

Разработка силового модуля

для автопрома и сельскохозяйственного транспорта

В статье объясняется причина выдвижения все новых, зачастую противоречивых технических требований, которые необходимо учитывать при разработке новых силовых модулей на базе IGBT для электрооборудования автомобилей массового и коммерческого применения, а также для грузовых автомобилей и сельскохозяйственных транспортных средств.

**Андре Кристманн
(Andre Christmann)**

**Дэвид Леветт
(David Levett)**

**Перевод:
Владимир Рентюк**

Когда команда разработчиков компании Infineon начала работать над своим новым силовым модулем на базе IGBT — HybridPACK Drive (HPDrive), предназначенным как для массового автомобильного рынка, так и рынка грузовых автомобилей, в том числе и сельскохозяйственных транспортных средств, крайне важно было сосредоточиться именно на потребностях конечного пользователя и иметь четкое представление о конечном приложении новых модулей. При этом необходимо было соблюсти такие разнообразные требования, как: низкая стоимость, высокая эффективность, большая плотность мощности, обеспечение высокого крутящего момента при заблокированном роторе, а также гарантировать длительный срок службы в условиях воздействия циклического изменения температуры и еще раз решить проблему стоимости.

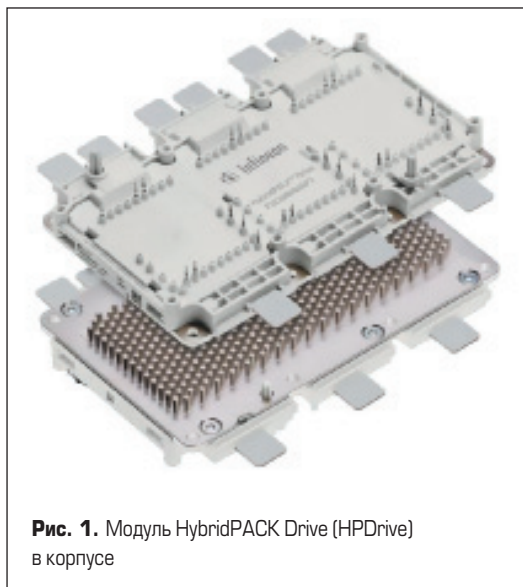


Рис. 1. Модуль HybridPACK Drive (HPDrive) в корпусе

В настоящей статье описывается то, как все эти выдвигаемые требования могут быть учтены в конструкции модуля и как они сочетаются с заявленной целью его применения как конечного продукта. Проанализировано, какое из решений наилучшим образом подходит для всех этих, зачастую несовместимых, требований и какие конструктивные и технологические улучшения были сделаны в новом модуле HybridPACK Drive по сравнению с хорошо зарекомендовавшими себя серийно выпускаемыми модулями HybridPACK 2 (HP2).

Основное внимание уделено трем главным из всех перечисленных выше требований, а именно: снижению потерь мощности, корпусированию модулей и решению вопросов, связанных с их устойчивостью к более высоким номинальным токам, а также проблеме стоимости, которая накладывает свои жесткие требования на все проектные решения. Новый модуль, разработанный в результате выполнения данного проекта, в завершеном корпусированном виде показан на рис. 1.

Проблема снижения потерь

В типичном преобразователе мощности источником большинства потерь мощности является IGBT-модуль. Если потери в нем смогут быть уменьшены, то это поможет увеличить эффективность отбора мощности от источника энергии, например аккумуляторной батареи или генератора, приводимого в действие двигателем в автомобилях с двигателями внутреннего сгорания. Это уменьшит требования по организации всей системы охлаждения преобразователя, включая насосы, теплообменники и т. д. Кроме того, это поможет снизить стоимость и габариты конечного электрооборудования в транспортном средстве. Если же рассматривать непосредственно сам модуль, то в нем имеются три основных источника потерь:

потери проводимости полупроводниковых ключей; коммутационные потери в ключах; потери мощности на медных линиях подключения, или, как их называют, потери I^2R (потери, связанные с тепловыделением, как следствие закона Джоуля–Ленца).

Потери проводимости

Для нового модуля был разработан новый чип под названием Electric Drive Train 2 (EDT2). Новый IGBT-чип EDT2 с номинальным блокируемым напряжением 750 В имеет вертикальную структуру, аналогичную предыдущему поколению IGBT3 с блокируемым напряжением 650 В, но улучшенную благодаря использованию технологии Micro Pattern Trench, основанной на конструкции чипа TRENCHSTOP 5 с субмикронной по ширине мезо-структурой затвора (рис. 2), что привело к увеличению плотности тока и уменьшению заряда в цепи затвора. Такая конструкция позволяет устройству иметь крайне низкое прямое падение напряжения «коллектор–эмиттер» (рис. 3) в состоянии насыщения транзистора (V_{cesat}), сохраняя при этом возможность выдержать без повреждения токи короткого замыкания длительностью порядка 5 мкс.

Коммутационные потери

В качестве компромисса между потенциалом перенапряжения и скоростью переключения в жертву была принесена концентрация неосновных носителей в p -области эмиттера. Помимо максимального пикового уровня перенапряжения, концентрация неосновных носителей также влияет на выбор оптимального соотношения заряда выключения E_{off} по отношению к напряжению насыщения V_{cesat} . Увеличение номинального блокируемого напряжения на 100 В (от 650 до 750 В) сводит к минимуму весомость перенапряжения в качестве ограничивающего фактора, что приводит к уже критичной и острой необходимости замедлять скорость переключения, например путем использо-

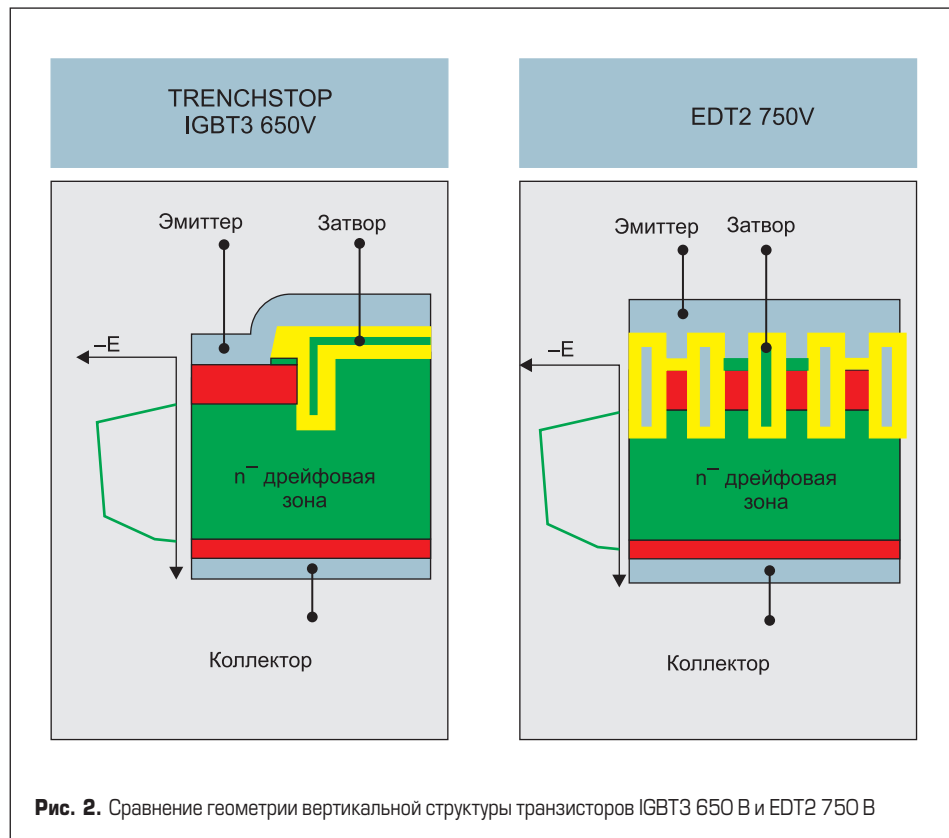


Рис. 2. Сравнение геометрии вертикальной структуры транзисторов IGBT3 650 В и EDT2 750 В

вания увеличенного номинала внешнего последовательного резистора в цепи затвора, необходимого для того, чтобы оставить в пределах области безопасной работы при обратном смещении (Reverse Bias Safe Operating Area, RBSOA) для IGBT-модуля. На рис. 4 показано, что при напряжении шины 400 В потери на выключение EDT2-чипа нового модуля были снижены на 29% по сравнению с IGBT3, работающим с увеличенным значением сопротивления в цепи затвора.

Потери I^2R

Часто сбрасывают со счетов и не учитывают тот факт, что потери I^2R , которые зависят от сечения, длины и геометрии медных про-

водников, использующихся непосредственно внутри модуля для подключения чипов, могут быть весьма значительными, что будет особенно заметно при высоких среднеквадратичных токах. Три основных компонента, вносящих потери этой категории, — главные клеммы подключения шины напряжения постоянного тока, линии подключения верхней части модуля и сама часть модуля — основа, которая выполняется по технологии DCB (Direct Copper Bonded, технология получения толстых — 127–500 мкм — медных проводников на керамических подложках). А кроме того, еще и соединительные перемычки, обеспечивающие соединение с верхней стороной чипов.

Один из путей уменьшения потерь I^2R — проектирование IGBT-чипов с затвором, рас-

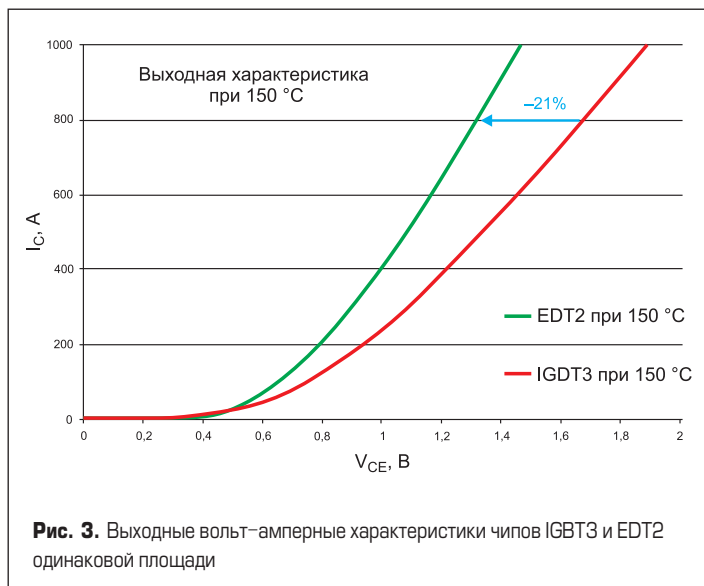


Рис. 3. Выходные вольт–амперные характеристики чипов IGBT3 и EDT2 одинаковой площади

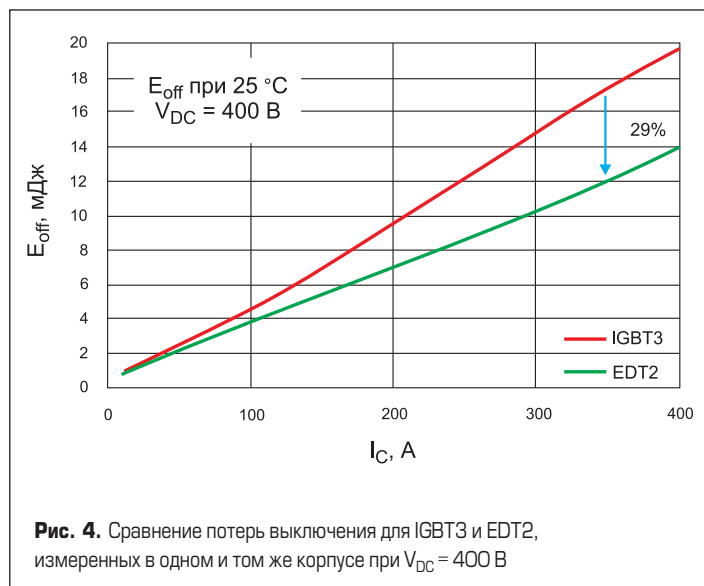


Рис. 4. Сравнение потерь выключения для IGBT3 и EDT2, измеренных в одном и том же корпусе при $V_{DC} = 400$ В

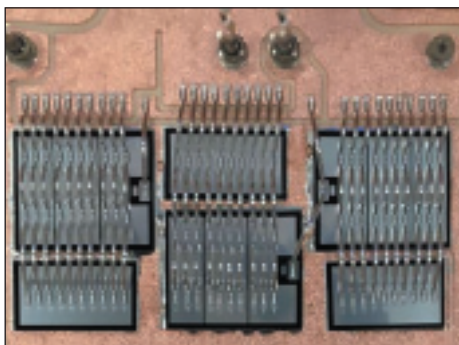


Рис. 5. Оптимизированная компоновка IGBT-чипов для модуля HPDrive

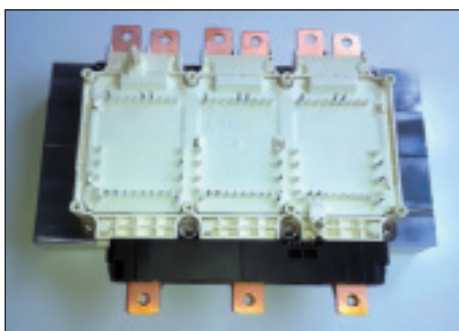


Рис. 6. Модуль HPDrive с расширенными ламелями, которые позволяют выполнить подключение датчика тока, например LEM HAN3DR 800-S07, как это показано на рисунке

положенным сбоку (рис. 5), а не по центру, что позволяет увеличить площадь медного основания для более эффективного отвода тока эмиттера. Кроме того, использование кристалла более прямоугольной формы, по сравнению с чипами, применяемыми в модулях HP2, позволяет в новом модуле увеличить число линий подключения до 10 по сравнению с восемью и сделать подключение верхней стороны чипа более коротким. В целом последовательное сопротивление силовой цепи модуля HPDrive удалось уменьшить на 20%.

Особенности корпусирования нового модуля

Основание и внутренняя конструкция базового корпуса модуля HPDrive выполнены из материала, аналогичного тому, который применен в уже достаточно хорошо зарекомендовавших себя модулях семейства HP2. Тем не менее HPDrive имеет на 36% меньшее по площади по отношению к HP2 основание и уменьшенную на 40% массу, что ве-

дет к снижению его стоимости. HPDrive также имеет гибкую систему размещения управляющих контактов, как это наглядно показано на рис. 1, предоставляя разработчику модуля возможность оптимизировать их размещение. Это также уменьшает площадь медных проводников, требуемых для формирования управляющих соединений на DCB-подложке.

Кроме того, поскольку контрольные выводы не сформованы, то есть они не выполнены в виде жестко зафиксированных элементов в пластике в корпусе, то будущие обновления модулей, такие как дополнение их встроенными температурными сенсорами или датчиками тока, могут быть гораздо легче интегрированы в уже имеющуюся структуру корпуса. Для подключения сигнальных штырей было принято решение использовать технологию PressFit. Это быстрый и надежный процесс производства по сравнению с выборочной пайкой, а газонепроницаемое соединение очень устойчиво к агрессивным средам и воздействию вибрации.

Что касается клемм питания, то клеммы подключения шины напряжения постоянного тока имеют достаточную высоту и расположены в шахматном порядке, что упрощает их подключение к ламинированной шине постоянного тока. Кроме того, для удлиненных выходных клемм предусмотрена опция установки датчика тока, как это показано на рис. 6. С помощью этих клемм, расположенных на той же высоте, что и клеммы входов управления модуля, датчик тока может быть подключен непосредственно к печатной плате драйвера затвора, что устраняет необходимость использования дополнительных переходных кабелей и разъемов.

Небольшой по габаритам корпус и оптимизация внутренней компоновки модуля позволили снизить индуктивность линий его подключения на 40% — с 14 нГн (HP2) до 8 нГн. Снижение индуктивности уменьшает вероятность превышения напряжения для IGBT в результате переходных процессов, позволяя использовать более высокую скорость переключения и/или работу при более высоком напряжении шины постоянного тока.

Устойчивость к повышенным токам, возникающим при блокировке ротора и пуске двигателя

Режим сваливания, или блокировка ротора (принудительная остановка работающего двигателя), т. н. hill-hold (буквально «удерживание на холме» — удержание автомобиля двигателем в начале движения при спуске или подъеме на склон), часто является точкой наибольшего температурного напряжения для

транзисторов полупроводниковых модулей. Это связано с тем, что ток в единичном транзисторе может оказаться на пике синусоидального сигнала. В результате эта угловая рабочая точка может достичь предела по току для силового модуля. Новые чипы EDT2 способны работать в течение коротких периодов времени, не превышающих 10 с, при температуре +175 °С, что вполне удовлетворяет требованиям по устойчивости модуля к блокировке ротора. В таблице 1 сравниваются рабочие характеристики модулей HPDrive и HP2 при остановке двигателя и наглядно показано, что чипы с площадью 300 мм², используемые в модулях EDT2, вполне могут справиться с ситуацией не хуже, чем чипы IGBT3 площадью 400 мм².

Однако максимальная температура полупроводникового перехода не является единственным ограничивающим фактором, ключевым критерием проектирования также является срок службы модуля, связанный с циклическим воздействием температуры. Для уменьшения эффекта воздействия высоких разностных температур ΔT была улучшена вся система пайки чипа. Это позволило обеспечить 40%-ное увеличение устойчивости к односекундным циклам периодического включения и выключения, например, до 60 000 циклов с разностью температур ΔT= 100 К на один чип.

Доступное семейство продуктов

Разработка нового чипа EDT2 с более низкими потерями, с более высокой рабочей температурой, содержащего IGBT и защитный диод, открыло два разных пути проектирования на основе этих чипов IGBT-модулей. Первый из них — это разработка меньшего по габаритам и более легкого IGBT-модуля с выходной мощностью, аналогичной уже серийно выпускаемому модулю HP2. При этом, как уже было сказано, новый корпус модуля обладает некоторыми техническими преимуществами, такими как более низкая индуктивность подключения и запрессованные контакты для сигналов управления. Это является вторым из возможных направлений проектирования модулей HPDrive. Второй путь — это включить новые чипы EDT2 в уже существующий корпус, используемый для HP2, что позволяет увеличить номинальный рабочий ток модулей с 800 до 1100 А. Поэтому для заказчиков и клиентов компании Infineon, уже использующих или рассматривающих вариант использования модулей HP2, существует возможность пойти либо по пути увеличения рабочего тока и напряжения шины постоянного тока, либо по пути сохранения

Таблица 1. Сравнение модулей HPDrive и HP2

	Потери проводимости IGBT, Вт	Коммутационные потери IGBT, Вт	Общие потери IGBT, Вт	Тепловое сопротивление «переход-охладитель», °С/Вт	Макс. температура перехода, °С	Запас по температуре, °С
HybridPACK Drive	502	166	668	0,12	160	15
HybridPACK 2	551	132	683	0,097	146	4

Условия измерения: частота 2 кГц, напряжение шины постоянного тока 400 В, рабочий ток 500 А(скз.), пиковый ток 707 А, рабочая температура +80 °С, рабочий цикл 50%.

производительности и использовать модуль в более дешевом корпусе.

Новый модуль HPDrive будет выпускаться в двух вариантах — с штыревыми выводами на основании и рабочим током до 820 А и с плоскими выводами над основанием с током 660 А. Эти новые модули расширят семейство модулей HybridPACK и дополнят обширный ряд силовых модулей высокой мощности компании Infineon, специально разработанных для автомобильной промышленности, в том числе и для грузовых автомобилей и сельскохозяйственных транспортных средств. Здесь имеются в виду такие серийно выпускаемые модули, как EconoDUAL 3 или PrimePACK, предназначенные для тяговых приводов мощных автомобилей.

Заключение

Авторы данной статьи надеются, что она достаточно полно проиллюстрировала важность комплексного подхода к проектированию, при котором все составные части силового модуля должны рассматриваться как единое целое. Это даст возможность наилучшим образом обеспечить соответствие модуля требованиям его конечного приложения. Так, например, уменьшенное падение напряжения на чипе во включенном состоянии, оптимизация компоновки перемычек подключения затвора и размещение контактов управления в пластиковой рамке способствуют снижению потерь. Повышенная номинальная мощность чипа и более низкая

индуктивность цепи подключения позволяют модулю работать при более высоких напряжениях шины напряжения постоянного тока. А более высокая температура полупроводникового перехода, улучшенная технология крепления кристалла к подложке и использование материалов с меньшими потерями способствуют более высокой устойчивости к току, возникающему при блокировке ротора, а также позволят выдерживать пусковые токи в момент запуска двигателя. В конечном итоге меньший по физическим размерам модуль с уменьшенной активной областью чипа, меньшими потерями и возможностью использования новейших технологий сборки способствуют снижению стоимости всей конечной системы в целом. ■