

Повышение плотности мощности инверторов на базе IGBT-модулей

Клаус ВОГЕЛЬ (Klaus VOGEL)

Повышение рабочей температуры IGBT

Повышение рабочей температуры (T_{VJ}) IGBT с +150 °C (IGBT 4) до +175 °C (IGBT 5) создает условия для увеличения рассеиваемой мощности и коммутируемого тока на одно устройство. В результате схемы инверторов с высокой паразитной индуктивностью могут выйти на предел своих возможностей в части пиковых перенапряжений и переходных колебаний при выключении. Перенапряжение на коллекторе IGBT вызывается паразитной индуктивностью L_{σ} и резким изменением тока. Соотношение между ними описывается формулой:

$$\Delta U = -L_{\sigma} di/dt.$$

Форма тока также зависит от напряжения, приложенного между коллектором и эмиттером. Чем выше напряжение на IGBT в процессе выключения, тем раньше удаляется заряд из устройства и исчезает «хвост» тока [1]. Это значит, что паразитная индуктивность, вызывающая перенапряжение, ускоряет спад тока, а это, в свою очередь, вызывает еще более высокое перенапряжение. Вдобавок высокие значения di/dt и L_{σ} могут привести к возникновению переходных колебаний, наводящих электромагнитные помехи (ЭМП). Это следствие возбуждения резонансной цепи, состоящего из паразитной индуктивности в контуре коммутации и емкости кристалла, высокочастотными составляющими тока и напряжения.

Таким образом, для повышения номинального тока необходимо снизить общую паразитную индуктивность контура коммутации, что позволит избежать перегрузок по напря-

Повышение плотности мощности — ключевой аспект разработки инверторных систем для силовой электроники. За последние 22 года плотность тока на уровне кристалла IGBT повысилась в три раза. Прогресс в технологии IGBT, а также применение новых материалов, таких как карбид кремния и нитрид галлия, позволят в ближайшем будущем повысить плотность тока на единицу площади за счет улучшения коммутационных свойств и повышения максимальной рабочей температуры T_{VJ_max} . Благодаря этому более значимым параметром станет индуктивность системы, которая может ограничивать максимальный коммутируемый ток.

жению и удовлетворить требования по электромагнитной совместимости. В общем случае это условие можно описать простой граничной постоянной [1]. Если удастся снизить до минимума паразитную индуктивность, полупроводниковое ключевое устройство можно будет оптимизировать для получения более высокой скорости выключения, а следовательно, и снижения потерь энергии при выключении. Рост потерь при включении, обусловленных низкими паразитными индуктивностями [2, 3], необходимо скомпенсировать за счет кристаллов IGBT с ускоренным включением и встречно-параллельных диодов с меньшим зарядом обратного восстановления.

Схема инвертора с малой индуктивностью и устойчивостью к высоким температурам

В следующих разделах будет представлена новая конструкция системы в сравнении с типичной трехфазной системой на 62-мм модулях общей индуктивностью около 70 нГн и плотностью мощности 8 кВт/А. В образцовой инверторной системе (6PS0400R12KE3-3F-C4V на базе модулей FF450R12KE4) применены электролитические конденсаторы, многослойная плоская шина питания и радиатор с воздушным охлаждением. Все устройства соединены между собой винтами; такие соединения нарушают геометрию многослойной плоской шины питания.

Лучший способ свести индуктивность системы к минимально возможной — это сохранять структуру контура протекания тока в виде узкой полосы в рамках всей системы из конденсаторов, шины и модуля [1]. К сожалению, с распространенными сегодня

устройствами это невозможно из-за межсекционных винтовых соединений, образованных интерфейсами между конденсаторами и силовыми модулями с шиной постоянного тока. За счет таких разрывов возникают участки с геометрией двухпроводных соединителей, которые вносят преобладающий вклад в индуктивность. Для этого исследования была разработана новая конструкция системы на базе устройств-прототипов с исследованием ее преимуществ.

Вновь разработанный силовой модуль [1] следует концепции узкополосного контура протекания тока, имея многослойную топологию с множеством точек соединения в чередующейся структуре для минимизации общей индуктивности системы. Соединители модуля были выполнены с использованием проверенной технологии PressFIT [4] компании Infineon. Расположение контактов в линию позволяет обеспечить подключение к остальной части системы с очень малой индуктивностью и низким активным сопротивлением. Более того, эта технология выигрывает от отличается от паяных соединений по сроку службы в условиях высокотемпературных циклов [4]. Для работы с транзисторами IGBT 5 при $T_{VJ_max} = 175$ °C без сокращения срока службы модуль-прототип был построен на базе новой технологии компании Infineon — XT [5–7].

Чтобы избежать соединений болтами [1], разработчики модуля применили опытный образец фильтрующего конденсатора на кристалле силового конденсатора (PCC) [8, 9] с контактом Infineon PressFIT, представленный компанией Epcos. Опытный образец конденсатора PCC имеет очень малую эквивалентную последовательную индуктивность и низкое эквивалентное последо-

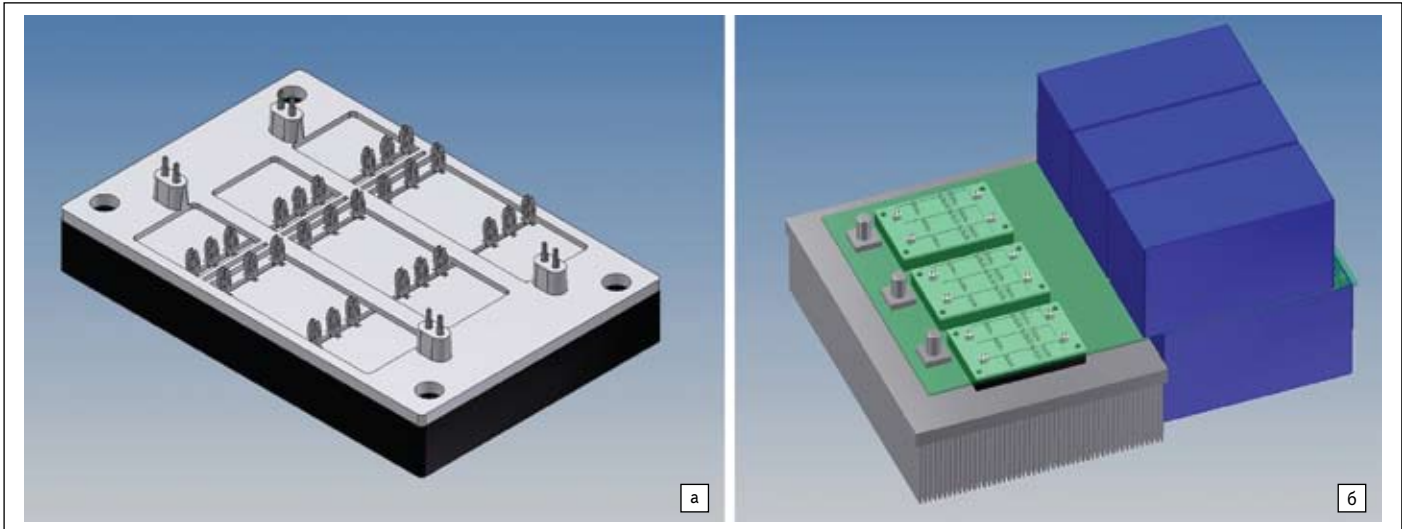


Рис. 1. а) Прототип полумостового низкоиндуктивного модуля на IGBT с соединителями типа PressFIT; б) конструкция инверторной системы В6 с низкоиндуктивными модулями и конденсаторами PCC, соединенными с силовоточной печатной платой несколькими контактами типа PressFIT

вательное сопротивление, что позволяет увеличить ток конденсатора на единицу объема. Благодаря высокому максимально допустимому напряжению [8] отсутствует необходимость в последовательном соединении конденсаторов. Кроме того, конденсаторы этого типа характеризуются более высокой максимальной температурой окружающей среды и более длительным сроком службы, чем электролитические конденсаторы [8, 9].

Для соединения упомянутых выше устройств была выбрана силовоточная печатная плата с максимальной рабочей температурой +150 °С и слоем меди 800 мкм на один контакт. Эти решения позволили реализовать концепцию контура протекания силового тока в цепи постоянного тока в виде узкой полосы для всех элементов силового преобразователя.

Цепь драйвера IGBT расположена так, что не имеет механической связи с силовой частью системы. По результатам исследования [5], в котором рассматривались последствия работы при $T_{VJ} = 175\text{ °C}$, расчетная температура печатной платы при возможной в худшем случае окружающей темпера-

туре образцовой системы составила +90 °С. Для управления IGBT был выбран драйвер 2ED020I12FA компании Infineon с максимально допустимой температурой окружающего воздуха +125 °С.

На рис. 1 показан прототип модуля и вся инверторная система.

В целом все принятые меры позволили снизить индуктивность системы до уровня ниже 10 нГн: это примерно на 60 нГн меньше, чем в образцовой инверторной системе. Влияние различных значений паразитной индуктивности на характеристики выключения при использовании быстродействующих кристаллов IGBT 3 на напряжение 1200 В при номинальных условиях показано на рис. 2.

На рис. 2а изображены характеристики переключения FF400R12KT3 — 62-мм модуля на базе быстродействующей технологии IGBT 3. Видно, что при паразитной индуктивности 70 нГн в быстродействующем кристалле IGBT 3 возникают переходные колебания. Перенапряжение составляет 280 В. Если уменьшить паразитную индуктивность до 35 нГн, как на рис. 2б (а с использованием нового низкоиндуктивного модуля —

до 10 нГн, как на рис. 2в), перенапряжение снижается до 160 и 80 В соответственно. В схеме с индуктивностью 10 нГн переходные колебания отсутствуют. «Хвост» тока имеет плавный вид за счет меньшего перенапряжения по сравнению со схемой с большей индуктивностью.

Схема с малой индуктивностью позволяет использовать транзисторы IGBT 5, обладающие более высокой скоростью переключения, большей плотностью тока на кристалле и меньшими потерями.

Повышение выходной мощности инвертора

Теперь, когда удалось снизить емкость коммутации системы до уровня менее 10 нГн, можно легко справиться с повышением плотности тока и мощности, возможность которого обусловлена ростом температуры перехода. Более того, можно даже реализовывать устройства с высокой частотой переключения и сниженными потерями без опасений превысить ограничения по перенапряжению и плавности тока.

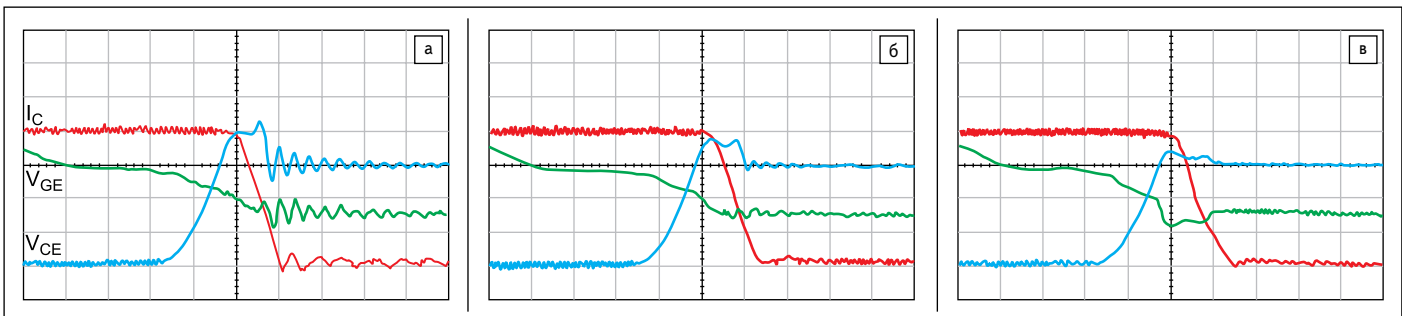


Рис. 2. Характеристики переключения при различных значениях паразитной индуктивности: а) 62-мм модуль в стандартной схеме; общая индуктивность — 70 нГн; б) 62-мм модуль в схеме с малой индуктивностью; общая индуктивность — 35 нГн; в) низкоиндуктивный модуль в схеме с малой индуктивностью; общая индуктивность — менее 10 нГн (голубой — V_{CE} [200 В/дел.]; зеленый — V_{GE} [10 В/дел.]; красный — I_C [100 А/дел.], [100 нс/дел.]

На рис. 3 приведена осциллограмма выключения тока, равного 1200 А (это вдвое больше номинального тока модуля), при повышенном до 800 В напряжении в цепи постоянного тока, в системе с малой индуктивностью.

Можно видеть, что при перегрузке быстродействующего транзистора IGBT 5 у него сохраняется достаточный «хвостовой» ток, пиковое перенапряжение составляет 1090 В, а переходные колебания отсутствуют. Возможен и следующий шаг оптимизации конструкции кристалла, связанный со снижением «хвостового» тока и, соответственно, потерь при выключении.

На рис. 4 сравниваются графики зависимости температуры кристалла IGBT от выходного тока системы для двух вариантов образцовой системы (на IGBT E3 и E4) и прототипа системы с малой индуктивностью на быстродействующих IGBT 5 при $T_{VJ_max} = 175$ °С.

Очевидно, что новая конструкция позволяет увеличить выходной ток на 18% по сравнению с IGBT 4 при $T_{VJ} = 150$ °С. Повышение максимальной температуры перехода до +175 °С дает на 40% больший ток, чем IGBT 4. В преобразователе с малой индуктивностью и устойчивостью к высоким температурам удалось достичь плотности мощности около 14 кВт·А.

Помимо этого необходимо следить за ростом температуры других компонентов системы, чтобы он не привел к сокращению срока службы инвертора.

Заключение

С повышением максимальной рабочей температуры растет плотность тока на единицу площади кристалла. В результате схемы инверторов с высокой паразитной индуктивностью могут выйти на предел своих возможностей в части импульсных перенапряжений и перенапряжений при переходных колебаниях при выключении. Применение быстродействующих кристаллов IGBT при большем токе возможно только в случае малой индуктивности модуля и системы в целом. Это потенциальная возможность и одновременно необходимое условие для

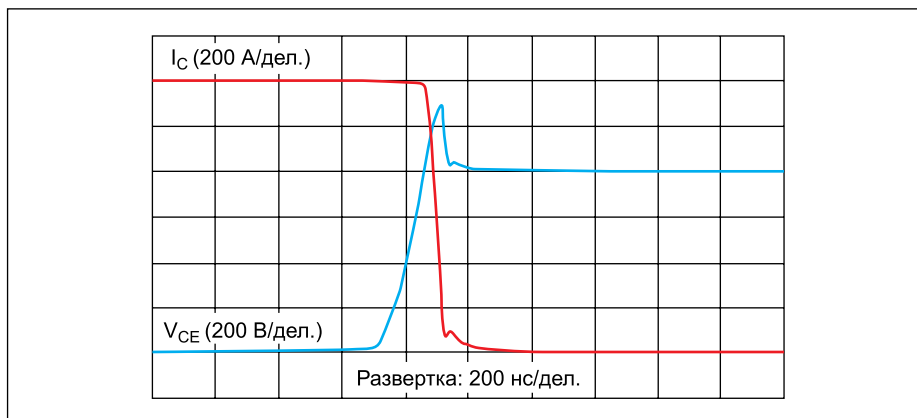


Рис. 3. Осциллограмма выключения тока быстродействующего транзистора IGBT 5

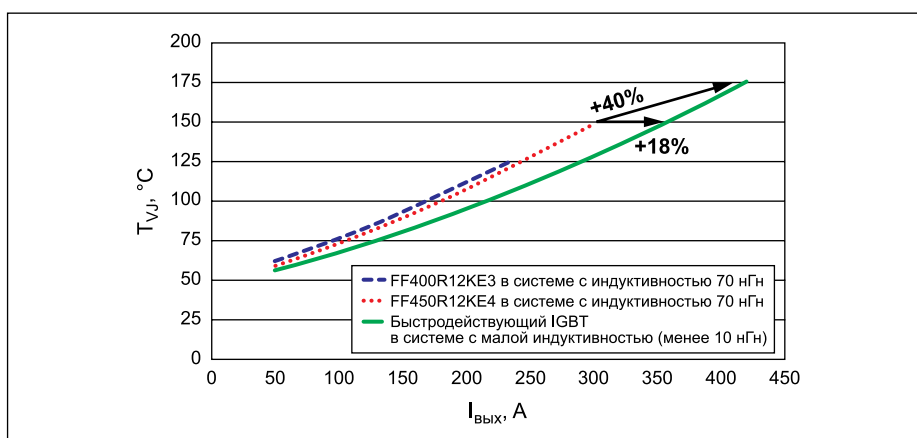


Рис. 4. Зависимость температуры кристалла IGBT от выходного тока инверторной системы при использовании различных технологий и разных значениях индуктивности системы

применения других быстродействующих кристаллов, например карбид-кремниевых JFET со сниженным уровнем ЭМП и уменьшенным пиковым перенапряжением.

Исследование показывает, что использование оптимизированных по потерям энергии кристаллов с повышенной рабочей температурой дает примерно на 50% большую плотность мощности в сравнении с образцовой системой на базе сегодняшних технологий. Прогресс в этом направлении возможен за счет дальнейшего совершенствования кон-

струкции кристалла IGBT или применения новых полупроводниковых технологий. ■

Литература

1. Bayerer R. et al. Power Circuit design for clean switching / CIPS 2010. Nuremberg, Germany.
2. Bäbler M. et al. On the loss-softness trade-off: Are different chip versions needed for softness improvement? / PCIM 2009. Nuremberg, Germany.
3. Rusche W. et al. Influence of Stray Inductance on High-Efficiency IGBT Based Inverter Designs // Power Electronics Europe. 2010. Issue 7.
4. Thoben M. et al. Press-Fit Technology, a Solderless Method for Mounting Power Modules / PCIM 2005. Nuremberg, Germany.
5. Vogel K. et al. IGBT with higher operation temperature — Power density, lifetime and impact on inverter design / PCIM 2011. Nuremberg, Germany.
6. Ciliox A. et al. New module generation for higher lifetime / PCIM 2010. Nuremberg, Germany.
7. Guth K. et al. New assembly and interconnects beyond sintering methods / PCIM 2010. Nuremberg, Germany.
8. Vetter H. Mission-Profil bezogene PCC-Designs zur Integration in HEV-Converter // Automobil-Elektronik. 2007. № 6.
9. Vetter H. Zwischenspeicher für Hybride // Automobil-Elektronik. Dec. 2007.