

LV100 — полумостовой модуль

для тяговых инверторов новых поколений

Статья посвящена новому типу полумостовых высоковольтных IGBT-модулей, разработанных, в первую очередь, для железнодорожных (ж/д) тяговых применений. Продукт получил название LV100 (Low Voltage 100) — ввиду напряжения изоляции 6 кВ и ширины корпуса 100 мм. Вторая модификация с напряжением изоляции 10,4 кВ носит имя HV100 (High Voltage 100). Обе версии имеют полумостовую топологию, а также идентичные по размеру основания 100×140 мм.

Виктор Толстопятов

victor.tolstopyatov@mer.mee.com

**Ойген Штумпф
(Eugen Stumpf)**

**Кенджи Хатори
(Kenji Hatori)**

Введение

С каждым новым поколением IGBT-кристаллов скорость их переключения возрастает. Увеличение значения di/dt (скорость изменения тока) позволяет уменьшить динамические потери мощности в кристаллах, так как процесс переключения ускоряется, однако в то же время из-за наличия паразитной индуктивности в контуре это приводит к увеличению обратных перенапряжений, ограничивающих область безопасной работы модулей. Особенно сильно данный эффект выражен при использовании полупроводниковых материалов с широкой запрещенной зоной, например карбида кремния (SiC), так как скорость переключения таких транзисторов на порядок выше кремниевых (Si). Таким образом, для сохранения достаточных запасов по напряжению, одновременно с улучшением динамических характеристик кристаллов, необходимо снижение паразитной индуктивности самого корпуса модуля. Именно это стало основной причиной создания корпусов нового типа. Первым компания «Мицубиси Электрик» представит корпус LV100 с Si-, а также SiC-кристаллами

с блокирующим напряжением 3300 В. Далее на рынок выйдут модули LV100 с чипами на 1700 В.

Ключевые преимущества нового корпуса

Главным мотивом к созданию корпусов нового типа LV100 стали требования к тяговым инверторам со стороны европейской организации по развитию ж/д транспорта Roll2Rail [1]. Помимо снижения паразитной индуктивности силовых модулей, важным требованием стало обеспечение унификации компонентов (использование модуля с одним номиналом тока для инверторов различных мощностей). Как было сказано выше, снижение паразитной индуктивности новых модулей до 8 нГн необходимо ввиду увеличения скорости переключения кристаллов и появления новых полупроводниковых материалов с широкой запрещенной зоной, унификация же позволяет снизить стоимость, а также упростить логистику и доступность компонентов.

Реализуя новую концепцию, компания «Мицубиси Электрик» использовала свои, уже зарекомендовавшие себя на рынке, передовые технологии. Увеличение рабочего тока модулей на единицу площади основания было достигнуто за счет использования нового поколения кристаллов и полупроводниковых материалов, а также уникальной структуры основания. Сложности при увеличении тока модулей связаны не столько с самими кристаллами, сколько с корпусом модуля, а конкретно — с нагрузочной способностью его силовых терминалов [2]. Решением здесь стало размещение трех силовых выводов со стороны шины переменного тока (рис. 1), включенных в параллель, в то время как другие концепты имеют лишь два. В соответствии с европейским стандартом EN50124 конструкция вспомогательных выводов удовлетворяет третьей степени загрязненности [3]. Высота выводов составляет 5 мм, что обеспечивает возможность применения двусторонней печатной платы для драйвера.

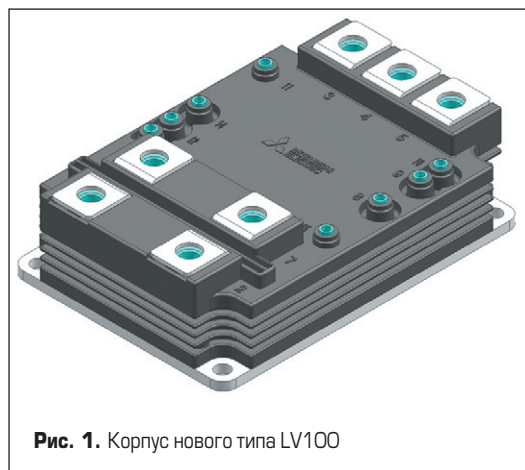


Рис. 1. Корпус нового типа LV100

В Si-версии модулей LV100 используется новейшее, седьмое поколение кристаллов, получившее название X-серия, а чипы, используемые в SiC-версии, успешно зарекомендовали себя в знаменитых японских скоростных поездах «Синкансен» [5]. Транзисторы выполнены с использованием технологии SCC (Surface Charge Control — контроль поверхностного заряда), повышающей надежность модулей за счет стойкости к высокой влажности [6]. Новая структура основания увеличивает срок службы модуля за счет снижения теплового стресса на полупроводниках [7].

Основание модуля

Особое внимание было уделено инновационной структуре базовой плиты модулей. Впервые для транспортных модулей в качестве основания был выбран не композит с металлической матрицей AlSiC, являющийся де-факто стандартом на рынке, а алюминий (Al). «Мицубиси Электрик» пошла на этот шаг, так как алюминий имеет ряд важных преимуществ перед AlSiC. Во-первых, теплопроводность алюминия выше, чем у композита AlSiC [8, 9]. Во-вторых, алюминий обладает меньшим весом, что также является существенным преимуществом для ж/д оборудования, так как косвенно повышает эффективность привода. И наконец, алюминий намного дешевле и легче в обработке в сравнении с композитом, что снижает итоговую стоимость модулей.

Исторически «Мицубиси Электрик» использует в качестве керамической изоляции нитрид алюминия (AlN), так как данный материал обладает в семь раз меньшим тепловым сопротивлением в сравнении с оксидом алюминия (Al₂O₃), используемым другими производителями. Использование алюминия в качестве базовой плиты ранее было невозможно из-за несоответствия коэффициентов теплового расширения (КТР). Так, слой пайки между базовой плитой и керамической изоляцией модуля подвергался механическому напряжению, что ограничивало срок службы модуля. Новые корпуса LV100 полностью лишены данной проблемы, так как данный слой пайки в них отсутствует. Это стало возможным за счет использования структуры

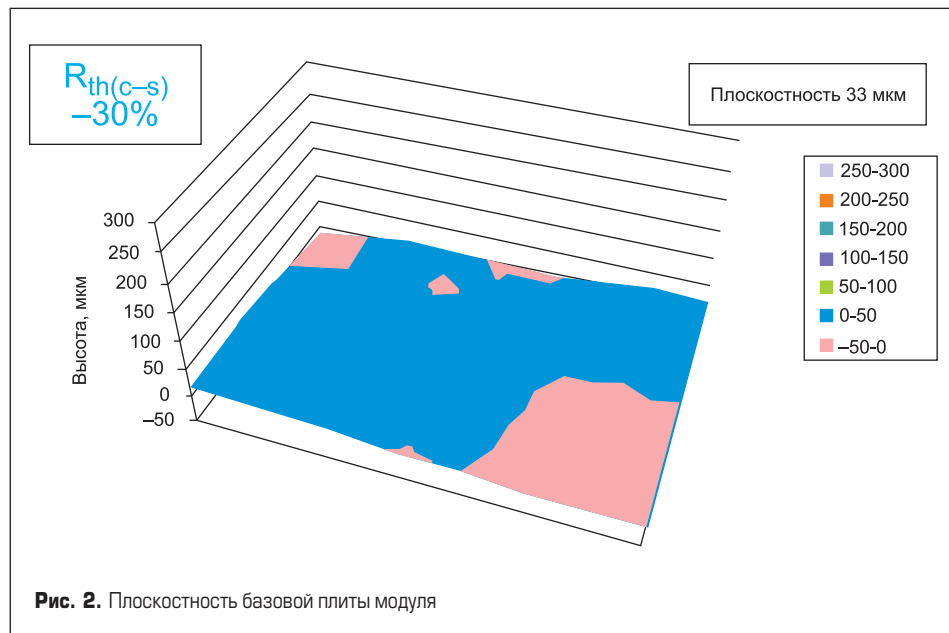


Рис. 2. Плоскостность базовой плиты модуля

прямого соединения литьем (Metal Casting direct Bonding) [7]. Биметаллического эффекта (изгибания основания модуля) при этом удалось избежать за счет внедрения дополнительных AlN-пластин внутрь алюминиевой базовой плиты. Такая структура уже использовалась компанией в модулях CM1800DY-34S и CM2500DY-24S и на протяжении семи лет отлично зарекомендовала себя. Помимо существенного увеличения количества длинных термоциклов, отсутствие слоя пайки также снижает тепловое сопротивление «кристалл-подложка» $R_{th(j-c)}$ на 25%.

В силовых модулях с классической структурой (с пайкой керамики к основанию) достигаемая плотность мощности ограничена геометрией изоляции. Структура прямого соединения снимает данное ограничение и позволяет увеличить площадь изоляции и оптимизировать положение кристаллов.

И, наконец, новая структура вкпе с Al-основанием улучшает плоскостность основания. Кривизна базовой плиты снижена до 33 мкм, что позволило уменьшить минимально необходимый слой термопасты и, как следствие, улучшить на 30% тепловую проводимость перехода «основание-радиатор» [7].

В итоге новое основание LV100 имеет меньший вес, увеличивает выходную мощность модуля и продлевает срок его службы.

На рис. 2 и рис. 3 показаны преимущества структуры прямого соединения.

Кристаллы серии X

Линейка IGBT-чипов серии X разработана компанией «Мицубиси Электрик» в соответствии с текущими требованиями рынка к эффективности, максимальной рабочей температуре, плотности тока, областям безопасной работы и стойкости к условиям высокой влажности.

Так, энергоэффективность кристаллов была увеличена за счет использования траншейной структуры затвора. Широкий диапазон рабочих температур был достигнут путем оптимизации буферного N-слоя и процесса геттерирования [4]. За счет этих мер ток утечки при температуре чипов +150 °C не превысил значений, имевшихся у предыдущей версии кристаллов при температуре +125 °C. Новая структура транзисторов показана на рис. 4. Также, ввиду возросших требований со стороны организации Roll2Rail к защищенности модулей от внешних воздействий, не менее важным параметром при выборе

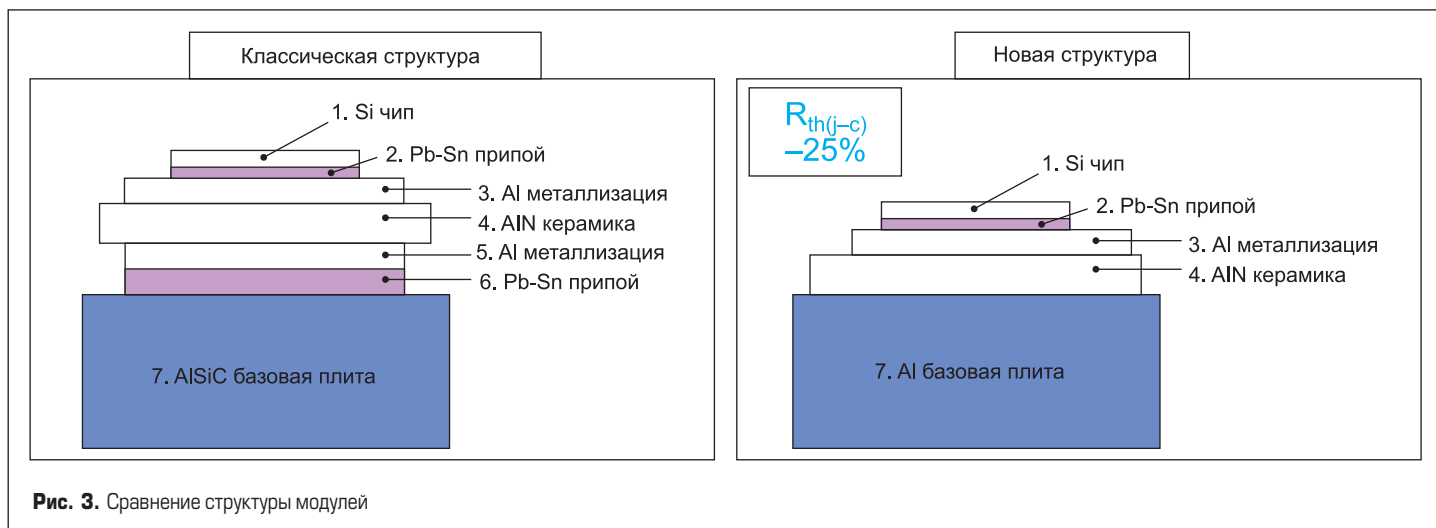


Рис. 3. Сравнение структуры модулей

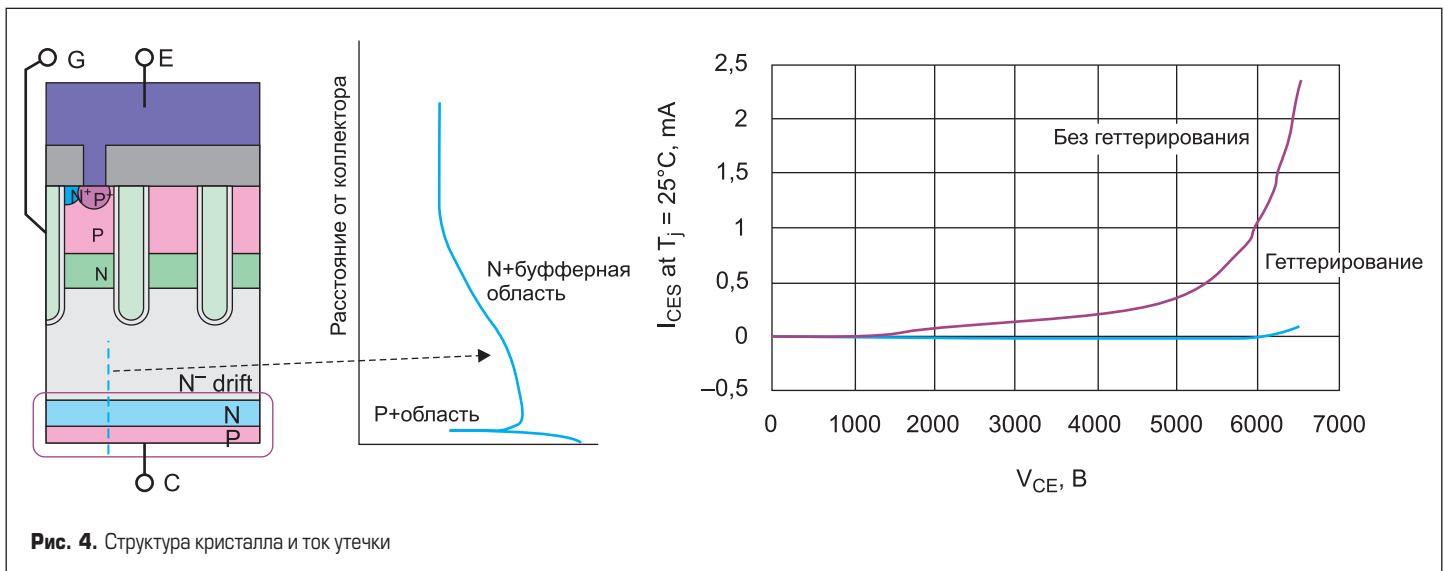


Рис. 4. Структура кристалла и ток утечки

IGBT-модулей является их стойкость к высокой влажности [11, 14]. Описанная выше технология контроля поверхностного заряда (SCC) предотвращает формирование и поляризацию внешних поверхностных зарядов QSS [6], которые могут нарушить однородность распределения электрического поля вблизи охранного кольца чипа.

Динамические характеристики

Стандартный набор тестов при производстве модулей CM450DA-66X включает в себя опыт двойного импульса при номинальных параметрах и максимальной рабочей температуре. Результаты такого теста показаны на рис. 5 и рис. 6. Осциллограммы иллюстрируют рост скорости переключения за счет сниженной паразитной индуктивности корпуса. Также

отражены параметры di/dt для оценки уровня электромагнитных помех. Треугольник компромиссов между динамическими потерями, статическими потерями и стойкости к КЗ для новой линейки кристаллов серии X уже был подробно описан в журнале «Силовая электроника» № 5'2016. [11].

Производительность в различных режимах работы

Производительность модуля CM450DA-66X (кремниевой версии на 450 А/3300 В в корпусе LV100) показана на рис. 7 и рис. 8. Ось X — выходной ток инвертора, а ось Y — частота ШИМ. Кривая представлена при суммарных потерях в модуле 750 Вт, что является оптимальным значением при воздушном охлаждении. Для систем

жидкостного охлаждения значения, показанные на графике, могут быть удвоены. На рис. 5 показан двигательный режим работы с коэффициентом мощности $\cos \phi = 0,9$, а на рис. 6 — генераторный режим с $\cos \phi = -0,9$. По графикам видно, что модули показывают идентичные результаты производительности в обоих режимах, что хорошо соотносится с текущими ж/д требованиями к ускорению/рекуперации. Использование энергии рекуперации снижает потребление электроэнергии и, как следствие, увеличивает итоговый КПД системы [13].

Сравнение Si- и SiC-версий модулей

Ответ на возрастающие потребности рынка в высокопроизводительных решениях

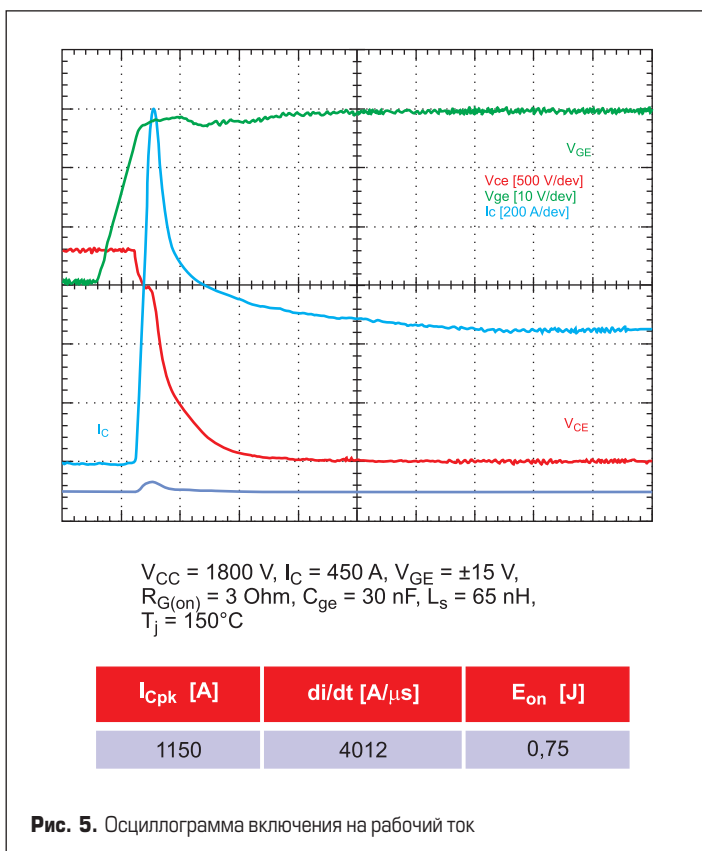


Рис. 5. Осциллограмма включения на рабочий ток

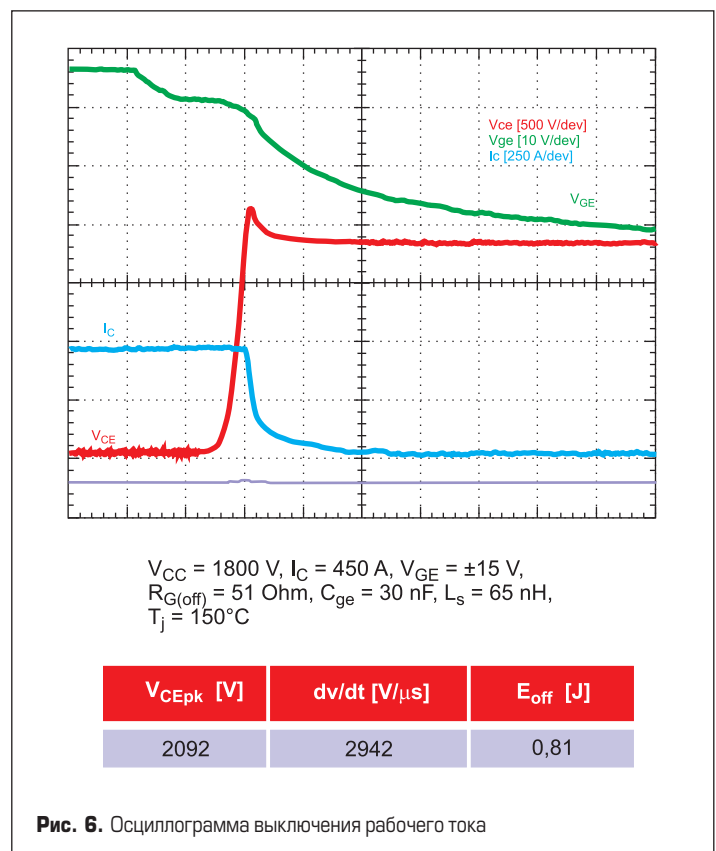


Рис. 6. Осциллограмма выключения рабочего тока

представлен на рис. 9. Диаграмма показывает сравнение производительности трех модулей LV100: 1 — кремниевый модуль; 2 — гибридный модуль (Si-транзисторы и SiC-диоды); 3 — модуль на карбиде кремния (Full SiC). Сравнение приведено для следующих параметров: $V_{cc} = 1800 \text{ В}$; $I_c = 450 \text{ А}$; $f_c = 0,5 \text{ кГц}$; $\cos(\phi) = 0,85$. Модуль Full SiC позволяет снизить потери мощности в два раза в сравнении с Si-версией. Или же, имея три силовых терминала с AC-стороны, выходной ток может быть удвоен. Силовые SiC-модули позволяют увеличить частоту ШИМ, уменьшить потери, увеличить плотность мощности инвертора, увеличить итоговый КПД, а также уменьшить индекс энергопотребления (Energy Consumption Index, ECI).

Литература

1. www.roll2rail.eu/
2. Krafft et al. A New Standard IGBT Housing for High-Power Converters. EPE 2015, Geneva, Switzerland.
3. EN50124. Railway applications Insulation Coordination. European Standard, April, 2006.
4. Tanaka et al. Durable Design of the New HVIGBT modules. PCIM 2016, Nuremberg.
5. MITSUBISHI ELECTRIC Press Release 2942. Mitsubishi Electric Installs Railcar Traction System with All-SiC Power Modules on Shinkansen Bullet Trains. Tokyo. June 25, 2015.
6. Honda et al. High Voltage Device Edge Termination for Wide Temperature Range plus Humidity with Surface Charge Control (SCC) Technology. Proc. ISPSD 2016. Prague, Czech Republic.
7. Sakai et al. Power Cycling Time improvement by reducing thermal stress of a new dual HVIGBT module. EPE 2017. Karlsruhe, 2016.
8. D. D. L Chung. Materials for Thermal Conductions. Applied Thermal Engineering 21, 2001.
9. Jiang et al., "Advanced Thermal Management Material". Chapter 8. Springer, New-York, 2013
10. C. Zorn, N. Kaminski. Temperature Humidity Bias (THB) Testing on IGBT Module at High Bias Levels. CIPS2014, Germany, 2014.
11. Набухико Т., В. Толстопятов. Новая серия высоковольтных IGBT-модулей с улучшенными параметрами надежности // Силовая электроника. 2016. № 5.
12. MITSUBISHI ELECTRIC press release 2732. Mitsubishi Electric Develops Regenerative Power Optimization Technology for Railway Energy Saving. Tokyo. February, 2013.
13. N. Tanaka, K. Ota, S. Iura, Y. Kusakabe, K. Nakamura, E. Wiesner, E. Thal. Robust HVIGBT module design against high humidity. PCIM Europe. Germany, 2015.
14. K. Hatori et al. Wide Temperature Operation of high isolation HVIGBT. Proc. PCIM Europe 2010. Nuremberg, Germany.

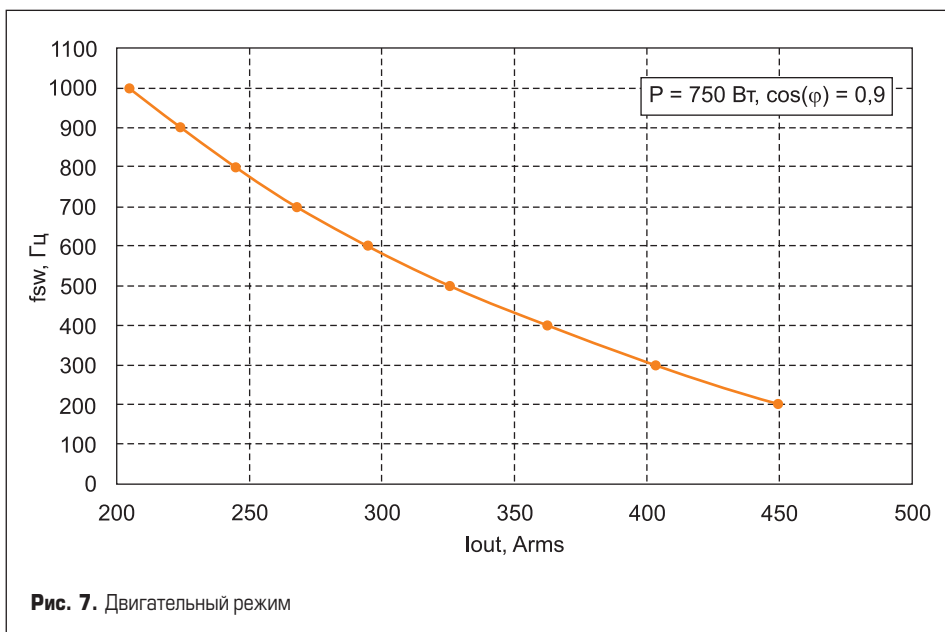


Рис. 7. Двигательный режим

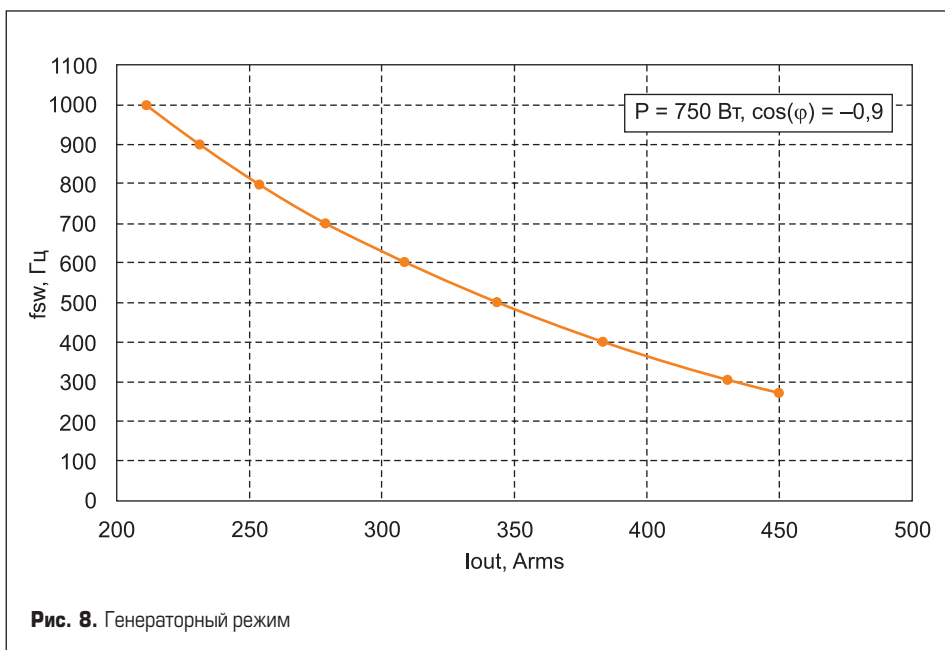


Рис. 8. Генераторный режим

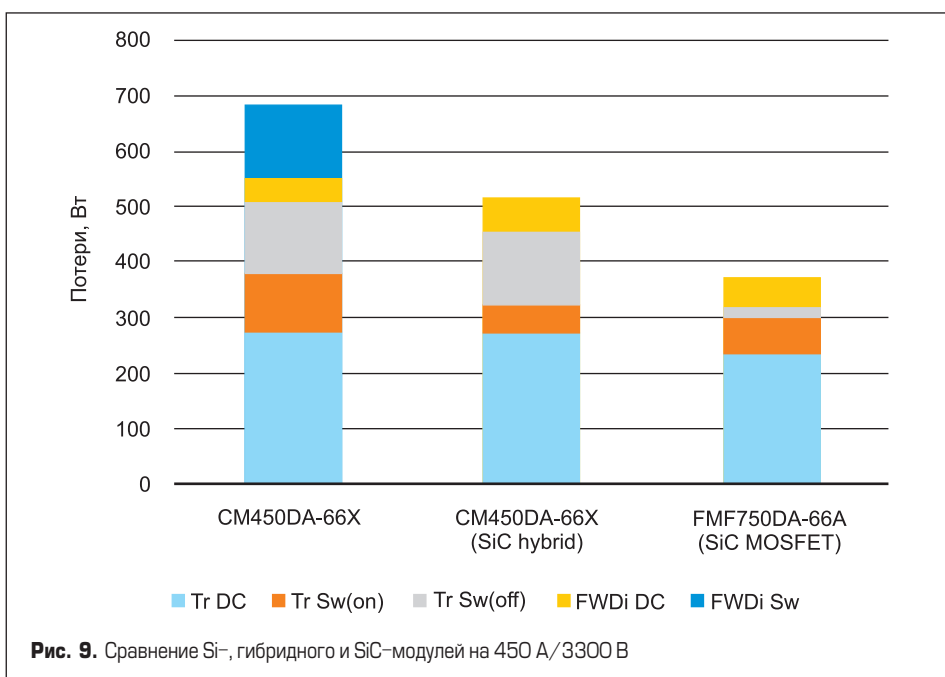


Рис. 9. Сравнение Si-, гибридного и SiC-модулей на 450 А/3300 В