

Новое поколение силовых модулей IGBT

Компания Dypex Semiconductor не является гигантом электронной отрасли и не может похвастаться многомиллиардными доходами. Впрочем, продукция производителя из английской глубинки хорошо известна во всем мире и широко используется лидерами современной промышленности.

Вадим Черный

v.chorny@vdm.ais.ua

Ребята из английской глубинки

Как водится у британцев, любая история должна быть как можно более запутанной и уходить корнями чуть ли не во времена Вильгельма Завоевателя, а лучше — центурионов Цезаря. Городок Линкольн в Восточном Мидленде, где квартирует Dypex, действительно был основан воинами IX «Испанского» легиона как форт Линдум Колония, впоследствии здесь были и викинги во главе с герцогом Нормандским, но история силовой электроники в Линкольншире началась все же несколько позже.

Британская компания Thomson Houston (ВТН), входящая в состав Associated Electrical Industries Group, образовалась в конце XIX века с британскими подразделениями американских электротехнических гигантов General Electric и Westinghouse. ВТН были оснащены производственными мощностями в Регби и Лестере. В 1956 году в провинциальном Линкольне были организованы специализированные установки по производству силовых полупроводниковых приборов на базе азота. Предприятие проходит через ряд изменений: с 1963 года оно называется AEI Semiconductors, в конце 1960-х годов является частью компании General Electric, в 1980 году — Marconi Electronic Devices, а с 1990-го — GEC Plessey Semiconductors. Все процессы слияний и поглощений сопровождаются различными всемирно известными компаниями, в том числе Marconi, Siemens, Edison, Alstom и тому подобными. Небольшое предприятие в Линкольншире становится глобальным центром экспертизы в области силовой электроники. Неудивительно, что оно стало соучредителем академии микроэлектроники при университете графства Суррей (Большой Лондон) и исследовательских центров при университете в Дареме и Уорике.

Имя Dypex Semiconductor (далее — Dypex) предприятие получило в 2000 году, перейдя под контроль управляющей компании Dypex Power Inc., только год как созданной в Торонто инвесторами, подозрительно похожими на разбогатевших инженеров с Линкольншира.

Продукция Dypex получает «прописку» во многих знаковых проектах в аэрокосмической, энерге-

тической, железнодорожной и автомобильной отраслях. Стоит вспомнить силовые цепи американского истребителя 5-го поколения F35 «Молния» или французских электрофургонов Renault Kangoo Z.E. Очень сильные позиции Dypex в сегменте электроники для железной дороги привели к приобретению ее акций (процесс длился с 2008 по 2018 год) главным клиентом — подразделением китайской корпорации CRRC. Под крылом крупнейшего в мире производителя железнодорожных локомотивов и подвижного состава (359-е место в Fortune Global 500 и более 1,4 млрд евро в год инвестиций в R&D) ребята из провинциального Линкольна удерживают лидерство в мировой отрасли силовых полупроводниковых приборов.

Краткий обзор продукции

Номенклатура стандартных изделий Dypex [2] предоставляет разработчикам широкий выбор биполярных полупроводниковых приборов, в частности фазоконтрольных тиристоров с рабочими напряжениями 1400–8500 В и токами 370–7610 А, выпрямительных диодов (1400–9000 В до 8880 А), тиристоров с изолированным затвором (1300–4500 В к 1180 А), импульсных тиристоров (3300 и 4500 В к 1670 А) и диодов с быстрым восстановлением (1400–6500 В до 3200 А), в том числе в виде FRD-модулей (1200–6500 В к 1200 А). Недавно номенклатура дополнена асимметричными шунтирующими тиристорами на прямое напряжение 1000 В и обратными 3300 и 4500 В и токами до 3200 и 2900 А для защиты IGBT в многоуровневых преобразователях напряжения.

Производственный цикл Dypex отличается высокой степенью вертикальной интеграции и предусматривает сосредоточенные в пределах одного предприятия исследования, разработку, производство полупроводниковых кристаллов, корпусирование, испытания и техническую поддержку разработчиков. Кроме стандартных изделий, компания немало работает по индивидуальным ТЗ заказчиков. Это касается клиентов из ВПК

Таблица 1. Выбор стандартных IGBT-модулей по току и напряжению

| Технология | | | | | | | | | |
|-------------------|---|--|--|---|--------------------------|---|------|---|-------------------|
| Ток коллектора, А | Напряжение коллектор-эмиттер, В | | | | | | | | |
| | DNPT | DNPT | TSPT | DSPT | TSPT | DSPT | TSPT | DSPT | TSPT |
| | 1200 | 1700 | 3300 | 4500 | 6500 | | | | |
| 2400 | DIM2400ESM12A | DIM2400ESM17A | | | | | | | |
| 1800 | DIM1800ESM12A DIM1800ESS12A | | DIM1800ESM33VF | | | | | | |
| 1600/1500 | DIM1600FSM12A DIM1600FSS12A | DIM1600FSM17A DIM1600FCM17A | DIM1500ESM33ML DIM1500ESM33TS DIM1500ASM33-TS001 DIM1500ESM33TL DIM1500ASM33-TL001 DIM1500ESM33MF | | DIM1500ASM45UF | | | | |
| 1200 | DIM1200FSM12A DIM1200FSS12A | DIM1200FSM17A | DIM1200ASM33F DIM1200ESM33F | DIM1200ASM45-TS DIM1200ASM45-TS001 DIM1200ASM45-TL DIM1200ASM45-TL001 DIM1200ASM45-TF DIM1200ASM45-TF001 | | | | | |
| 1000 | | DIM1000UHM17-UF000 | DIM1000NSM33TS DIM1000XSM33-TS001 DIM1000ECM33TS DIM1000ACM33-TS001 DIM1000NSM33TL DIM1000XSM33-TL001 DIM1000ECM33TL DIM1000ACM33-TL001 | | | | | DIM1000ASM65-US DIM1000ASM65-UL DIM1000ASM65-UJ | |
| 800/750 | DIM800FSM12A DIM800DDM12A DIM800DCM12A DIM800FSS12A DIM800DCS12A DIM800DDDS12A | DIM800FSM17A DIM800DDM17A DIM800DCM17A | DIM800NSM33F DIM800XSM33F DIM800ECM33F | DIM800ACM45TS DIM800OCM45-TS001 DIM800XSM45TS DIM800XSM45-TS001 DIM800XSM45TL DIM800XSM45-TL001 | | DIM750ASM65TS DIM750ASM65TL DIM750ASM65TF | | | |
| 600/500 | DIM600DDM12A DIM600DDS12A | DIM600DDM17A DIM600DCM17A | DIM500GDM33TS DIM500GCM33TS DIM500GDM33TL DIM500GCM33TL | DIM500UHM33-UF000 | | DIM600XSM65TS DIM500ACM65TS | | | |
| 450/400/375 | DIM400DDM12A | DIM400DDM17A DIM400DCM17A DIM400PCM17A | DIM400NSM33F | DIM450UHM33-UF000 | DIM375VHM451UF000 | | | | |
| 250 | | | DIM250PKM33TS DIM250PLM33TS DIM250PHM33TS DIM250PKM33TL DIM250PLM33TL | | DIM250XCM65-TS | | | | DIM250VHM651UF000 |
| 125 | | | DIM125PHM33TS DIM125PHM33TL | | | | | | |

и аэрокосмического сектора, а также крупных заказчиков со специфическими требованиями. В частности, для удовлетворения потребностей китайских железнодорожников было построено отдельное произ-

водственное предприятие в миллионном городе Чжучжоу.

Отдельной группой в номенклатуре Duxpac стоят биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT). Исключительная

осведомленность в современных технологиях и замкнутый цикл производства дают возможность относительно небольшому предприятию выступать независимым поставщиком IGBT-технологий мирового значения.

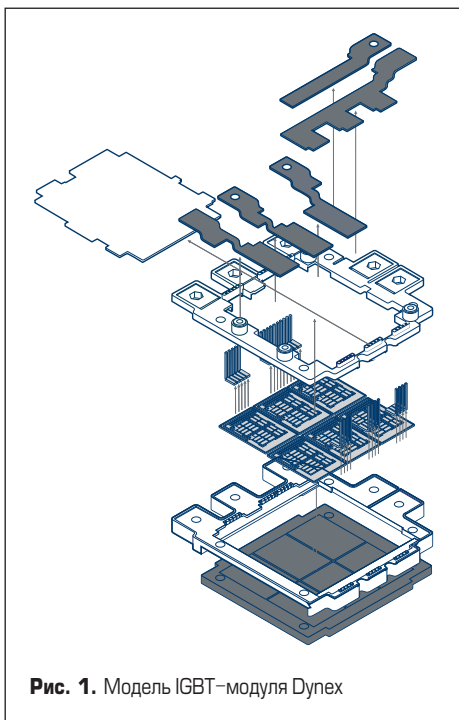


Рис. 1. Модель IGBT-модуля Dynex

IGBT-модули Dynex. Перезагрузка

В последние годы (очевидно коррелированно с инвестициями в R&D) Dynex значительно обновила линейку продукции, прежде всего в сегменте IGBT. Компания поставляет IGBT в виде кристаллов и модулей, в том числе в корпусе Presspack. Линейка стандартных IGBT-модулей (рис. 1) включает устройства на напряжения до 1200, 1700, 3300, 4500 и 6500 В и максимальные токи, соответственно, 2400, 1800, 1500 и 1000 А (табл. 1). Заказчики имеют возможность выбирать из приборов, изготовленных на базе проприетарных технологий Dynex Non Punch Through (DNPT) и Dynex Soft Punch Through (DSPT) и современной Trench Soft Punch Through (TSPT).

IGBT-модули Dynex по внутренней электрической схеме делятся на единичные IGBT (single), полумосты с последовательно соединенными IGBT (halfbridge), прерыватели с последовательно соединенными IGBT и диодом (chopper). Все

приборы имеют встроенный обратный или инверсный (антипараллельный) быстро восстанавливаемый диод FRD с «мягкими» характеристиками обратного восстановления.

Инкапсулированные в герметичные корпуса с прижимными контактами Presspack IGBT-модули рассчитаны на напряжения до 4500 В и токи до 2100 А (заявлена также доступность модулей к 3000 А [3] и анонсировано на 4000 А). Кроме того, в последние годы компания начала быстрое развитие отдельной линейки IGBT-модулей для автомобильной промышленности, сертифицированных на соответствие AECQ101, AQC324 и IATF16949.

В общем, IGBT от Dynex имеют широкое применение в системах управления двигателями, импульсных преобразователях, инверторах, сервоприводах и тому подобное.

Компоненты IGBT Dynex для таких приложений отвечают следующим требованиям:

- низкие статические и динамические потери (на низких частотах по этому показателю они превосходят MOSFET);
- широкая прямоугольная область безопасной работы (в неблагоприятном режиме ключа при максимальных значениях тока, напряжения и длительности импульса);
- высокая устойчивость к токам короткого замыкания;
- устойчивость к большим импульсным токам;
- малые емкости и заряды затворов;
- высокие частоты переключения: до 100 кГц;
- не требуют отрицательного смещения на затворе для устойчивого замыкания;
- малое остаточное напряжение, не более: 2,5 В;
- возможность параллельного включения;
- низкий остаточный ток с низкой температурной зависимостью;
- низкая внутренняя индуктивность модулей;
- способность выдерживать высокие значения di/dt и dv/dt ;
- улучшенная электромагнитная совместимость;
- высокое значение изоляции: до 10,2 кВ;
- высокая надежность, улучшенная термостойкость;

- 100%-ный заводской контроль в статическом и динамическом режимах.

Учитывая задачи по минимизации потерь, которые решают разработчики силового оборудования, Dynex предлагает многочисленные специализированные серии, рассчитанные на определенные значения рабочей частоты и напряжения насыщения. В номенклатуре имеются отдельные группы модулей с пониженными коммутационными и кондуктивными потерями (потерями на проводимость), а также модули с пониженным уровнем индуктивности (выделено шрифтом в табл. 1).

Замечания по обозначению артикулов

Приведенная выше таблица 1 становится значительно информативнее после ознакомления с системой сокращений, обновленной компанией Dynex в этом году [1]:

- DIM1500ESM33MF — идентификатор производителя Dynex Semiconductor;
- DIM1500ESM33MF — тип модуля: I — IGBT-модуль, F — FRD-модуль;
- DIM1500ESM33MF — модуль;
- DIM1500ESM33MF — номинальный ток;
- DIM1500ESM33MF — идентификатор компоновки модуля, номинального напряжения и класса изоляции [1], E: 190×140×38 мм, 3,3 и 6 кВ;
- DIM1500ESM33MF — схема модуля [1, 2], S — одиночный ключ, D — двойной ключ, B — двунаправленный ключ, H — полумост, C — измельчитель, K — измельчитель верхнего плеча, L — измельчитель нижнего плеча, F — блок с 6-мА ключами;
- DIM1500ESM33MF — материал основы, S — медь, M — металоматричный композит;
- DIM1500ESM33MF — максимальное рабочее напряжение (разделенная на 100), 33–3,3 кВ;
- DIM1500ESM33MF — технология, например, MF — Dynex Soft Punch Through, оптимизирован для снижения коммутационных потерь (табл. 2).

Также в конце артикула может быть дополнительный трехзначный идентификатор: 000 — стандартный продукт, 001 — класс изоляции превышает требования стандартов IEC, 076 — предоставляются результаты тестирования, XXX — по спецификации заказчика.

Максимизация эффективности на системном уровне

Важнейшая цель при проектировании силовой электроники — снижение потерь. В случае с IGBT эта задача усложняется тем, что физически проблематично одновременно уменьшить потери динамические (коммутационные) и статические (кондуктивные) в отдельном приборе. Новое поколение IGBT-модулей от Dynex демонстрирует улучшенные характеристики эффективности относительно существующих на рынке аналогов, впрочем, кроме увеличения эффективности на уровне компонентов, производитель предлагает разработчикам силового оборудования повышать эффективность и на системном

Таблица 2. Проприетарные технологии Dynex (i с идентификаторами артикулов)

| | |
|----|---|
| A | NPT DMOS IGBT, время срабатывания до 10 мкс |
| F | Dynex Soft Punch Through IGBT и комплементарные FRD |
| MF | Dynex Soft Punch Through (оптимизирован, с пониженными коммутационными потерями и улучшенной компоновкой) |
| ML | Dynex Soft Punch Through (оптимизирован, с пониженным напряжением насыщения и улучшенной компоновкой) |
| MS | Dynex Soft Punch Through (стандартный с улучшенной компоновкой) |
| PN | Dynex Times Manufacturing Centre NPT IGBT (Чжучжоу, КНР) |
| PS | Dynex Times Manufacturing Centre Soft Punch Through |
| PT | Dynex Times Manufacturing Centre Trench Soft Punch |
| TF | Dynex Soft Punch Through (оптимизирован, с пониженными коммутационными потерями) |
| TL | Dynex Soft Punch Through (оптимизирован, с пониженным напряжением насыщения) |
| TS | Dynex Soft Punch Through (стандартный) |
| UF | Dynex Soft Punch Through, Trench (оптимизирован, с пониженными коммутационными потерями) |
| UL | Dynex Soft Punch Through, Trench (оптимизирован, с пониженным напряжением насыщения) |
| US | Dynex Soft Punch Through, Trench (стандартный) |
| VF | Dynex Soft Punch Through, Trench (оптимизирован, с пониженными коммутационными потерями и улучшенной компоновкой) |
| VL | Dynex Soft Punch Through, Trench (оптимизирован, с пониженным напряжением насыщения и улучшенной компоновкой) |
| VS | Dynex Soft Punch Through, Trench (стандартный с улучшенной компоновкой) |

уровне за счет подбора IGBT-модулей в соответствии с условиями конкретных приложений. В качестве примера производитель приводит [5] снижение потерь в топологии трехуровневой схемы инвертора с фиксированной нейтралью (3L NPC — 3Level Neutral Point Clamped) за счет использования двух разных модулей, оптимизированных для различных частот, вместо одного универсального IGBT-модуля.

В схеме инвертора (рис. 2) основные потери приходятся на транзисторы T1–T4 и NPC-диоды D5 и D6. Потери на инверсных диодах D1–D4 относительно невелики. В различных режимах потери на коммутацию преобладают на T1 и T4, потери на проводимость — на T2 и T3. Увеличение эффективности на системном уровне возможно за счет использования в инверторе вместо одного универсального IGBT-модуля двух: оптимизированного по частоте коммутации (Low Switching Loss Range) для T1 и T4 и оптимизированного по проводимости (Low Conduction Loss Range) для T2 и T3. В частности, в статье Шивы Ушпулри [5] рассматриваются модули DIM1500ESM33MF (далее — MF) и DIM1500ESM33MS (далее — MS). Результаты моделирования потерь по отдельной и совместной работе модулей MF/MS сравниваются с потерями универсальных IGBT-модулей от других производителей (любят в Дупех похвастаться преимуществом!). Как видим (рис. 3), на отдельных частотах оптимизированные модули могут проигрывать универсальным, но в сочетании они показывают значительно более высокую эффективность.

Впрочем, производитель приводит данные по преимуществам своих продуктов и на уровне компонентов по сравнению с существующими на рынке аналогами [4]. В частности, сравнивается уровень эффективности ceteris paribus уже упоминавшегося стандартного модуля DIM1500ESM33MF и его аналогов в трехфазной двухуровневой топологии в зависимости от среднеквадратического значения тока (рис. 4), от частоты по току 385 А (рис. 5) и при фиксированных значениях тока 385 А и частоты 750 Гц (рис. 6).

Производитель утверждает, что за счет применения проприетарной LOCOS-технологии (LOCal Oxidation of Silicon) удалось значительно увеличить эффективность еще на уровне

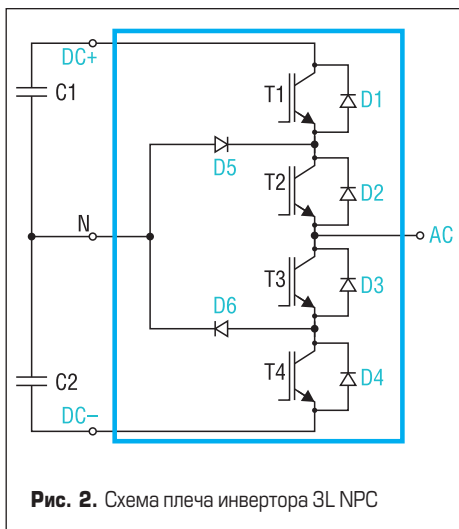


Рис. 2. Схема плеча инвертора 3L NPC

кристалла. В частности, на 30% увеличена плотность мощности, до +150 °C — температура перехода, а на уровне готового продукта потери мощности в типичной трехфазной двухуровневой топологии снижены на 10% по сравнению с лучшими существующими аналогами.

Параллельное подключение

Параллельное подключение IGBT-модулей для увеличения суммарного тока требует определенной осторожности, учитывая

дисбаланс токов в отдельных модулях, вызванный различиями в динамических и статических характеристиках модулей при присутствии IGBT отрицательном температурном коэффициенте по напряжению насыщения [6]. Фактор дисбаланса, отражающий относительную разность максимального и минимального тока в подключенных в параллель модулях, в статическом режиме является функцией напряжения насыщения, температуры перехода и зависит от конструкции модуля и технологии изготовления кристалла.

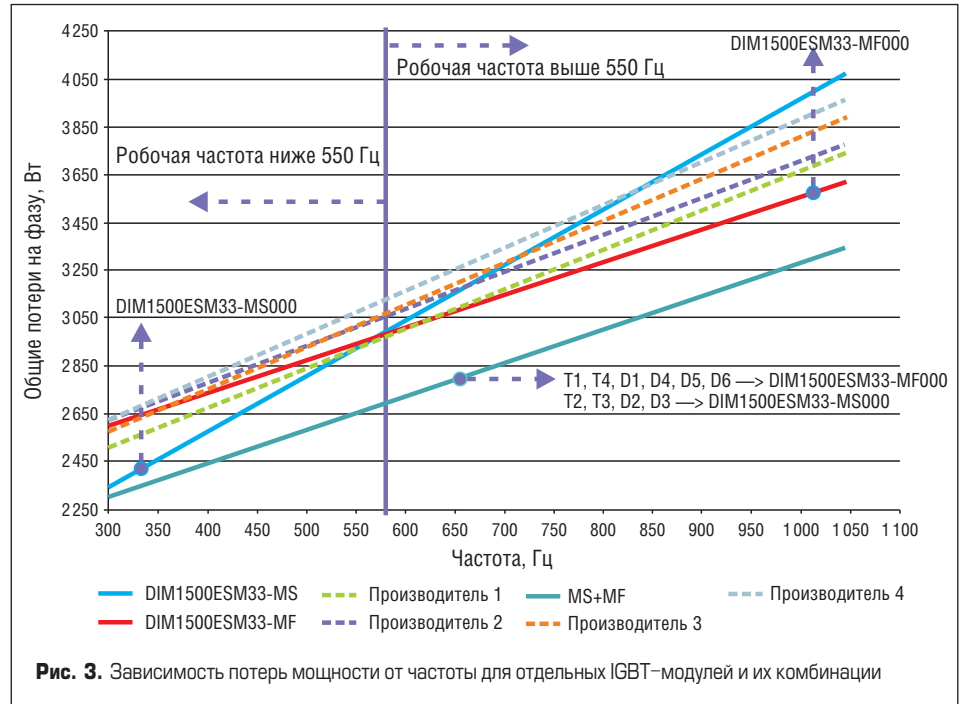


Рис. 3. Зависимость потерь мощности от частоты для отдельных IGBT-модулей и их комбинации

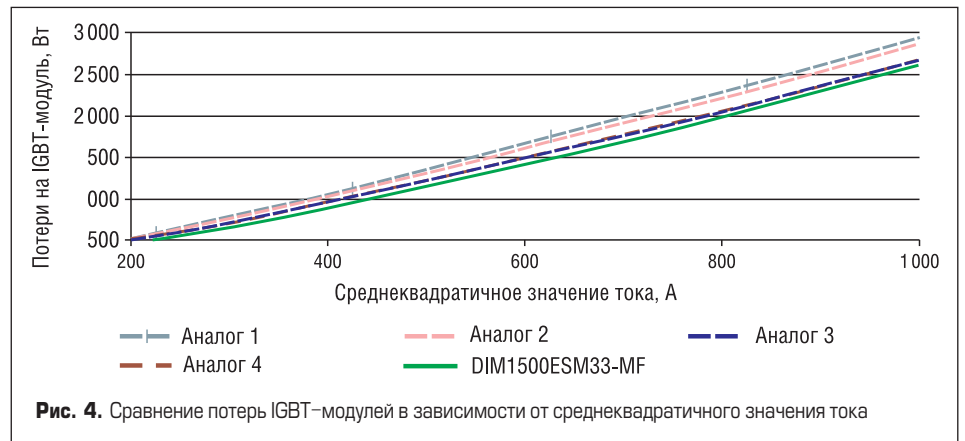


Рис. 4. Сравнение потерь IGBT-модулей в зависимости от среднеквадратичного значения тока

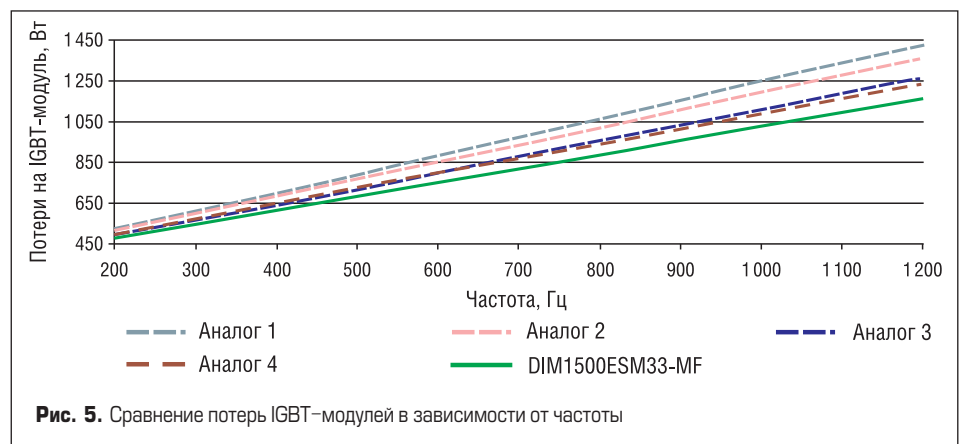


Рис. 5. Сравнение потерь IGBT-модулей в зависимости от частоты

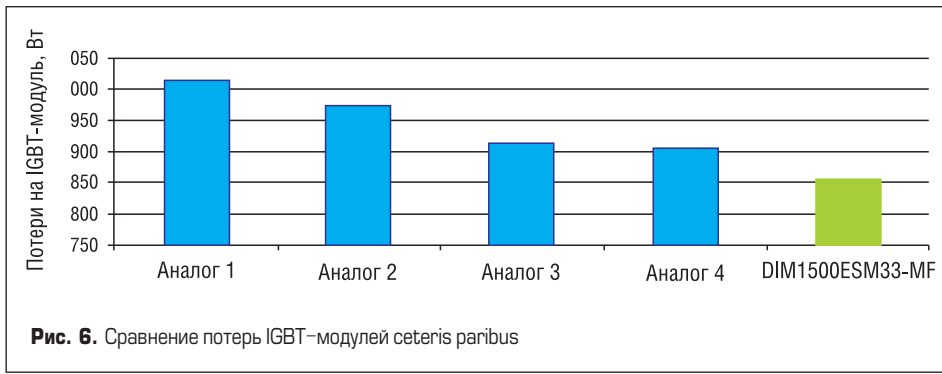


Рис. 6. Сравнение потерь IGBT-модулей ceteris paribus

В динамическом режиме главной причиной дисбаланса становится разница передаточных характеристик отдельных модулей (зависимости коллекторного тока от напряжения между затвором и эмиттером). Сравнение дисбаланса и фактора снижения токов в различных режимах показывает, что во многих случаях статический фактор дисбаланса больше динамического и именно на него надо ориентироваться при определении характеристик модулей для параллельного подключения. Уменьшение дисбаланса в динамическом режиме возможно с помощью резисторов в цепях затворов и эмиттеров (рис. 7), которые создают демпфер паразитных колебаний и подавляют компенсационные токи между вспомогательными эмиттерами.

Последовательное подключение и выбор драйвера

При последовательном включении IGBT, скажем, для управления двигателем по полумостовой схеме, необходимо согласовать задержки включения IGBT верхнего и нижнего плеча для предотвращения проникновения постоянного тока в обмотку двигателя. 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 [7]. При этом надо уделить внимание размещению схемы драйвера на печатной плате в разрезе минимизации шумов от паразитных элементов схемы и предотвращения электрического пробоя при используемом рабочем напряжении.

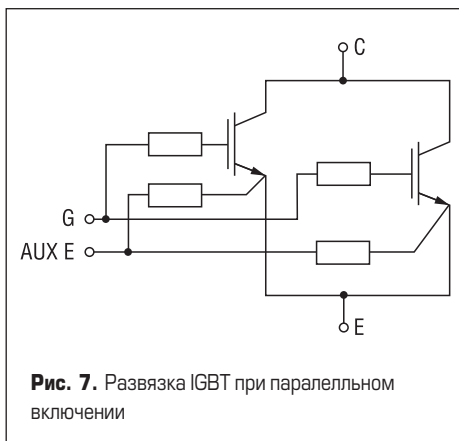


Рис. 7. Развязка IGBT при параллельном включении

Ток коллектора IGBT зависит от напряжения «коллектор-эмиттер» и «затвор-эмиттер». Проводимость IGBT увеличивается при росте второй, поэтому желательно увеличить ее до максимума, то есть до 15 В. При отключении следует держать ее в пределах от -8 до -15 В — этого достаточно для снижения потерь и обеспечения устойчивости к dv/dt . Как и большинство производителей IGBT, компания Duxep гарантирует сохранение работоспособности транзистора при коротком замыкании до 10 мкс значения рабочего напряжения в 50% от максимальной при напряжении 15 В между затвором и эмиттером и температуре перехода + 125 °С. При КЗ на транзисторе в проводящем состоянии ток через коллектор и напряжение между коллектором и эмиттером быстро увеличиваются, вызывая также резкое повышение напряжения «затвор-эмиттер». Предупреждению такого сценария способствует встречно-параллельное включение диодов Зенера параллельно кругу «затвор-эмиттер» (рис. 8).

Онлайн-моделирование

Все необходимое для нужд проектировщиков представлено на веб-сайте [10], там размещен простой онлайн-инструмент для подбора IGBT-модулей для силовых схем. Пользователю предоставляется выбор из популярных типовых топологий: повышающий или понижающий преобразователь, одно- или трехфазный диодный выпрямитель, пяти-, трех- (типа I или T) и двухуровневый (одно- или трехфазный) инвертор; тип нагрузки (сеть или двигатель), а также предлагается задать основные характеристики: напряжение в сети и величину нагрузки (или ток). Под заданные параметры

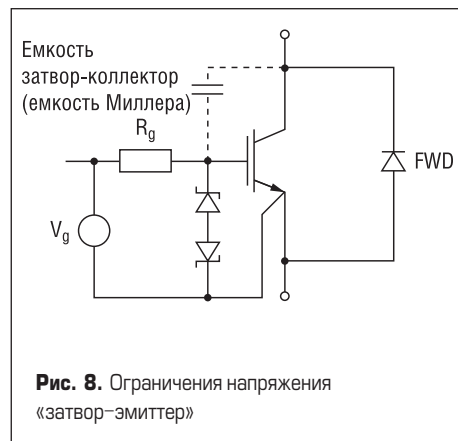


Рис. 8. Ограничения напряжения «затвор-эмиттер»

сайт выдает список соответствующих задаче компонентов (разумеется, по номенклатуре Duxep) и предлагает пользователю выбрать два или три из них. После нажатия виртуальной кнопки Show System Simulation пользователь практически мгновенно получает симуляцию работы системы и сравнение избранных вариантов по потерям, а также визуализацию параметров работы системы при различных вариантах с возможностью масштабировать диаграммы и пересматривать параметры на любой их точке. Результаты почти мгновенно конвертируются в документ в формате PDF одним нажатием клавиши мыши. Доступ к симулятору не требует регистрации и открыт для всех желающих на вкладке меню Design Support.

Там же для загрузки доступны PLECS-модели (Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation) всех изделий для использования в распространенных симуляторах Simulink от MathWorks или PLECS или WBS (WebBased Simulation) от Plexim.

Замечания по монтажу и эксплуатации

В рекомендациях по монтажу [8] производитель напоминает об уязвимости биполярных полупроводниковых компонентов к электростатическим разрядам. Превышение из-за накопления электростатического заряда максимального напряжения «эмиттер-затвор» (обычно ±20 В) может разрушить чип. Поэтому должны быть приняты меры для исключения такого повреждения. IGBT, поставляемые фирмой Duxep, имеют перемычки между затвором и эмиттером и антистатическую упаковку. При монтаже необходимо принять меры по защите IGBT-модулей от воздействия статического электричества и перенапряжений в цепи затвора (обязательное 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 предохранители между фильтрами блока питания и силовыми ключами, поскольку предохранители имеют большую индуктивность;
- значение повторяющегося пикового тока не должно превышать 80% от классификационного постоянного тока коллектора;
- температура $p-n$ -перехода не должна превышать 80% максимально допустимой температуры T_{jmax} указанной в спецификациях, расчет методом тепловых сопротивлений [9];
- при включении схемы сначала должно подаваться напряжение питания на систему управления и драйверы, и только потом — на IGBT;
- при выключении снятие напряжения питания должно проводиться в обратном порядке;
- время нарастания и спада напряжения управления должно быть минимизировано;

- для защиты модулей от перенапряжений в цепи «коллектор-эмиттер» рекомендуется применение снабберных RC- и RCD-цепей, установленных непосредственно на силовых выводах.

Кстати, о теплоотводе. Производитель, конечно, не настаивает, но настоятельно рекомендует использовать радиаторы Duxep, имеющие увеличенную площадь теплоотдачи за счет дополнительных канавок в ребрах и могущих применяться как в системах с естественной воздушной конвекцией, так и в системах с обдувом.

Улучшение термодинамических характеристик достигается использованием в модулях Duxep современных матричных композиционных материалов (в частности, AlSiC, Aluminium Silizium Carbide да и AlN (Aluminium Nitride), имеющих высокую теплопроводность и низкий коэффициент теплового расширения. Разработанные Duxep IGBT-модули удовлетворяют самым высоким требованиям по термостойкости в циклических режимах, например в составе тяговых электроприводов.

Литература

1. Part Numbering Nomenclature for IGBT & FRD Modules, AN57002, LN39469, Lincoln, UK, 2020.
2. Power Semiconductor Product Guide, DYNPS19003, Lincoln, UK, 2019.
3. Simpson R. Dynamic LoadBalancing PressPack IGBT for Robustness, Reliability and Ease of Use // Bodo's Power Systems. 2019. No. 4.
4. Uppuluri S. Latest Generation IGBT Modules for Efficient, Reliable & Power Dense Systems // Bodo's Power Systems. 2019. No. 2.
5. Maximising System Efficiency with the Latest Generation IGBT Modules, Siva Uppuluri, Bodo's Power Systems #122018, pp.40–42, ISSN 18635598, Laboe, Germany, 2018.
6. Rao N., Chamund D. Calculating Power Losses in an IGBT Module. AN61561 LN31943. Lincoln, UK, 2014.
7. Gate Drive Considerations For Maximum IGBT Efficiency, AN45073.1, Lincoln, UK, 2002.
8. IGBT Electrostatic Handling Precautions, AN45023.1. Lincoln, UK, 2002.
9. Heatsink Issues For IGBT Modules, AN45056. Lincoln, UK, 2013.
10. www.dynexsemi.com