

# Автомобильный тяговый преобразователь

## с использованием технологии SiC от компании Rohm

**В статье рассмотрены преимущества и прикладные аспекты практического применения недавно разработанного силового SiC-модуля производства компании Rohm и его использование в преобразователе силовой передачи. Приведено сравнение производительности карбид-кремниевых и классического кремниевого (Si) преобразователей.**

**Али Машали**  
(Aly Mashaly)

**Масахару Наканиши**  
(Masaharu Nakanishi)

**Адаптированный перевод:**  
**Роман Плавинский**

prv@gamma.spb.ru

**Александр Морозов**

mas@gamma.spb.ru

### Вступление

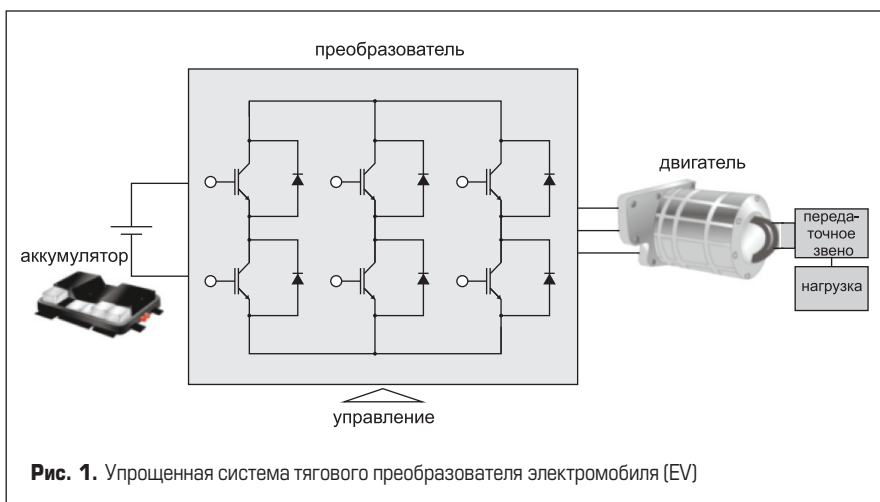
Первый карбид-кремниевый силовой транзистор (Silicon Carbide, SiC) появился на рынке в 2010 году и сразу же инициировал революцию в области силовой электроники, что привело к массовому использованию SiC-устройств в различных областях промышленных приложений и автомобилестроения. Жизнь показала, что SiC-компоненты являются серьезным конкурентом классическим кремниевым решениям. Одна из наиболее перспективных областей, где применение высокоэффективных силовых SiC-устройств может обеспечить заметное преимущество, — разработка систем управления и силовых приводов электромобилей (Electric Vehicle, EV).

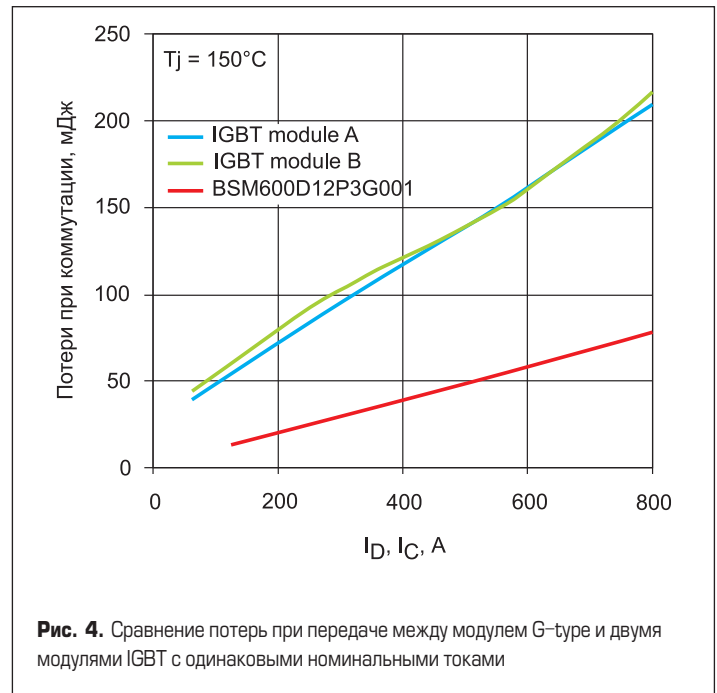
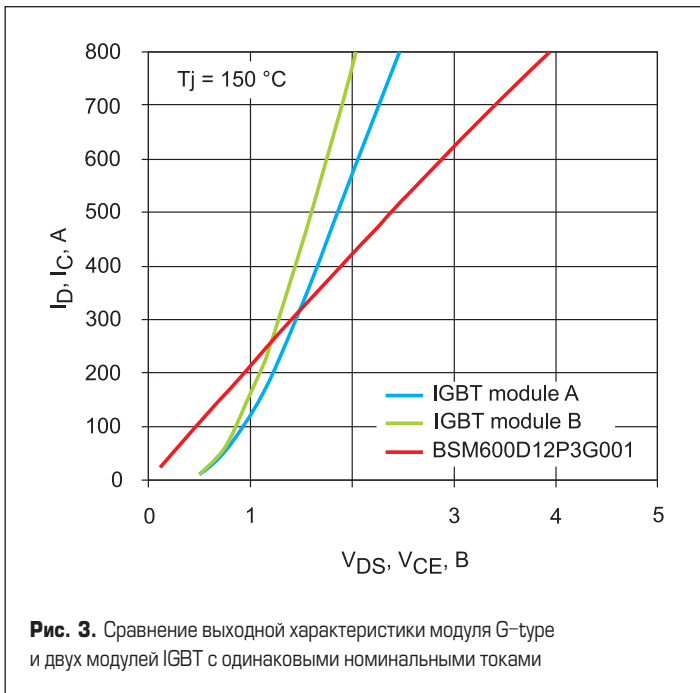
### Общие положения

К проектированию тяговых преобразователей двигателя предъявляется ряд требований, наиболее важные из которых — высокая надежность в компактном форм-факторе, малая масса при высоком КПД. Кроме того, затраты на разработку и производство продукта

должны оставаться низкими, при сохранении всех преимуществ ранее существовавших решений или достижения их более высоких показателей. Перечисленное определяет более строгие требования к проектированию на уровне отдельных узлов и системы в целом и в конечном итоге влияет на все решение, включая силовые устройства, пассивные компоненты, технологию охлаждения и конструктивные особенности печатных плат. Для достижения кардинального улучшения системы в целом полупроводниковые устройства должны обеспечивать более высокую мощность, эффективность и надежность при функционировании в условиях перегрузок и в неблагоприятной среде.

Упрощенная структурная схема тягового силового узла показана на рис. 1. Использование силовых SiC-компонентов в инверторе силовой передачи приводит к повышению его эффективности и помогает получить более компактное решение благодаря меньшим потерям при передаче, лучшим показателям проводимости и теплопроводности рабочего объема. Как результат мы получаем увеличение дальности движения при той же емкости батареи либо заметное уменьшение размера и массы батареи при





той же дальности пробега. Таким образом, повышение эффективности и уменьшение массы в итоге приводят и к экономической выгоде для конечных пользователей и отрасли в целом.

**Сравнение IGBT- и SiC-модулей**

BSM600D12P3G001 — новый полумостовой модуль в корпусе G-type от компании Rohm, функционирующий на основе технологии SiC Trench Gate MOSFET [1, 2] и барьерного диода Шоттки (SBD), — представлен на рис. 2.

Номинальный постоянный ток стока составляет 600 А при  $T_C = +50\text{ }^\circ\text{C}$ . На приведенных ниже диаграммах дано сравнение модуля G-type с двумя доступными на рынке IGBT-модулями последнего поколения с одинаковыми номинальными токами. На рис. 3 — сравнение выходных характеристик по потерям проводимости SiC MOSFET- и IGBT-модулей при температуре  $+150\text{ }^\circ\text{C}$ .

Сравнение передаточных потерь при температуре перехода  $+150\text{ }^\circ\text{C}$  представлено на рис. 4. Как видно, суммарные потери модуля G-type с SiC-устройствами оказываются ниже на 65%, чем у IGBT-модулей при номинальном рабочем токе 600 А. Благодаря меньшим передаточным потерям модуль SiC может работать при гораздо более высоких частотах переключения.

**Тяговый преобразователь**

На рис. 5 показано два тяговых преобразователя. Левый рассчитан на нагрузки до 200 кВт и использует силовые модули с Si IGBT и Si с быстрым восстановлением (FRD). Описанный преобразователь работает



в полевых условиях с 2013 года. Правый преобразователь — новинка, разработанная на основе модулей SiC и рассчитанная на нагрузку до 220 кВт. В дополнение к использованию SiC Trench Gate MOSFET и SiC SBD, в новом преобразователе успешно реализована инновационная концепция управления двигателем, эффективная система охлаждения, применена конструкция шины с малой индуктивностью и меньший номинал конденсатора в цепи постоянного тока. Оба преобразователя относятся к системам с водяным охлаждением и могут работать совместно с батареями напряжением до 800 В [3].

В таблице приведено сравнение характеристик описанных преобразователей. Новый преобразователь работает на частоте, которая может варьироваться в зависимости от модели и режима работы двигателя в пределах 16–24 кГц. При этом даже в нижнем диапазоне частот вращения вала ротора преобразователь использует частоту 16 кГц, чтобы избежать риска возникновения резонанса между контурами, включающими конденсаторы цепей постоянного тока, и комплексным импедансом входных кабелей. Хотя доступная максимальная выходная мощность преобразователя на основе SiC MOSFET оказывается на 20 кВт выше, он имеет заметно меньший объем и меньший вес, чем преобразователь на основе Si IGBT. Масса устройства уменьшилась на 6 кг. Перечисленные факторы привели к созданию преобразователя с высокой удельной мощностью — 22 кВт/л, что на 57% выше, чем у традиционного решения на основе IGBT.

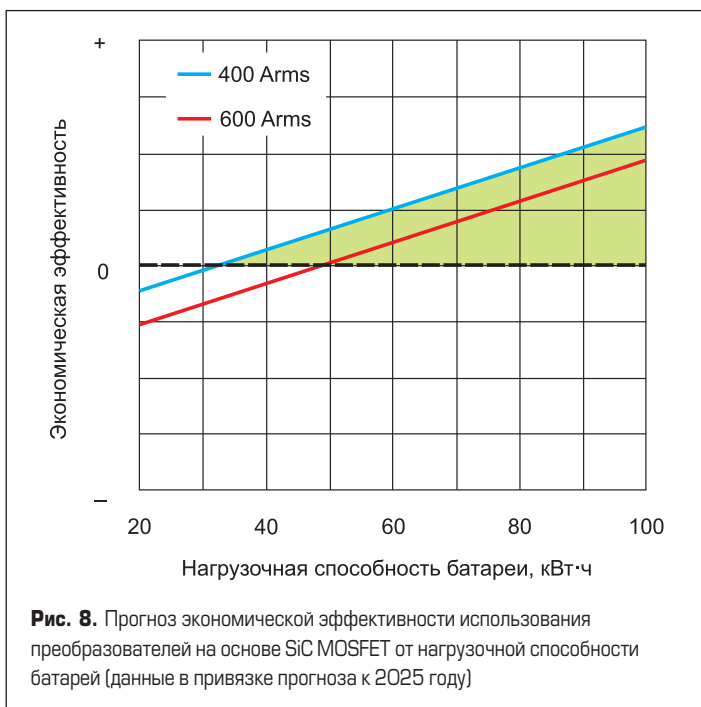
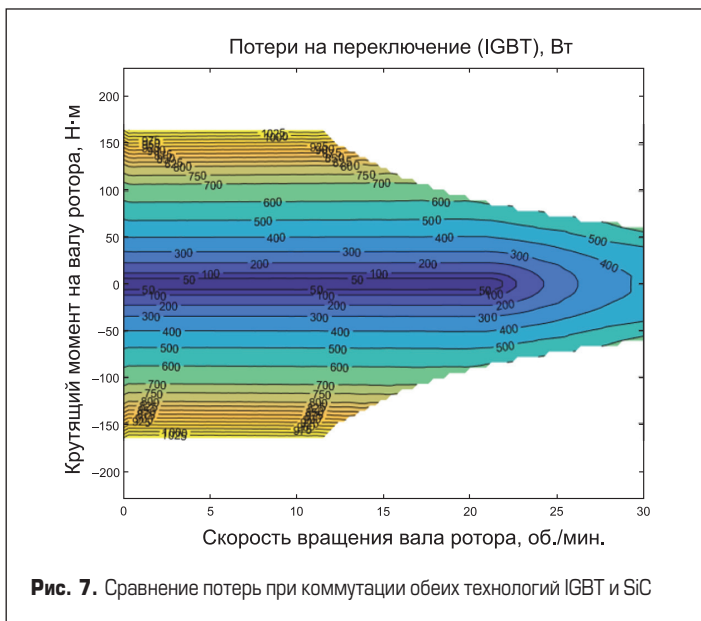
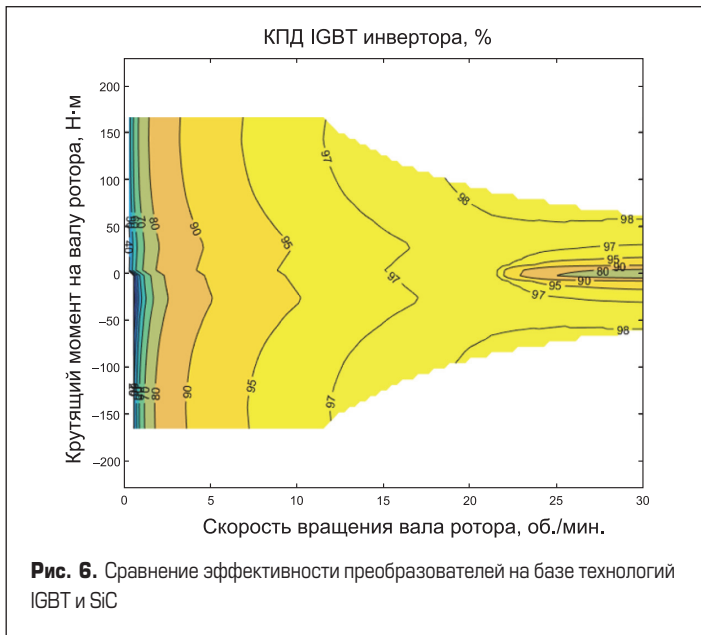
**Производительность (КПД и потери)**

На рис. 6 и 7 проиллюстрированы изменения КПД преобразователей и потеря мощности транзисторов в зависимости от скорости вращения вала ротора и его крутящего момента в основных рабочих точках. При сравнении эффективности решений и характерных для них потерь использован рабочий профиль, базирующийся на той же конструкции двигателя.

На рис. 6 видно, что преобразователь на основе SiC MOSFET имеет КПД более 98% при скорости вращения вала ротора 10 об/мин, а максимальный КПД — до 99,1%.

**Таблица.** Сравнение характеристик обоих преобразователей

Преобразователь	Si IGBT	SiC MOSFET
Выходная мощность, кВт	200	220
Максимальный КПД, %	98	99,1
Рабочее значение КПД, %	96,9	98,2
Частота передачи, кГц	16	24
Масса, кг	15	9,1
Плотность мощности, кВт/л	14	22



На рис. 7 приведены потери мощности транзисторов для обоих преобразователей. При высоком крутящем моменте потери каждого SiC MOSFET (передаточные потери) на 400 Вт ниже, чем для каждого Si IGBT. В итоге, учитывая, что большая часть потерь происходит при передаче, инвертор на основе SiC MOSFET имеет на 2400 Вт меньшие потери, чем инвертор на основе Si IGBT. Более низкие потери приводят к сокращению температуры чипа при использовании той же системы охлаждения и увеличению устойчивости системы к перегрузкам. Что касается системы охлаждения, у преобразователей на основе SiC MOSFET она установлена снаружи, что дает выигрыш в габаритах более чем в 30% по сравнению с преобразователями на основе Si IGBT.

**Преимущество SiC на системном уровне**

В настоящее время ведется большое количество работ по повышению емкости и нагрузочной способности аккумуляторов [4]. Однако этот же эффект может быть достигнут и за счет высокой эффективности преобразователей на основе SiC MOSFET, позволяющей уменьшить размер батарей системы EV при сохранении показателей дальности пробега электромобилей. При этом адекватное получаемому выигрышу снижение емкости используемых аккумуляторов может привести к существенной экономической выгоде.

На рис. 8 приведен прогноз экономической выгоды, полученной за счет уменьшения размера батареи благодаря использованию более эффективного преобразователя. Выгода показана для разных размеров батареи, в привязке к прогнозам по состоянию к 2025 году. Предполагаемый коэффициент улучшения использования емкости аккумулятора составляет 3–5% в зависимости от КПД преобразователя и стандартного цикла вождения (штатного использования) для пассажирских транспортных средств [5].

Для типового размера микросхемы SiC MOSFET в 25 мм<sup>2</sup> и номинального напряжения 1200 В учитывались значения выходного тока в 100 A<sub>rms</sub> (среднеквадратическое значение тока в амперах). Из приведенной диаграммы видно, что преобразователь, рассчитанный на 400 A<sub>rms</sub>, может обеспечить экономическую выгоду на системном уровне при использовании батарей емкостью не менее 32 кВт·ч. Для преобразователя, рассчитанного на токи в 600 A<sub>rms</sub>, выигрыш покажут батареи с нагрузочной способностью, превышающей 48 кВт·ч.

**Заключение**

В сравнении с традиционными решениями на Si IGBT разработанный компанией Rohm карбид-кремниевый модуль, помимо характерных для новой технологии существенно меньших внутренних потерь, благодаря новому корпусу G-type, имеет и меньшую индуктивность в сочетании с более высокой способностью рассеивать тепловые потери. Тяговый преобразователь, использующий новый модуль, при выходной мощности 220 кВт достигает эффективности 99,1%. Кроме того, преобразователи на основе SiC MOSFET имеют меньший вес и объем, чем конструкции на основе Si IGBT. При типовых решениях плотность мощности составляет 22 кВт/л, что на 57% выше, чем у решений на базе Si IGBT. Новый преобразователь экономически выгоден не только для конечных пользователей, но и для EV-индустрии в целом, поскольку увеличивает дальность пробега электромобилей при фиксированной емкости батареи либо позволяет уменьшить ее размер при сохранении заданных ходовых параметров электромобиля.

**Литература**

1. Nakamura T., Nakano Y., Aketa M., Nakamura R., Mitani S., Sakairi H., Yokotsuji Y. High performance SiC Trench devices with ultra-low Ron. IEDM, 2011.
2. Nakamura R., Nakano Y., Aketa M., Kawamoto N., Ino K. 1200 V 4H-SiC Trench Devices. PCIM Europe, 2014.
3. Nakanishi M., Hayashi K., Enomoto A., Hayashiguchi M., Ando M., Ino K., Felgемacher C., Mashaly A., Richard G. Automotive Traction Inverter utilizing SiC Power Module. PCIM, 2018.
4. New Energy and Industrial Technology Development Organization: "Secondary battery technology development roadmap 2013"
5. World Harmonized Light Duty Test Procedure.