственно в статьях [1, 2] были описаны:

- низкочастотные и быстродействующие диоды и сборки элементов, включая диоды Шоттки;
- тиристоры: традиционные (триодные), запираемые (GTO, GCT, IGCT), оптоотиристоры;
- симисторы и оптосимисторы.

Отмечено, что на рынке силовой электроники в России в последние годы значительно продвинулись вперед отечественные предприятия — производители силовых электронных компонентов, использующие передовые зарубежные технологии и современное высокопроизводительное оборудование [3, 4].

Перейдем к рассмотрению структур, а также особенностей и основных параметров следующих классов современных силовых полупроводниковых приборов:

- полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET);
- биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT),
- силовые модули, в том числе интегрированные силовые модули (IPM).

Полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET)

Мощные полевые транзисторы с изолированным затвором и индуцированным *n*- или *p*-каналом выполняются по схеме «металл – диэлектрик (окисел) – полупроводник (МДП, или MOS)» и сокращенно называются МОПТ, или MOSFET. Первый силовой MOSFET, выпущенный International Rectifier в 1979 году, «дал путевку в жизнь» этим новым, более совершенным, чем биполярные транзисторы, силовым приборам. С конца 1980-х годов силовые высокочастотные MOSFET, особенно на Западе, стали уверенно вытеснять господствовавшие до этого времени мощные биполярные транзисторы в диапазоне напряжений до 500–600 В и токов 8–10 А, применявшиеся, в частности, в импульсных ИВЭ [5]. Биполярные мощные высоковольтные (400–1000 В) транзисторы на токи 8–60 А, например, такие как KT846A, KT872A, KT8127, BU508, BUX48A, BUV98A, BUV298AV и другие, какое-то время еще применялись, благодаря низкой величине напряжения насыщения $U_{CE\ sat}$ (1–1,5 В), отлаженной технологии изготовления и сравнительной дешевизне. Но к середине 1990-х годов увеличение допустимого напряжения (U_{DSS}) полевых транзисторов MOSFET до 800 (900) В, токов (I_D) до 15–20 А и, соответственно, допустимой мощности рассеивания (P_D) с 100–125 до 195–280 Вт и более ознаменовало окончательную победу MOSFET. Немаловажную роль сыграло также массовое их освоение, что всегда приводит к снижению цены изделий. Аналогично шел процесс вытеснения силовых модулей на основе биполярных транзисторов модулями на MOSFET и особенно на IGBT.

В отличие от биполярных транзисторов, полевые транзисторы управляются напряжением (электрическим полем) и поэтому имеют очень большое входное сопротивление (мегаомы) [6]. Такие транзисторы нормально закрыты и открываются, если напряжение затвор-исток (G-S) достигает определенного порога (threshold) — $U_{GS\ th}$, который для мощных высоковольтных MOSFET обычно составляет 3,5–6 В. Кроме того, к их достоинствам следует отнести:

- а) Большую перегрузочную способность в импульсном режиме, то есть отношение между максимально допустимыми значениями импульсного тока стока I_{DM} к постоянному току стока I_D (I_{DM}/I_D) обычно составляет для зарубежных транзисторов 4.
 - б) Линейную зависимость напряжения на открытом канале сток-исток (D-S) от протекающего тока стока I_D при практически постоянном сопротивлении (имеет место зависимость от температуры) открытого канала $R_{DS\ on}$
 - в) Малое изменение сопротивления открытого состояния канала сток-исток $R_{DS\ on}$ не оказывает существенного влияния при параллельном включении полевых транзисторов [7]. Если, например, включаются два полевых транзистора вместо одного, то получается экономия в мощности потерь на открытом эквивалентном ключе ровно в 2 раза (при условии идеального разделения тока и постоянстве $R_{DS\ on}$). В то же время при параллельном включении двух биполярных транзисторов (также при идеальном разделении тока) можно получить экономию мощности потерь в эквивалентном ключе только в 1,1–1,2 раза.
- Важно отметить, что при параллельном соединении MOSFET возможно возникновение паразитных высокочастотных (ВЧ) колебаний. В статье [8] рассмотрены причины и методы устранения таких колебаний на примере MOSFET-транзисторов типа APT5024BLL ($U_{DSS} = 500$ В, $I_D = 22$ А) фирмы Advance Power Technology (APT). Каждый транзистор между

затвором и выходом драйвера типа MIC4452 (Micrel) имел резистор сопротивлением 10 Ом. Паразитные ВЧ-колебания возникали при скачках напряжения на стоке транзисторов в моменты переключения, причем частота этих колебаний составляла 50–250 МГц. Напряжение на транзисторах было 333 В при импульсе тока амплитудой 44 А (при температуре 25 °С). Добавление индуктивного элемента (L) в виде ферритового цилиндра с отверстием по оси (Ferrite bead) в цепь затвора устраняло паразитные колебания с минимизацией потерь при переключении. Такой способ применялся и ранее для подавления паразитных колебаний при использовании биполярных ВЧ-транзисторов. Он более эффективен, чем просто использование резисторов в цепи затвора MOSFET, поскольку импеданс индуктивного элемента L прямо пропорционален частоте. Так, при ширине полосы пропускания сигнала с драйвера MIC4452 примерно 2 МГц частота паразитных ВЧ-колебаний (50–250 МГц) лежит значительно выше и поэтому хорошо подавляется. Использование вместе с L резистора усиливает эффект подавления колебаний; при этом резистор может быть более низкоомным: 1–4,3 Ом.

Вместе с тем при использовании MOSFET необходимо учитывать также такие особенности и рекомендации, как, например, приведенные в [9]:

- Необходимость устанавливать ограничитель перенапряжений между затвором и истоком, поскольку допустимое напряжение обычно не должно превышать 20 В.
 - При активном записании мощных высоковольтных транзисторов ток заряда емкости Миллера, «подключенной» между выводами сток-затвор, протекает по внутреннему импедансу генератора управляющего импульса. При этом он уменьшает (буквально «выгрызает») ток записания отрицательного импульса, подаваемого в цепь затвор-исток (G-S).
- Основные характеристики MOSFET, которые приводятся в справочных данных:
- а) Предельные параметры:

- максимальное напряжение сток-исток U_{DSS} ;
 - максимальный ток стока I_D ;
 - максимальная рассеиваемая мощность P_D (P_{tot}).
- б) Сопротивление открытого состояния канала сток-исток $R_{DS\ on}$, обуславливающее статические потери мощности на транзисторе.
 - в) Пороговое напряжение отпираания на затворе $U_{GS\ th}$.
 - г) Параметры быстродействия:
 - время задержки включения $t_{d\ on}$;
 - время нарастания сигнала в силовой цепи t_r ;
 - время задержки выключения $t_{d\ off}$;
 - время спада сигнала t_f ;
 - время восстановления обратного сопротивления t_{rr} встроенного антипараллельного диода.
 - д) Энергия одного переключения (мкДж): E_{on} — при включении и E_{off} — при выключении, то есть суммарная энергия одного переключения составляет $E_{tot} = E_{on} + E_{off}$
 - е) Энергия (мДж) разрушающего лавинного (avalanche) пробоя: E_{AR} — для повторяющихся импульсных перегрузок; E_{AS} — для одиночного импульса.
- Первыми российскими, по-настоящему мощными MOSFET (≥ 400 В) были разработанные и выпускавшиеся с начала 1990-х годов *n*-канальные транзисторы КП809 производства ВЗПП (Воронеж) [10]. Они выпускаются и сейчас на напряжение 400–750 В и токи 25–8 А соответственно. Эти транзисторы хорошо себя зарекомендовали. Один из авторов статьи был в числе первых потребителей этих транзисторов и использовал КП809Б1 в мощных (1500 Вт) источниках бесперебойного питания [11].
- Технические характеристики некоторых отечественных и зарубежных MOSFET приведены в таблице 1.
- Малая номенклатура мощных полевых транзисторов в 1990-е годы, да и сейчас тоже, возмещается за счет импорта зарубежных MOSFET. Они способны работать в широком

Таблица 1. Основные технические характеристики мощных MOSFET

Наименование	Фирма-производитель	Технология	U_{DSS} , В	I_D , А (25 °С)	P_D , Вт	$R_{DS\ on}$, Ом	МОПТ (MOSFET): t_r/t_f , нс	Диод: t_{rr} нс (Q_{rr} , мкК)	Корпус [$R_{th\ jc}$, °С/Вт]
Отечественные									
КП809А1 (Б1)	АООТ «ВЗПП», Воронеж	—	400 (500)	9,6	100	0,3 [0,6]	50/100	нет	КТ-43В (ТО-218)
КП812А1		—	600	50	125	0,028		180 [0,8]	
КП450		—	500	12	150	0,4		—	
КП460	Завод «Эльтав», Махачкала	—	500	20	280	0,27	66/60	860 [8,6]	ТО-218 [0,8]
2П7160Г (Д)	ОАО «ФЭМТ»	—	400 (500)	23 (20)	150	0,23 [0,2]	-/150	—	КТ-97С (ТО-258) [0,83]
КП794А	ОАО «ОКБ "Искра"», Ульяновск	—	500	16	190	0,3	—	—	КТ-43В (ТО-218)
КП795А		—		14		0,4			
2П (КП)7154АС		—	1200	50	0,35	70/90//300/70		—	Металлокерамический [0,14]
2П (КП)7154БС		—	800	60	0,3				
2П (КП)7154ВС		—	600	75	0,2				
Зарубежные									
IXFN66N50Q2	IXYS	HiPerFET	500	66	735	0,08	16/10	250 [25,0]	SOT-227В [0,17]
IXFK70N60Q2		HiPerFET	600	70	890	0,08	25/12	250 [1,2]	SOT-227В (ISOTOP) [0,14]
IXFN60N80P		HiPerFET	800	53	1040	0,14	29/26	250 [25,0]	SOT-227В [0,17]
IXFN38N80Q2		HiPerFET	800	38	735	0,22	16/12	250 [1,0]	SOT-227В [0,17]
IXFR38N100Q2		HiPerFET	1000	28	417	0,24	—	250	ISOPLUS-247 [0,3]
IXFN38N100Q2		HiPerFET	1000	38	893	0,25	—	250	SOT-227В [0,14]
IPW60R045CS	Infineon	CoolMOS	600	60	431	0,045	20/10	660 [17,0]	PG-TO-247-3 [0,3]
IPW60R099CS		CoolMOS	600	31	255	0,099	5/5	450 [12,0]	PG-TO-247-3 [0,5]
IRFP460	IR	HEXFET	500	20	280	0,27	77/43	570 [6,6]	TO-247АС [0,45]
IRFPS40N60K		HEXFET	600	40	570	0,11	110/60	630 [14,0]	Super-247 [0,22]
APT6010B2LL	APT	Power MOS 7	600	54	690	0,1	19/9	770 [18,0]	T-MAX [0,25]
APT60M60JLL		Power MOS 7	600	70	694	0,06	16/12	950 [33,0]	SOT-227В (ISOTOP) [0,18]
APT10021JLL		Power MOS 7	1000	37	690	0,21	9/11	300 [1,8]	(ISOTOP) [0,18]
APT12031JLL		Power MOS 7	1200	30	690	0,31	16/30	1400 [38,0]	(ISOTOP) [0,18]

диапазоне мощностей, напряжений и токов, а также обладают более высокими показателями качества и надежности. Чтобы выжить в тех непростых условиях, в конце 1990-х гг. некоторые предприятия в России и странах СНГ, на основе закупок импортных полупроводниковых кристаллов, корпусов, материалов, а также оборудования, стали полулегально и легально налаживать выпуск хорошо известных моделей зарубежных полевых транзисторов. В наибольшей степени это коснулось транзисторов фирмы International Rectifier (IR), например, таких как IRF640–RF840, IRFP350–IRFP460 (табл. 1).

В последние годы, в связи с возрождением российского ВПК и частично промышленности, положение с выпуском отечественных мощных MOSFET, как низковольтных, так и высоковольтных, стало меняться в лучшую сторону. В этой связи отметим транзисторы типа 2П7160 (Г, Д), выпускаемые ОАО «Фрязинский завод мощных транзисторов» [12]. Эти транзисторы имеют следующие характеристики: $U_{DSS} = 400$ В (500 В), $I_D = 23$ А (20 А), $P_D = 150$ Вт, $R_{DS\ on} = 0,23$ Ом (0,2 Ом). Транзисторы 2П7160 (Г, Д) выпускаются по техническим условиям АЕЯР.432140.374ТУ. ОАО «ОКБ «Искра»» совместно с ОАО «Ангстрем» (Зеленоград) разработало мощный высоковольтный DMOSFET-транзистор (то есть транзистор со встроенным «антипараллельным» диодом) с поликремниевым затвором серии 2П (КП)715 [3, 13]. Транзистор имеет напряжения $U_{DSS} = 600$ –1200 В, ток стока $I_D = 50$ –75 А, сопротивление $R_{DS\ on} = 0,08$ –0,3 Ом и низкие потери при переключении. Конструкция и технология изготовления транзистора обеспечивают высокие параметры быстродействия за счет низких значений входной, выходной и проходной емкостей, а также малой величины заряда затвора. Кристаллы транзистора монтируются в специально спроектированный металлокерамический корпус с безындуктивными выводами. Корпус имеет высокую теплопроводность благодаря применению в качестве изолятора оксида бериллия (BeO) и имеет широкий диапазон рабочих температур (от –60 до 150 °С). Прибор с успехом может применяться в СВЧ-устройствах и ВЧ-преобразователях, в частности, в резонансных режимах на частотах 200 кГц и выше.

Среди других новых MOSFET укажем на разработку мощных *n*-канальных DMOSFET-транзисторов с напряжениями U_{DSS} — 30, 60, 100, 200, 600, 800 и 1200 В на токи $I_D = 10$ –80 А (30 типонаименовал транзисторов) и мощность рассеяния 150–200 Вт. НИОКР выполнена в 2007–2008 годах ОАО «ОКБ «Искра»» [13] совместно с ОАО «Ангстрем» [14]. Транзисторы создавались для спецтехники, получили наименование 2П2829А-Ж и были выполнены в дискретных корпусах типа КТ-105-1 (аналог ТО-259АА), КТ43 (ТО-247), КТ-97 (ТО-254). Транзисторы 2П829А9-Ж9 выполнены в корпусах для поверхностного монтажа — SMD-корпусах типа КТ106-1 (SHD-6), КТ-95 (SMD-2) и др. Надежность транзисторов была подтвержде-

на в ходе испытаний в соответствии с требованиями комплекса стандартов «Климат-7» со значениями характеристик по группе 6У. В статье [14] утверждается, что по своим подходам в области радиационной стойкости DMOS-технологий ОАО «Ангстрем», наряду с фирмой IR, заняло лидирующие позиции в мире. Положительные результаты испытаний позволяют рассматривать эти транзисторы в качестве перспективных компонентов при модернизации и создании системы ГЛОНАСС и другого спутникового оборудования. Приведем другие характеристики высоковольтных транзисторов серии 2П829ХХ:

- 2П829А (2П829А9): $U_{DSS} = 1200$ В, $I_D = 10$ А, $P_D = 200$ Вт, $R_{DS\ on} = 1$ Ом;
- 2П829Б (2П829Б9): $U_{DSS} = 800$ В, $I_D = 15$ А, $P_D = 200$ Вт, $R_{DS\ on} = 0,5$ Ом;
- 2П829В (2П829В9): $U_{DSS} = 600$ В, $I_D = 20$ А, $P_D = 200$ Вт, $R_{DS\ on} = 0,15$ Ом.

В таблице 1 приведены технические характеристики некоторых высоковольтных MOSFET большой мощности ведущих зарубежных фирм [15–18]. Представленные модели имеют существенно лучшие параметры, чем отечественные полевые транзисторы, в том числе: напряжения $U_{DSS} = 500$ –1200 В, токи $I_D = 20$ –70 А, мощность рассеяния $P_D = 280$ –1040 Вт, сопротивление $R_{DS\ on} = 0,045$ –0,3 Ом (в зависимости от значений U_{DSS} , I_D и технологии изготовления). Показатели быстродействия позволяют их использовать в преобразователях напряжения с рабочими частотами коммутации 100–300 кГц. Так, суммарное время нарастания и спада ($t_r + t_f$) составляет у основной массы транзисторов порядка 15–50 нс, а время восстановления обратного сопротивления встроенного антипараллельного диода $t_{rr} = 250$ –1000 нс. Приведем для примера некоторые дополнительные параметры MOSFET типа APT 6010B2LL ($U_{DSS} = 600$ В, $I_D = 54$ А, $P_D = 690$ Вт):

- Энергия одного переключения (для условий $U_{DD} = 400$ В, $I_D = 54$ А, $U_{GS} = 15$ В, $R_G = 5$ Ом): при включении $E_{on} = 855$ мкДж и при выключении $E_{off} = 970$ мкДж.
- Энергия разрушающего лавинного пробоя: $E_{AR} = 50$ мДж — для повторяющихся импульсных перегрузок и $E_{AS} = 3000$ мДж — для одиночного импульса.

Сейчас зарубежные фирмы начали выпуск силовых полевых транзисторов по технологии Power MOS 8. Так, в 2007 г. компания Microsemi объявила о выпуске первых 15 моделей новых MOSFET этой технологии [3], в частности, 10 моделей MOSFET и пять MOSFET со встроенным диодом со сверхбыстрым восстановлением, или FREDFET. Напряжение блокирования транзисторов составляет $U_{DSS} = 500$ –1200 В, ток $I_D = 19$ –75 А, $R_{DS\ on} = 0,075$ –0,8 Ом. Затем компания дополнила семейство еще десятью моделями FREDFET на напряжение 500 и 600 В, токи от 18 до 97 А и $R_{DS\ on} = 0,04$ –0,43 Ом.

Дальнейшее повышение уровня и качества MOSFET связано с освоением карбида кремния (SiC). В настоящее время на карбиде кремния выпускаются лишь диоды Шоттки (основной производитель — фирма Cree). Вместе с тем ведутся активные работы по соз-

данию SiC-транзисторов. Есть информация [4] о том, что в лаборатории Университета штата Нью-Джерси на 4H-SiC создан полевой транзистор с вертикальной структурой и затвором по технологии Power MOS 8 на основе *p-n*-перехода. Блокирующее напряжение транзистора составляет 10 кВ, плотность прямого тока — 23 А/см² при напряжении стока 2 В, $R_{SP\ on} = 106$ мОм/см².

Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT)

Идея использовать совместно мощный высоковольтный биполярный транзистор (БПТ) с полевым транзистором (ПТ), то есть выполнить такой комбинированный составной транзистор, возникла еще в конце 1970-х гг. К тому времени появились первые высоковольтные MOSFET средней мощности. В комбинированной структуре входной ПТ позволял обеспечить малую мощность управления за счет малого входного тока (тока затвора) и несколько улучшал параметры быстродействия, по сравнению с БПТ по схеме Дарлингтона. Но это был лишь частичный успех. Более плодотворная и использующаяся до наших дней идея состояла в применении низковольтного сильноточного MOSFET для эмиттерной коммутации мощного высоковольтного БПТ. Перечислим преимущества такого решения:

- а) Низковольтные MOSFET имеют малое значение сопротивления открытого канала $R_{DS\ on}$ (сотые – десятые доли Ом).
- б) Сохранялось малое падение напряжения на коллекторе транзистора $U_{CE\ sat}$ — при прямом смещении.
- в) Расширялась область безопасной работы биполярного транзистора, поскольку он оказывался включенным по схеме с общей базой (а не с общим эмиттером).
- г) Увеличивалось быстродействие, прежде всего, за счет уменьшения времени спада t_f и времени рассасывания (t_s) неосновных носителей в базе БПТ при «обрыве» эмиттерной цепи. Такие комбинированные ключи могут работать на частотах коммутации до 50–80 кГц.

В статье [19] описываются результаты экспериментальных исследований, проведенных специалистами фирмы STMicroelectronics (ST) для комбинаций транзисторов различных классов. В частности, исследовались МОПТ (Power MOS) типа SGSP321, SGSP352 и мощные БПТ типа BUX48, BU508 и др. Так, у транзистора BUX48 ($U_{CER} = 850$ В, $I_C = 15$ А, $P_D = 175$ Вт) при импульсном токе 10 А было получено: при базовой коммутации — $t_f = 0,2$ мкс и $t_s = 2$ мкс, а при эмиттерной коммутации — $t_f = 0,1$ мкс и $t_s = 0,5$ мкс (преимущества очевидны). В настоящее время фирма STMicroelectronics выпускает гибридную реализацию рассмотренной комбинации (Emitter Switched Bipolar Transistor, ESBT) [4, 20]. В таком приборе в одном корпусе смонтирована пара: высоковольтный БПТ-МОПТ, в которой транзисторы включены по каскадной схеме. Транзисторы ESBT (STMicroelectronics) имеют следующие параметры:

- STC08DE150HV: $U_{CES} = 1500$ В, $I_C = 8$ А, $P_D = 156$ Вт, $U_{CE sat} = 0,6$ В, $R_{DS on} = 0,075$ Ом; $t_f/t_s = 8,5/526$ нс;
- STC03DE170HV: $U_{CES} = 1700$ В, $I_C = 1,8$ А, $P_D = 100$ Вт, $U_{CE sat} = 1$ В, $R_{DS on} = 0,55$ Ом; $t_f/t_s = 14/760$ нс;
- STC08DE220HV: $U_{CES} = 2200$ В, $I_C = 6$ А, $P_D = 166$ Вт, $U_{CE sat} = 1$ В, $R_{DS on} = 0,55$ Ом; $t_f/t_s = 20/526$ нс.

Заметим, что у MOSFET с $U_{DSS} = 1500$ В пока сопротивление в открытом состоянии значительно больше, тем более, что такие транзисторы значительно дороже. Значение напряжения насыщения $U_{CE sat}$ порядка 0,6–1 В, благодаря чему минимизированы потери проводимости. А небольшая величина «хвостового» тока минимизирует потери переключения (динамические потери). Все транзисторы семейства ESBT поставляются в 4-выводных корпусах ТО-247.

Собственно биполярный транзистор с изолированным затвором (БИТЗ, или Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) был создан в 1982 году специалистами фирмы General Electric. Этот транзистор представляет собой сочетание входного MOSFET-транзистора с выходным мощным биполярным *pnp*-транзистором. В кристалле единичные IGBT размером порядка 10 мкм объединены («запараллелены») в количестве сотен (дискретные IGBT-транзисторы) или тысяч (модули IGBT). Наибольшее применение в IGBT нашла практическая модель, которая имеет паразитную *pnpn*-структуру, образованную совместно с *pnp*-транзистором (дополнительный малоомощный биполярный транзистор) [7]. Этот транзистор нормально заперт благодаря шунтированию его эмиттер-базового перехода внутренним, сравнительно низкоомным резистором. Вместе с основным силовым биполярным транзистором образовавшаяся структура создает глубокую внутреннюю положительную обратную связь. Такая связь создает предпосылки для образования тиристорного эффекта — эффекта «зашелкивания». Иными словами, скорости изменения коллекторного напряжения dU_C/dt и тока dI_C/dt реально должны быть ограничены во избежание «зашелкивания», что было особенно характерно для ранних моделей.

Высоковольтные IGBT сочетают в себе как достоинства мощных MOSFET и биполярных транзисторов, так и их недостатки:

- Большое значение максимально допустимого напряжения коллектор-эмиттер $U_{CE max}(U_{CES})$, которое может составлять от 600 до 1700 В и более.
- IGBT управляются напряжением (зарядом) и имеют большое входное сопротивление (МОм), так же как и MOSFET.
- Транзисторы нормально закрыты и открываются при такой же, как у MOSFET, величине порогового напряжения на затворе ($U_{GS th} = 2-4$ В).
- IGBT обладают большей перегрузочной способностью в импульсном режиме, чем биполярные транзисторы, но меньшей, чем MOSFET.
- Напряжение на переходе коллектор-эмиттер IGBT в открытом состоянии $U_{CE sat}$

мало зависит от коллекторного тока I_C (для современных приборов $U_{CE sat} = 2,0-4,5$ В).

д) Заряд, накопленный в базе мощного *pnp*-транзистора, вызывает «хвост» при выключении IGBT от 0,25 до нескольких микросекунд в зависимости от разновидности (класса) прибора.

Отметим также, что IGBT занимают меньшую площадь кристалла по сравнению с MOSFET и, значит, дешевле. К существенным проблемам в управлении этих приборов можно отнести «высокопотенциальность» источника питания затвора. Речь идет о том, что между базой (не выведена) и эмиттером (выведен) силового (биполярного) транзистора в IGBT всегда присутствует высокое напряжение U_{CE} пока он заперт. В то время как у обычного MOSFET, который нормально заперт, потенциал затвора отличается от потенциала истока не более чем на $\approx \pm 20$ В. При некоторых проверках (по ТУ) затвор MOSFET закорачивается с истоком. В связи с этим требования к схемам управления и драйверам для MOSFET-приборов значительно снижены, по сравнению с похожими проблемами, которые необходимо преодолеть для IGBT, где, например, нужна защита от понижения напряжения затвора менее +8 В [9].

Особенности обеспечения защиты перехода затвор-эмиттер IGBT аналогичны рекомендациям для цепи затвор-исток MOSFET. Дополнительные рекомендации для применения IGBT:

- Необходимо предусматривать ограничение скорости изменения коллекторного напряжения и тока с запасом относительно предельных значений dU_C/dt и dI_C/dt , что одновременно снижает уровень электромагнитных помех.
- Для большинства IGBT величина коллекторного тока при КЗ не должна превышать 5–10-кратного максимального значения (с учетом температуры) и в течение ограниченного интервала времени (например, 10 мкс).

Подчеркнем, что основные достоинства IGBT проявляются в основном при рабочих частотах примерно от 1 до 100 Гц, то есть актуально применение этих приборов в устройствах управления электроприводом, в инверторах для мощных ИБП с ШИМ- и ЧИМ-управлением и т. п.

Основные характеристики IGBT:

а) Предельные параметры:

- максимальное напряжение коллектор-эмиттер $U_{CES}(U_{CE max})$;
- максимальный ток коллектора I_C ;
- максимальная рассеиваемая мощность $P_D(P_{CE max})$.

б) Напряжение насыщения на коллекторе в открытом состоянии $U_{CE sat}$ обуславливающее статические потери мощности в транзисторе.

в) Параметры быстродействия:

- время задержки включения t_{don} ;
- время нарастания сигнала в силовой цепи t_p ;
- время задержки выключения $t_{d off}$;
- время спада сигнала t_f ;
- время рассасывания t_{rr} встроенного антипараллельного диода.

г) Энергия единичного переключения E_{tot} или выключения E_{off} определяющая динамические потери.

При разработке современных и новых IGBT основное внимание уделяется совершенствованию их структуры и технологии изготовления. Были разработаны транзисторы с «проколом» базы (Punch Through, PT, или эпитаксиальная структура) и без «прокола» базы (Non Punch Through, NPT, или гомогенная структура). Так, в моделях IGBT фирмы Advance Power Technology (APT) используется технология PT IGBT MOS 7, которая позволяет сбалансировать потери проводимости (статические потери) и потери на переключение (динамические потери) [21]. Технология PT IGBT MOS 7 практически идентична другим технологиям IGBT, но отличается от них комбинацией инжектирующего слоя p^+ и буферного слоя n^+ . Благодаря наличию буферного слоя n^+ контролируется коэффициент передачи тока транзистора за счет ограничения числа дырок, которые первоначально были введены в область дрейфа. Поскольку время жизни неосновных носителей в буферном слое значительно ниже, чем в дрейфовой области, то буферный слой поглощает захваченные дырки в момент выключения. В дополнение к этому «хвостовой» ток в PT IGBT контролируется ограничением общего времени неосновных носителей до того момента, когда они рекомбинируют. Это свойство называется управлением времени жизни неосновных носителей.

Высокой скорости переключения также способствует металлическая полосковая технология затвора. В результате этого приборы фирмы APT обладают более низким эквивалентным сопротивлением затвора — EGR (доли Ом), что существенно меньше, чем у приборов с поликремниевым затвором. Другие преимущества «полоскового» затвора: равномерное и быстрое возбуждение затвора; большая устойчивость к возможным дефектам, неизбежным при производстве; повышенная надежность при работе транзисторов с высоким током и при большой температуре. Управление PT IGBT MOS 7 практически идентично управлению MOSFET Power MOS 7 и допускает практически прямую замену устройства управления при выходном напряжении 12–15 В.

Авторы не обнаружили сведений о реальных разработках и тем более выпуске отечественных IGBT. Наиболее вероятное объяснение этому заключается, по нашему мнению, в следующем. В конце 1980-х годов в СССР не было серьезных наработок в этой области, и в трудные 1990-е годы российские предприятия не имели ни средств, ни возможностей восполнить этот пробел в силовых компонентах. В таком положении некоторые предприятия, например, такие как ОАО «Электровыпрямитель», предпочли сосредоточиться на разработке и выпуске IGBT-интегрированных силовых модулей, используя сотрудничество с ведущими зарубежными фирмами. В таблице 2 представлены технические характеристики некоторых зарубежных IGBT по данным [15, 17, 18].

Таблица 2. Основные характеристики силовых зарубежных IGBT

Наименование	Фирма	Технология	U_{CES} , В	I_C^*/I_C , А ($T^*/25^\circ\text{C}$)	P_D (P_{CEmax}), Вт	$U_{CE(sat)}$, В	IGBT: $t_{don}/t_r/t_{doff}/t_f$, нс	Диод: t_{rrr} , нс	E_{tot} (E_{off}), мДж	Диапазон частот, кГц	Корпус [$R_{th,JC}$, $^\circ\text{C}/\text{Вт}$]	
APT30GT60BRDQ2	APT	NPT IGBT	600	30*/64	250	2,5	12/20//245/100	–	1,4(0,83)	До 100	TO-247	
APT40GT60BR		NPT IGBT	600	40*/80	345	2,5	30/110//310/500	Без диода	1,75–4,0	До 150	TO-247	
APT30GP60B		Power MOS 7 IGBT	600	49*/100	463	2,7	13/18//55/46	–	(0,25)	100 (400 В/37 А); 200 (400 В/24 А)	TO-247 [0,27]	
APT45GP120B2DG2		Power MOS 7 IGBT	1200	54*/113	625	3,3 (тип)	18/29//100/38	–	(0,95)	100 (800 В/16 А)	T-MAX [0,12]	
APT75GP120B2G		Power MOS 7 IGBT	1200	91*/100	1042	4,5 (тип)	20/40//163/56	–	(2,5)	100 (800 В/24 А)	T-MAX [0,2]	
IRG4P50WD	IR	WARP	900	28*/51	200	2,7	26/220	Без диода	–	20–100	TO-247AC	
IRG4PH40KD		–	1200	21*/41	160	3,0 (тип)	42/32//240/510	95	(1,93)	–	TO-247 [0,77]	
IXBH42N170A	IXYS	–	1700	21*/42	350	4,5 (тип)	25/35//230/50	330	(2,8)	–	TO-247AD [0,35]	
IXGH32N170		NPT IGBT	1700	32*/75	350	3,3	45/38//270/250	Без диода	(11,0)	–	TO-247AD [0,35]	
IXGX100N170		NPT IGBT	1700	100*/170	350	3,0	45/38//270/250	Без диода	(11,0)	–	PLUS-247 [0,15]	
IXLF19N250A		NPT IGBT	2500	32	–	3,3	–/50//–/250	–	–	–	ISOPLUSi4-Pack [0,5]	
IXGF20N300		NPT IGBT	3000	/22	–	3,2	–//–/210	–	–	–	ISOPLUSi4-Pack [1,25]	
IXGF30N400		NPT IGBT	4000	15*/30	–	3,1	–//–/514	–	–	–	ISOPLUSi4-Pack [0,78]	
IXGH12N90C		HiperFast IGBT	900	12*/24	100	3,0	20/20//135/70	Без диода	–	–	TO-247	
IXGH50N60C2		HiPer Fast IGBT	600	50*/75	400	2,7	18/25//115/48	Без диода	–	(0,38–0,7)	До 150	TO-247AD

Примечание: T^* — максимальная рабочая температура (90 или 110 $^\circ\text{C}$).

Основная масса моделей дискретных IGBT-транзисторов производится по-прежнему с напряжением $U_{CES} = 600$ В, при котором возможно обеспечить наибольшее быстродействие и частоту коммутации до 150 кГц. Для достижения такой высокой частоты использовались технологии WARP, NPT IGBT, Power MOS 7 IGBT, HiPer Fast IGBT. 600-В транзисторы характеризуются более низкими значениями напряжения насыщения — в среднем $U_{CE sat} < 3$ В. Эти транзисторы наилучшим образом подходят для реализации высокочастотных импульсных источников с питанием от однофазной сети переменного тока 220 (230) В; 50 (60, 400, 500) Гц. Напряжение $U_{CES} = 900$ В, на которое «рассчитаны», например, транзисторы IXGH12N90C (IXYS) и IRG4P50WD (IR), по сути, являлись промежуточными на пути к разработке и массовому освоению более высоковольтных транзисторов (≥ 1200 В). В настоящее время по масштабам выпуска IGBT с напряжением $U_{CES} = 1200$ В приближаются к транзисторам с напряжением 600 В. Напряжение насыщения у IGBT-приборов в среднем составляет 3–3,5 В. Быстродействующие модели 1200-В транзисторов используются в высокочастотных инверторах и преобразователях импульсных ИВЭ с питанием от трехфазной сети переменного тока 3×220 (230) В («звезда») или 3×380 В («треугольник») с частотой 50 (60, 400, 500) Гц.

Транзисторы с напряжением 1700 В перестали быть редкостью. Приведенный в таблице 2 IGBT-прибор фирмы IXYS типа IXGH32N170 (IXBT32N170) имеет следующие основные параметры: $U_{CES} = 1700$ В; $I_C = 32$ А (110 $^\circ\text{C}$) и 75 А (25 $^\circ\text{C}$); $P_D = 350$ Вт; $U_{CE sat} = 3,3$ В. Параметры быстродействия: $t_{d on} = 45$ нс; $t_r = 38$ нс; $t_{d off} = 270$ нс и $t_f = 250$ нс. Область безопасной работы (RBSOA/SSOA) составляет при индуктивной нагрузке: $90 \text{ A} \times (0,8 U_{CES} = 1360 \text{ В})$. Упомянутый транзистор с индексом IXGH выполнен в корпусе TO-247AD, а с индексом IXBT — в корпусе TO-268 для поверхностного монтажа. В последнее время появились и более высоковольтные транзисторы на напряжения 2500, 3000 и 4000 В, например, IXLF19N250A, IXGF20N300 и IXGF30N400 со-

ответственно (таблица 2). Они имеют приемлемые значения напряжения насыщения $U_{CE sat} < 4$ В, но являются низкочастотными (не быстродействующими). Так, время спада t_f у них составляет 0,25–0,5 мкс. Для таких транзисторов были специально разработаны корпуса типа ISOPLUS-264 и ISOPLUSi4-Pack с напряжением гальванической изоляции не менее 2500 Вэф. Лидером в разработке и производстве высоковольтных дискретных IGBT является фирма IXYS.

В заключение отметим, что IGBT-транзисторы с TrenchStop (+Fieldstop) структурой имеют более низкое напряжение насыщения и значительно меньшие (на 40%) потери, по сравнению с NPT-транзисторами, при этом потери переключения не возрастают. Помехозащищенность структур с «утопленным» затвором лучше, чем у планарных приборов. Достоинства TrenchStop IGBT — в очень высокой прочности и стойкости к коротким замыканиям. Также важно повышение надежности и уменьшение вносимых электромагнитных помех — по сравнению со стандартными NPT IGBT.

Интегрированные силовые модули

Успехи в развитии MOSFET и IGBT способствовали прогрессу в развитии силовых модулей на их основе. Силовые модули разделяются на стандартные и интегрированные (интеллектуальные) силовые модули — Integrating Power Switches (IPM).

Объемы выпуска силовых модулей непрерывно растут, а области их применения постоянно расширяются:

- инверторы, преобразователи энергии;
- устройства регулирования электропривода постоянного и переменного тока;
- коммутационная и защитная аппаратура. В IPM используются следующие полупроводниковые структуры:
 - диодно-тиристорные структуры, в том числе с запираемыми тиристорами (IGCT);
 - MOSFET-структуры: чопперы (ключ с последовательным диодом), полумосты и мосты с антипараллельными диодами в ключах;

- IGBT-структуры: чопперы, полумосты, одно- и трехфазные мосты (6 IGBT) с антипараллельными диодами в ключах;
- комбинация выпрямительного диодного моста с инвертором в одно- и трехфазном инверторном мосте (6 IGBT) с добавлением «тормозного» ключа (7-й IGBT в трехфазном модуле);
- более интегрированные MOSFET- и IGBT-структуры со встраиванием силовых управляющих драйверов.

По мнению авторов, такие силовые модули, как чопперы и полумосты, следует относить к IPM невысокой степени интеграции (иногда их называют стандартными). Однофазные и трехфазные MOSFET- и IGBT-мосты с антипараллельными диодами силовых ключей можно отнести к IPM средней степени интеграции. И наконец, упомянутые структуры со встроенными интегрированными драйверами уже представляют собой IPM высокой степени интеграции [22].

Интегрированные силовые модули на основе MOSFET выпускаются на напряжения до 400 (600) В и на токи 20–400 А, то есть на мощность не более 10–20 кВт. Это объясняется тем, что при напряжениях более 600 В (800–1000 В) существенно возрастает их стоимость, по сравнению с IGBT-модулями. Поэтому если существует необходимость использовать IPM на MOSFET на большее напряжение в каких-то применениях, то обычно используется их последовательное включение по питанию. Для получения больших токов прибегают к параллельному соединению таких структур. Отметим, что подобные решения используются и при выполнении IPM-IGBT на напряжения 2500 В (3300 В) и выше в энергетических устройствах и системах. Такой способ может оказаться более дешевым и более надежным.

Ведущие зарубежные фирмы — IXYS, Infineon, APT, IR, Fairchild, Semikron, Mitsubishi — выпускают широкую гамму IPM на напряжения 600, 1200, 1700, 2500, 3300, 4500, 6300, 10 000 В. Токи нагрузки таких IPM — от 30–100 А (мини-IPM) [22], а токи до 4500 А — у IPM супербольшей

Таблица 3. Основные характеристики мини-интегрированных IGBT-модулей (mini-IPM) фирмы SEMIKRON

Тип	Схема	IGBT						Выпрямитель
		P, кВт	U _{CES} , В	I _C , А	I _{C ном} , А	U _{CE(sat)} , В	R _{th Jc} , Ом	
SKiP25NAD1066V1	CIB*	4,0	600	39	30	1,45	1,35	370
SKiP26NAD1066V1	CIB	5,5	600	59	50	1,45	0,95	370
SKiP37NAD1066V1	CIB	7,5	600	79	75	1,45	0,75	700
SKiP25AC1124V1	6-pack**	15	1200	72	50	1,85	0,65	–

Примечание. Условно обозначены конфигурации mini-IPM: * — CIB (Converter-Inverter-Brake) — 3-фазный выпрямитель в комплексе с 3-фазным инвертором, управляемым драйвером и тормозным чоппером; ** — 6-pack — 3-фазный инвертор, управляемый драйвером, и терморезистор.

мощности (в различном исполнении и для различных применений). Здесь ограничимся рассмотрением IPM и их применением только на основе перспективных MOSFET- и IGBT-модулей, не затрагивая диодно-тиристорных и симисторных модулей.

Возможности интегрированных силовых модулей достаточно подробно описаны в работах [22–30], а в обобщенном виде — в статье авторов [25]. Поэтому в рамках данной статьи рассмотрим вкратце только некоторые IPM.

IPM для импульсных ИВЭ

Фирмы IXYS [15] и Infineon [16] разработали и выпускают силовые модули для сетевых ИВЭ (AC/DC-преобразователей): узлы активного корректора коэффициента мощности (KKM/PFC) и работающего на него инвертора — с использованием MOSFET-ключей. В работе [26] авторов этой статьи приведен пример схемы импульсного ИВЭ с выходной мощностью 1200 Вт (27 В/45 А) с применением IPM фирмы IXYS. В частности, применены:

- KKM-модуль типа VUM33-05N — однофазный выпрямительный мост и MOSFET-чоппер.
- MOSFET-модуль типа VHM40-06P1 в схеме однотактного прямоходового преобразователя напряжения («косой» мост). Параметры VHM40-06P1 (CoolMOS) для каждого из двух MOSFET: U_{DSS} = 600 В, I_D = 38 А, R_{DS on} = 0,07 Ом; время нарастания t_r/время спада t_f — 95/10 нс. Устроенных антипараллельных диодов: U_{RRM} = 600 В, I_{FM} = 18,5 А, время восстановления t_{rr} = 70 нс (ток 10 А).

IPM для регулируемого электропривода

Для использования в электроприводах малой мощности фирма International Rectifier (IR) [18] предложила интегрированные силовые модули платформы PlugN&Drive в серии IRAMxxUP60x. Это трехфазные инверторы для управления элек-

троприводом с мощностью от 600 до 2500 Вт. Они имеют следующие параметры IGBT:

- IRAMS10UP60B: U_{CES} = 600 В, I_C = 10 А (25 °C) — для электропривода до 750 Вт;
- IRAMY20UP60B: U_{CES} = 600 В, I_C = 20 А (25 °C) — для электропривода до 2500 Вт.

Предложены две версии модулей — «А» и «В». Версия «А» использует 3-фазный мост на IGBT: 6 кристаллов 600-вольтовых IGBT (NPT, 5-го поколения) и 6 антипараллельных диодов — с открытыми эмиттерами нижних плеч. Версия «В» — та же структура, но с включением силового шунта для контроля тока в нулевой провод.

Фирма SEMIKRON в 2004 г. создала платформу конфигурации В6U+В6С1 (то есть 3-фазный выпрямитель + инвертор), названную платформой SEMIKUBE [23]. Она предназначена для построения приводов мощностью 75–1000 кВт. Концепция SEMIKUBE позволяет обеспечить широкий ряд мощностей за счет небольшого набора стандартных базовых блоков — «кубиков». Блок состоит из силового каскада со звеном постоянного тока, платы драйвера, осуществляющей функции управления, защиты и мониторинга, а также набора датчиков для осуществления этих функций. Модели SEMIKUBE применяются в приводах асинхронных двигателей, а также в системах выработки электроэнергии. Условия эксплуатации модулей SEMIKUBE: напряжение питания переменного тока — 3×400 В, 50 Гц или 3×460 В, 60 Гц; частота ШИМ — 3 кГц; cosφ = 0,85; T_{окр} = 40 °C. Выбор класса напряжения IGBT определяется типом питающей сети. Например, для сети стандарта 3×380 В, 50 Гц предназначены модули с напряжением 1200 В, а для сетей 3×690 В, 60 Гц — с напряжением 1700 В.

Серия миниатюрных модулей MiniSKiIP разработана фирмой SEMIKRON для использования в приводах мощностью до 30 кВт. На европейском рынке доля этих компонен-

тов составляет до 46% для этого диапазона мощностей. В таблице 3 приведены основные характеристики модулей MiniSKiIP.

Продолжая это направление, компания SEMIKRON разработала к 2008 г. новое поколение IPM с интегральным драйвером на основе технологии SOI, полностью исключая зашелкивание IGBT. Mini-IPM имеют стандартную конфигурацию для электропривода: входной 3-фазный мостовой выпрямитель, 3-фазный IGBT-инвертор, тормозной чоппер. Семиканальный драйвер в виде высоковольтной интегральной схемы вырабатывает управляющие импульсы для всех 6 транзисторов инвертора и еще для чоппера. Он также осуществляет защиту от токовых перегрузок. Входы управления драйвера совместимы и с TTL-3,3 В и КМОП. И кристаллы транзисторов, и чип драйвера, и резисторы затворов установлены на одной плате. В таблице 4 приведены особенности структуры, технология и основные технические характеристики IGBT-модулей некоторых зарубежных фирм (Infineon и IXYS).

Рабочее напряжение всех IGBT-модулей составляет 1200 В, максимальные токи — от 115 до 1400 А.

В 2004–2008 гг. отечественные фирмы ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) [26], ОАО «Контур» (г. Чебоксары) [30], ЗАО «Протон-Импульс» (г. Орел) и некоторые другие освоили ряд силовых модулей, в том числе и IPM, на высокие напряжения и большие токи. Так, в ОАО «Электровыпрямитель» [27] за последние 10 лет увеличено производство IGBT-модулей с 35 до 300 типов (в 10 конструктивных исполнениях). Это стало возможным благодаря помощи немецких фирм Infineon и Eures, а также компании «Интех Электроникс» [28], представляющей их на российском рынке, что позволило ОАО «Электровыпрямитель» получить доступ к высоким технологиям в области силовой IGBT-электроники. На предприятии разработана и внедрена в производство серия IGBT-модулей на большие напряжения и токи: 600 В (50–4800 А), 1200 и 1700 В (50–3600 А), 2500 В (50–1500 А), 3300 В (50–1200 А) и 6500 В (25–600 А). Модули этой фирмы выпускаются по схемам одиночных ключей (МТКИ, МТКИ-1), чопперов (МТКИД, МДТКИ), полумостовых (М2ТКИ) и 3-фазных инверторов (М6ТКИ). Модули соответствуют международным стандартам и выпускаются на основе системы качества ISO 9001:2000. В статье [29] приведены некоторые параметры модулей ОАО «Электровыпрямитель»,

Таблица 4. Основные технические характеристики интегрированных IGBT-модулей Infineon и IXYS

Тип	Фирма	Технология	Схема	IGBT						Диоды
				U _{CES} , В	I _C , А	P _{tot} , кВт	U _{CE(sat)} , В	Q _G /E _{off} , мкКл/Дж	R _{th Jc} , Ом	
FF300R12ME4	Infineon	Trench/Fieldstop	Полумост + терморезистор	1200	300	1,6	2,1	2,25/25	0,094	300
FF1400R12IP4		Trench/Fieldstop		1200	1400	7,65	2,05	9,6	0,0195	1400
FS450R1212KE4		Trench/Fieldstop	3-фазный инвертор (3 полумоста + терморезистор)	1200	675	2,25	2,1	3,3	0,066	450
MW1450-12E9	IXYS	NPT3 IGBT		1200	640	2,2	2,2	3,3/47	0,057	450
MW1300-17E9		NPT3 IGBT		1200	500	2,2	2,3 (тип)	2,6/80	0,057	290 (80 °C)
MI1200-12A4		NPT IGBT	Полумост	1200	270	1,13	2,7	-/21	0,11	300
MK1100-12EB		NPT3 IGBT	Полный мост	1200	115 (80 °C)		2,0	-/10	0,19	200

в частности, напряжение насыщения $U_{CE\ sat}$ и оптимальная частота работы — в зависимости от технологии и рабочего напряжения. Заметим, что с повышением рабочего напряжения >1700 В увеличивается величина $U_{CE\ sat}$ и заметно снижается оптимальная частота работы (с 5–20 до 0,5–1,5 кГц) — с учетом технологии изготовления.

В ОАО «Электровыпрямитель» разработаны и освоены в производстве IGBT-модули транспортного исполнения, предназначенные для преобразовательного оборудования подвижного состава российских железных дорог. Модули этой серии могут работать в условиях жестких климатических и механических воздействий. По заказу ОАО «РЖД» разработаны IGBT-модули с напряжением электроизоляции 13 кВ. Создание таких модулей решает проблему преобразования напряжения контактной сети 3000 В в стабильное напряжение бортового питания электровозов, независимо от всех возможных колебаний и перенапряжений в тяговых сетях. На их основе разработаны высоковольтные преобразователи частоты (ВПЧА) с выходной мощностью от 500 до 2000 кВт для электроприводов асинхронных двигателей с напряжениями 6 и 10 кВ.

Несколько слов об IGBT-модулях ОАО «Контур» [30]. Здесь с 1998 г. разработаны несколько десятков таких модулей на напряжения 600–1700 В и большие токи (до 400 А). Модули производятся на базе кристаллов ABB Semiconductors. Выпускаются следующие типы модулей:

- Одиночные ключи МТКИ с антипараллельным диодом: 1200 В, 200, 300, 400 А.
- Нижние чопперы МДТКИ: 1200 В, 50, 75, 100, 150, 200 А.

- Верхние чопперы МТКИД 1200 В, 50, 75, 100, 150, 200 А.
- Полумосты М2ТКИ: 1200 В, 50, 75, 100, 150, 200 А.
- Шестиключевой мост МТКИ-100-12: 1200 В, 100 А.

Прочие характеристики модулей (собственно для IGBT): $U_{CES} = 2,1-2,2$ В, $R_{thJC} = 0,05-0,23$ °C/Вт, $t_{d\ off} = 500-800$ нс.

IPM для автомобильной силовой электроники

Важным направлением в развитии интеллектуальных силовых модулей является их использование в так называемых гибридных транспортных средствах — гибридных автомобилях. Своим названием эти автомобили обязаны тому, что используют для движения комбинацию двигателя внутреннего сгорания с электродвигателем. Одним из первых такие модули начала разрабатывать и выпускать фирма SEMIKRON. Модули получили название SKAI (сначала SEMIKRON Automotive Inverter, а потом — SEMIKRON Advanced Integration). Но так как область применения таких модулей оказалась широкой (подъемники, транспортеры, погрузчики и др.), то окончательно за ними в некоторых вариантах закрепилось название SKADS (SEMIKRON Advanced Drive Systems). Сейчас в связи с повышением требований, прежде всего на Западе, к топливной эффективности (энергосбережению), безопасности и экологичности автомобилей заметно усилился интерес к гибридным автомобилям (Hybrid Electric Vehicles, HEV) работают и на бензине, и на электричестве (электрический двигатель) [25].

Для управления модулями, одиночными и полумостовыми, выпускаются драйверы (о них пойдет речь в последующих частях этой статьи).

Продолжение следует

Литература

1. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 1 // Силовая электроника. 2009. № 5.
2. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 2 // Силовая электроника. 2010. № 1.
3. Кокорева И. Отечественная силовая электроника. Фирмы-производители // Электроника: НТБ. 2007. № 3.
4. Шурыгина М. Дискретные силовые приборы. Расширение применения и специализация // Электроника: НТБ. 2007. № 3.
5. Эраносян С., Ланцов В. Эволюция импульсных источников питания: от прошлого к будущему. Часть 2 // Силовая электроника. 2009. № 1.
6. Прянишников В. Электроника: курс лекций. СПб.: Корона, 1998.
7. Эраносян С., Ланцов В. Эволюция импульсных источников питания: от прошлого

к будущему. Часть 5.2 // Силовая электроника. 2009. № 5.

8. Слабухин А. Устранение паразитных колебаний, возникающих при параллельном соединении полевых транзисторов MOSFET // Силовая электроника. 2005. № 1.
9. Ланцов В., Эраносян С. Надежность силовых устройств в России: мифы и реалии, проблемы и пути решения. Часть 3 // Силовая электроника. 2009. № 2.
10. www.vzpp-s.ru
11. Эраносян С., Ланцов В. Источники бесперебойного питания: новый подход к синтезу. Часть 2 // Силовая электроника. 2008. № 1.
12. www.fzmt.ru
13. Алферов А., Гордеев А., Кирсанов Г., Крицкая Т., Машевич А., Обмайкин Ю. Новые высоковольтные силовые транзисторы с изолированным затвором // Силовая электроника. 2007. № 1. www.okbiskra.ru
14. Гордеев А., Крицкая Т., Алферов А., Машевич А., Кирсанов Г., Обмайкин Ю., Чукин В. Новая серия DMOSFET-транзисторов // Силовая электроника. 2009. № 3.
15. www.ixys.com
16. www.infineon.com
17. www.advancedpower.com
18. www.irf.com
19. High voltage transistors with power MOS emitter switching // SMART POWER. Application Manual. 1-st edition. STMicroelectronics, June 1989.
20. www.st.com
21. Шукина И., Некрасов М. Новая технология PT IGBT против мощных полевых транзисторов // Силовая электроника. 2004. № 1.
22. Колпаков А. Mini-IPM — интеллект и компактность // Силовая электроника. 2008. № 4.
23. Колпаков А. Инверторная программа SEMIKUBE — вопросы выбора // Силовая электроника. 2009. № 1.
24. Башкиров В. Интеллектуальные силовые модули компании International Rectifier для электропривода малой мощности // Силовая электроника. 2005. № 1.
25. Ланцов В., Эраносян С. Интеллектуальная силовая электроника: от настоящего к будущему // Силовая электроника. 2009. № 4.
26. Ланцов В., Эраносян С. Интегрированные компоненты — основа построения современных источников питания // Силовая электроника. 2006. № 3.
27. www.elvpr.ru
28. Аксенов В., Бормотов А., Мартыненко В., Мускатиньев В., Чибиркин В. IGBT-модули производства ОАО «Электровыпрямитель» // Силовая электроника. 2006. № 2.
29. Мускатиньев В., Мартыненко В., Чибиркин В., Бормотов А. ОАО «Электровыпрямитель» расширяет производство IGBT-модулей // Силовая электроника. 2008. № 3.
30. Бандура Г., Пастухов В. Российские IGBT силовые модули производства ОАО «Контур» // Силовая электроника. 2007. № 1. www.kontur.chb.ru