

Высокоэффективный DC/DC-конвертер

для средневольтных применений

Участие силовой электроники в электрических распределительных сетях будущего становится все более важным. Прежде всего, широкое распространение возобновляемых источников энергии, таких как солнечные батареи и ветрогенераторы, требует применения большого числа преобразователей между источниками и потребителями электрической энергии. Использование высоковольтных силовых полупроводниковых устройств на основе карбида кремния (SiC) позволяет создавать высокоэффективные преобразователи, которые можно подключать непосредственно к средневольтным сетям. Увеличение уровня напряжения позволяет снизить ток и, следовательно, сечение медных проводов. Кроме того, можно исключить применение трансформаторов 50/60 Гц. Потенциал этих устройств описан на примере DC/DC-конвертера мощностью 28 кВт, созданного с применением 10-кВ/10-А SiC-транзисторов. При входном напряжении 3,5 кВ и выходном напряжении 8,5 кВ КПД конвертера достигает 98,5% на частоте переключения 8 кГц.

Юрген Тома
(Jürgen Thoma)

Девид Чилашава
(David Chilachava)

Дирк Кранцер
(Dirk Kranzer)

Перевод:
Валерия Смирнова

cree@macrogroup.ru

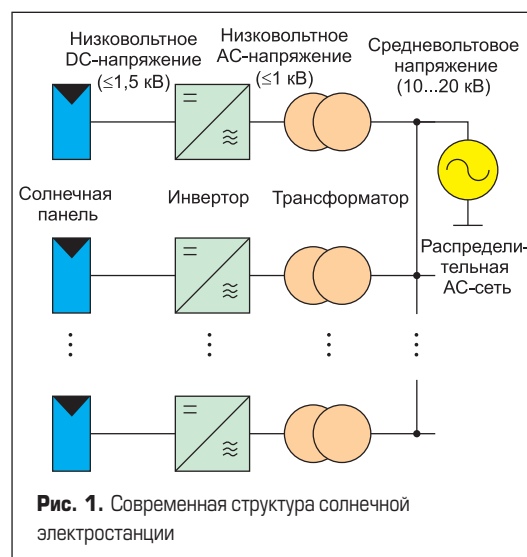
Высокое пробивное напряжение, большая ширина запрещенной зоны и отличная теплопроводность позволяют с успехом применять полупроводниковые SiC-приборы в средневольтных устройствах силовой электроники будущего. В последние годы были разработаны SiC MOSFET с напряжением 10 кВ и SiC IGBT с напряжением 15 кВ, которые имеют достаточный потенциал, чтобы заменить кремниевые приборы в высокоэффективных средневольтных преобразователях мощностью до нескольких мегаватт [1, 2, 3]. В качестве примера применения SiC-приборов в будущих системах возобновляемой энергии средневольтного диапазона

в следующем разделе обсуждается структура солнечных электростанций.

Современная архитектура солнечных электростанций

В современных солнечных станциях мощностью до 100 МВА и более распределение электрической энергии осуществляется на низком уровне напряжения. Однако они в основном вырабатывают энергию для средневольтных сетей (например, 20 кВ). Напряжение постоянного тока фотоэлектрического (PV) генератора (солнечной панели) обычно не превышает 1000 В. Выходы генераторов объединяются и подключаются к инвертору, который формирует трехфазное переменное напряжение, как правило, от 250 до 400 В (между фазами). Далее трансформатор 50/60 Гц преобразует это напряжение для подключения к средневольтной сети (рис. 1).

Фотоэлектрический генератор, инвертор, трансформатор и дополнительное распределительное устройство образуют единичный submodule. Его мощность, как правило, составляет около 1 МВА. Солнечные электростанции состоят из большого числа таких submodule, поэтому желательно увеличить их мощность, чтобы снизить стоимость системы [4]. Повышение мощности с неизменным уровнем напряжения приводит к увеличению токов, что требует применения медных кабелей большего сечения и ведет к росту тепловых потерь. Также неэффективно увеличивать мощность трансформаторов при существующих высоких коэффициентах трансформации, поскольку это упирается в физические ограничения [4].



Перспективная архитектура солнечных электростанций

Единственным разумным способом увеличения мощности субмодуля является повышение уровня напряжения в системе. Хотя директивы в отношении низковольтных устройств должны продолжать действовать, этот шаг дает много преимуществ. На рис. 2 показана концепция топологии солнечной электростанции с общей DC-шиной средневольтного уровня. Выходное напряжение фотоэлектрических модулей может быть в будущем увеличено [4].

DC/DC-преобразователи применяются для подключения PV-генераторов к общей распределительной сети постоянного тока. Поскольку объединение выходов генераторов происходит на высоком уровне напряжения, диаметры кабелей могут быть относительно небольшими. При использовании средневольтных преобразователей солнечная станция может работать непосредственно на сеть. В этой концепции низкочастотный трансформатор не нужен, что позволяет снизить затраты на основные материалы и медь. Общее число компонентов системы также будет уменьшено. Номинальная мощность одного средневольтного инвертора может составлять несколько мегаватт в зависимости от того, какие полупроводниковые модули будут доступны в будущем.

Характеристики SiC-приборов

Для разработки средневольтного преобразователя напряжения использованы 10-кВ/10-А SiC-транзисторы с антипараллельными 10-кВ/10-А диодами SiC JBS (рис. 3). Также был создан испытательный стенд для оценки потерь данных силовых полупроводниковых приборов. На рис. 4 и 5 показаны схема и конструкция стенда, позволяющего проводить измерения в режиме «2-импульсного» теста с индуктивной нагрузкой.

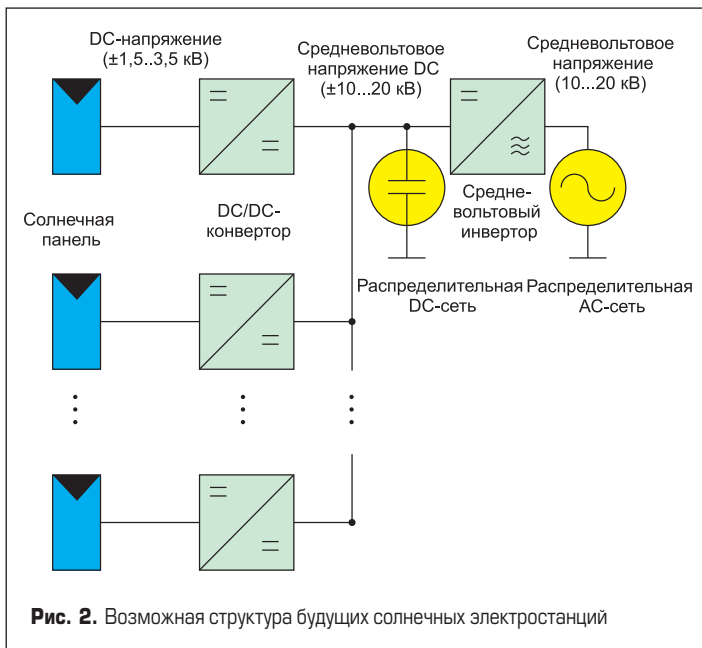


Рис. 2. Возможная структура будущих солнечных электростанций



Рис. 3. 10-кВ/10-А SiC MOSFET с интегрированным 10-кВ/10-А диодом SiC JBS

Основным узлом стенда является конденсаторная батарея. В начале испытаний конденсаторы заряжаются от высоковольтного источника, после чего MOSFET включается, и ток стока I_D , проходящий через индуктор, линейно возрастает. Эпюры тока I_D и напряжения «сток-исток» V_{DS} показаны на рис. 6. При достижении заданного значения тока транзистор выключается, а ток перекоммутируется в оппозитный диод, в данном случае это 10-кВ/10-А SiC JBS. Спустя несколько микросекунд транзистор включается и снова берет на себя ток нагрузки. Во время цикла коммутации I_D и V_{DS} должны контролироваться с помощью широкополосных, высоковольтных датчиков напряжения и тока.

После окончания испытаний блок конденсаторов необходимо безопасно разрядить через сопротивление, подключаемое через

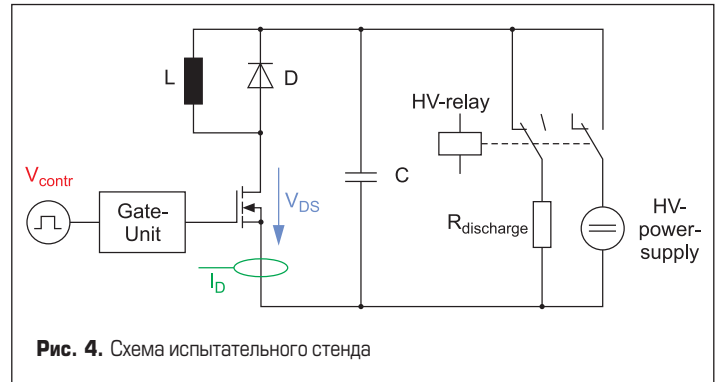


Рис. 4. Схема испытательного стенда



Рис. 5. Внешний вид испытательного стенда со средневольтными полупроводниковыми приборами

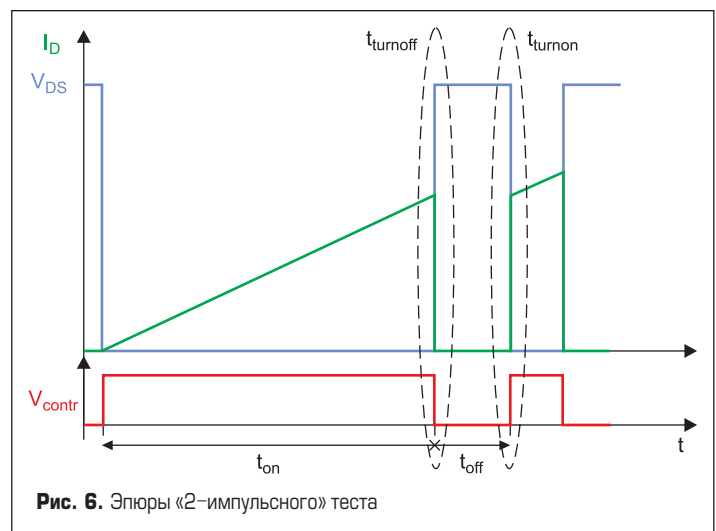


Рис. 6. Эпюры «2-импульсного» теста

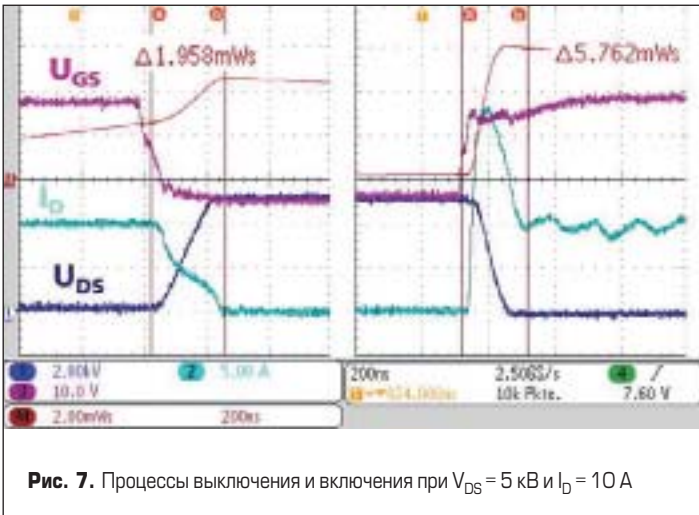


Рис. 7. Процессы выключения и включения при $V_{DS} = 5 \text{ кВ}$ и $I_D = 10 \text{ А}$

высоковольтное реле. Для измерений при различных температурах воле транзистора устанавливаются электронагревательные элементы.

Энергия переключения

Для управления MOSFET был разработан драйвер с выходным напряжением +18/-5 В и различными номиналами резисторов затвора

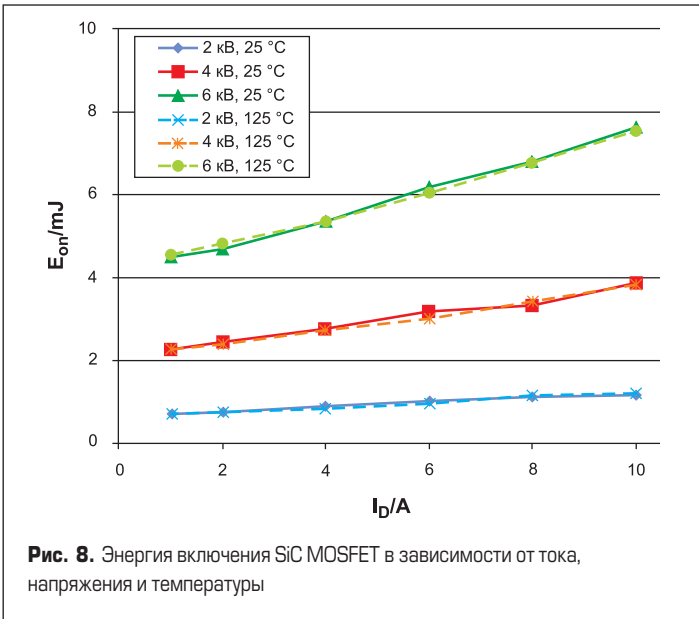


Рис. 8. Энергия включения SiC MOSFET в зависимости от тока, напряжения и температуры

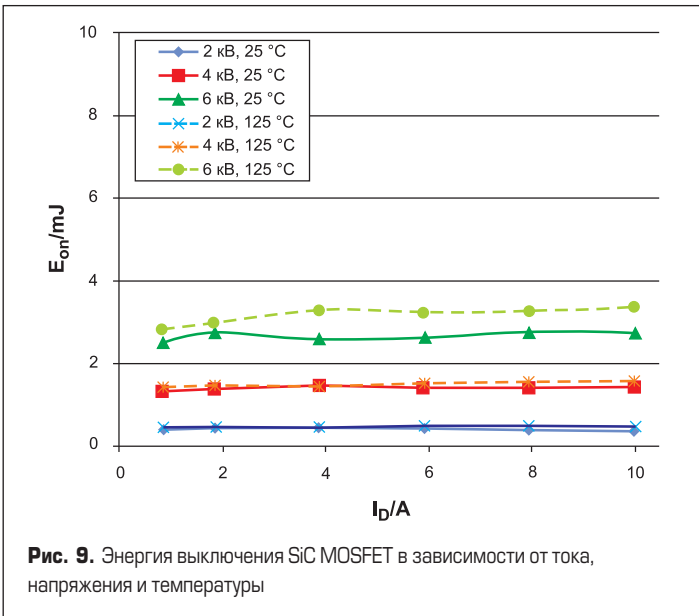


Рис. 9. Энергия выключения SiC MOSFET в зависимости от тока, напряжения и температуры

для режимов включения и выключения. Перед проведением измерений проводился расчет длительностей двойного импульса, которые должен формировать генератор для достижения нужного тока. Энергия переключения может быть определена путем интегрирования произведения тока стока и напряжения «сток-исток» за время коммутации:

$$E_{sw} = \int V_{DS}(t) \times I_D(t) dt.$$

Измерения проводились при комнатной температуре и температуре корпуса транзистора и оппозитного диода +125 °С. Токи варьировались до 10 А при различных напряжениях переключения. В качестве примера на рис. 7 показан процесс коммутации при 5 кВ и 10 А.

Рис. 8 и 9 получены по результатам серии испытаний.

Как и ожидалось, энергия включения и выключения увеличивается с ростом напряжения. В процессе включения видна линейная зависимость энергии от тока, энергия выключения относительно мало зависит от коммутируемого тока, также очень слаба зависимость от температуры. В целом, энергия динамических потерь очень мала по сравнению с кремниевыми устройствами.

Потери проводимости

Потери проводимости измерялись в низковольтном диапазоне напряжений. Вольт-амперные характеристики показаны на рис. 10. Температурная зависимость потерь проводимости оказывается значительно выше, чем потерь переключения. При измерениях температура варьировалась от +25 до +150 °С с шагом 25 К. При комнатной температуре сопротивление в открытом состоянии составляет 550 мОм, при +150 °С оно возрастает до 1620 мОм.

Конструкция DC/DC-конвертера

Для демонстрации отличных возможностей SiC MOSFET при использовании в средневольтном диапазоне напряжений был разработан повышающий DC/DC-конвертер, схема которого показана на рис. 11.

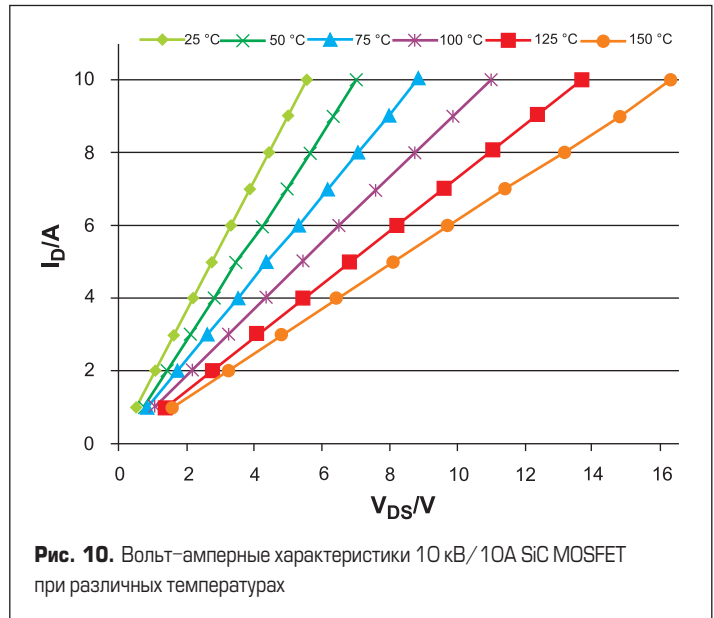


Рис. 10. Вольт-амперные характеристики 10 кВ/10А SiC MOSFET при различных температурах

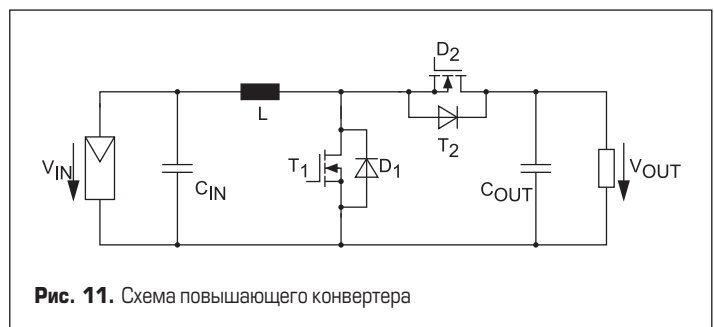


Рис. 11. Схема повышающего конвертера

Благодаря наличию второго транзистора MOSFET T_2 (антипараллельного диоду D_2) есть возможность использовать режим синхронного выпрямления. Обратный ток через T_2 способен уменьшить потери проводимости диода. Преобразователь имеет входное напряжение 3,5 кВ и выходное напряжение 8,5 кВ. Получить такие характеристики при использовании доступных кремниевых приборов можно путем последовательного соединения нескольких транзисторов.

Номинальная мощность преобразователя — 28 кВт. Эта величина обеспечивается максимальными параметрами 10-кВ/10-А SiC MOSFET с учетом небольшого запаса по надежности. Поэтому номинальный входной ток составляет 8,1 А при выходном токе 3,3 А. Благодаря низкой энергии переключения MOSFET выбрана рабочая частота 8 кГц. Это примерно в 10 раз выше, чем у обычных средневольтных преобразователей. Чем выше частота переключения, тем меньше номиналы пассивных компонентов. Это позволяет снизить расход материалов, а также размеры и стоимость индуктивностей и конденсаторов.

Расчетное значение индуктивности составляет 81 мГн для максимального размаха тока пульсаций, соответствующего 40% от входного тока. Высокочастотный индуктор имеет сердечник из аморфного материала, его размеры 331×212×162 мм, поэтому он занимает большую часть преобразователя по объему. В процессе эксплуатации дроссель активно охлаждается воздухом. Входные и выходные конденсаторы — пленочные, 1 мкФ. Это обеспечивает максимальное напряжение пульсаций 3%. Низкоиндуктивные керамические конденсаторы соединены параллельно.

Два MOSFET установлены на радиатор. В нижней части их корпуса потенциал стока достигает 8,5 кВ, это значит, что транзисторы должны быть электрически изолированы от теплоотвода. Кроме того, необходимо обеспечить достаточный отвод тепла от полупроводниковых элементов на радиатор. Для решения этих вопросов использован керамический диск из нитрида алюминия (AlN), имеющего отличную теплопроводность 200 Вт/м·К и напряжение пробоя 15 кВ/мм. Транзисторы

крепятся к AlN-диску и радиатору механическим способом с помощью прижимной пластины. Конструкция преобразователя с установленной на нем платой контроллера показана на рис. 12. Для управления конвертором необходимо контролировать входное напряжение, выходное напряжение и ток через T_1 .

Работа и измерения

Первое включение конвертера было сделано с разомкнутой системой управления с высоковольтным сопротивлением. Для формирования входного напряжения был использован высоковольтный источник питания. На рис. 13 показаны эпюры выходного напряжения и тока при частоте коммутации 8 кГц.

Для оценки эффективности преобразования был использован измеритель WT 3000. Входное напряжение контролировалось с помощью высоковольтного пробника напряжения 34136A, а выходное — с помощью P6015A. Потреблением мощности источника, питающего плату управления и драйвер, при оценке КПД можно пренебречь.

Результаты измерений показаны на рис. 14. В режиме номинальной мощности 28 кВт при входном напряжении 3,5 кВ и выходном напряжении 8,5 кВ получен очень высокий КПД — 98,5%. В этой рабочей точке температура радиатора поднимается до +52 °С, а температура индуктора до +55 °С в наиболее нагретой зоне. Общие потери при выходной мощности 28 кВт достигают 410 Вт. При моделировании в режиме двойного импульса более половины потерь генерируются полупроводниковыми элементами. Расчетное значение составляет 100 Вт для потерь проводимости и 140 Вт для коммутационных потерь. Потери в меди индуктора около 60 Вт, магнитные потери оцениваются на уровне 80 Вт. На рисунке представлена зависимость КПД от выходной мощности.

Дополнительная серия измерений была выполнена при входном напряжении 3 кВ и выходном напряжении 6 кВ, в этом случае уменьша-



Рис. 12. Конструкция повышающего конвертера 28 кВт

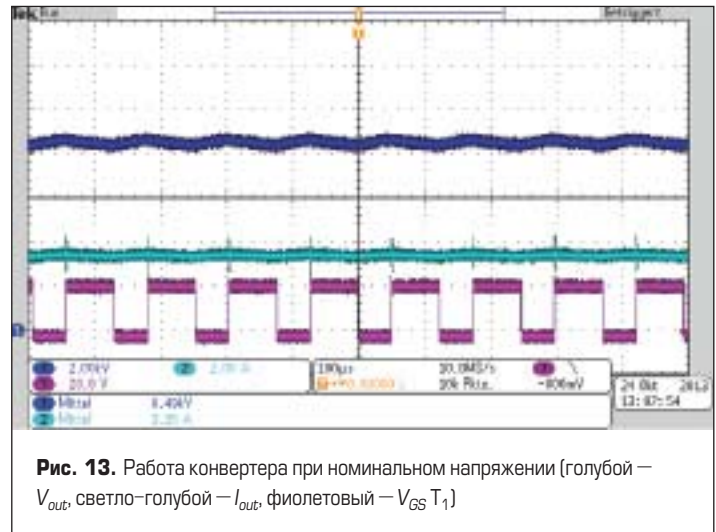


Рис. 13. Работа конвертера при номинальном напряжении (голубой — V_{out} , светло-голубой — I_{out} , фиолетовый — $V_{GS} T_1$)

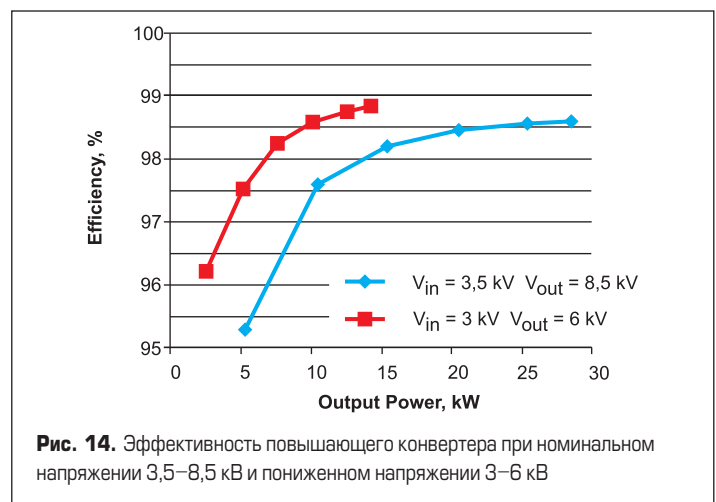


Рис. 14. Эффективность повышающего конвертера при номинальном напряжении 3,5–8,5 кВ и пониженном напряжении 3–6 кВ

ется не только напряжение, но и коэффициент заполнения. Ожидается, что в этой рабочей точке может быть достигнут еще более высокий КПД. Измерения, выполненные при мощности 14 кВт, показали максимальную эффективность 98,8%. Были проведены аналогичные исследования с 10-кВ SiC MOSFET [5] и также в повышающем преобразователе, но с намного меньшим выходным напряжением и мощностью. Тем не менее, основные характеристики приборов были подтверждены.

Заключение

Для демонстрации возможностей высоковольтных SiC-приборов разработан повышающий средневольтовый преобразователь мощностью 28 кВт. В конвертере применены доступные 10-кВ/10-А SiC MOSFET со встроенными JBS-диодами, а благодаря присущей им низкой энергии переключения была выбрана высокая частота коммутации 8 кГц. Это позволило создать компактный конвертер с КПД 98,5%. В будущем должны появиться более мощные модули для разработки преобразователей с большими номинальными мощностями [3]. Высокоэффективные SiC-преобразователи могут быть использованы во многих приложениях, связанных с возобновляемыми источниками энергии или стабилизацией средневольтовых электрических сетей.

Данная работа была осуществлена при поддержке внутренней программы Fraunhofer Markets of Tomorrow в рамках гранта № 823 813 проекта Supergrid.

Литература

1. R. Callanan, A. Agarwal, A. Burk, M. Das, B. Hull, F. Husna, A. Powell, J. Richmond, S. Ryu, Q. Zhang. Recent Progress in SiC DMOSFETS and JBS Diodes at CREE // Proc. 2008 IEEE Industrial Electronics Conf.
2. J. Wang, A. Huang, W. Sung, Y. Liu, and B. J. Baliga. Smart grid technologies // IEEE Ind. Electron. Mag. 2009. Vol. 3. № 2.
3. M. K. Das, C. Capell, D. E. Grider, R. Raju, M. Schutten, J. Nasadoski, S. Leslie, J. Ostop, and A. Hefner. 10 kV, 120 A SiC half H-bridge power MOSFET modules suitable for high frequency, medium voltage applications // Proc. IEEE ECCE. Sep., 2011.
4. J. Mayer. Projektstudie für zukünftige Systemtechnik und Netzanbindung regenerativer Kraftwerke. Diploma thesis, Fraunhofer.
5. Institute for Solar Energy Systems ISE. Freiburg, Germany. Apr., 2012.
6. J. Wang, J. Li, X. Zhou, T. Zhao, A. Q. Huang, R. Callanan, F. Husna, and A. Agarwal. 10 kV SiC MOSFET based boost converter // Proc. IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meeting, 2008.