

# Инвертор 250 кВт

## на основе SiC силового модуля Wolfspeed с индуктивностью 5,5 нГн

**В статье описан прототип инвертора мощностью 250 кВт, разработанный с применением карбидокремниевых (SiC) высокоскоростных, низкоиндуктивных силовых модулей. Он использован для демонстрации динамических свойств DC-шины, определяемых соотношением паразитных параметров контура коммутации и динамики переключения. Взаимодействие распределенных элементов структуры DC-шины и динамики коммутации в диапазоне, близком к радиочастотному (RF), может быть количественно измерено как во временной, так и в частотной области.**

**Ти МакНатт (Ty McNutt)**

**Крег Олейничак  
(Kraig Olejniczak)**

**Дэниель Мартин  
(Daniel Martin)**

**Гай Моксей (Guy Moxey)**

**Перевод:  
Евгений Карташев**

**В**ыбор внешних резисторов затвора драйвера в режиме включения и выключения, расположенных в цепи затвор-исток, непосредственно влияет на реакцию системы и определяет степень ее демпфирования. Паразитные параметры (ESR и ESL) пленочных конденсаторов звена постоянного тока, ламинированной шины, высокочастотных (HF) керамических развязывающих конденсаторов и силовых DC-терминалов модуля ухудшают динамические свойства системы, построенной с помощью высокоскоростных SiC-MOSFET. Важно с самого начала оптимизировать структуру DC-шины, а не пытаться компенсировать ее неудачную конструкцию.

Разработчикам следует обращать особое внимание на паразитные индуктивности силовых ключей

и всей системы, поскольку эти параметры определяют коэффициент использования тока и напряжения тока модулей по отношению к их номинальным характеристикам. Драйверы затворов, способные работать на сотнях килогерц, должны обеспечить высокую помехоустойчивость к большим значениям  $dv/dt$ ,  $di/dt$ , а также синфазным помехам. Несмотря на то, что быстрые ключи имеют низкие потери переключения, проблемы EMI становятся в этом случае более выраженными и могут влиять на поведение системы.

### 100% SiC силовые модули: проектирование «изнутри наружу»

На рис. 1 показано, как обеспечивается подключение SiC-кристаллов к остальным элементам устройства за пределами силовых терминалов высокопроизводительного силового модуля. Оптимальное проектирование системы идет «изнутри наружу»; оно начинается с выбора быстрых и мощных карбидокремниевых устройств, имеющих низкое сопротивление открытого канала; малое значение ESL внутренних цепей «затвор-исток» для обеспечения симметричной работы параллельных кристаллов (до 13); низкоимпедансные силовые терминалы ( $< 0,1$  мОм распределенное сопротивление и 5,5 нГн паразитная индуктивность) и термостойкие материалы корпуса, способные работать при температуре свыше  $+225$  °C. Чтобы наиболее полно реализовать преимущества силовых SiC-приборов, следует уделить особое внимание конструкции внешней DC-шины — ошибки при ее проектировании могут свести на нет усилия производителей карбидокремниевых силовых модулей.



**Рис. 1.** В 100% SiC-модуле CAS325M12HM2 с индуктивностью корпуса 5,5 нГн использована высокоскоростная распределительная плата для выравнивания динамических характеристик чипов

### Конструкция драйвера затворов

Из-за экстремально высоких скоростей коммутации  $di/dt$  и  $dv/dt$  критически важно обеспечить минимальную индуктивность цепи управления затвором для снижения уровня паразитных осцилляций, к которым очень чувствительны SiC-приборы. Это достигается минимизацией длины соединения между драйвером и выводами управления модуля (не более нескольких сантиметров) и установкой платы драйвера на поверхности модуля. Конструкция платы управления и выбор внутреннего резистора затвора имеют критическое значение для получения оптимальных характеристик ЕМI и минимизации потерь переключения.

Внешние резисторы затвора управляют скоростью заряда и разряда паразитных емкостей силового модуля, поэтому они определяют потери переключения системы. Чем меньше резистор затвора, тем выше скорость переключения и, соответственно, уровень коммутационного перенапряжения. Уменьшение емкости изоляции драйвера позволяет повысить помехозащищенность системы и ее устойчивость к шумам, генерируемым при переключении силовых SiC-модулей. Драйвер затвора Wolfspeed имеет изолирующую емкость порядка 17 пФ на канал. Использование дифференциальных сигналов управления и обратной связи дополнительно улучшает невосприимчивость к шумам на системном уровне благодаря подавлению синфазных помех, наводимых на проводах и входных клеммах драйвера.

### Структура DC-шины

Контур коммутации, включающий ламинированную DC-шину и батарею конденсаторов звена постоянного тока, должен иметь минимальное значение ESL по отношению к силовым терминалам модуля. Максимальное напряжение звена постоянного тока  $V_{DC}$  ограничено коммутационными всплесками, образующимися из-за накопления энергии в паразитных индуктивностях силовых цепей, связанных со стоком и истоком SiC MOSFET. Наличие распределенной индуктивности  $L_{\sigma}$  в сочетании с высоким значением  $di/dt$  негативно влияет на коэффициент использования тока и напряжения силового модуля. Основной проблемой является коммутационное перенапряжение  $\Delta V_{overshoot} = -L_{\sigma} \times di/dt$ , которое добавляется к  $V_{DC}$  при выключении транзистора. Это ограничивает максимально допустимое напряжение на DC-шине  $V_{bus}$ , поскольку максимальное значение  $V_{bus} + V_{ripple} + \Delta V_{overshoot}$  с учетом некоторого запаса по надежности не должно превышать номинальное рабочее напряжение модуля.

Здесь  $V_{ripple}$  — это пиковый уровень пульсаций напряжения, обусловленный прохождением переменного тока по ESR банка конденсаторов. Существует три способа снижения уровня коммутационных перенапряжений: минимизация  $L_{\sigma}$ , уменьшение тока нагрузки  $di$  и/или увеличение времени переключения

$dt$ . Однако снижение выходного тока нагрузки означает соответствующее уменьшение мощности нагрузки.

Снижение скорости выключения увеличивает динамические потери, что приводит к дополнительному нагреву кристаллов и влияет на общую эффективность системы. Ограничение  $di/dt$  путем уменьшения тока или скорости выключения сокращает коэффициент использования тока силового модуля. Таким образом, минимизация паразитной индуктивности имеет первостепенное значение.

### Выбор пленочных конденсаторов DC-шины

К основным компонентам, влияющим на общую производительность системы, относится конденсатор DC-шины. Как правило, в силовых электронных устройствах используются электролитические, металлизированные полипропиленовые (MPP) или керамические емкости. Оптимальный выбор конденсаторов звена постоянного тока очень важен и должен предусматривать компромисс между тремя факторами: стоимостью, электротермическими механическими характеристиками при максимальной температуре окружающей среды и надежностью, рассчитанной на основе максимальной температуры в наиболее нагретой точке (Hot Spot —  $T_{hs}$ ).

Разработчику силовой электронной системы следует учитывать зависимость максимальной блокирующей способности от температуры, стабильности емкости в соответствии с температурой и напряжением, допустимый уровень RMS пульсаций тока, сопротивление изоляции, а также надежность и срок службы. В то же время следует выбирать элементы с минимальными габаритами, весом, ESR, ESL и тепловым сопротивлением «горячая точка — корпус»  $R_{th}(hs-c)$ .

### Ламинированная DC-шина

Проектирование DC-шины представляет собой «мультифизическую» проблему, имеющую электрические, тепловые и механические аспекты. С «электрической» точки зрения DC-шина должна иметь низкий ESR (изготавливаться из материала с высокой электропроводностью и иметь

большую площадь сечения) и ESL (иметь тонкую и широкую планарную структуру). Основными конструктивными параметрами звена постоянного тока, влияющими на ESR и ESL, являются: толщина меди ( $t$ ), ширина ( $w$ ) и длина ( $l$ ) слоев  $V+$  и  $V-$ , а также расстояние между ними.

С «тепловой» точки зрения необходимо стремиться к минимальному перегреву (например, не более 80 К от комнатной температуры) при максимальном предпологаемом RMS тока, проходящего по шине. С точки зрения «механики» нужен высокий уровень устойчивости к ударам и вибрациям во время эксплуатации. Два исполнения DC-шины, соединяющей конденсаторы звена постоянного тока с силовым модулем SiC, показаны на рис. 2. Версия 1 (V1) — недорогая ламинированная медная шина была использована в первом прототипе для оценки производительности модуля, версия 2 (V2) имеет усовершенствованный дизайн, основанный на теоретическом анализе взаимодействия модуля, DC-шины и конденсаторов.

Отметим, что шина V1 не подводит ламинированную структуру к модулю, вместо этого она имеет тонкие «пальцы», соединенные с терминалами модуля и создающие таким образом цепи с высокой индуктивностью, для компенсации которой используются ВЧ-конденсаторы (две из трех плат снабберов, показанных слева на рис. 2). Эти снабберные конденсаторы нужны для изменения частотного диапазона DC-шины, что позволяет уменьшить величину перенапряжения при отключении. Для этого они должны быть физически установлены как можно ближе к DC-выводам модуля.

В средней части рис. 2 показан улучшенный дизайн DC-шины, где ламинированные параллельные слои объединены с конденсаторами звена постоянного тока вплоть до терминалов силового модуля. В этой конструкции устранены недостатки предыдущего варианта, она обеспечивает минимальную площадь токового контура между DC-выводами  $V+$  и  $V-$  модуля. Реализация такого подхода к проектированию позволила снизить суммарную индуктивность DC-шины и конденсаторов до 10 нГн.

На рис. 3 представлены амплитудная и фазовая частотные характеристики шин V1 и V2



Рис. 2. Начальная конструкция V1 (слева) и оптимизированная конструкция шины V2 (посередине) трехфазного инвертора на основе модулей Wolfspeed CAS325M12HM2. Справа показано распределение магнитного потока  $B_x$  для низкоиндуктивного варианта V2 (~3,5 нГн)

соответственно, с учетом импеданса конденсаторов DC-шины относительно выводов питания SiC-модуля. Очевидно, что импеданс цепи истока силового модуля определяется параметрами DC-шины в сочетании с эквивалентной

последовательной индуктивностью (ESL) конденсаторов звена постоянного тока. Для обеспечения минимального значения импеданса разработчик должен выбирать конденсаторы с низким значением ESL или использовать

их параллельное соединение для уменьшения эффективной паразитной индуктивности.

Снабберы уменьшают эффективную индуктивность до 6,8 нГн в радиочастотном диапазоне, но одновременно образуют резонансный контур, создающий токовые осцилляции между конденсаторами DC-шины и снабберными конденсаторами. Если без них не обойтись, то следует применить RC-цепь для снижения уровня радиочастотных колебаний, генерируемых при использовании чисто емкостного снаббера. Было выявлено, что благодаря собственному малому импедансу шины V2 низкий уровень перенапряжений и звона можно достичь без помощи снабберной цепи.

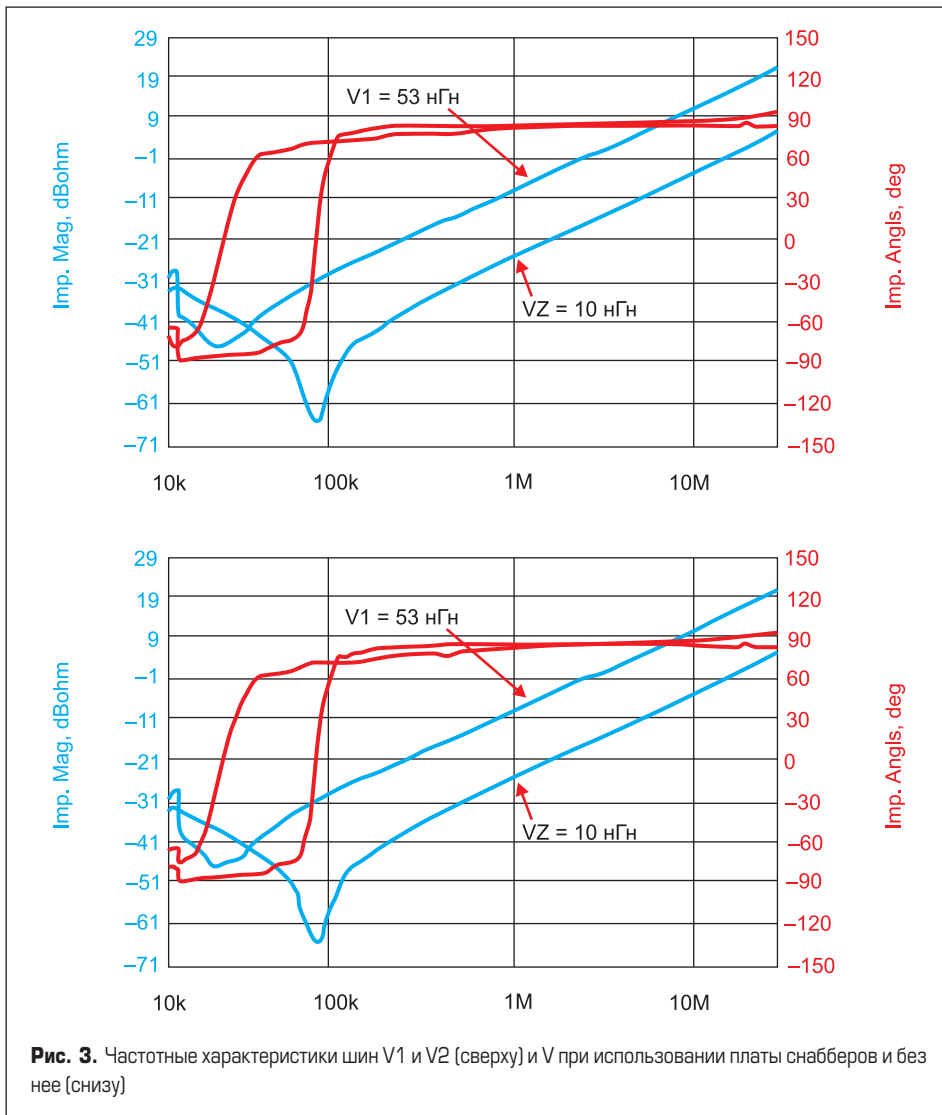
**Результаты тестирования**

Вариант конструкции V2 выполнен с применением трех полумостовых модулей CAS325M12HM2 для формирования трехфазной инверторной системы. Кроме силовых модулей и ламинированной DC-шины, в устройстве предусмотрен радиатор с жидкостным охлаждением и три полумостовых драйвера CGD15HB62LP, оптимизированных для управления SiC-ключами. На рис. 4 показаны результаты, полученные при работе однофазного инвертора с индуктивной нагрузкой (слева) и трехфазного инвертора (справа). Испытания инвертора, проведенные с ламинированной шиной V2 при напряжении на DC-шине  $V_{DC} = 900$  В и отключении высокоскоростного SiC-модуля с тока 304 А, демонстрируют очень низкий уровень перенапряжений (рис. 4, слева). Неискаженные эпюры трехфазного напряжения фазного тока при трехфазной мощности 250 кВт получены при частоте коммутации  $f_{sw} = 20$  кГц и  $V_{DC} = 700$  В (рис. 4, справа).

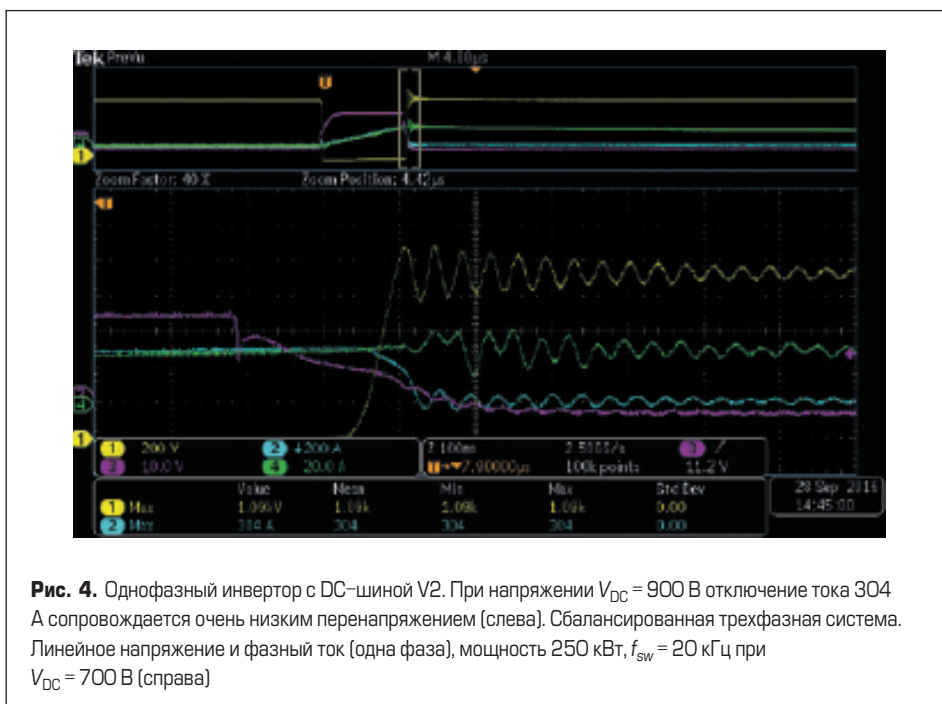
**Закключение**

Философия дизайна высокочастотного модуля была расширена до структуры DC-шины и конденсаторов звена постоянного тока для повышения коэффициента использования напряжения SiC силового модуля путем кардинального снижения уровня коммутационных перенапряжений, генерируемых из-за наличия паразитной индуктивности. Оптимизация структуры DC-шины и конденсаторов звена постоянного тока позволяет отказаться от внешних высокочастотных снабберных емкостей, что уменьшает стоимость и увеличивает плотность мощности системы.

Снижение распределенной индуктивности шины, исключение снабберов при сохранении высокой нагрузочной способности обеспечиваются за счет итеративного подхода к проектированию. Для демонстрации возможностей модулей SiC 1200 В при использовании оптимизированной DC-шины был разработан инвертор мощностью 250 кВт. Испытания инвертора продемонстрировали минимальный уровень коммутационных перенапряжений и чистую синусоидальную форму фазных токов.



**Рис. 3.** Частотные характеристики шин V1 и V2 (сверху) и V при использовании платы снабберов и без нее (снизу)



**Рис. 4.** Однофазный инвертор с DC-шиной V2. При напряжении  $V_{DC} = 900$  В отключение тока 304 А сопровождается очень низким перенапряжением (слева). Сбалансированная трехфазная система. Линейное напряжение и фазный ток (одна фаза), мощность 250 кВт,  $f_{sw} = 20$  кГц при  $V_{DC} = 700$  В (справа)