

УДК 621.314.1

А. Б. Блинов, А. И. Чуб, Д. В. Винников, А. А. Гусев

Таллинский Технический Университет, Институт Электротехники, г. Таллин, Эстония

ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ДВУХТАКТНОГО КВАЗИ-ИМПЕДАНСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

В статье рассмотрен квази-импедансный преобразователь постоянного напряжения с широким диапазоном регулирования. Благодаря этой особенности его предложено использовать для интеграции с сетью ветровых турбин на базе синхронных генераторов с постоянными магнитами. Вследствие ряда особенностей, данный преобразователь стал платформой для испытаний и демонстрации преимуществ SiC-полупроводников нового поколения. Эксперименты показали значительное уменьшение потерь мощности в этих элементах, по сравнению с кремниевыми аналогами, что предсказывали предварительные расчеты КПД. Согласно испытаниям, благодаря применению SiC-приборов потери в силовых ключах были уменьшены на 66 %, а динамические потери диодов на 92 %.

Ключевые слова: широкозонные полупроводники, повышающий преобразователь, ветровые турбины.

У статті розглянуто квазі-імпедансний перетворювач постійної напруги з широким діапазоном регулювання. Завдяки цій особливості його запропоновано використовувати для інтеграції з мережею вітрових турбін на базі синхронних генераторів з постійними магнітами. Внаслідок ряду особливостей, даний перетворювач став платформою для іспитів та демонстрації переваг SiC-напівпровідників нового покоління. Експерименти показали значне зменшення втрат напруги в цих елементах, порівняно з кремнієвими аналогами, що передбачували попередні розрахунки КПД. Відповідно випробуванням, завдяки застосуванню SiC-приборів втрати в силових ключах були зменшені на 66 %, а динамічні втрати діодів на 92 %.

Ключові слова: широкозонні напівпровідники, підвищувальний перетворювач, вітрові турбіни.

Введение

Синхронные генераторы с постоянными магнитами (СГПМ) стремительно набирают популярность в отрасли ветроэнергетики благодаря возможности использования многополюсной конструкции. Такая конструкция имеет низкую скорость работы и позволяет применять безредукторную конструкцию ветровой турбины (ВТ). Основным недостатком является зависимость выходного напряжения от скорости вращения. В некоторых случаях отношение между минимальным и максимальным выходным напряжением может быть пятикратным. Данный недостаток можно компенсировать путём применения стабилизирующего преобразователя с широким диапазоном регулирования. Система интеграции ветровой турбины на базе СГПМ с сетью, как правило, имеет три этапа преобразования. На первом этапе происходит выпрямление выходного напряжения генератора. На втором – напряжение стабилизируется (повышается) на необходимом уровне, а на последнем этапе – инвертируется в переменное, с напряжением и частотой сети. Также преобразователь должен иметь функцию отслеживания точки максимальной мощности. Из множества схем преобразователей для ВТ на базе СГПМ наиболее интересны варианты с гальванической развязкой на высокочастотном трансформаторе (рис. 1).

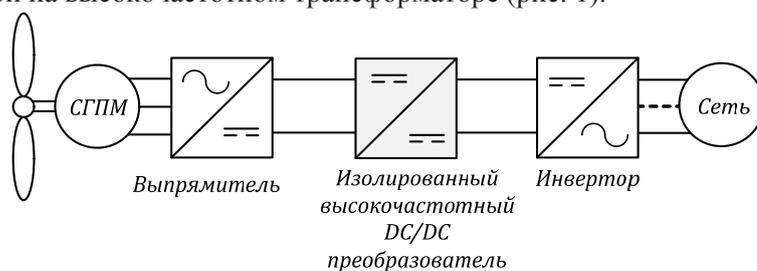


Рис. 1

Схема двухтактного преобразователя постоянного напряжения (рис. 2) получена путём объединения двух квази-импедансных (КИ) повышающих преобразователей со связанными дросселями. Входная и выходная части связаны через два высокочастотных силовых трансформатора

(ТХ1 и ТХ2), в которых высокие индуктивности намагничивания выполняют функцию накопителей энергии соответствующих КИ-звеньев [4]. К преимуществам данной топологии можно отнести широкий диапазон регулирования входного напряжения, непрерывный входной ток, малое количество компонентов и простоту управления ключами. В тоже время, преобразователь работает в режиме жесткой коммутации, что налагает ограничения на используемые силовые полупроводники. Их параметры должны быть сбалансированы под условия работы, чтобы обеспечить максимально возможный КПД преобразователя.

Последние достижения в сфере технологий производства полупроводников, в частности, политипа карбида кремния 4H-SiC, и непрерывное снижение цен позволили диодам Шоттки на основе карбида кремния (SiC) произвести прорыв на рынке преобразовательных систем в диапазоне напряжений 600-1700 В, благодаря заметно улучшенным характеристикам [1]. Активные ключи на базе SiC, например, MOSFET-транзисторы, доступны в диапазоне напряжений до 1,2 кВ [2]. При столь высоком блокирующем напряжении эти устройства обладают превосходными характеристиками во включенном состоянии, по сравнению с кремниевыми аналогами. По этой причине необходимо исследовать преимущества от применения этих устройств в экспериментальных преобразователях. Эта статья посвящена экспериментальному исследованию характеристик КИ-преобразователя в случае применения силовых полупроводниковых элементов на основе карбида кремния.

Описание эксперимента. Ветровые турбины на базе СГПМ могут работать в трех режимах: режим покоя, режим с переменной скоростью вращения, режим с постоянной скоростью вращения. Турбина находится в состоянии покоя в двух случаях: скорость ветра ниже скорости включения или выше скорости выключения турбины. Обычно ВТ начинает работать при скоростях ветра более 3,5 м/с и должна быть остановлена при превышении 25 м/с [2]. Скорость ветра, при которой турбина входит в синхронный режим зависит от типа ВТ, но зачастую составляет величину близкую к 12 м/с. При этой скорости турбина достигает номинальной выходной мощности, а при дальнейшем повышении скорости ветра сохраняет постоянной частоту вращения и максимальную выходную мощность. Режим работы с постоянной частотой вращения, когда генератор работает в синхронизме, соответствует диапазону скоростей ветра от номинальной (12 м/с) до максимально допустимой (25 м/с), когда турбина отключается. Рис. 3 и рис. 4 показывают графики мощности и её максимального значения при разных скоростях ветра для реальной ВТ с диаметром лопастей 2 метра, что соответствует предполагаемой области применения изучаемого преобразователя. На этом примере можно увидеть широкий диапазон выходного напряжения и режимы работы ВТ.

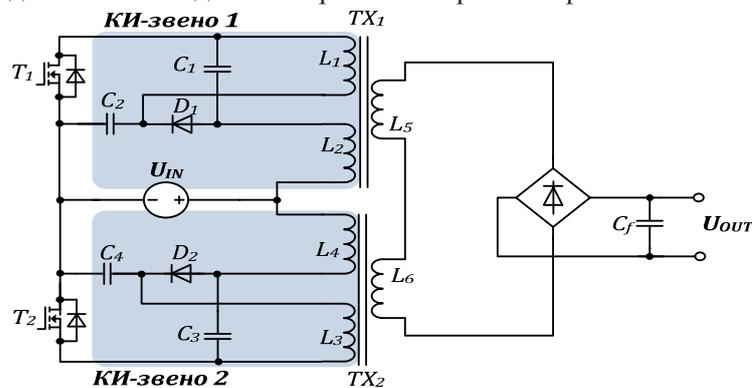


Рис. 2

Режимы работы генератора (табл. 1) были определены в зависимости от его скорости вращения и способности отбирать энергию. Статистически генератор работает в режиме малых скоростей 46 % времени, но при этом способен отбирать только до 22 % энергии ветра. При номинальной скорости, которая соответствует максимальной вероятности возникновения ветра, он работает не более 17 % времени и отбирает до 27 % энергии. При больших скоростях ветра, возможно отбирать до 51 % энергии ветра, но в этом режиме ВТ работает только 12 % времени. Такое распределение энергии показывает другую особенность систем ветровой энергетики, которая должна быть учтена при проектировании связанных преобразователей: большую часть времени преобразователь работает при частичной загруженности. Это выдвигает дополнительные требования к эффективности преобразования – она должна быть высокой в широком диапазоне мощностей.

Прототип DC/DC преобразователя. С целью проверки выдвинутых гипотез, согласно схеме на рис. 2 был спроектирован и изготовлен лабораторный прототип мощностью 1,3 кВт, работающий на частоте коммутации 100 кГц. В окончательной версии были использованы силовые полупроводниковые приборы только на базе карбида кремния. Также для них были подобраны сравнимые по параметрам кремниевые аналоги. Значения и типы выбранных компонентов показаны в табл. 2.

Таблица 1

	Покой	Низкая скорость	Номинальная скорость	Высокая скорость
Диапазон скорости ветра	0–3 м/с	3.5–6.5 м/с	7–8.5 м/с	9–25 м/с
Время работы в этом режиме	25 %	46%	17%	12%
Отбираемая энергия	0%	22%	27%	51%
Диапазон выходной мощности	0%	3–16%	16–35%	35–100%
Скорость вращения генератора	0	147–273 об/мин	273–357 об/мин	357–510 об/мин



Рис. 3

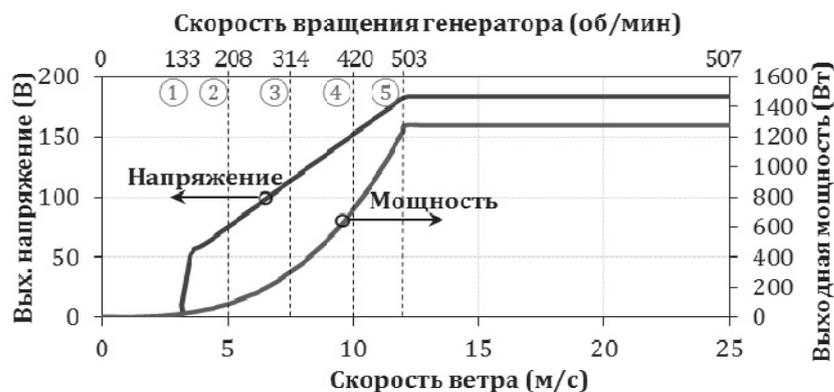


Рис. 4

Таблица 2

Компонент	Тип	Значение
КИ-конденсаторы C1...C4	Металлизированные полипропиленовые пленочные	60 мкФ/800 В
Трансформаторы TX1, TX2	Payton Planar	Соотношение витков обмоток ≈ 1:1:1 / Lm=1мГн
КИ-диоды D1, D2	CREE C4D10120D ST STTH1512W	18 А/1200 В 15 А/1200 В
Ключи T1, T2	CREE CMF10120D IXYS IXFK20N120	24А/1200 В 20 А/1200 В
Драйвер транзистора	IXDN609PI	9 А/35В
Выпрямительные диоды	CREE C4D10120D	18 А/1200 В
Конденсатор выходного фильтра C ₀	Металлизированный полипропиленовый пленочный	12.5 мкФ / 2×1000 В

Параметры транзисторов приведены в таблице. Выходное напряжение было установлено равным 400 В, что типично для систем интеграции с сетями переменного тока 230 В. В эксперименте преобразователь изучался в пяти точках работы ВТ, обозначенных как ①-⑤ на рис.3 и рис.4

Таблица 3

Устройство	CMF10120D	IXFK 20N120
Технология	SiC	Si
Пробойное напряжение сток-исток	1200 В	1200 В
Непрерывный ток стока (25°C)	24 А	20 А
Сопротивление во включенном состоянии	0.16 Ом	0.75 Ом
Задержка включения	7 нс	25 нс
Время нарастания	14 нс	45 нс
Задержка выключения	46 нс	75 нс
Время спада	37 нс	20 нс
Крутизна (125°C)	3.4 См	27 См
Заряд затвора	11.8 нКл	35 нКл
Максимальная температура кристалла	125°C	150°C
Корпус	ТО-247	ТО-264

Экспериментальное исследование коммутационных переходных процессов

Экспериментальные диаграммы токов и напряжений транзисторов и КИ-диодов при работе преобразователя на максимальной выходной мощности 1300 Вт представлены на рис. 5а и 5б, соответственно. На максимальной мощности преобразователь работает в режиме непрерывных токов, а перенапряжения на транзисторах не превышают 780 В, что соответствует диапазону допустимых значений. При коммутации ток обратного восстановления выходящегося диода протекает через соответствующий включающийся MOSFET-транзистор. Это увеличивает потери на включение транзистора, поскольку в момент включения ток стока имеет большую амплитуду. Поскольку в КИ-цепи используются ДШ, влияние процессов обратного восстановления сводится к минимуму. Тем не менее, высокая скорость нарастания тока при коммутационных процессах может приводить к нежелательным перенапряжениям, что ухудшает характеристики преобразователя. Поэтому потребовалось провести некоторое количество экспериментов, чтобы выявить наилучший режим работы, в котором достигается компромисс между потерями и перенапряжениями на элементах.

Были проведены испытания с использованием разных номиналов сопротивлений в затворах транзисторов. При этом все диоды в преобразователе были выполнены по SiC-технологии. При анализе процессов переключения особое внимание было уделено переходным процессам при включении. В процессе экспериментов для Si-транзисторов компромиссным вариантом оказалось значение сопротивлений в затворах равное 17 Ом.

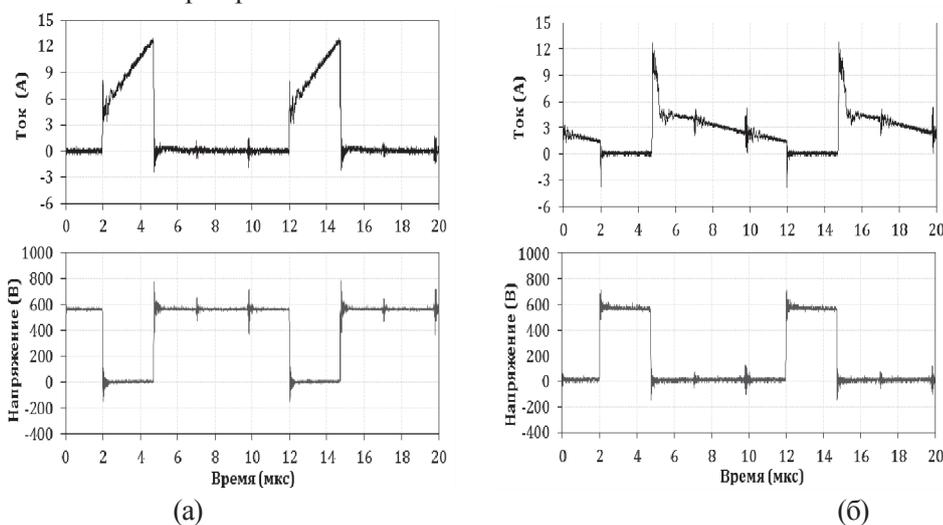


Рис. 5

Из-за более низкой крутизны передаточной характеристики SiC транзисторов оптимальным значением сопротивления в затворных цепях было выбрано 7 Ом. SiC-транзисторы показали скорость нарастания тока при включении заметно ниже, чем у Si-транзисторов, при равных сопротивлениях в затворах. Измеренная мощность потерь включения для обоих транзисторов с разными номиналами затворных сопротивлений показана на рис. 6а.

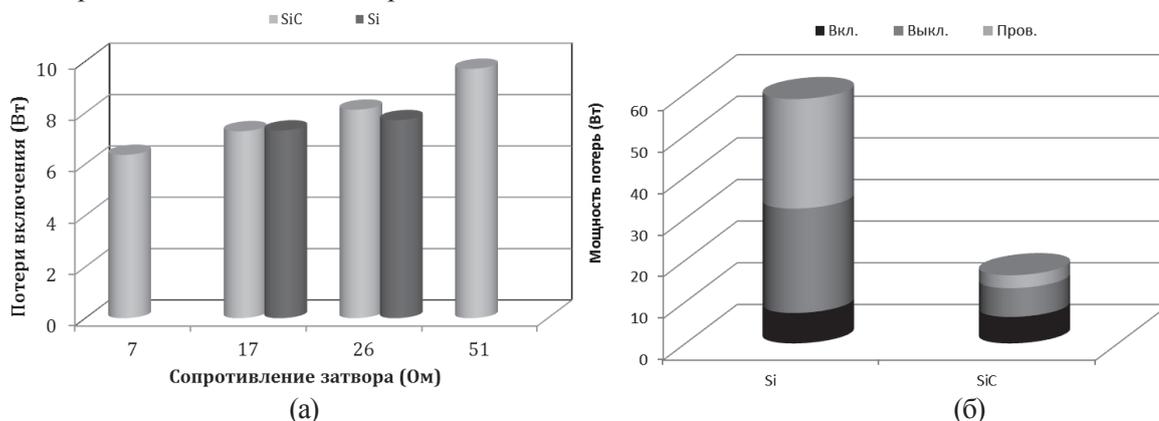


Рис. 6

Распределение мощности потерь в ключах представлено на рис. 6. Мощность потерь на выключение и потери проводимости доминируют у кремниевого транзистора. Карбид-кремниевый MOSFET-транзистор показал превосходство над кремниевым: потери на включение соответствуют 87 %, потери на выключение – 28 %, а потери проводимости – 17 % от значений для испытанного кремниевого MOSFET-транзистора.

Таким образом, применение транзисторов на базе SiC позволяет снизить потери в ключах на 66%. Следует отметить, что разделение затворных цепей включения и выключения могло бы несколько улучшить характеристики преобразователя с Si- транзисторами.

В исследуемой схеме процесс выключения КИ-диода определяется скоростью нарастания тока при включении соответствующего транзистора. Рис. 7а сравнивает процессы выключения у сверхбыстрого кремниевого диода (STTH1512) и карбид-кремниевого ДШ (C4D10120D). Сигналы приведены при работе преобразователя с входной мощностью порядка 300 Вт, что соответствует номинальной скорости вращения ВТ. Термический режим работы кремниевого диода не позволил провести эксперименты с более высокой мощностью. ДШ на базе SiC обладают значительным превосходством в характеристиках – мощность потерь выключения, вызванных процессом обратного восстановления, составила лишь 8 % от потерь сверхбыстрого Si-диода. В то же время его свойства в условиях прямой проводимости лишь немного уступают кремниевому диоду (при 125 °С). Вследствие этого использовать карбид-кремниевые ДШ в КИ-звене крайне желательно.

Требования к драйверу затвора транзистора. Благодаря высокой крутизне, кремниевые MOSFET-транзисторы могут легко управляться от драйвера с выходным напряжением от 0 до 10 вольт. Это позволяет использовать широкодоступные микросхемы драйверов. С другой стороны пониженная крутизна SiC-транзисторов делает необходимым использовать напряжение включения 20 В, а выключения – от -2 В до -5 В. SiC-транзисторы имеют максимальные напряжения затвора +25 В/-5 В, что близко к номинальным напряжениям управления. Следовательно, при проектировании печатной платы драйвера необходимо минимизировать её паразитные параметры, чтобы обеспечить надежную работу преобразователя.

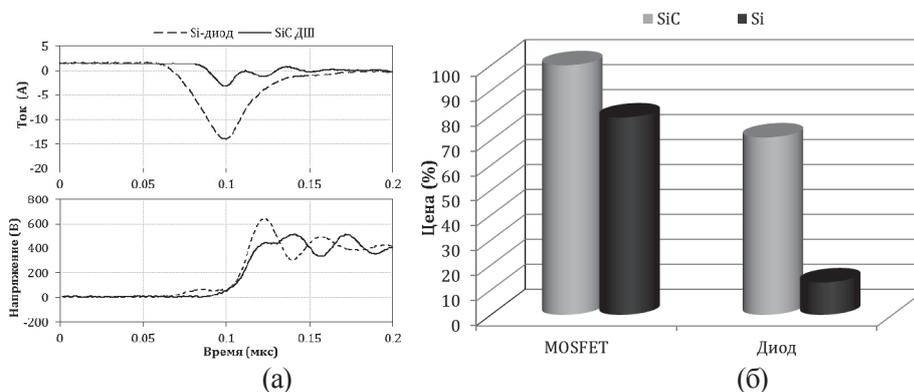


Рис. 7

В наших экспериментах SiC-транзистор управлялся двухполярным напряжением $-3,3 \text{ В}/+20 \text{ В}$. Несмотря на более широкий диапазон напряжений на затворе, заряд затвора SiC-транзисторов значительно ниже, чем у Si-транзисторов. Эксперименты показали, что SiC-транзисторы требуют вдвое меньше энергии для управления затвором, по сравнению с кремниевыми устройствами. При частоте коммутации 100 кГц потери управления парой Si- и SiC-транзисторов составили 240 мВт и 125 мВт соответственно. В обоих случаях использовался один драйвер $-3,3 \text{ В}/+20 \text{ В}$.

Типы корпусов. В связи с ограничениями в технологии производства карбид-кремниевых транзисторов, они доступны, как правило, в корпусах TO-247 с максимальной температурой кристалла 125°C . Это ограничивает максимальную рассеиваемую мощность ключа. Исследованный кремниевый MOSFET-транзистор был в корпусе TO-264, который на 75% больше по площади теплоотвода и имеет максимальную температуру кристалла 150°C . Это позволяет кремниевому транзистору рассеивать больше энергии при равных условиях охлаждения и одинаковой частоте коммутации. Таким образом, оба транзистора приемлемы для использования в исследуемом преобразователе. С другой стороны, транзисторы в корпусах с большей площадью могут создать конструктивные сложности при проектировании преобразователей.

Сравнение цен. Когда SiC-транзисторы были впервые представлены, их цена была значительно выше кремниевых аналогов. Можно видеть, что сейчас цены на SiC-транзисторы снизились практически до уровня сопоставимых по параметрам Si-транзисторов (рис. 7б). Цены на SiC ДШ все еще заметно выше цен кремниевых сверхбыстрых диодов. С другой стороны без их использования невозможно достичь высокой мощности в исследованном приложении, а их использование незначительно повышает цену преобразователя. Можно предположить, что тенденция к снижению цены на карбид-кремниевые устройства сохранится в ближайшем будущем, что сделает применение SiC-устройств оправданным в широком спектре приложений.

Распределение потерь и оценка характеристик преобразователя. Результат оценки распределения мощности потерь в полупроводниковых устройствах преобразователя на базе кремниевых транзисторов показан на рис. 8. Значения потерь на переключение для SiC-транзисторов и диодов были получены из экспериментальных осциллограмм. Согласно расчетам, применение SiC-транзисторов может повысить КПД на 7-17 %, в зависимости от рабочей точки, как показано на рис. 9а. Экспериментально измеренный КПД преобразователя показан на рис. 9б. Преобразователь имеет минимальный КПД в точке включения ВТ, а в широком диапазоне наиболее вероятных скоростей ветра он не ниже 85 %.

Рис. 10 показывает распределение потерь в преобразователе: в точке ① с мощностью потерь 10 Вт (рис. Рис. 10а), точке ③ с мощностью потерь 30 Вт (рис. Рис. 10б) и точке ⑤ с мощностью потерь 220 Вт (рис. Рис. 10в). Можно видеть, что при повышении выходной мощности вклад потерь в трансформаторах в общие потери преобразователя увеличивается и достигает 76% при максимальной выходной мощности.

Выводы

Была проведена серия экспериментов с целью оценки улучшения характеристик преобразователей от применения приборов на базе SiC. Платформой для исследований стал двух тактный квази-импедансный DC/DC преобразователь. Его предлагается использовать в составе связанного преобразователя для ВТ на базе СГПМ. Был изготовлен лабораторный прототип мощностью 1,3 кВт и частотой коммутации 100 кГц на базе полупроводниковых элементов из карбида кремния. Эксперименты проводились при параметрах, соответствующих нескольким рабочим точкам конкретной ветровой турбины. Предварительные расчеты предсказывали заметное снижение потерь в полупроводниковых элементах, что оправдалось на практике. Было произведено сравнение потерь в кремниевых и карбид-кремниевых транзисторах и проанализировано перераспределение потерь в SiC-приборах.

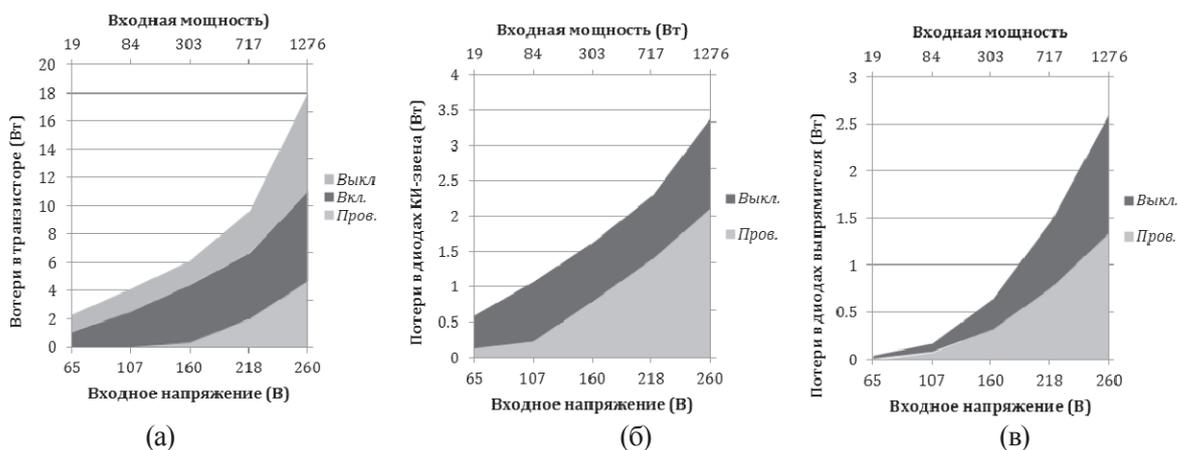


Рис. 8

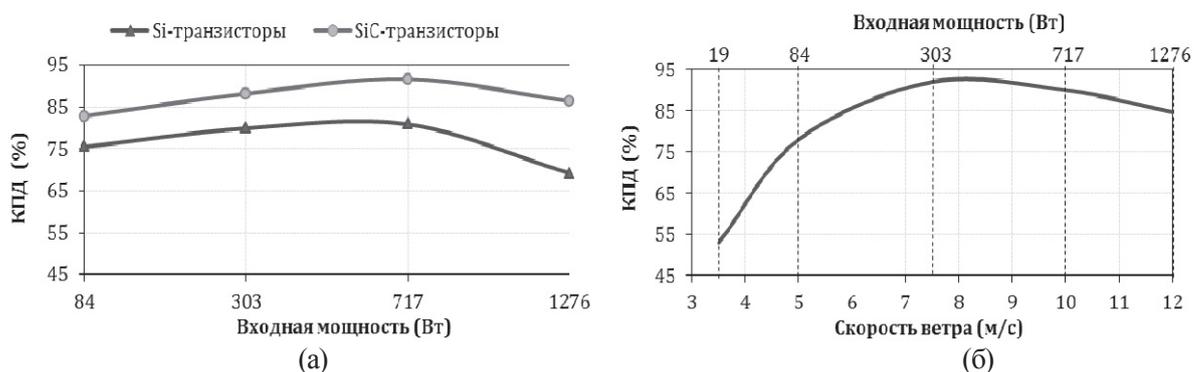


Рис. 9

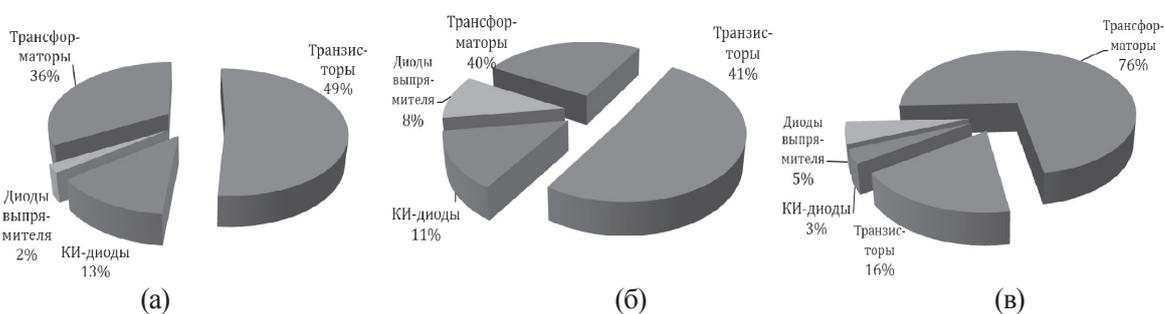


Рис. 10

Эксперименты показали, что в представленном преобразователе могут быть применены MOSFET-транзисторы как на базе кремния, так и на базе карбида кремния. Не смотря на более жесткие требования к сигналам управления затвором, SiC-транзисторы являются лучшим решением, поскольку позволяют снизить потери на 66 %, по сравнению с кремниевыми аналогами. С точки зрения улучшения КПД это весьма важное достижение, поскольку после замены транзисторов на карбид-кремниевые, их потери составили всего 16 % от общих в точке максимальной мощности. В то же время, ДШ на базе SiC в КИ-цепях превосходят по потерям коммутации сверхбыстрые кремниевые диоды на 92 % и практически не уступают по потерям проводимости, что делает их более подходящей альтернативой для КИ схем с широким диапазоном усиления. Не смотря на высокую стоимость карбид-кремниевых устройств, постепенное снижение цен позволяет уже сейчас рассматривать их как сравнимую альтернативу для практического применения в новых разработках. Следует отметить, что дальнейшее улучшение характеристик рассмотренного преобразователя возможно путем оптимизации потерь в трансформаторе, которые составляют 76% от всех потерь в точке максимальной выходной мощности.

Благодарности. Авторы благодарят Европейский центр силовой электроники (ЕСРЕ) за поддержку этого исследования. Особая благодарность Kunze Folien gmbh за предоставление образцов для экспериментов. Данная научно-исследовательская работа была софинансирована Министерством образования и науки Эстонии (проект SF0140016s11), научным фондом (грант ETF8538) и программой EAS Energiatehnoloogia.

Список литературы

1. Das M. K., Capell C., Grider D.E., Raju R., Schutten M., Nasadoski J., Leslie S., Ostop J., Hefner A. 10 kV, 120 A SiC half H-bridge power MOSFET modules suitable for high frequency, medium voltage applications // Proc. of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition 2011 (ECCE'11). – 17-22 Sept. 2011. – P. 2689–2692.
2. Manfred Stiebler. Wind Energy Systems for Electric Power Generation. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2008. – 212 p.
3. Ostling M., Ghandi R., Buono B., Lanni L., Malm B.G., Zetterling C.-M. SiC bipolar devices for high power and integrated drivers // IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting 2011 (BCTM'11). – 9-11 Oct. 2011. – P. 227–234.
4. Vinnikov D., Zakis J., Husev O., Strzelecki R. New high-gain step-up DC/DC converter with high-frequency isolation // Proc. of Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'12). – 5-9 Feb. 2012. – P. 1204–1209.

EXPERIMENTAL STUDY OF QUASI-Z-SOURCE DERIVED PUSH-PULL CONVERTER WITH SiC-BASED SEMICONDUCTORS

A. Blinov, A. Chub, D.Vinnikov, O. Husev
Tallinn University of Technology, Department of Electrical Engineering

This paper presents a quasi-Z-source DC/DC converter with wide input voltage regulation range. The proposed converter is intended to operate as power conditioning system for alternative and renewable energy sources, such as PMSG-based wind turbine systems. Due to a number of specific properties, the converter was used to test and show advantages of a new generation of SiC-based semiconductors. The experiments showed considerable reduction of losses in comparison to Si devices, as it was in expected from the analytical analysis. According to measurements by implementation of SiC-devices the losses in transistors were reduced by 66% and switching losses in diodes by 92 %.

Keywords: wide bandgap semiconductors, step-up converter, wind turbine.