

Особенности параллельного соединения модулей IGBT

Андрей КОЛПАКОВ
Andrey.Kolpakov@semikron.com

Параллельная работа ключей в импульсных режимах создает массу проблем, главной из которых является необходимость статической и динамической токовой балансировки. В данной статье рассматривается один из основных аспектов параллельного соединения, касающийся симметрии характеристик проводимости IGBT-транзисторов и антипараллельных диодов.

Параллельное соединение силовых ключей является основным способом наращивания мощности электронных модулей и преобразователей. В современной силовой электронике это в первую очередь относится к транзисторам с изолированным управляющим затвором — MOSFET и IGBT. Даже одиночный кристалл содержит множество параллельно соединенных ячеек затворов. Практически любой модуль с изолированным затвором и с достаточно высоким током коллектора (более 500 А) представляет собой параллельное соединение силовых чипов, выполненное внутри корпуса модуля. Дальнейшее наращивание мощности достигается с помощью соединения силовых модулей.

Невозможно до бесконечности увеличивать площадь кристалла или повышать плотность тока — при этом неизбежно сокращается выход годных при производстве и становится невозможным эффективный отвод тепла с единицы площади. Разработчики силовых кристаллов постоянно совершенствуют технологии, стремясь к снижению потерь и увеличению допустимой токовой нагрузки. Однако все имеет свои физические ограничения, и на сегодняшний момент классические технологии производства MOSFET/IGBT близки к пределу возможностей по уменьшению уровня потерь проводимости и переключения.

Основной трудностью параллельного соединения является невозможность производства чипов с полностью идентичными характеристиками. Источником проблем в динамических режимах является также неизбежная асимметрия геометрии подключения, вызывающая разницу в распределенных паразитных индуктивностях проводников. Такая разница в худшем случае может привести к критической перегрузке одного из кристаллов, что особенно сильно проявляется в наиболее напряженном динамическом режиме — коротком замыкании (КЗ) и последующем

отключении. В аварийных режимах схема защиты производит отключение силовых ключей при токах, в 5–10 раз превышающих номинальные значения. Уровень перенапряжения, воздействующего при этом на кристалл и определяемого как $dU = L_S di_{sc}/dt$ (L_S — индуктивность шины, di_{sc}/dt — скорость отключения тока КЗ), может превысить напряженные пробоя. При параллельном включении топология силовых шин внутри и вне модуля должна не только обеспечивать минимальное значение L_S , распределенные индуктивности должны быть одинаковы во всех параллельных цепях. Требование симметрии подключения касается и цепей управления затворами, где разность в значениях индуктивности цепей приводит к различным задержкам включения-выключения транзистора.

Наиболее сложным решением проблемы рассогласования характеристик является предварительный подбор кристаллов или модулей по их характеристикам, основными из которых являются напряжение насыщения и время переключения. Выбор диодов с одинаковой группой напряжения насыщения V_F не представляет особой сложности, однако практически неосуществимо достижение у параллельных элементов идентичных динамических характеристик — времени переключения и энергии обратного восстановления. Более серьезным аргументом против подбора чипов по параметрам является сложность подобной селекции в условиях серийного промышленного производства.

В данной статье мы рассмотрим проблемы выравнивания статических характеристик транзисторов IGBT и антипараллельных диодов на примере стандартного полумостового модуля SEMIKRON SKM100GB123D, производимого по технологии NPT (Non Punch Through). К особенностям данной технологии относится положительный температурный коэффициент напряжения насыщения, обеспечивающий автоматическое выравни-

вание статических токов параллельных транзисторов. Наибольшие трудности связаны с выравниванием токов антипараллельных диодов, температурный коэффициент прямого напряжения которых отрицателен.

Следует отметить, что проблема небаланса статических режимов при параллельном соединении значительно упростилась после разработки компанией SEMIKRON новой серии антипараллельных диодов CAL HD [3], имеющих положительный температурный коэффициент напряжения насыщения при номинальных токах. Однако эти диоды имеют несколько худшие динамические характеристики, и они используются только в низкочастотных модулях IGBT, выполненных по технологии Trench FS.

Для обоих рассматриваемых кристаллов мы проведем анализ «наихудшего случая», при котором статический небаланс максимален, поскольку используются элементы с максимальным (USL — upper specification limit) и минимальным (LSL — lower specification limit) справочным значением напряжения насыщения. Для математического анализа такого варианта необходимо выразить падение напряжения как функцию температуры и тока. Данная функция должна содержать нормирующий коэффициент, который позволит проанализировать дисбаланс токов при минимальном, среднем и максимальном рассогласовании параметров. На рис. 1а показано семейство прямых характеристик антипараллельных диодов модуля SKM100GB123D. Ситуация «наихудшего случая» соответствует параллельному соединению модуля с диодом, имеющим минимально возможное значение прямого напряжения, и одного или нескольких модулей, у которых падение напряжения на диодах имеет максимально возможное значение.

Предположим также, что отсутствует тепловая связь между параллельно включенными модулями и тепловое сопротивление

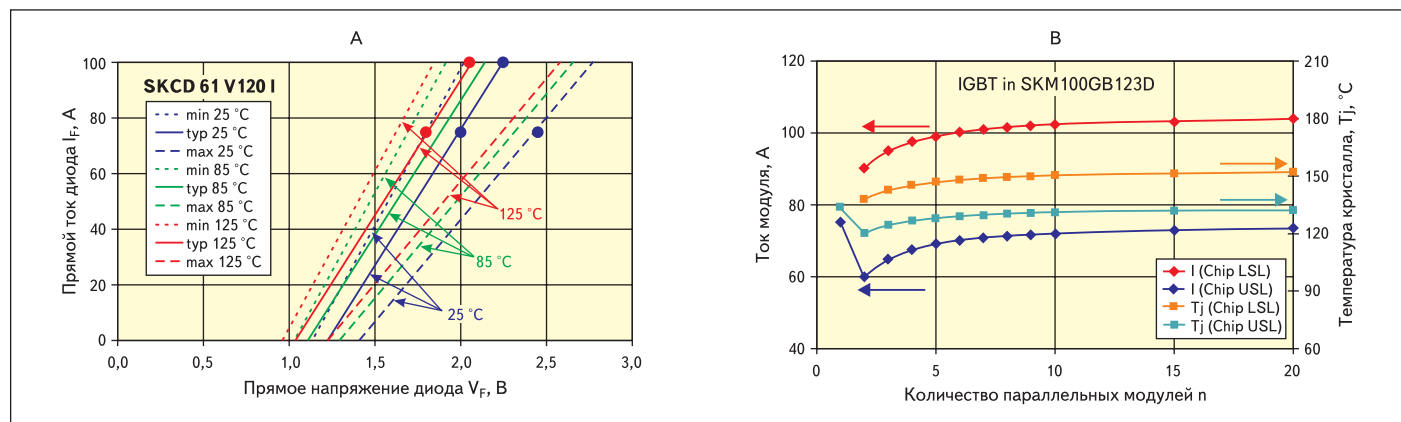


Рис. 1. а) прямые характеристики кристаллов диодов SKCD 61 C120I (антипараллельный диод модуля SKM100GB123D), б) анализ «наихудшего случая» токового небаланса при параллельном соединении модулей

«кристалл — корпус» для кристаллов IGBT и диода соответствует максимальным справочным значениям: 0,18 и 0,5 °С/Вт соответственно. Расчеты производятся при фиксированной температуре радиатора 85 °С, соответствующей номинальному режиму эксплуатации в большинстве реальных применений.

Указанные положения позволяют проанализировать воздействие, оказываемое разностью прямых характеристик диодов на температуру кристаллов и значение токового небаланса. В качестве исходных данных для расчета задаются токи каждого чипа и температура кристаллов диодов, имеющих максимальное предельное значение напряжения насыщения. Далее значение прямого напряжения рассчитывается как функция температуры и тока. На основании полученных результатов можно вычислить величину потерь и скорректировать значение температуры с помощью тепловых моделей кристаллов. Разница между предполагаемой и рассчитанной температурой минимизируется с помощью вариации значения токов кристаллов каждой параллельной цепи, при этом нулевая разница в падении напряжения на параллельных диодах является граничным условием. Данные расчеты легко реализуются с помощью вычислительных средств программы MS Excel.

Результаты проведенного анализа для условия параллельного соединения до 20 модулей и «целевом» токе модуля 75 А показаны на рис. 16. Вариант единичного модуля ($n = 1$) соответствует образцу с характеристиками USL («наихудший случай» без параллельного соединения). На рисунке приведены значения токов и температуры кристаллов для модулей с предельными прямыми характеристиками (LSL и USL). При $n = 2$ ток в цепи транзистора LSL уже превышает 90 А и продолжает увеличиваться до 103 А, при этом ток в цепи USL, начинающийся со значения 60 А, возрастает до 73,5 А для случая 20 параллельно соединенных кристаллов. Температура чипа LSL составляет 138 °С для $n = 2$ и 152 °С для $n = 20$, а в цепи чипа USL соответствующее значение остается ниже 133 °С.

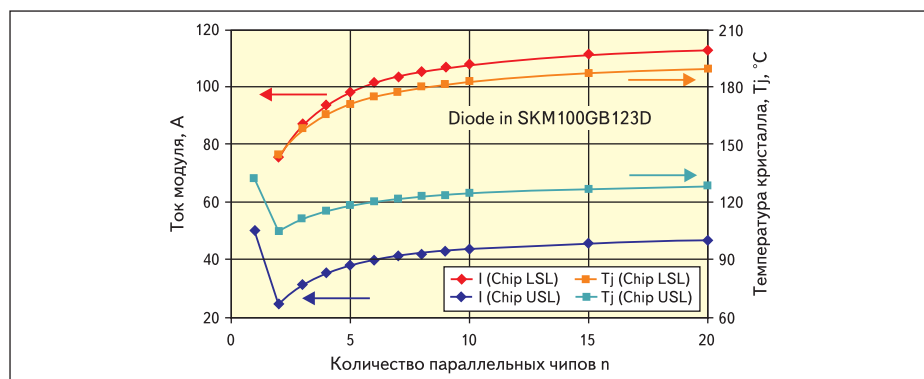


Рис. 2. Анализ небаланса токов (I) и температур (T_j) как функции количества параллельных кристаллов

Полученные значения позволяют проанализировать состояние «наихудшего случая» по небалансу токов и температур как функции количества параллельных чипов. Для этого необходимо заменить модель диода, отображающую прямое напряжение, на его тепловую модель и задать «целевое» значение тока (в нашем случае 50 А). Результаты такого анализа показаны на рис. 2.

Графики показывают, что разброс прямого напряжения параллельно соединенных диодов приводит к более серьезным последствиям, чем несимметрия характеристик проводимости IGBT. При соединении параллельно двух модулей ток в цепи LSL (75 А) оказывается на 50% больше тока одиночного модуля с предельными характеристиками. Ситуация ухудшается по мере увеличения количества параллельно соединенных модулей и при $n = 20$ ток «наихудшего случая» может превысить номинальное значение в 2,25 раза.

Результатом небаланса токов являются критические тепловые режимы работы кристаллов. Температура, составляющая 145 °С для чипа LSL в случае двух параллельно соединенных кристаллов, при $n = 20$ может увеличиться до 190 °С. Данный эффект для диодов является более выраженным, чем для IGBT, из-за разности температурных коэффициентов прямого напряжения. В отличие от диода, для которого тепловой коэффициент V_F

отрицателен, положительный температурный коэффициент напряжения насыщения IGBT приводит к более равномерному распределению токов с ростом температуры.

Как показывает проведенный анализ, «прямое» параллельное соединение модулей без подбора параметров может оказаться серьезной проблемой. Напомним, что все расчеты были основаны на предположении, что в одной комбинации могут встретиться элементы с предельными справочными характеристиками.

Несмотря на все приведенные рассуждения, на практике встречаются нормально работающие изделия, где параллельно включены 20 и более модулей. Причину их успешной работы может объяснить статистический анализ. Проводя исследования «наихудшего случая», мы рассматривали только комбинации элементов с предельными характеристиками проводимости. Естественно, что данные характеристики у реальных диодов и транзисторов должны подчиняться определенному закону распределения. На рис. 3а показаны результаты статистического анализа напряжения насыщения кристаллов SIG C 121 T 120 R2C (входящих в рассматриваемый модуль IGBT) при токе 75 А, выполненного компанией Infineon на основе анализа характеристик 236 тыс. чипов (Empirical). Граничные справочные значения V_{CE} показаны на рисунке в виде вертикальных красных прямых LSL и USL.

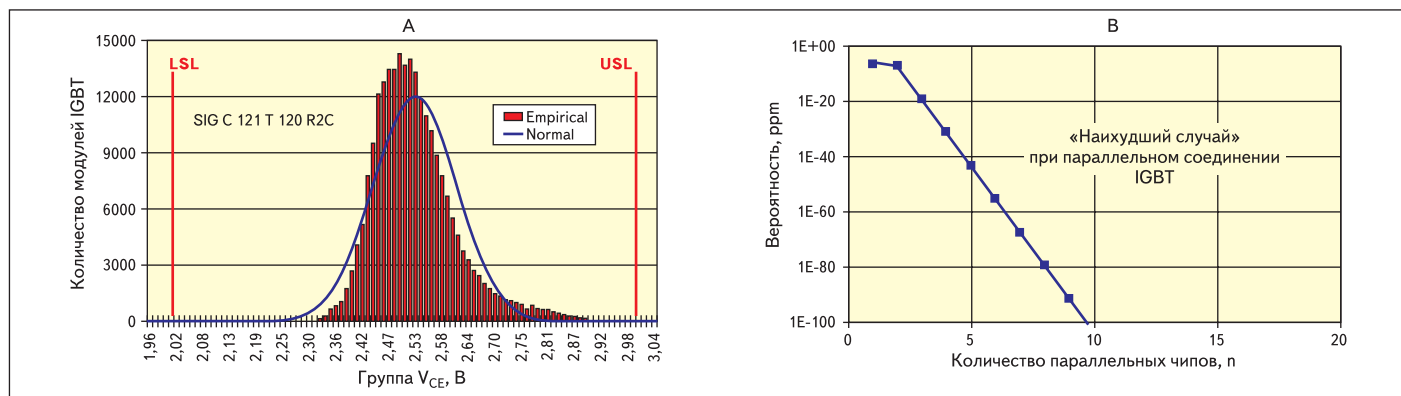


Рис. 3. а) статистический анализ IGBT по группе V_{CE} , б) вероятность наступления «наихудшего случая», рассчитанная на основе статистического анализа

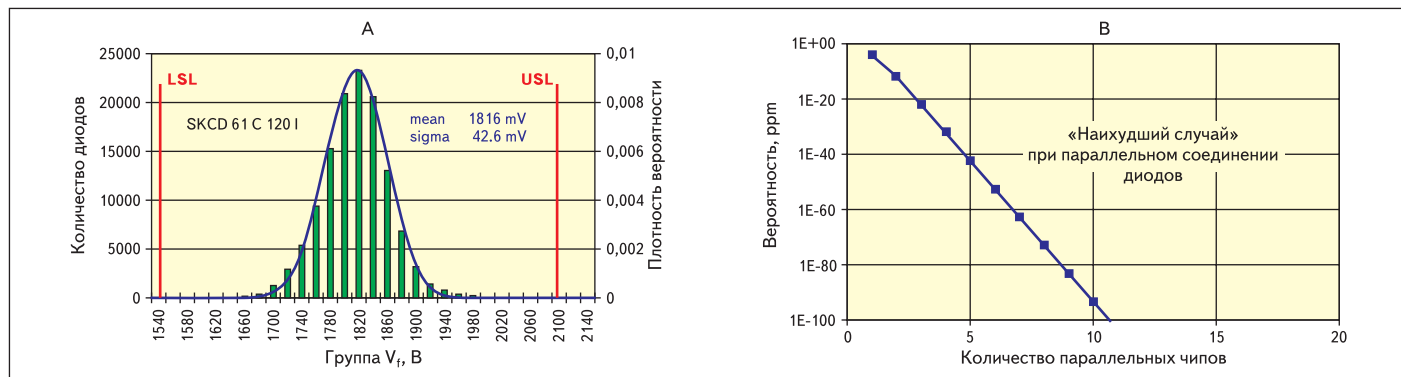


Рис. 4. а) статистический анализ диодов по группе V_f , б) вероятность наступления «наихудшего случая», рассчитанная на основе статистического анализа

На график также нанесена кривая, соответствующая нормальному закону распределения (Normal). На основании статистического анализа произведен расчет вероятности наступления «наихудшего случая» в зависимости от количества параллельных чипов (рис. 3б). Как видно из графика, вероятность появления критических режимов при параллельном соединении реальных кристаллов IGBT довольно низка, а вероятность нахождения в выборке кристалла с предельными характеристиками пренебрежимо мала: только один из 10^{12} чипов имеет характеристики в области USL. Вероятность появления комбинации из одного LSL и девяти USL чипов не превышает 10^{-100} ppm (ppm — parts per million, $1/10^6$).

Все сказанное выше в достаточной мере относится и к кристаллам диодов. На рис. 4а приведены результаты статистического анализа характеристик проводимости, выполненного SEMIKRON на основе измерения параметров 125 тыс. чипов диодов SKCD 61 C 120I. График, отображающий вероятность наступления «наихудшего случая» (рис. 4б), достаточно близок к кривой, показанной на рис. 3б. Вероятность наступления критического состояния быстро падает с ростом количества элементов в комбинации.

Как было показано выше, анализ режима «наихудшего случая» для элементов с предельными характеристиками показывает, что параллельное соединение без подбора параметров в ряде случаев может приводить

к фатальным последствиям. Однако вероятность наступления подобных состояний при использовании реальных кристаллов и модулей оказывается чрезвычайно низкой. Более реалистичные прогнозы можно сделать, если за точку отсчета взять вероятность наступления «наихудшего случая», равную 1 ppm для комбинации параллельных кристаллов. На основе известных кривых распределения значений потерь проводимости можно определить пределы, внутри которых расчеты обладают высокой степенью вероятности: LCL (Lower Calculation Limit) и UCL (Upper Calculation Limit). Для нормального распределения данные пределы расположены симметрично относительно значения математического ожидания x_m ($x_m - LCL = UCL - x_m$).

Предлагаемая методика иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 5. Поскольку вероятность «наихудшего случая» резко снижается при увеличении количества параллельно соединенных чипов, соответственно, пределы LCL, UCL должны сближаться по направлению к x_m для обеспечения заданного значения вероятности. Дисбаланс параметров, создаваемый комбинацией чипов, характеристики которых находятся за пределами LCL и UCL, также может быть определен с помощью предлагаемой методики.

На рис. 6 показаны результаты расчетов: дисбаланс токов и температур в зависимости от количества параллельных чипов при постоянном значении вероятности 1 ppm. Если выбирать кристаллы так, чтобы вероят-

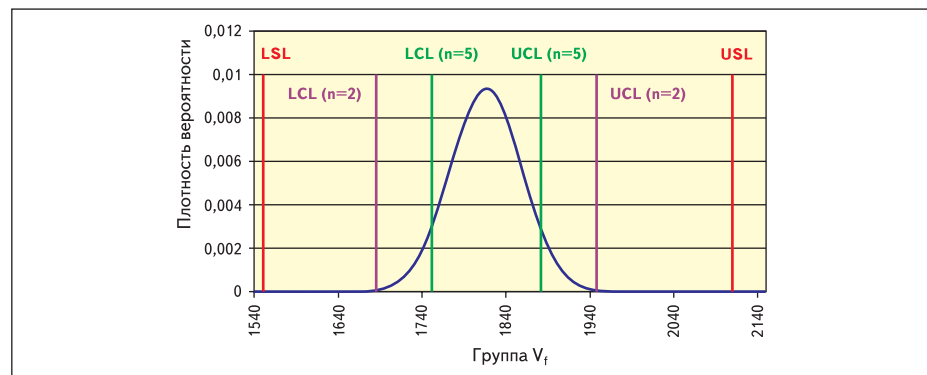


Рис. 5. Плотность вероятности по прямой характеристике диода

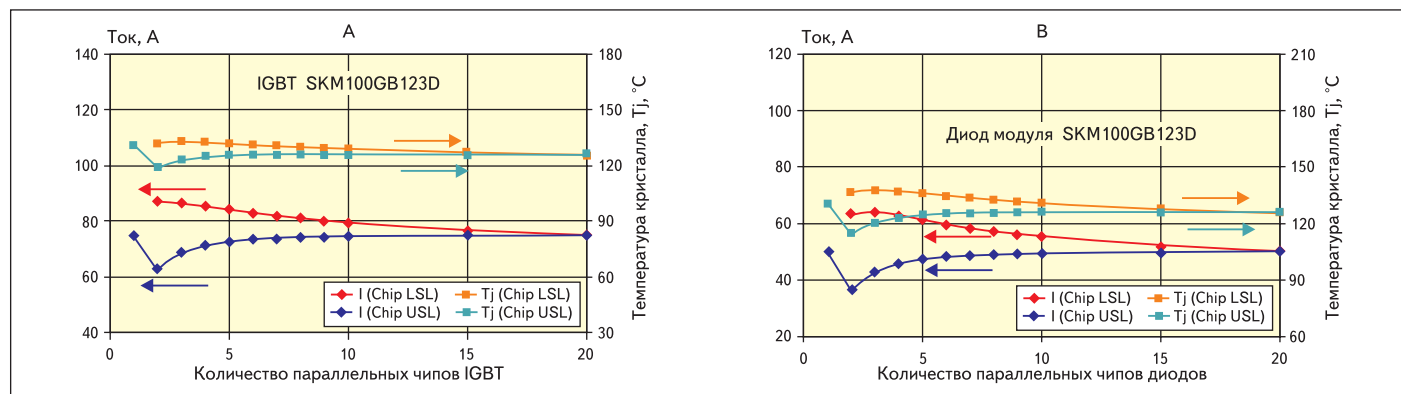


Рис. 6. Результаты статистического анализа при фиксированной вероятности 1 ppm в функции от количества параллельных кристаллов для IGBT (а) и диодов (б)

ность «наихудшего случая» была равна 1 ppm для каждой комбинации, то максимальный разбаланс для IGBT при «целевом» токе 75 А достигается при $n = 2$. При этом ток коллектора достигает значения 87 А. Данный разброс токов вызывает соответствующий дисбаланс температур с максимальным значением 132 °С. Это значение всего на 2 °С превышает перегрев одиночного чипа, имеющего максимально возможные потери проводимости. Как показывает рис. 6а, при увеличении количества параллельных чипов дисбаланс уменьшается, а при $n = 20$ практически исчезает.

Еще более интересные результаты в аналогичной ситуации дает статистический анализ для диодов модуля, имеющих отрицательный температурный коэффициент прямого напряжения. Соответствующие графики приведены на рис. 6б. Ток LCL чипа достигает максимума (64 А) при $n = 3$, а затем снижается до состояния баланса при $n = 20$. Температура кристалла в комбинации (равная в пределе 138 °С) оказывается всего на 8 °С выше температуры одиночного чипа с предельными характеристиками.

На основе приведенных выше данных мы можем вычислить относительное уменьшение допустимого тока при параллельной работе IGBT на примере модуля SKM100GB123D. Для такого расчета следует определить значение максимально допустимой температу-

ры кристаллов при параллельном соединении. Затем необходимо произвести перерасчет, задавшись граничным условием, что общий ток комбинации модулей ограничен значением, при котором температура кристаллов находится в допустимых пределах.

Характеристики проводимости диодов, имеющих отрицательный температурный коэффициент прямого напряжения, оказывают решающее влияние на разброс параметров при параллельном соединении. Показанные на рис. 7 кривые, характеризующие уменьшение тока в «наихудшем случае» и в случае фиксированного значения вероятности 1 ppm, относятся именно к диодам рассматриваемого модуля. Для режима, соответствующего «наихудшему случаю», температура зафиксирована на уровне 132 °С. В таком тепловом режиме работает диод, имеющий предельно допустимое прямое напряжение. Максимальный ток чипа снижается до 80% от номинального значения в случае двух параллельных кристаллов, и до 40%, когда $n = 20$. В соответствии с приведенными расчетами допустимый ток для 20 параллельно соединенных диодов с номинальным током 50 А не должен превышать 400 А.

Если использовать статистический анализ при заданном значении вероятности 1 ppm, то максимальная температура одиночного диода с предельными характеристиками про-

водимости составляет 130 °С, и это значение будет граничным условием для дальнейших расчетов. Теперь максимально допустимый ток снизится только до 83% при параллельном соединении 3 чипов (рис. 7, красный график). В случае использования большего количества параллельных элементов допустимый ток нагрузки возрастает, достигает значения 100% при соединении в параллель 10 модулей и далее продолжает увеличиваться. Этот неожиданный результат иллюстрирует тот факт, что вероятность появления в реальном параллельном соединении комбинации диодов с предельными характеристиками крайне мала.

Все вышесказанное подтверждает, что параллельное соединение модулей IGBT является достаточно просто реализуемым в части симметрирования статических характеристик. В реальных применениях динамические потери, возникающие при переключении транзисторов, имеют не меньшее значение, чем статические. Проблемы, возникающие при переключении параллельно соединенных модулей, усложняются наличием переходных процессов и перенапряжений, возникающих из-за наличия паразитных индуктивностей в коммутируемых цепях. Как показывает практика, именно динамические режимы ограничивают возможности параллельного соединения, однако это не мешает ведущим производите-

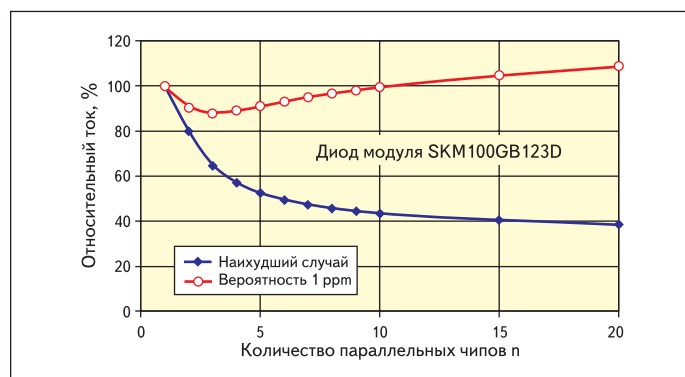


Рис. 7. Относительное уменьшение допустимого тока, рассчитанное на основе анализа «наихудшего случая» и при статистическом анализе в случае фиксированного значения вероятности 1 ppm

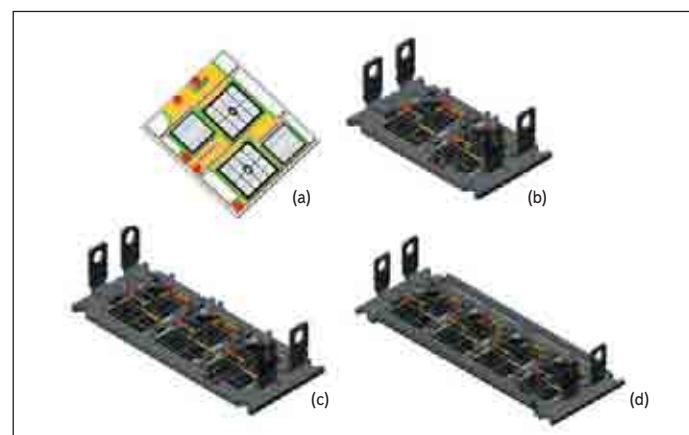


Рис. 8. Базовый элемент и типоразмеры модулей SEMiX

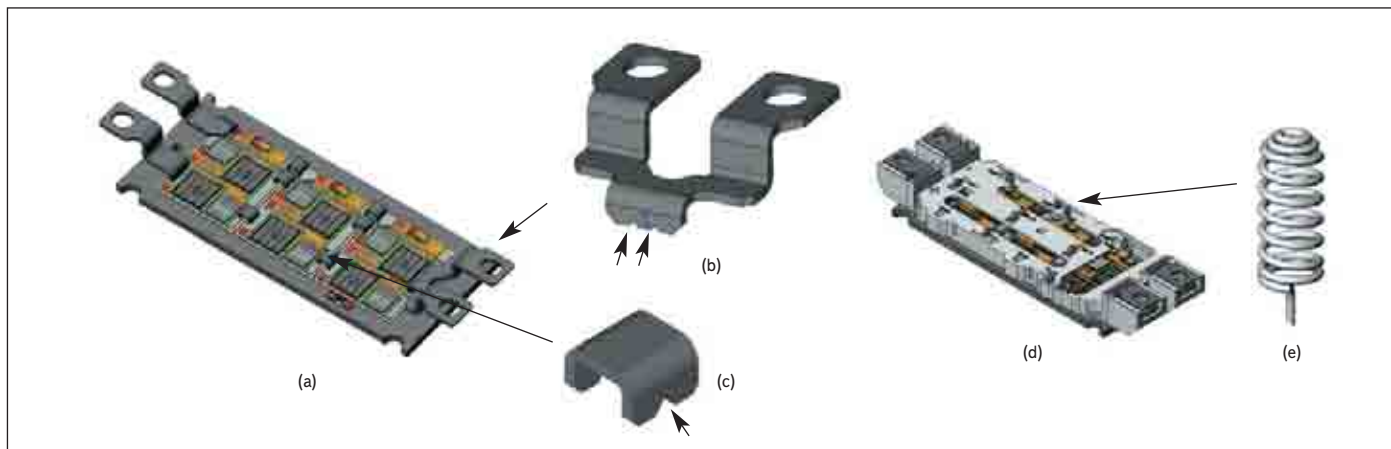


Рис. 9. Силовые и сигнальные выводы SEMiX

лям силовых модулей создавать ключи, надежно работающие при таком соединении. Примером может служить новейшая серия модулей IGBT SEMiX, выпускаемая компанией SEMIKRON. В основе конструкции модулей SEMiX, рассчитанных на ток от 100 до 900 А, лежат базовые полумостовые IGBT-каскады. Нарращивание мощности данных модулей производится за счет увеличения количества параллельно соединенных базовых элементов внутри модуля. Это позволило получить очень технологичную конструкцию с высокой степенью повторяемости и даже несколько снизить стоимость модулей SEMiX по сравнению со стандартными модулями IGBT.

Составные части конструктива SEMiX показаны на рис. 8. Базовыми элементами модуля являются керамические платы DBC (Direct Bonded Copper) с полумостовыми каскадами IGBT (рис. 8а), размещаемые на медном основании с помощью пайки. Нарращивание мощности модулей производится с помощью параллельного промежуточного соединения полумостов, что способствует хорошей повторяемости и удешевлению производства. Соединение силовых терминалов соседних элементов производится с помощью U-образных контактов (рис. 9с). В модуле SEMiX 3 (рис. 8с) использовано 3 базовых элемента; SEMiX 2 (рис. 8б) содержит 2 полумоста; SEMiX 4 (рис. 8д), соответственно, 4 базовых элемента. Силовые терминалы для подключения питания и выхода (рис. 9б) разнесены по разные стороны в плоскости модуля, что позволяет упростить конструкцию DC-шины.

Для обеспечения надежной работы силовых модулей в динамических режимах должна быть проработана не только топология силовых шин, но и геометрия контрольных цепей. При разработке SEMiX этому было уделено особое внимание [4]. Подключение сигнальных выводов силовых кристаллов и выводов термодатчика осуществляется в SEMiX с помощью спиральных пружинных контактов (рис. 9д, е), фиксируемых в рамке корпуса модуля. Возможность произвольного размещения сигнальных выводов на кера-

мической плате позволяет выбрать положение, при котором обеспечивается наилучшая симметрия цепей управления параллельно включенными кристаллами, минимизируется значение распределенных индуктивностей, максимально снижается влияние силовых шин на сигналы управления. Кроме того, свободный доступ к сигнальным выводам затворов и эмиттеров дает возможность оптимизировать динамические характеристики модуля как в режиме переключения, так и при коротком замыкании (КЗ). Соответствующие сигнальные выводы параллельных чипов объединяются на интерфейсной плате, являющейся крышкой модуля.

На рис. 10 показано, как в модуле SEMiX 3 размещены силовые кристаллы IGBT верхнего (Т1...Т3) и нижнего (В1...В3) плеча полумостовых каскадов и как выбраны точки подключения пружинных контактов к затворам (G) и эмиттерам (Ex).

Кристаллы IGBT-транзисторов и антипараллельных диодов каждого плеча размещены по одной линии: Т1...Т3 — это 3 параллельных транзистора верхнего плеча, В1...В3 — чипы IGBT нижнего плеча. В наиболее сложном динамическом состоянии (режим короткого замыкания и последующее отключение) влияние различных путей протекания тока и несимметричного распределения перенапряжений относительно выводов DC и AC для параллельно соединенных кристаллов оказывается наиболее сильным. Проблема решается с помощью оптимиза-

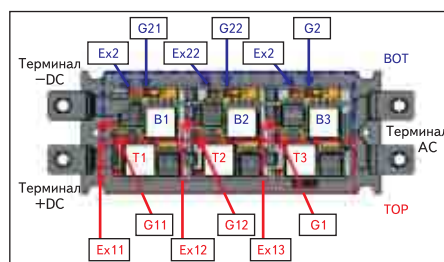


Рис. 10. Расположение силовых кристаллов SEMiX 3, точки подключения пружинных контактов

ции топологии силовых шин и выбора положения сигнальных контактов. Особенности геометрии полумостовых элементов SEMiX, наличие дополнительных сигнальных выводов эмиттеров (Ex11...Ex13, Ex21...Ex23) и специальная топология связей на печатной плате позволяют получить минимальное значение энергии потерь E_{on} , E_{off} и при этом обеспечить безопасную работу модуля в пределах ограничений SCSOA (Short Circuit Safe Operating Area — область безопасной работы в режиме КЗ). При коротком замыкании любого плеча модуля SEMiX гарантируется как ограничение тока $K3 I_{SCmax}$ в рамках SCSOA для всех параллельно соединенных чипов, так и отсутствие опасных перенапряжений при выключении. Испытания, проведенные SEMIKRON, показали, что **ключи SEMiX 3 устойчиво и надежно работают при параллельном соединении до 7 модулей**. Тесты проводились для самых напряженных условий эксплуатации, включая режим многократного короткого замыкания.

Заключение

Параллельное соединение силовых модулей, как основной способ увеличения выходного тока, является чрезвычайно интересным в части анализа тепловых режимов, вызывающих дисбаланс параметров силовых кристаллов. Анализ сценария «наихудшего случая», часто обсуждаемого в технической литературе, позволяет получить результаты, делающие параллельное соединение без предварительного подбора параметров элементов практически нецелесообразным. Однако статистический анализ показывает, что вероятность наступления «наихудшего случая» в его теоретическом проявлении на практике крайне мала. Результаты измерений прямых характеристик реальных элементов огромного количества элементов, проводимых фирмами-производителями, позволяет выполнить статистический анализ, основанный на фиксированной вероятности «наихудшего случая», дающий гораздо более достоверные результаты.

В данной статье была рассмотрена проблема статического токового дисбаланса параллельного соединения, вызванного разбросом прямых характеристик транзисторов IGBT и антипараллельных диодов. В реальных применениях динамические потери, возникающие при переключении транзисторов, имеют не меньшее значение, чем статические. Для их решения существуют различные топологические и технологические приемы, что и было продемонстрировано на примере модулей SEMiX.

Особенности конструкции модулей SEMiX, наличие специальных точек подключения сигнальных контактов, использование спиральных пружинных выводов открыли принципиально новые возможности проектирования силовых ключей. Динамические характеристики и параметры «управляемости» кристаллов SEMiX могут быть адаптированы для конкретных условий эксплуатации с помощью изменения топологии интерфейсной платы или выбора положения сигнальных выводов. При этом использование пружинных выводов, имеющих лучшие механические характеристики и более высокую надежность по сравнению с паяными контактами, не ухудшает динамических свойств модуля. ■

Литература

1. Schuermann U. Paralleling of Chips — From the Classical Consideration to a Statistical Approach. SEMIKRON International, 2005.
2. Annacker R., Grasshoff T. A New Platform for IGBT Modules — Flexible and expandable SEMiX family // PCIM Europe Magazine. 2003. July/August.
3. Колпаков А. Антипараллельные диоды SEMIKRON для новых поколений IGBT // Электронные компоненты. 2005. № 2.
4. Колпаков А. Особенности конструкции модулей SEMiX // Электронные компоненты. 2005. № 3.