

## IGBT-модули Dynex

**IGBT-модули Dynex на базе планарной технологии позволяют уменьшить прямые потери, улучшить шумовые характеристики, обеспечить более эффективный теплоотвод и, таким образом, повысить долговечность изделия и его термическую прочность.**

Автор  
info@rtd-universal.ru

Более 50 лет назад в Линкольне (Великобритания) была основана фирма AEI Semiconductors Ltd. В то время это была одна из немногих компаний, занимающихся силовыми компонентами. Впоследствии она изменила название на Dynex и расширила свое производство, приобретя подразделения и технологии таких известных компаний как GEC Plessey, SGS-Thomson, Alstom и Marconi Electronic Devices Ltd. (MEDL).

Сегодня штаб-квартира Dynex Semiconductor ([www.dynexsemi.com](http://www.dynexsemi.com)), основное производство, исследовательский центр, службы продаж и маркетинга расположены в Линкольне. Производственные площади, приобретенные у компании Mitel в 2000 году, имеют чистые помещения и самое современное оборудование, отвечающее жестким требованиям производства силовых полупроводников.

### Продукция

#### Биполярные полупроводники

Dynex производит широкий диапазон тиристоров, выпрямительных диодов, запираемых по затвору тиристоров, импульсных тиристоров и диодов с быстрым восстановлением с рабочими напряжениями от 1200 до 6500 В и токами от сотен до 11000 А. Дополнительно Dynex оказывает содействие в решении индивидуальных задач потребителей по конструктивному исполнению узлов и отводу тепла.

#### Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT)

Dynex производит различные IGBT в виде кристаллов и модулей. Семейство модулей включает изделия с параметрами рабочего напряжения от 600 до 6500 В и тока до 3600 А. Эти компоненты отвечают самым строгим требованиям качества. Dynex имеет замкнутый цикл производства, начиная от разработки технологий IGBT в собственном инженерном центре и заканчивая контролем качества модулей. Все IGBT доступны в виде кристаллов. Dynex — независимый поставщик IGBT-технологий мирового масштаба для приложений с высокими требованиями к надежности, таких как:

- системы питания и управления энергией: импульсные источники питания, источники бесперебойного питания, системы управления двигателями, сварочное оборудование, инверторы телекоммуникационных систем;
- автомобильная электроника: системы зажигания, сервоприводы, устройства зажигания фар;
- системы освещения: регуляторы, высокочастотные балластные сопротивления;
- бытовая техника: стиральные машины, пылесосы, микроволновые печи, устройства обработки пищевых продуктов, обогреватели.

Компоненты IGBT Dynex для таких применений отвечают следующим требованиям:

- низкие статические и динамические потери (на низких частотах по этому показателю они превосходят биполярные и МОП ПТ);
- достаточно широкая область безопасной работы, то есть область работы транзистора в «жестком» (неблагоприятном) режиме ключа при максимальных значениях тока, напряжения и длительности импульса;
- высокая стойкость к короткому замыканию;
- устойчивость к большим импульсным токам;
- малые емкости и заряды затворов;
- возможность параллельного включения;
- высокие частоты переключения (до 100 кГц);
- расширенный диапазон области безопасной работы;
- не требуют отрицательного смещения на затворе для устойчивого запираания;
- малая величина остаточного напряжения (не более 2,5 В);
- способность выдерживать высокие значения  $di/dt$  и  $dv/dt$ .

Вместе с тем, поскольку потери мощности силового блока любого оборудования в заданных условиях работы в первую очередь зависят от общей переключаемой энергии и напряжения насыщения, то для минимизации мощности, рассеиваемой оборудованием, его разработчик должен правильно выбрать соотношение между этими двумя основными характеристиками, задаваемыми структурой транзистора. Поэтому Dynex вы-

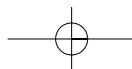
пускает многочисленные специализированные семейства, рассчитанные на определенные значения рабочей частоты и напряжения насыщения.

Основу IGBT-модулей составляют IGBT-транзисторы. Модули имеют высокую надежность, высокое быстродействие и удобство в эксплуатации.

IGBT-модули Dynex по внутренней электрической схеме могут представлять собой: единичный IGBT (single); двойной модуль, где два IGBT соединены последовательно — полумост (half-bridge); прерыватель (chopper), в котором единичный IGBT последовательно соединен с диодом. Все приборы имеют встроенный обратный или инверсный (антипараллельный) быстро восстанавливающийся диод (Fast Recovery Diode-FRD) с «мягкими» характеристиками обратного восстановления и обладают следующими особенностями:

- высокая стойкость к токам короткого замыкания;
- очень низкий остаточный ток с низкой температурной зависимостью;
- прямоугольная область безопасной работы;
- низкая внутренняя индуктивность модулей;
- улучшенная электромагнитная совместимость;
- высокое значение изоляции (до 10,2 кВ);
- высокая надежность, улучшенная термостойкость;
- 100%-ный заводской контроль в статическом и динамическом режиме.

Растущие требования одновременного повышения мощности и эффективности преобразовательных устройств требуют постоянного совершенствования технологий производства IGBT-модулей. Компания Dynex делает ставку на два типа IGBT — Trench и FS SPT (Field Stop Soft Punch Through). Новые поколения модулей обеспечивают существенное снижение потерь по сравнению со стандартными компонентами, производимыми по наиболее распространенной в настоящее время технологии NPT (Non Punch Through). Для того чтобы использование новых типов IGBT дало наибольшие преимущества, параметры антипараллельных диодов в модулях Dynex согласованы с характерис-



тиками транзисторов. Технология производства этих диодов основана на оригинальном эпитаксиальном процессе, обеспечивающим повышенную надежность при работе с высокими температурами, высокую скорость переключения и мягкое восстановление для минимизации потерь переключения. В результате применения новых технологий были созданы модули с улучшенными характеристиками:

- пониженное напряжение насыщения  $V_{GE(sat)}$  сокращающее прямые потери;
- улучшенные шумовые характеристики — пониженный уровень шумов коммутации и повышенная скорость переключения;
- низкое тепловое сопротивление, обеспечивающее более эффективный теплоотвод;
- повышенная долговечность и термическая прочность.

С целью дальнейшего снижения габаритов и массы, повышения надежности, энерго- и термостойкости, уменьшения теплового сопротивления и стоимости IGBT-модулей Dypex интенсивно развивает применение новых материалов и технологий сборки на тонкие и керамические подложки (AlN) в корпусах с малоиндуктивными выводами, разработкой специальных конструкций силовых модулей с использованием матричных композиционных материалов (MMC-Metal Matrix Composite), имеющих хорошие теплопроводящие свойства и низкие, согласованные с кремнием и керамикой, коэффициенты теплового расширения (КТР). Применение матричных композиционных материалов открывает новые перспективы в создании высокоомощных, компактных, прочных, надежных силовых модулей.

При разработке инверторов использование приборов со встроенными обратными быстродействующими диодами становится особенно предпочтительным. В этом случае требуемое число силовых полупроводниковых компонентов уменьшается на 50% по сравнению с использованием IGBT и диодов в виде отдельных элементов. Перекрываемые области диапазонов токов, где использование дискретных приборов экономически предпочтительнее применения силовых модулей, могут быть расширены за счет параллельного соединения отдельных приборов.

IGBT-модули могут быть соединены параллельно для создания силовых переключателей. Однако успешное запараллеливание IGBT-модулей требует определенной осторожности. В зависимости от области применения системы проектировщик должен предусматривать множество факторов, гарантирующих надежность работы. К этим факторам относятся характеристики модуля, компоновка и конструкция платы управления, а также ее расположение.

На первом этапе необходимо определить оптимальное число модулей, которые будут соединены параллельно для получения необходимого значения тока. Любое решение

должно гарантировать нахождение рабочего режима отдельного модуля в пределах зоны безопасной работы. Из-за различий характеристик модулей необходимо учитывать, что при параллельном включении  $N$  однотипных модулей суммарный ток увеличится менее чем в  $N$  раз, так как необходимо облегчить режим работы каждого модуля.

### Параллельное включение IGBT-модулей

При параллельном включении двух или более IGBT-модулей дисбаланс токов происходит из-за различия в динамических и статических характеристиках отдельных модулей. Одним из основных недостатков IGBT является отрицательный температурный коэффициент (ТК) по напряжению насыщения  $V_{CE(sat)}$ , что нарушает баланс токов при параллельном соединении транзисторов. Через модуль с наименьшим напряжением насыщения  $V_{CE(sat)}$  протекает наибольший ток.

#### Статический режим

Снижение эффективности по току при параллельном включении известно как фактор снижения тока. Он определяется как:

$$\delta = 1 - I_T / (n_p \times I_M). \quad (1)$$

Здесь  $\delta$  — фактор снижения тока,  $I_T$  — ток в общей цепи, поддерживаемый параллельно включенными модулями,  $I_M$  — максимальный из всех допустимых постоянных токов модулей,  $n_p$  — количество параллельных модулей.

#### Пример 1

Предположим, что мы имеем два параллельно включенных IGBT-модуля, и один из них управляет током 800 А, а другой — током 640 А. Мы можем вычислить фактор снижения тока таким образом:

$$I_T = 800 + 640 = 1440 \text{ А}, \\ I_M = 800 \text{ А}, n_p = 2.$$

Следовательно,

$$\delta = 1 - 1440 / (2 \times 800) = \\ = (1 - 0,9) \times 100\% = 10\%.$$

Преобразуя уравнение (1), мы получаем:

$$I_T = (1 - \delta) n_p I_M. \quad (2)$$

По заданному значению фактора снижения тока можно определить полный ток общей цепи. Поскольку в системе из параллельно соединенных модулей ток ни через один из них не должен превышать номинального значения, то наихудший случай произойдет, когда одно из устройств проводит максимальный ток  $I_M$ , а остальные  $(n_p - 1)$  — минимальный  $I_{min}$ . В этом случае общий ток будет

$$I_T = I_M + (n_p - 1) I_{min}. \quad (3)$$

Следующим параметром, показывающим ухудшение характеристики, является фактор дисбаланса  $m$

$$m = (I_M - I_{min}) / I_M. \quad (4)$$

Здесь  $m$  — фактор дисбаланса;  $I_M$  — максимальный ток для одиночного модуля;  $I_{min}$  — минимальный ток для одиночного модуля в параллельной цепи.

Из (4) можно выразить

$$I_{min} / I_M = 1 - m. \quad (5)$$

Из (1), (3) и (5) получаем:

$$\delta = 1 - ((n_p - 1)(1 - m) + 1) / n_p. \quad (6)$$

#### Пример 2

Определим фактор снижения тока для 4 параллельных устройств с фактором дисбаланса 20%.

Используя уравнение (6), вычисляем:

$$\delta\% = (1 - ((4 - 1)(1 - 0,2) + 1) / 4) \times 100 = \\ = 0,15 \times 100\% = 15\%.$$

Фактор дисбаланса — важная характеристика для параллельно включенных IGBT-модулей. Эта характеристика является функцией напряжения насыщения  $V_{CE(sat)}$ , температуры перехода, конструкции устройства и технологии. Рис. 1 (интерпретация уравнения (6)) показывает рост фактора снижения тока при соединении параллельно до пяти IGBT-модулей Dypex DIM800DDM17.

Отметим, что фактор снижения тока заметней при более низких температурах. При расчетах целесообразно пользоваться значениями  $\delta$  для температуры перехода 25 °С.

Полный ток системы для пяти параллельно включенных модулей может быть определен из рис. 1 и уравнения (2).

#### Пример 3

Оценим полный ток для системы из четырех DIM800DDM17, соединенных параллельно.

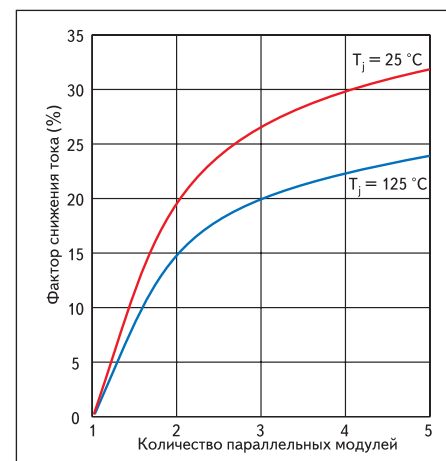


Рис. 1. Изменение статических факторов снижения тока модуля DIM 800DDM17-A000

Таблица 1. Типы, размеры и конфигурации модулей

Код типа корпуса	Размеры, мм	Конфигурация модуля	Конфигурация диода	Максимальное рабочее напряжение, кВ	Примечание
A	190×140×48	Одиночный ключ		6,5	Изоляция 10,2 кВ
B	62×107×30	Одиночный ключ	Одиночный	1,7	В новых разработках применяется код L
C	94×34×30	Полумост Чоппер		1,7	
D	140×130×38	Двойной ключ Несвязанный с диодом чоппер		1,7	
E	190×140×38	Одиночный ключ	Тройной	3,3	
F	140×130×38	Одиночный ключ	Двойной	1,7	
G	140×130×38	Двойной ключ Несвязанный с диодом чоппер		3,3	
J	140×130×64	Одиночный ключ		3,3	Изоляция 8,5 кВ
K	140×73×48	Одиночный ключ		6,5	Изоляция 10,2 кВ
L	62×108×30	Одиночный ключ	Одиночный	1,7	
M	62×108×30	Полумост Чоппер Двухнаправленный ключ	Последовательная пара (Полумост)	1,7	
N	140×130×38	Одиночный ключ	Двойной	3,3	
P	73×140×38	Полумост Чоппер Двухнаправленный ключ	Последовательная пара (Полумост)	3,3	
R	140×130×38	Мост вентиляльно-индукторного двигателя		1,7	
W	62×107×30	Полумост Чоппер Двухнаправленный ключ	Последовательная пара (Полумост)	1,7	
X	140×130×38	Одиночный ключ		6,5	Изоляция 10,2 кВ

Таблица 2. Тип конфигурации схемы модуля

Код типа электрической схемы	Описание	Код типа корпуса
B	Двухнаправленный ключ из двух IGBT с общим эмиттером	
C	IGBT чоппер и несвязанный с ним диод	
D	Два отдельных IGBT ключа	
E	Симметричная пара IGBT чопперов с возможностью последовательного соединения (коллектор-эмиттер) по внешней шине	
H	IGBT полумост	
K	IGBT чоппер верхнего плеча	
L	IGBT чоппер нижнего плеча	
R	Мост вентиляльно-индукторного двигателя	
S	Одиночный ключ	B
	Три одиночных IGBT ключа с возможностью параллельного соединения по внешней шине	E
	Два одиночных IGBT ключа с возможностью параллельного соединения по внешней шине	E
V	Последовательно соединенная пара двухнаправленных IGBT ключей	
X	Два диода с возможностью параллельного соединения по внешней шине	F, N, X
	Три диода с возможностью параллельного соединения по внешней шине	E
	Одиночный диод	B, L
	Два последовательных соединенных диода с отводом	M, L, P

Из рис. 1 определим фактор снижения тока при 25 °С — для четырех параллельно включенных устройств он равен 30%. Из уравнения (2) получим:

$$I_T = (1 - 0,3) \times 4 \times 800 = 2240 \text{ A.}$$

**Динамический режим**

Статическая оценка системы параллельно соединенных IGBT-модулей предполагает, что ни через одно из устройств не проходит ток, превышающий максимально допустимый. Подобный подход может быть применен и в динамическом режиме. Главная причина дисбаланса токов во время переключения — различие в передаточных характеристиках (зависимости коллекторного тока от напряжения между затвором и эмиттером) отдельных модулей.

Через IGBT-модуль с наибольшей крутизной передаточной характеристики протека-

ет наибольшая часть общего тока. Значение тока в динамическом режиме ( $I_{C(PK)}$ ) связана с температурой перехода и, следовательно, со значением общих потерь.

Если мы определяем  $I_{C(PK)(max)}$  как максимально допустимый пиковый ток отдельного модуля, работающего в определенных условиях, а  $I_{C(PK)(min)}$  — как минимальный пико-

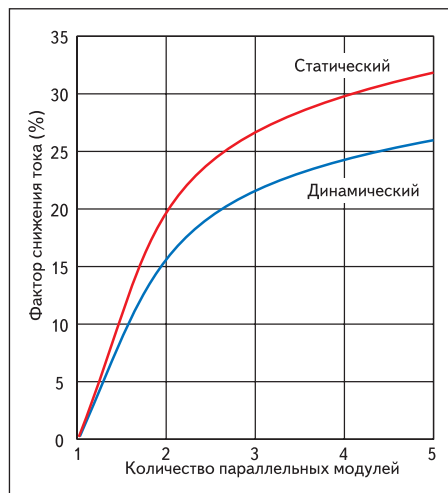


Рис. 2. Сравнение статического и динамического факторов снижения тока модуля DIM 800DDM17-A000

Таблица 3. Аналоги

DYNEX	EUPEC	SEMIKRON	MITSUBISHI	TOSHIBA	FUJI
<b>Полумосты</b>					
DIM125CHS06-S	BSM100GB60DLC	SKM100GB063D	CM100DY-12H	MG100J2YS50	2MBI100N-060
DIM250WHS06-S	BSM200GB60DLC	SKM200GB063D	CM200DY-12H	MG150J1ZS50	
DIM375WHS06-S	BSM300GB60DLC	SKM300GB063D	CM300DY-12H		2MBI300N-060
DIM50CHS12-E	BSM50GB120DN2		CM50DY-24H	MG50Q2YS50	
DIM75CHS12-E	BSM75GB120DN2		CM75DU-24F	MG75Q2YS50	2MBI75UA-120
DIM100CHS12-E			CM100DU-24F		2MBI100UA-120
DIM100WHS12-A		SKM100GB123D		MG100Q2YS51	2MBI100N-120
DIM100WHS12-E	BSM100GB120DN2				
DIM200WHS12-A		SKM200GB123D	CM200DU-24H	MG150Q2YS51	
DIM200WHS12-E	BSM200GB120DN2	SKM200GB126D			2MBI200UB-120
DIM100WHS17-A	BSM100GB170DN2		CM100DU-34KA	MG90V2YS40	
DIM200WHS17-A	BSM200GB170DLC	SKM150GB173D	CM200DU-34KA		
DIM300WHS17-E	FF300R17KE3				
DIM200PHM33-A	FF200R33KF2C				
<b>Чопперы</b>					
DIM250WKS06-S				MG150J1JS50	
DIM200WKS12-S				MG150Q1JS40	
DIM200WLS12-A	BSM200GAL120DN2	SKM150GAL123D			
DIM200WKS12-A	BSM200GAR120DN2	SKM150GAR123D			
DIM400DCM17-A	FD400R17KF6CB2				
DIM600DCM17-A	FD600R17KF6CB2				
DIM800DCM17-A	FD800R17KF6CB2				
DIM400GCM33-A	FD400R33KF2C				
<b>Одиночные ключи</b>					
DIM500BSS06-S			CM400HA-12H	MG400J1US51	1MBI600NN-060
DIM200BSS12-A	BSM200GA120DN2				
DIM400BSS12-A	BSM400GA120DN2		CM400HU-24F		
DIM800FSM12-A	FZ800R12KF4		CM800HA-24H		
DIM1200FSM12-A	FZ1200R12KF4		CM1000HA-24H		
DIM1600FSM12-A	FZ1600R12KF4				
DIM1800ESM12-A	FZ1800R12KF4				
DIM2400ESM12-A	FZ2400R12KF4				
DIM200BSS17-A	BSM200GA170DLC				
DIM400BSS17-A	BSM400GA170DLC				
DIM600BSS17-A		SKM500GA174D			
DIM800FSM17-A	FZ800R17KF6CB2		CM600E2Y-34H		
DIM1200FSM17-A	FZ1200R17KF6CB2		CM1200HA-34H		
DIM1600FSM17-A	FZ1600R17KF6CB2		CM1600HC-34H		
DIM2400ESM17-A	FZ2400R17KF6CB2		CM2400HC-34H		
DIM800NSM33-A	FZ800R33KF2C		CM800HA-66H		
DIM1200ESM33-A	FZ1200R33KF2C		CM1200HC-66H		

Таблица 4. Подбор модулей по напряжению и току

Ток коллектора, А	Напряжение коллектор-эмиттер, В							
	600	1200	1700	3300	6500			
3600			DIM3600ESM12-E					
2400				DIM2400ESM12-A				
					DIM2400NSM17-E			
					DIM2400NSM17-E			
1800		DIM1800ESM12-A			DIM1800ESM17-E			
1600		DIM1600FSM12-A	DIM1600NSM12-E	DIM1600FSM17-A	DIM1600NSM17-E			
1200			DIM1200DDM12-E		DIM1200DDM17-E			
		DIM1200FSM12-A		DIM1200FSM17-A		DIM1200ESM33-A	DIM1200ESM33-F	
		DIM1200FSM12-A	DIM1200NSM12-E		DIM1200NSM17-E			
800		DIM800DDM12-A		DIM800DDM17-A	DIM800DDM17-E	DIM800JSM33-A		
		DIM800DCM12-A	DIM800DDM12-E	DIM800DCM17-A		DIM800NSM33-A	DIM800NSM33-F	
		DIM800FSM12-A		DIM800FSM17-A			DIM800ECM33-F	
600		DIM600BSS12-A	DIM600BSS12-E	DIM600BSS17-A	DIM600BSS17-E			
			DIM600WHS12-E	DIM600DDM17-A	DIM600DDM17-E			
			DIM600DDM12-E	DIM600DCM17-A				
500	DIM500BSS06-S							
400				DIM400BSS17-A	DIM400BSS17-E			
				DIM400WHS17-A	DIM400WHS17-E			
		DIM400BSS12-A	DIM400BSS12-E	DIM400DDM17-A	DIM400DDM17-E	DIM400GDM33-A	DIM400GDM33-F	
		DIM400WHS12-A	DIM400WHS12-E	DIM400DCM17-A	DIM400WHS17-E	DIM400GCM33-A		DIM400XSM65-K
		DIM400DDM12-A		DIM400PBM17-A				
				DIM400PHM17-A				
300	DIM375WHS06-S		DIM300BSS12-E		DIM300BSS17-E			
	DIM375WLS06-S	DIM300WHS12-A		DIM300WHS17-A	DIM300WHS17-E			
	DIM375WKS06-S		DIM300WHS12-E					
		DIM200BSS12-A	DIM200BSS12-E	DIM200BSS17-A	DIM200BSS17-E	DIM200PHM33-A	DIM200PHM33-F	
200	DIM250WHS06-S	DIM200WHS12-A	DIM200WHS12-E	DIM200WHS17-A	DIM200WHS17-E	DIM200PKM33-A		
	DIM250WLS06-S	DIM200WLS12-A		DIM200WLS17-A		DIM200PLM33-A		
	DIM250WKS06-S	DIM200WKS12-A		DIM200WKS17-A				
		DIM200MBS12-A						
150					DIM150CHS17-E			
					DIM150WHS17-E			
100				DIM100CHS17-A	DIM100CHS17-E			
		DIM100WHS12-A	DIM100WHS12-E	DIM100WHS17-A	DIM100WHS17-E			
75					DIM75CHS17-E			
50					DIM50CHS17-E			

вый ток для отдельного модуля, работающего в параллельном соединении с другими, тогда  $\Delta I_{C(PK)} = I_{C(PK)(max)} - I_{C(PK)(min)}$ , а динамический фактор дисбаланса тока:

$$\varphi = \Delta I_{C(PK)} / I_{C(PK)(max)} \quad (7)$$

Таким образом, динамический фактор снижения тока:

$$\delta(\text{dynamic}) = 1 - ((n_p - 1)(1 - \varphi) + 1/n_p) \quad (8)$$

где  $\delta(\text{dynamic})$  — динамический фактор снижения тока;  $n_p$  — количество параллельных модулей;  $\varphi$  — динамический фактор дисбаланса тока.

Динамический фактор дисбаланса тока  $\varphi$  связан с передаточной характеристикой IGBT.

На рис. 2 приводится сравнение статического и динамического факторов снижения тока для IGBT-модуля DIM800DDM17 при температуре перехода 25 °C. Заметим, что статический фактор снижения тока больше динамического.

Это верно вообще для большинства условий применения модулей. Поэтому необходимо учитывать только статический фактор снижения тока при определении числа параллельно соединяемых модулей. Однако параметры динамического режима более чувствительны к внешним факторам,

особенно к разбросу параметров распределенной индуктивности в цепи «эмиттер–затвор», который приводит к динамическому разбалансу и неравенству напряжений «эмиттер–затвор» во время переключения. Использование резисторов в цепях затворов помогает восстановить динамический баланс.

### Обозначение IGBT-модулей и FRD компании Dypex

С февраля 2001 года Dypex использует следующие обозначения для новой документации на продукцию.

Порядок обозначений рассмотрим на примере изделия DIM800DDM17-A000.

- DIM800DDM17-A000 (**D** — компания Dypex).
- DIM800DDM17-A000 (**I** — IGBT; **F** — FRD).
- DIM800DDM17-A000 (**M** — модуль).
- DIM800DDM17-A000 — рабочий ток (минимум две цифры, максимум — четыре).
- DIM800DDM17-A000 — тип корпуса (табл. 1).
- DIM800DDM17-A000 — тип конфигурации схемы модуля (табл. 2)
- DIM800DDM17-A000 — материал основания (**M** — металл-матричный композиционный материал; **S** — медь).
- DIM800DDM17-A000 — максимальное рабочее напряжение (06 — 600 В; 12 — 1200 В; 17 — 1700 В; 33 — 3300 В; 65 — 6500 В).

- DIM800DDM17-A000 — технология изготовления (**A** — стандартная гомогенная структура (Standard Non Punch Through-NPT) IGBT и FRD; **E** — заглубленный затвор-канавка (Trench Field Stop) IGBT и FRD; **F** — мягкий прокол базы (Soft Punch Through-SPT) 3,5 кВ IGBT и FRD; **J** — 600 В гомогенная структура (Non Punch Through-NPT) IGBT и FRD; **K** — мягкий прокол базы (Soft Punch Through-SPT) 6,5 кВ IGBT и FRD; **S** — 600 В эпитаксиальная структура (Punch Through-PT) IGBT).

- DIM800DDM17-A000 (**000** — стандартная продукция (может быть не указана); **076** — стандартная продукция, сопровождаемая результатами тестовой проверки; **XXX** — продукция, поставляемая по спецификации заказчика).

#### Примеры:

- DIM800DDM17-A001.
- DIM200PLM33-A019.

Размеры различных типов корпусов даны в таблице 3.

Dypex является одним из мировых лидеров в области производства компонентов силовой электроники — наряду с такими фирмами как Eupec, Semikron и Mitsubishi. В таблице 3 показаны IGBT-модули Dypex, подходящие для замены модулей других производителей.

Подбор модулей Dypex по требуемому току коллектора и напряжению между коллектором и эмиттером можно произвести по таблице 4.

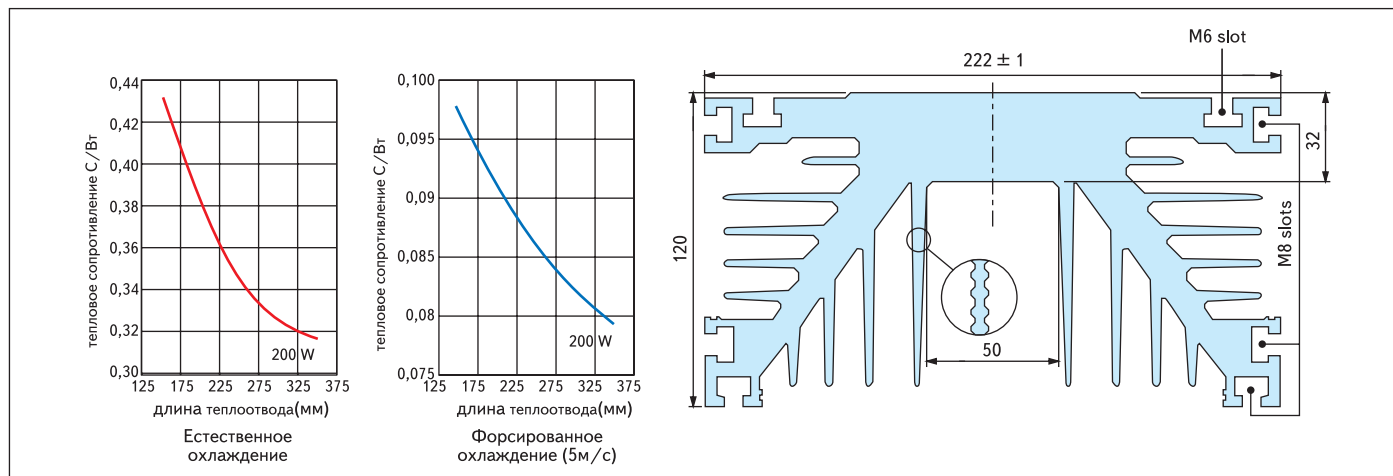


Рис. 3. Разрез теплоотвода IGBT модуля Duxex

### Рекомендуемые основные правила монтажа и эксплуатации IGBT-модулей Duxex

- Для достижения необходимых характеристик переключения требуется создание структуры окисного слоя толщиной в несколько сотен ангстрем. По этой причине изготовители ограничивают максимальное напряжение «эмиттер–затвор» величиной  $\pm 20$  В. Если это напряжение превышено, то существует опасность того, что чип будет разрушен, а это приведет к потере свойств структуры «эмиттер–затвор». Такое может происходить из-за накопления электростатического заряда. Поэтому должны быть приняты меры для исключения такого повреждения. Продукты IGBT, поставляемые фирмой Duxex, имеют перемычки, соединяющие затвор и эмиттер, и упакованы в антистатический токопроводящий материал. При монтаже необходимо принять меры по защите IGBT-модулей от воздействия статического электричества и перенапряжений в цепи затвора (обязательно применение персоналом заземляющих браслетов и заземленных низковольтных паяльников с питанием через трансформатор). При эксплуатации необходимо выполнять следующие условия:
  - значение рабочего пикового напряжения в схемах должно быть не более 80%, а рабочего постоянного напряжения — не более 60% от классификационного значения напряжения «коллектор–эмиттер»;
  - запрещается устанавливать плавкие предохранители между фильтрами блока питания и силовыми ключами, так как предохранители имеют большую индуктивность;
  - значение повторяющегося пикового тока должно быть не более 80% от классификационного постоянного тока коллектора;
  - температура  $p-n$ -перехода не должна превышать 80% максимально допустимой температуры  $T_{j\text{max}}$ ;
  - температура корпуса должна быть не выше  $100^{\circ}\text{C}$ ;

- при включении схемы сначала должно подаваться напряжение питания на систему управления и драйверы, и только затем — на IGBT;
- при выключении снятие напряжений питания должно производиться в обратном порядке;
- время нарастания и спада напряжения управления должно быть как можно меньше;
- для защиты модулей от перенапряжений в цепи «коллектор–эмиттер» рекомендуется применение снабберных RC- и RCD-цепей, установленных непосредственно на силовых выводах.

В качестве снабберных конденсаторов можно порекомендовать полипропиленовые пленочные конденсаторы фирмы ICEL (типы PPA, PPB, PMB) или EPCOS (тип МКР).

- Среднее время жизни кремниевого полупроводника существенно увеличивается при снижении температуры перехода. Для поддержания последней ниже максимально допустимой ( $T_{j\text{max}}$ ) необходим подходящий теплоотвод. Для правильного выбора теплоотвода необходимо учитывать множество факторов, в том числе следующие:

- максимальная допустимая температура перехода;
- максимальная допустимая температура перехода, при которой еще обеспечивается необходимое время жизни полупроводника;
- доступность метода охлаждения;
- стоимость метода охлаждения;
- надежность метода охлаждения.

Если нет никаких ограничений на размер теплоотвода, то вполне надежным решением является естественное воздушное охлаждение за счет большой площади теплоотвода. Данный метод самый дешевый, но не всегда эффективный. Ребристые теплоотводы имеют меньшие размеры. Профиль такого теплоотвода производства Duxex (тип EM) и зависимость теплового сопротивления от длины для естественного и форсированного охлаждения показаны на рис. 3. Тепловое сопротив-

ление «теплоотвод–воздух»  $R_{th(h-a)}$  уменьшается за счет увеличения излучения с поверхности канавок, прорезанных в ребрах.

IGBT-модуль обычно электрически изолируется от своего основания. Это позволяет устанавливать несколько устройств на едином теплоотводе. Средняя температура перехода может быть определена из соотношения:

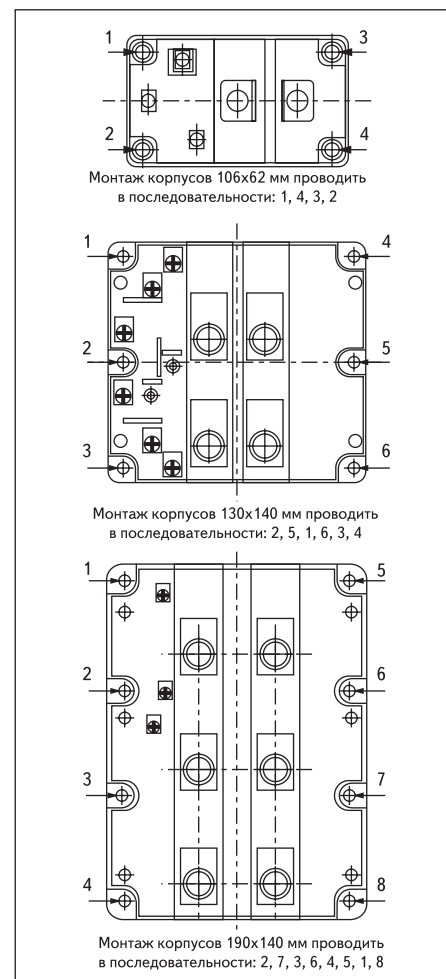


Рис. 4. Порядок затягивания болтов для IGBT-модулей Duxex

Таблица 5. Параметры компаундов

Параметр	Марка компаунда						
	Rhodasil 47V5	Dow Corning DC200	Aavid Sil Free1020	American Oil PQ	BICC BX13	Aremco 664	Unial
Максимальная температура, °C	120	315	200	200	260	285	120
Минимальная температура, °C	-65	-50	-40				-30
Удельная теплопроводность	0,12 Вт/м·К	0,155 Вт/м·К	0,793 Вт/м·К	16,7×10 с×см×°C		16,7×10 с×см×°C	
Диэлектрическая прочность, В/мм	15000		225	15000		0	0

$$T_j = W(R_{th(j-c)} + R_{th(c-h)} + R_{th(h-a)}) + T_a,$$

где  $W$  — мощность потерь;  $T_j$  — температура кристалла;  $T_c$  — температура корпуса;  $T_h$  — температура теплоотвода под модулем;  $T_a$  — окружающая температура;  $R_{th(j-c)}$  — тепловое сопротивление «кристалл–корпус»;  $R_{th(c-h)}$  — тепловое сопротивление «корпус–теплоотвод»;  $R_{th(h-a)}$  — тепловое сопротивление «теплоотвод–воздух».

Мощность потерь  $W$  включает в себя потери переключения и потери проводимости. Тепловое сопротивление  $R_{th(j-c)}$  описывает распространение тепла между кристаллами IGBT и корпусом модуля. Оно характеризует статическое распространение тепла системы IGBT внутри модуля и зависит от размеров кристалла и конструкции модуля. Тепловое сопротивление контакта «корпус–теплоотвод»  $R_{th(c-h)}$  IGBT-модуля описывает распространение тепла между корпусом модуля и теплоотводом. Оно характеризует статическое распространение тепла IGBT-модуля и зависит от размеров модуля, теплоотвода и поверхности корпуса, толщины и параметров термослоя (паста, фольга, прокладки) между модулем и теплоотводом, а также от силы прижатия крепежными винтами. IGBT-модули крепятся к охладителю винтами высокой твердости, при этом должен соблюдаться заданный момент вращения, и должны быть обязательно установлены плоские и стопорные шайбы.

Контактные поверхности модулей и теплоотводов должны быть чистыми и без повреждений. Неплоскостность поверхности теплоотвода, ограниченной крепежными отверстиями, должна быть не более 30 мкм (в интервале между отверстиями под винты). Шероховатость контактной поверхности  $R_a$  — не более 2,5 мкм. Если поверхность не отвечает этому требованию, то произойдет увеличение теплового сопротивления между основанием модуля и теплоотводом ( $R_{th(c-h)}$ ).

Перед монтажом контактную поверхность модуля и охладителя необходимо очистить с помощью растворителя от загрязнения и нанести тонким равномерным слоем теплопроводящий компаунд с помощью валика или шпателя. Параметры теплопроводящих компаундов некоторых производителей приведены в таблице 5.

Однородный слой компаунда (например 'Unial') должен иметь толщину приблизительно 1 мм. Компаунд необходимо наносить на поверхность основания модуля до установки на теплоотвод.

Излишки состава удаляются с помощью гофрированной лопаточки, которая должна иметь форму, показанную рис. 5, и быть ориентирована перпендикулярно к поверхности основания модуля и параллельно его короткой стороне.

После установки модуля на теплоотвод доворот крепежных болтов должен быть выполнен по следующему алгоритму:

- поместить рекомендованные крепежные болты в отверстия;
- используя динамометрический ключ, медленно завернуть крепежные болты до упора;
- довернуть крепежные болты не больше чем четверть оборота поочередно, как показано на рис. 6, и в соответствии со справочными данными модулей Duplex на моменты вращения крепежных болтов;
- через три часа после закрепления винты необходимо довернуть, соблюдая заданный момент вращения, так как часть теп-

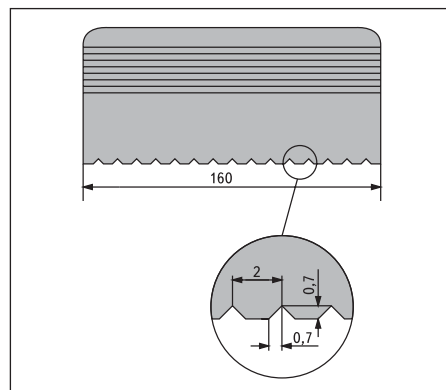


Рис. 5. Профиль лопаточки

лопроводящей пасты вытекает под давлением.

Количество компаунда является достаточным, если вокруг окончательно смонтированного на охладитель модуля наблюдается небольшое выдавливание состава. Во избежание неравномерного нанесения не рекомендуется использование компаундов с повышенной вязкостью. Запрещается наличие в теплопроводящей пасте, а также на поверхностях модуля или охладителя твердых частиц, так как при креплении модуля они вызывают деформацию основания и разрушение внутренних элементов модуля.

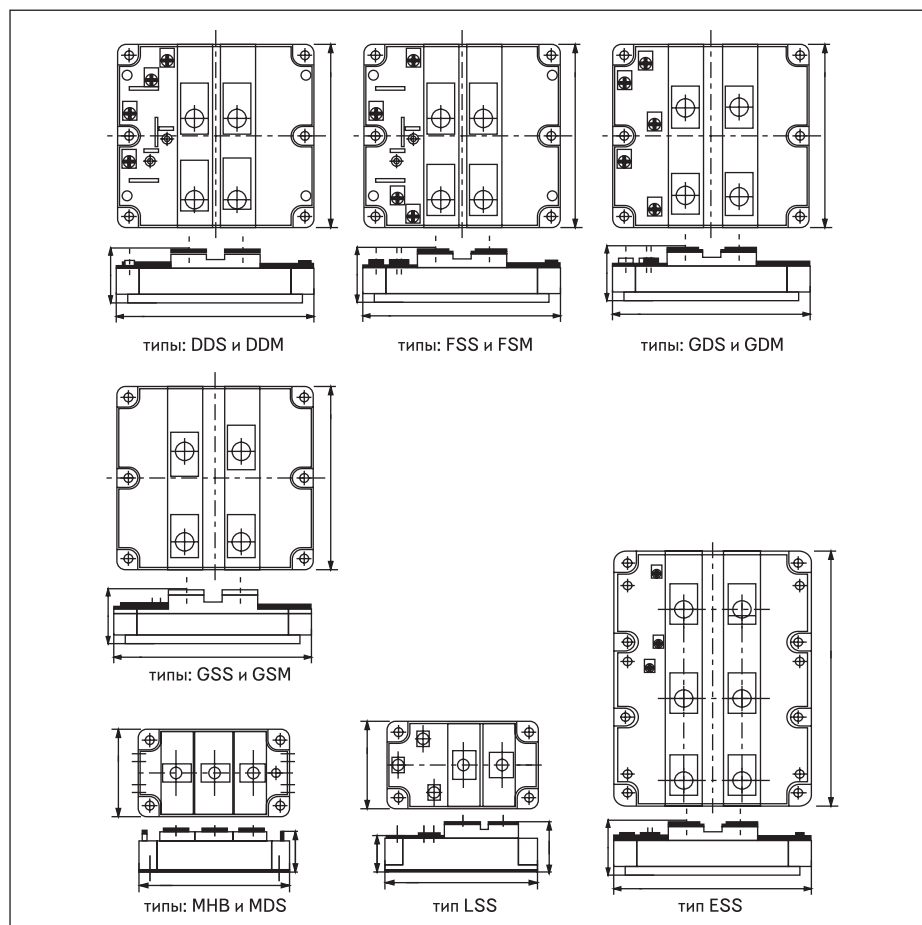


Рис. 6. Профили и размеры различных типов корпусов IGBT модулей Duplex

Применение в модулях Dupex матричных композиционных материалов, имеющих высокую теплопроводность и низкий коэффициент теплового расширения, позволяет снизить до минимума напряженность в конструкции модуля, особенно в чипах силовых приборов. Это позволяет обеспечить хорошую электрическую изоляцию и эффективный отвод тепла.

3. При использовании некомплектных винтов необходимо следить за тем, чтобы их длина была достаточной для надежного соединения, в то же время винты не должны выступать за отверстие гайки под силовым выводом более чем на 3 мм.

4. Для предотвращения механического разрушения модулей не рекомендуется прикладывать к силовым и управляющим выводам значительные механические нагрузки.

Применяемая фирмой Dupex при производстве чипов IGBT технология заглубленного затвора-канавки (затвора с изолирующими канавками — trench gate) обеспечивает низкий уровень напряжения насыщения за счет повышения плотности каналов в кристалле и использует вертикальную структуру затвора вместо традиционной горизонтальной. Планарная конструкция кристалла позволяет уменьшить напряжение насыщения  $V_{CE(sat)}$  и потери переключения. Для IGBT-модулей Dupex, рассчитанных на напряжение 1200 В, удалось уменьшить значение  $V_{CE(sat)}$  с 2,2 до 1,7 В и снизить потери переключения. Кроме того, одновременно с улучшением характеристик IGBT улучшена работоспособность рекуперативного диода в самом модуле. В общих чертах, улучшение показателей IGBT-модулей привело к более быстрому включению, благодаря которому сократились потери переключения. Тем не менее, рост отношения  $di/dt$  в модуле приводит к более крутому росту  $di/dt$  рекуперативного диода, что увеличивает уровень шума. Параметры этого диода также улучшены аналогично параметрам самого модуля и скорость переключения повышена. Мягкое восстановление, поддерживая быстрое переключение, обуславливает низкий уровень шумов IGBT. Для увеличения количества рабочих циклов и долговечности в IGBT-модулях используется изолятор на основе нитрида алюминия и новый тип оптимизированной структуры алюминиевой металлизации кремниевой поверхности электродов.

Разработанные Dupex IGBT-модули удовлетворяют самым высоким требованиям по термоустойчивости в циклических режимах, что очень важно для работы в составе тяговых электроприводов. В их конструкции используются передовые разработки: композитные материалы AlSiC (Aluminium Silizium Carbid) и AlN (Aluminium Nitrit) для основания и подложки соответственно, которые улучшают термодинамические характеристики силовых IGBT-модулей и обеспечивают высокую прочность изоляции при тестировании частичными разрядами. Оказалось,

что термоциклоустойчивость увеличивается при использовании нового материала AlSiC, который обеспечивает практически полное отсутствие какого-либо отслоения или ослабления припойной структуры. На рис. 6 показаны профили и размеры различных типов корпусов IGBT-модулей Dupex.

В дополнение к вышеупомянутым рекомендациям рассмотрим выбор схемы драйвера и его компоновку.

Ток коллектора IGBT  $I_C$  зависит от напряжения «коллектор–эмиттер»  $V_{CE}$  и от напряжения «затвор–эмиттер»  $V_{GE}$ . Причем проводимость IGBT, определяемая как крутизна характеристики  $dI_G/dV_{CE} = f(V_{GE})$ , возрастает при увеличении  $V_{GE}$ . Поэтому желательно увеличить  $V_{GE}$  до максимума, то есть до значения примерно 15 В. При выключении  $V_{GE}$  рекомендуется держать в пределах  $-8...-15$  В, так как этого достаточно для снижения потерь при выключении и обеспечения высокой стойкости транзистора к  $dV/dt$ . Компания Dupex, как и большинство изготовителей IGBT гарантирует, что они будут сохранять работоспособность при коротком замыкании на время 10 мкс при значении рабочего напряжения 50% от максимального, с  $V_{GE} = 15$  В и с температурой ниже 125 °С. Если короткое замыкание появляется при нахождении IGBT в проводящем состоянии, то  $I_C$  и  $V_{CE}$  очень быстро повышаются. Быстрое повышение  $dV/dt$  вместе с обратной емкостью  $C_{res}$ , составляющей единицы нанофард, приводит к увеличению эффективного значения  $V_{GE}$ , так как  $V_{GE} = C_{res} \times dV/dt \times R_G + V_G$  (рис. 7).

Для предотвращения такой ситуации помогает встречно-параллельное включение диодов Зенера параллельно цепи «затвор–эмиттер», как показано на рис. 7.

При последовательном включении IGBT, например, для управления двигателем с помощью полумостов, необходимы согласованные задержки включения IGBT верхнего и нижнего плеча для предотвращения проникновения постоянного тока в обмотку. Кроме того, схема драйвера должна обеспечивать достаточную коррекцию времени коммутации для предотвращения большого сквозного тока через модули. Метод задержки не требует никаких дополнительных силовых компонентов и в IGBT не возникает больших потерь. С другой стороны, он предъявляет жесткие требования к драйверу и схеме управления.

Особое внимание нужно уделить размещению схемы драйвера, чтобы минимизировать

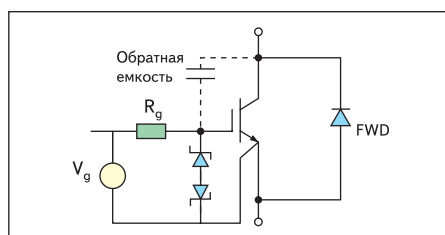


Рис. 7. Ограничение напряжения затвор-эмиттер

шумы от паразитных элементов схемы, а также гарантировать, что выбраны правильные расстояния для предотвращения электрического пробоя при используемом рабочем напряжении. Провода, соединяющие схему драйвера с затвором и эмиттером IGBT должны быть минимальной длины.

При параллельном включении нескольких однотипных модулей небольшое различие в потенциалах эмиттеров может вызвать паразитные колебания в схеме драйвера.

Для демпфирования этих колебаний полезно включать резисторы в цепь затворов и в эмиттеры. На рис. 8 показан пример схемы драйвера для параллельных IGBT. Резисторы в цепях затворов демпфируют паразитные колебания в цепи «затвор — эмиттер». Кроме того, они уменьшают отрицательные эффекты от разных переходных характеристик. Значения этих резисторов должны лежать в диапазоне 0,5–2 Ом. Резисторы в цепях эмиттеров подавляют компенсационные токи между вспомогательными эмиттерами. Они должны иметь номинал около 0,5 Ом.

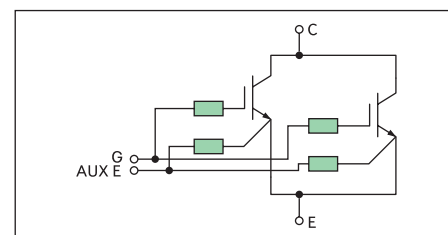


Рис. 8. Развязка IGBT при параллельном включении

При управлении мощными IGBT-модулями в условиях практического отсутствия постоянного тока через затвор ключа необходимо перезаряжать затворную емкость величиной порядка сотни нанофард, что на частотах около 20 кГц требует обеспечивать значительные импульсные токи для сохранения приемлемых фронтов импульса. Высокие коммутационные напряжения накладывают дополнительные ограничения на схемы управления. В схемах силовой электроники обычно необходимо изолировать компоненты схемы драйвера от схемы управления. Для управления входными каскадами схем драйверов необходимо использовать либо опторазвязки с хорошим быстродействием, например быстродействующие HCNW3120, HCNW4503 или HCNW4504 фирмы Agilent Technologies с  $dV/dt$  порядка 15 кВ/мкс, либо развязки на специальных высоковольтных схемах трансформации (рис. 9).

Применение оптопар более предпочтительно по соображениям борьбы с шумами, надежности и массово-габаритным параметрам. Кроме того, поскольку для функционирования входных каскадов схем драйверов модулей на них необходимо подавать постоянное напряжение +15 В, применении оптопар можно использовать один источник питания для модуля и схем развязки.

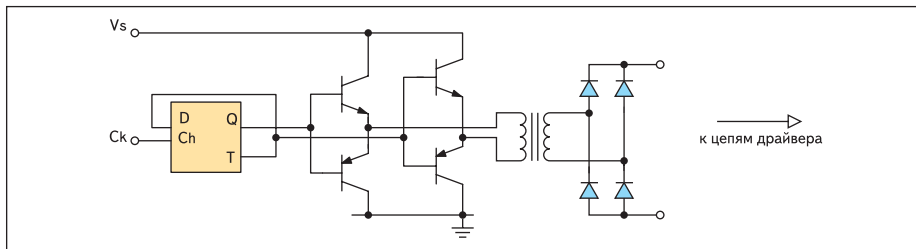


Рис. 9. Развязка драйвера и цепи управления через трансформатор

Сигналы управления и ошибки могут также быть переданы через трансформаторы или оптоизоляторы. Независимо от того, какой метод используется, нужно гарантировать необходимые уровни напряжения, скорость переключения и устойчивость к  $dV/dt$ . Собственный ток потребления драйверов мал, но в предельных режимах им приходится рассеивать значительную мощность. Максимальная нагрузочная способность драйверов ограничивается еще и типом корпуса. Емкость затвора IGBT  $C_{ies}$  (этот параметр приводится в справочных данных) и рабочая частота преобразования являются отправными параметрами для расчета максимального выходного тока драйвера  $I_O$ :

$$I_O = C_{ies} \times V_O \times f, \quad (9)$$

где  $V_O$  — значение выходного напряжения драйвера.

При отсутствии внешнего резистора между выходом драйвера и затвором транзистора вся мощность рассеивается на резистивных элементах внутри корпуса микросхемы и, с учетом (9), может быть определена из соотношения:

$$P = C_{ies} \times V_O^2 \times f. \quad (10)$$

#### Пример 4

Оценим возможность применения оптоизолятора HCNW4503 в качестве драйвера

для управления ключом IGBT модуля Duplex DIM800DDM17-A000 при значении  $C_{ies} = 60$  нФ и напряжении  $V_O = 15$  В на частоте преобразования 40 кГц.

$$P = (60 \text{ нФ}) \times (15 \text{ В})^2 \times (40 \text{ кГц}) = 540 \text{ мВт}.$$

Из справочных данных на HCNW4503 мощность  $P_{S,OUTPUT} = 700$  мВт  $> 540$  мВт.

Потери переключения IGBT зависят от уровня  $V_{GE}$  и общего сопротивления в цепи затвора  $R_G$ . Увеличение  $V_{GE}$  или уменьшение  $R_G$  позволяет сократить время задержки, время нарастания и спада, а следовательно, и уменьшить потери переключения. Другими факторами, влияющими на потери переключения, являются потери переключения анти-параллельного диода, индуктивность схемы, снабберы, температура перехода, рабочие напряжение и ток и т. д. Однако для снижения потерь в течение короткого времени необходимо снижение значения  $di/dt$ , что может быть получено путем увеличения значения  $R_G$ . Следовательно, необходимо динамическое управление цепью затвора.

Одним из способов динамического управления, рекомендованных Duplex, является активное ограничение напряжения. Процесс активного ограничения напряжения характеризуется контролем напряжения «коллектор-эмиттер» и обратной связью на затвор через элемент Зенера, операционный усилитель и комплиментарную пару (рис. 10).

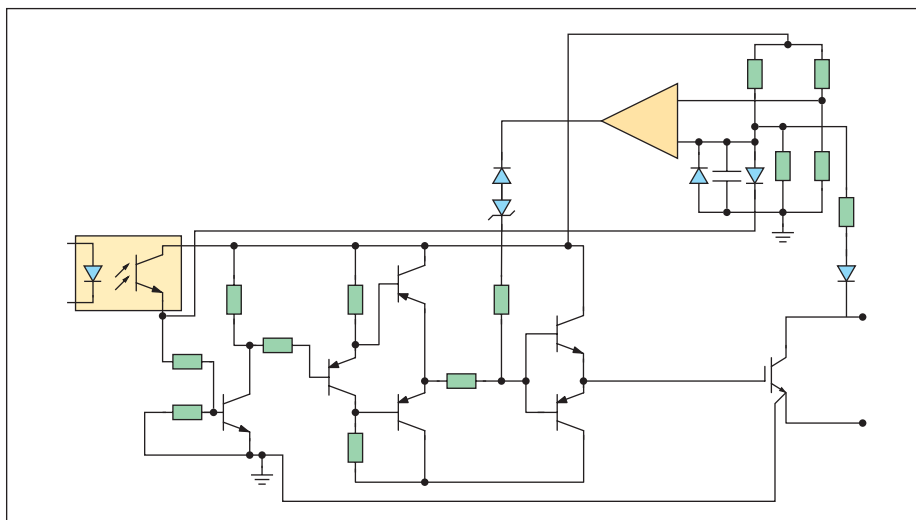


Рис. 10. Метод активного ограничения напряжения затвора

Если напряжение на транзисторе достигает максимума, напряжение на затворе возрастает так, что рабочая точка сдвигается на активный участок выходной характеристики в соответствии с пропускаемым током через коллектор. Дополнительные потери в транзисторе при активном ограничении сравнительно малы. Активное ограничение не влияет на симметрию фронтов коммутации. Этот метод работает с малыми временными задержками, зависящими от коэффициента в цепи обратной связи. Ограничение напряжения не зависит от рабочей точки инвертора. Кроме того, преимущество данного метода в том, что любой стандартный драйвер можно оборудовать устройством фиксации, и он будет обеспечивать ограничение напряжения для выключения непараллельных диодов и т. п. Защита гарантирована даже в случае неисправности источника питания драйвера.

#### Заключение

IGBT-модули Duplex на базе планарной технологии позволяют уменьшить прямые потери, улучшить шумовые характеристики, обеспечить более эффективный теплоотвод и, таким образом, повысить долговечность изделия и его термическую прочность. Как известно, IGBT характеризуются высокой скоростью переключения, возможностью управления напряжением, подобно полевым транзисторам и, в то же время, низким уровнем напряжения насыщения и способностью управлять большой мощностью, характерной для биполярных транзисторов. Тем не менее, инженеры фирмы Duplex непрерывно работают над улучшением основных параметров этих компонентов. Благодаря высокой надежности технологии производства IGBT-модули Duplex находят все большее применение на железнодорожном и водном транспорте, в самолетостроении и автомобилестроении. Разработчики используют как стандартные продукты, так и заказные модули.

В последние два года Duplex проектирует ряд мощных высоконадежных модулей для аэрокосмической промышленности. В начале 2003 года Duplex получила заказ на изготовление асимметричного H-моста на основе IGBT, который используется в силовых системах самолета-истребителя F35.

IGBT-модули Duplex также разработаны для морского флота, где предъявляются высокие требования по надежности. Например Duplex поставляет IGBT-модули на 3,3 кВ, 800 А с высокой степенью изоляции для инвертора 20-мегаваттного двигателя эсминца типа 45 британского королевского флота.

В электромобилях Renault Kangoo, передвижающихся по дорогам Швеции, Франции и Нидерландов, работают 600-вольтовые IGBT-модули Duplex. В дизельной гибридной версии Kangoo, которую планируют выпускать в ближайшем будущем, также будут использоваться модули Duplex.