

1200-В ДИСКРЕТНЫЕ SiC MOSFET В СРАВНЕНИИ С ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ IGBT СЕМЕЙСТВА H3 ДЛЯ СЕРВОПРИВОДНЫХ СИСТЕМ

БЛАЖ КЛОБУЧАР (BLAŽ KLOBUČAR), д-р ЧУЙ ЮАНЬ (DR. ZHINHUI YUAN), Infineon Technologies

В статье рассматриваются преимущества использования ключей CoolSiC MOSFET по сравнению с высокоскоростными IGBT-ключами семейства H3 в сервоприводных системах. В частности, благодаря снижению потерь применение CoolSiC MOSFET открывает новые возможности по усовершенствованию систем.

ВВЕДЕНИЕ

Приложения с сервоприводами должны иметь не только определенные массогабаритные показатели, но и работать в условиях ограниченных возможностей охлаждения. Дискретные CoolSiC MOSFET в полной мере соответствуют этим требованиям и улучшают рабочие характеристики систем. Снижение потерь позволяет реализовать конструкцию, которой не требуется вентилятор для принудительного охлаждения и, следовательно, техническое обслуживание. Кроме того, электродвигатель и привод можно объединить, уменьшив размер управляющей стойки и упростив прокладку кабелей.

CoolSiC MOSFET В СЕРВОПРИВОДАХ

Одним из приложений, на работу которых большое влияние оказывают параметры CoolSiC MOSFET, являются системы сервоприводов. В этих приложениях обычно установлены эффективные компактные инверторы, например те, которые применяются в промышленных роботах и системах автоматизации. Снизить потери на проводимость и коммутацию можно во всех режимах работы, включая режимы разгона, постоянной скорости и торможения.

Использование CoolSiC MOSFET в сервоприводах дает следующие преимущества:

- большой крутящий и тормозной моменты, которые являются ключевыми параметрами сервопривода;
- высокая надежность, малые эксплуатационные расходы благодаря приводу без вентилятора.

CoolSiC MOSFET в сервоприводах также допускают интеграцию двигателя и привода, благодаря которой

от управляющей стойки идет только один кабель, что снижает затраты за счет простоты подключения и повышает надежность системы благодаря использованию меньшего числа кабелей или менее сложной кабельной разводки. Кроме того, не требуется стойка для управления инвертором (или используется стойка меньшего размера).

Сервоприводы обычно работают более 90% времени в режиме постоянной скорости с малым крутящим моментом, т.е. при низком токе. В режиме разгона и торможения привод, как правило, работает в диапазоне гораздо большего тока. Динамические потери можно уменьшить на 50% по сравнению с Si IGBT даже при низкой скорости коммутации (5 кВ/мкс).

СРАВНЕНИЕ ДИСКРЕТНОГО 1200-В Si IGBT С SiC MOSFET

По сравнению с предлагаемыми решениями с использованием Si IGBT, CoolSiC MOSFET обеспечивают наилучшие показатели во многих приложениях. Благодаря тому, что CoolSiC MOSFET имеют резистивную характеристику, их потери на проводимость до 80% меньше, чем у IGBT при малых токах. В результате CoolSiC MOSFET позволяют значительно уменьшить общие потери в системе, поскольку сервоприводы функционируют более 90% времени при относительно низком токе. По сравнению с Si IGBT, у 1200-В CoolSiC MOSFET, используемых в преобразователях мощности, – гораздо меньше динамические потери, что обусловлено униполярной структурой MOSFET, в которой неосновные носители заряда не участвуют в процессах переключения. Коммутационные потери CoolSiC MOSFET не растут с температурой, как у IGBT.

КОММУТАЦИЯ

Ключу CoolSiC MOSFET не требуется дополнительный диод: используется внутренний диод, который работает как антипараллельный. Использование внутреннего диода в MOSFET позволяет значительно уменьшить заряд Q_{RR} по сравнению с внутренними диодами кремниевых MOSFET. Было установлено, что благодаря использованию CoolSiC MOSFET вместо Si IGBT позволяет сократить размер радиатора на 63% [3] и вес до 65% [4].

Для таких приложений как серводвигатели и промышленные роботы-манипуляторы, где возможности охлаждения ограничены, а эффективность важна, использование CoolSiC MOSFET дает огромные преимущества, особенно если массогабаритные показатели являются ключевыми приоритетами.

Из-за длинных кабелей электродвигателя в нем возникают высокие пиковые напряжения, которые неблагоприятно воздействуют на изоляцию обмоточных проводов и подшипники электродвигателя, создавая ударные моменты. Для защиты привода требуется, чтобы скорость переключения не превышала 5 кВ/мкс. Если CoolSiC MOSFET работает при малом значении dv/dt , его коммутационные потери увеличиваются. Однако потери на переключение у CoolSiC MOSFET ниже более чем на 50% в сравнении с высокоскоростными IGBT при 5 кВ/мкс. На рисунке 1 сравниваются коммутационные характеристики Si IGBT с CoolSiC MOSFET при 5 кВ/мкс.

Кроме того, у CoolSiC MOSFET коммутационные потери не зависят от температуры и меньше выбросы напряжения благодаря более плавному спаду тока. У напряжения при коммутации IGBT – более высокие выбросы, и скорость переключе-

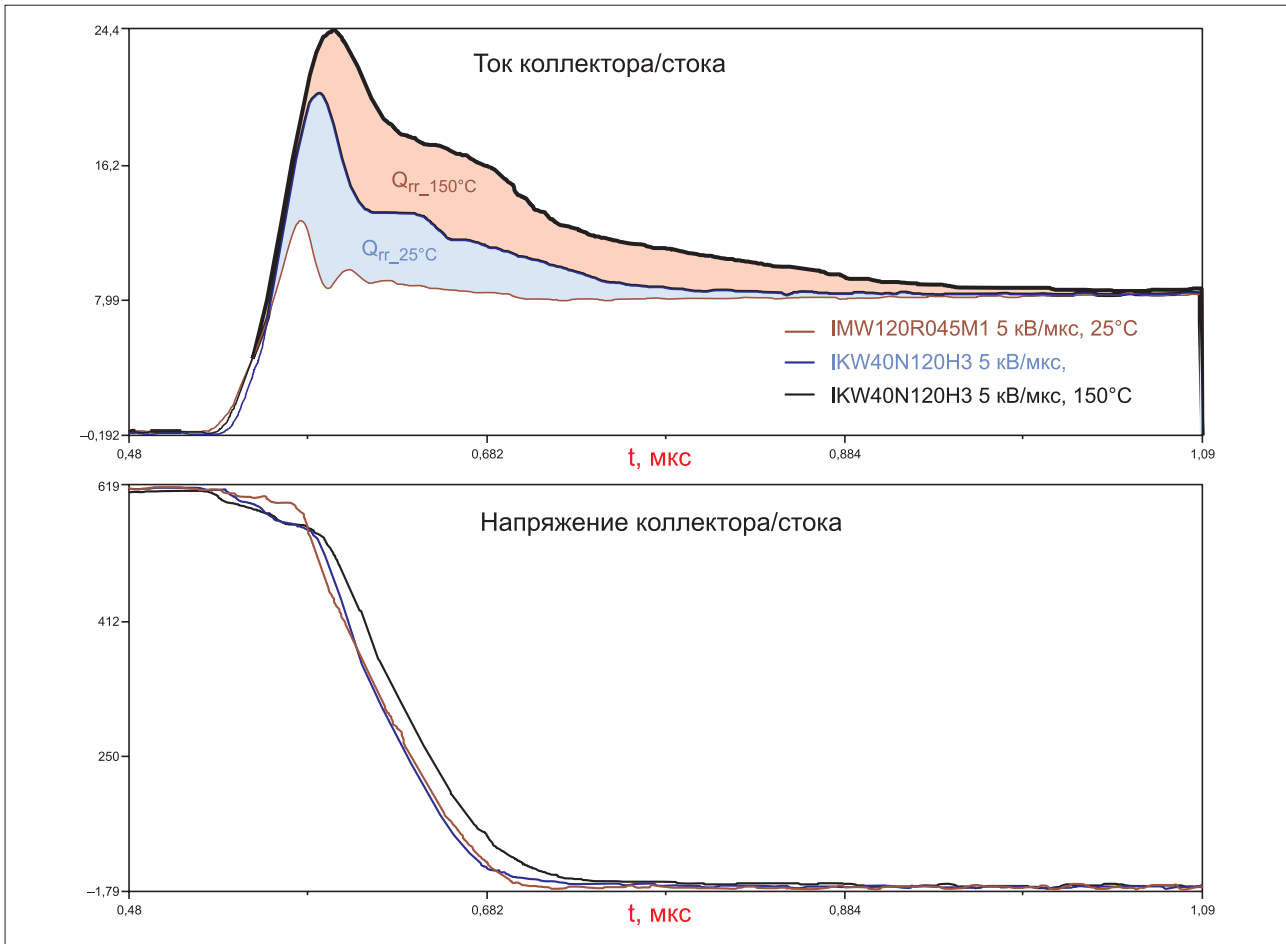


Рис. 1. Сравнение коммутационных характеристик при включении Si IGBT с CoolSiC MOSFET при 5 кВ/мкс

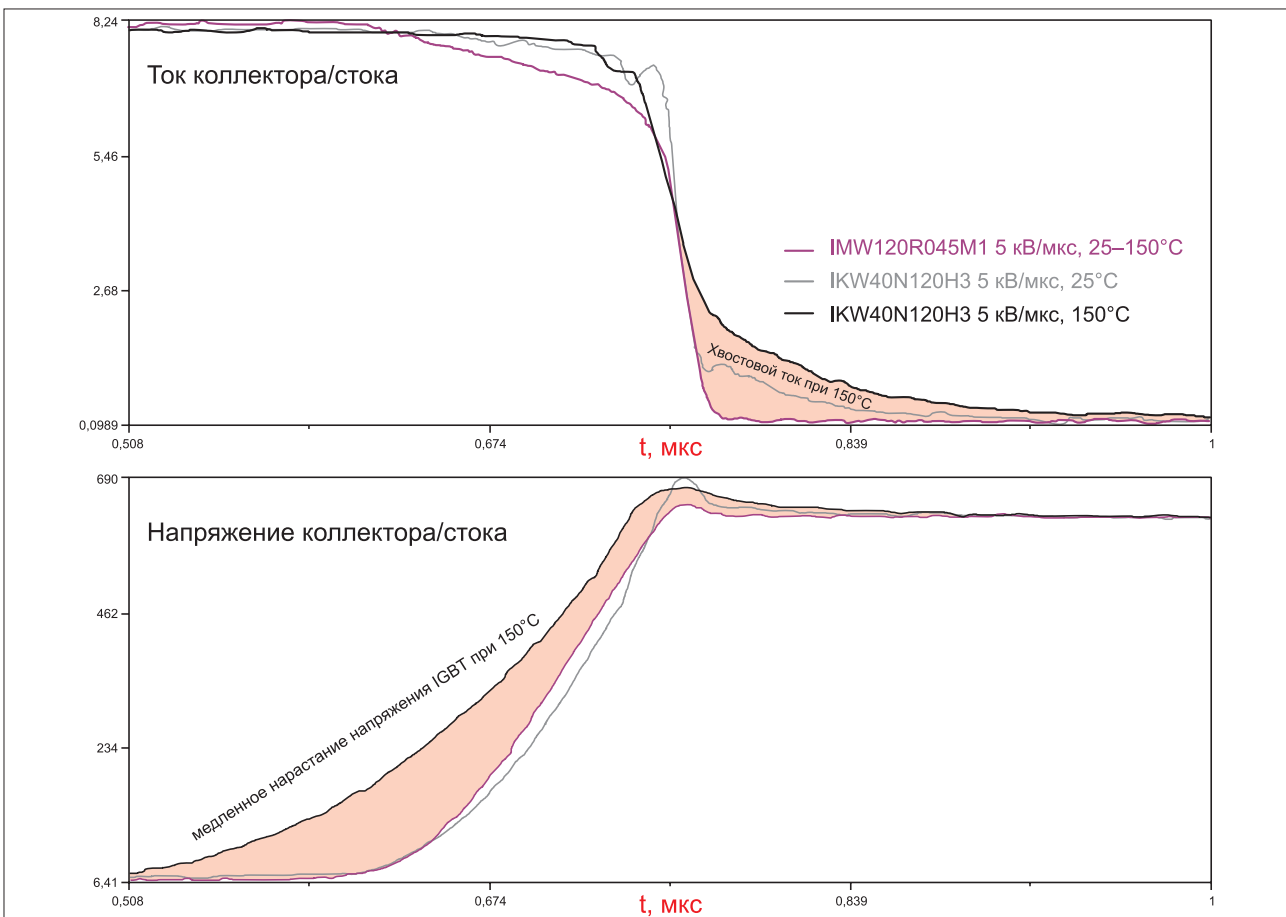


Рис. 2. Сравнение коммутационных характеристик при выключении Si IGBT и CoolSiC MOSFET при 5 кВ/мкс

ния этого компонента значительно замедляется при более высоких температурах (см. рис. 2). CoolSiC MOSFET могут переключаться со скоростью, превышающей 60 кВ/мкс; более того, известен способ уменьшить потери, установив на выходе инвертора фильтр dv/dt. Таким образом, этот полупроводник может переключаться с максимальной скоростью, а фильтр предотвращает нагрузку на обмотки двигателя при высоких значениях dv/dt и пиковых напряжениях. Этот способ уже реализован в высокоскоростных электроприводах. В разных исследованиях фильтры dv/dt были усовершенствованы путем их подключения к среднему потенциалу шины постоянного тока. Совместное использование новых электродвигателей с усиленной системой изоляции и фильтров, работающих с минимизированной скоростью dv/dt, позволяет реализовать весь потенциал ключей SiC [6].

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Чтобы оценить работоспособность устройств CoolSiC и поведение сервоприводов в разных условиях, было проведено моделирование, результаты которого сравнивались с данными экспериментальных испытаний. Поскольку температуру перехода устройств в реальной системе очень трудно измерить, обычно измеряется температура корпуса. Для более точной оценки температуры перехода рекомендуется использовать результаты моделирования.

Чтобы как можно точнее сравнить эффективность предлагаемого дискретного решения с использованием CoolSiC MOSFET с высокоскоростным IGBT-решением, была создана модель на основе трехфазной топологии В6 для оценки температуры пере-

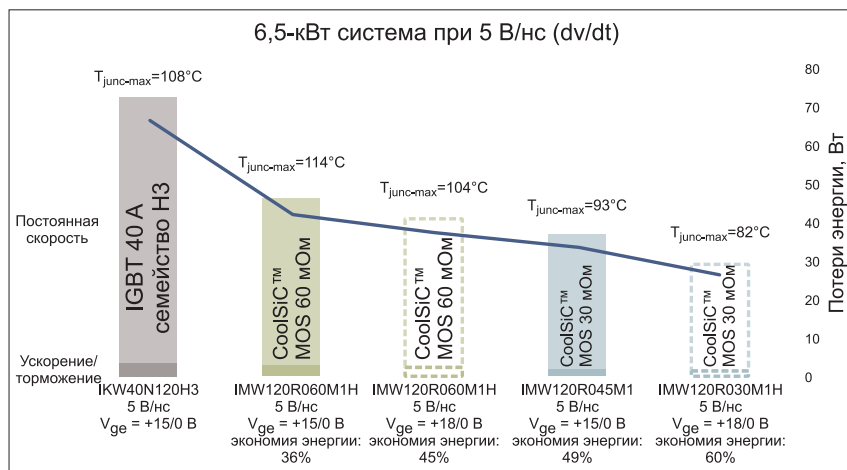


Рис. 3. Сравнение тепловых характеристик и потерь CoolSiC MOSFET с аналогичными показателями высокоскоростных IGBT семейства H3 в случае системы мощностью 6,5 кВт при скорости переключения 5 кВ/мкс в режиме постоянной скорости и ускорения/торможения

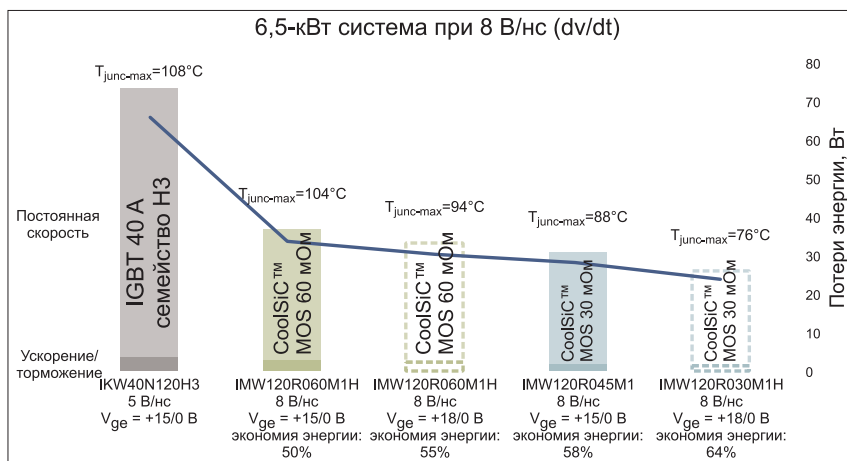


Рис. 4. Сравнение тепловых характеристик и потерь CoolSiC MOSFET с аналогичными показателями высокоскоростных IGBT семейства H3 в случае системы мощностью 6,5 кВт при скорости переключения 8 кВ/мкс в режиме постоянной скорости и ускорения/торможения

хода T_j и соответствующих потерь инвертора.

Из рисунка 3 видно, что даже при 5 кВ/мкс у сильно замедленных CoolSiC MOSFET сокращение потерь достигает 60% и на 38% меньше повышается температура перехода по сравнению

с высокоскоростным IGBT. Это связано с тем, что внутренние диоды CoolSiC MOSFET не имеют (или имеют очень низкий) заряд обратного восстановления Q_{RR} . Кроме того, у этих ключей отсутствует хвостовой ток, как на рисунках 1–2.

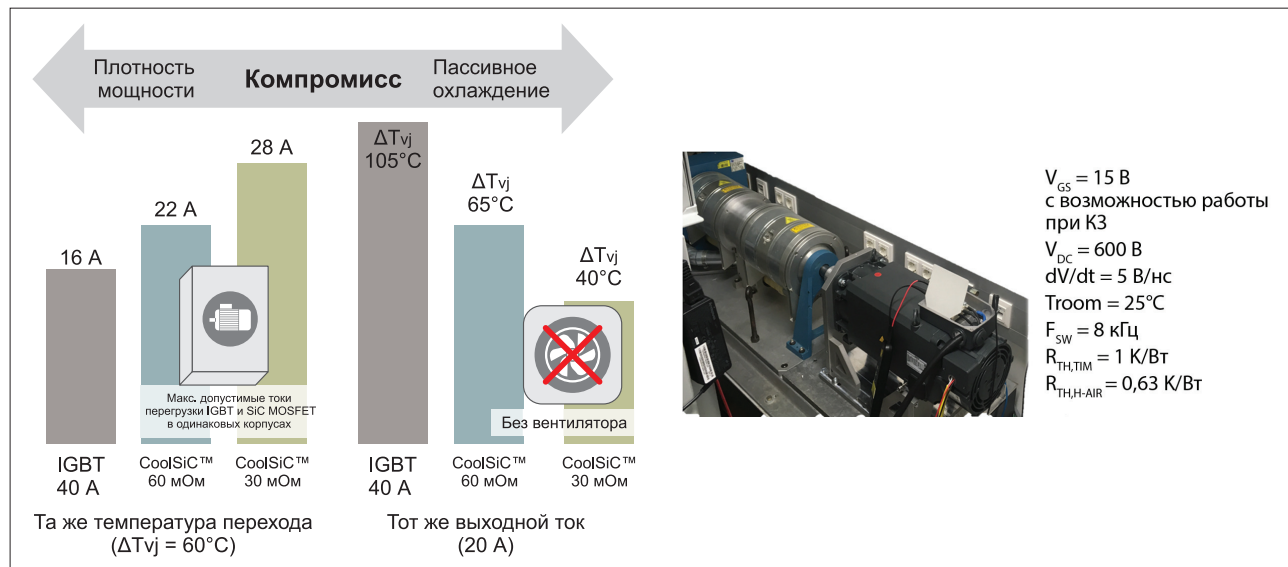


Рис. 5. Пример выбора $R_{DS(ON)}$ с учетом разных требований к сервоприводному решению и вид испытательной установки электродвигателя

Согласно новым правилам [6], скорость переключения высокоскоростных приводов можно увеличить до 8 кВ/мкс при коммутационной частоте 16 кГц. Из-за гораздо меньших выбросов напряжения CoolSiC MOSFET по сравнению с IGBT первые из них в некоторых случаях можно использовать и при более высокой частоте. В сервоприводах обычно не применяются длинные кабели, что также обеспечивает более быстрое переключение.

Если управление ключами CoolSiC MOSFET осуществляется со скоростью 8 кВ/мкс (вместо 5 кВ/мкс), потери можно сократить до 64% и на 47% уменьшить рост T_j по сравнению с высокоскоростными IGBT семейства H3 (см. рис. 4).

Ключи CoolSiC MOSFET от Infineon, работающие при напряжении затвора $V_{GS, On} = 15$ В, обладают уникальной функцией, допускающей возможность короткого замыкания продолжительностью до 3 мкс при максимальных номинальных значениях, указанных в техническом описании. Для корректного сравнения с другими SiC MOSFET на рынке заметим, что управление CoolSiC MOSFET от Infineon при напряжении затвора $V_{GS, On} = 18$ В обеспечивает не меньшую допустимую нагрузку по току/мощности при меньшем сопротивлении открытого канала (при этом отсутствует возможность работы при кратковременном коротком замыкании).

ВЫВОДЫ

Данные испытаний и проверка результатов моделирования подтвердили, что использование CoolSiC MOSFET в сервоприводах позволяет сократить потери на 64% и уменьшить рост температуры на 47% при низких скоростях переключения (5–8 кВ/мкс).

При использовании 60-мОм CoolSiC MOSFET для замены 40-А IGBT в сервоприводе с сохранением требований к теплоотводу и dv/dt общие потери в полупроводниках уменьшаются почти вдвое при аналогичных максимальных температурах перехода.

Снижение потерь CoolSiC открывает новые возможности по усовершенствованию системы:

- достигается компромисс между выходным током, T_j , охлаждением и выбором $R_{DS(ON)}$ (см. рис. 5);
- низкое значение ΔT_j у CoolSiC MOSFET позволяет использовать пассивное охлаждение. 

ЛИТЕРАТУРА

1. Blaž Klobučar and Zhihui Yuan. 1200 V Discrete SiC MOSFETs in a Comparison with the High-Speed 3 IGBTs for Servo-Drive Systems. Bodo's Power Systems. January. 2021//www.bodospower.com.
2. Dr. Fanny Björk, Dr. Zhihui Yuan Infineon Technologies AG, Austria. CoolSiC SiC MOSFETs: a solution for bridge topologies in three-phase power conversion. 2019.
3. Benjamin Sahan, Anastasia Brodt. Infineon Technologies AG, Germany. Enhancing power density and efficiency of variable speed drives with 1200V SiC T-MOSFET. PCIM Europe 2017, 16–18 May 2017. Nuremberg. Germany.
4. Tiefu Zhao, Jun Wang, Alex Q. Huang. Comparisons of SiC MOSFET and Si IGBT Based Motor Drive Systems. 2007.
5. S. Tiwari, O. M. Midtgard, T. M. Undeland. SiC MOSFETs for Future Motor Drive Applications 2016.
6. K. Vogel, A. Brodt, A. Rossa. Improve the efficiency in AC-Drives: New semiconductor solutions and their challenges. EEMODS 2015.
7. Eval-M5-IMZ120R-SiC//www.infineon.com.