

# Roll2Rail:

силовые модули нового поколения для тягового привода — общие требования, рыночный анализ, технологическая дорожная карта и прогнозы.

## Часть 3. Рыночный анализ и технические требования к транспортным модулям нового поколения

**В настоящей статье, посвященной реализации проекта Roll2Rail, представлены результаты совместной деятельности крупнейших европейских поставщиков железнодорожного тягового оборудования по разработке и стандартизации нового, усовершенствованного модуля для тягового привода. В третьей части статьи о Roll2Rail проведен анализ рынка силовых полупроводниковых приборов и сформированы технические требования к транспортным модулям нового поколения.**

Под редакцией:  
Т. Вийк (T. Wiik)

**Силовые полупроводниковые приборы:  
рыночный анализ**

Перевод:  
Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Цель данной работы — обзор рынка силовых полупроводников за период до 2020 года с акцентом на силовые приборы, имеющие отношение к железнодорожному транспорту. Сегодня в этом секторе доминируют модули Si IGBT с номинальным током от нескольких сотен до нескольких тысяч ампер и рабочим напряжением в диапазоне 1,7–3,3 кВ. Новые технологии широкозонных полупроводников бросают вызов кремниевым приборам, обещая повы-

шение эффективности и снижение потерь. Поэтому анализ в основном сосредоточен на силовых Si- и SiC-модулях с рабочим напряжением 1,7–6,5 кВ.

Рынок полупроводниковых приборов составил примерно €15 млрд в 2020 году, наибольший рост отмечен для силовых модулей (около €5 млрд, рис. 1).

Анализ показывает, что на рынке доминируют низковольтные приборы (400–900 В), однако этот сектор имеет меньший относительный прирост по сравнению с компонентами с номинальным напряжением выше 900 В (рис. 2). Повышение на 75% в классе напряжения 1,2–1,7 кВ в основном обусловлено развитием фотоэлектрических систем (PV), а также сегмента электромобилей (EV) и гибридных электромобилей (HEV). В диапазоне 2–3,3 кВ рост связан в первую очередь с развитием рынка ветроэнергетики, а также железнодорожных и энергетических систем. Считается, что увеличение мощности ветротурбин дает толчок к разработке преобразователей на основе силовых модулей с напряжением 3,3 кВ. В первую очередь это происходит на китайском рынке, где действуют менее строгие требования к безопасности, и в меньшей степени — в Европе, где переход с приборов 1,7 кВ на 3,3 кВ сопровождается повышением требований к безопасности и увеличением вложений в сервисное обслуживание.

Рост сектора высоковольтных приборов обусловлен развитием систем передачи и распределения энергии (T&D). При производстве энергии в основном используются модули низковольтного или средневольтного диапазона.

Крупнейшие инвестиции поставщиков силовых полупроводников делаются в специализированные

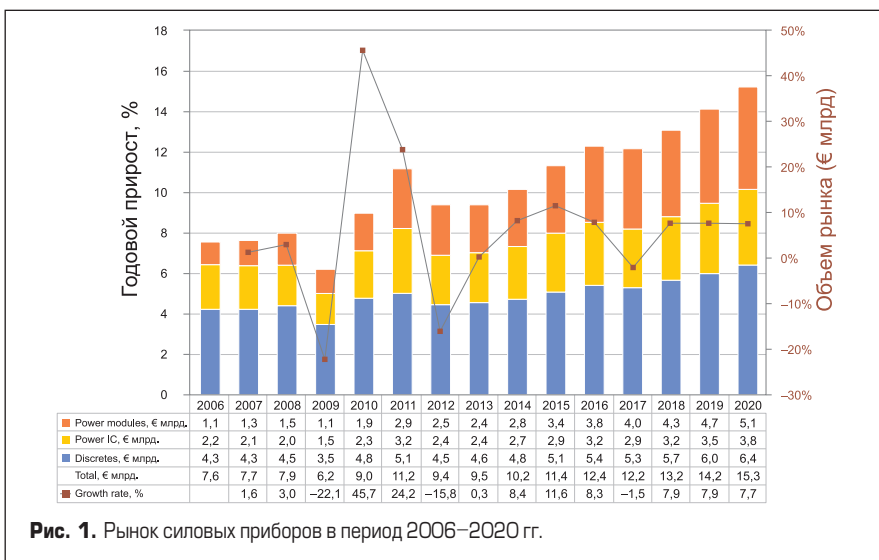
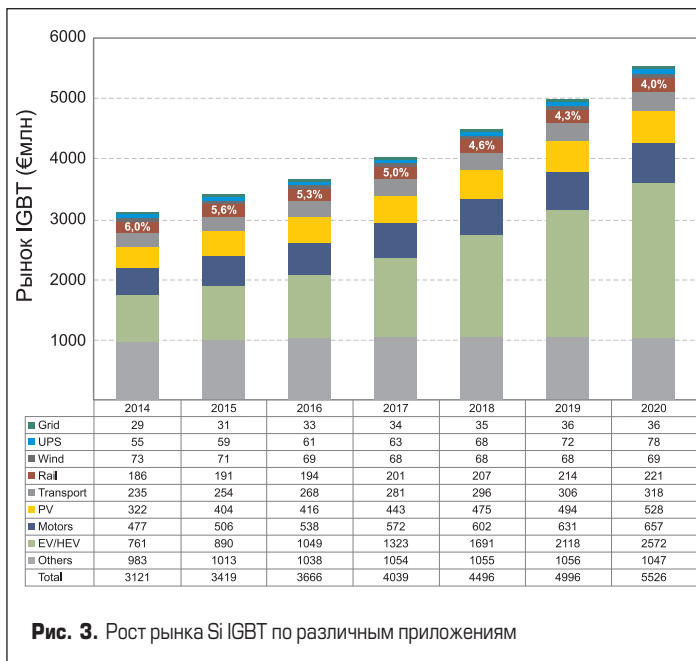
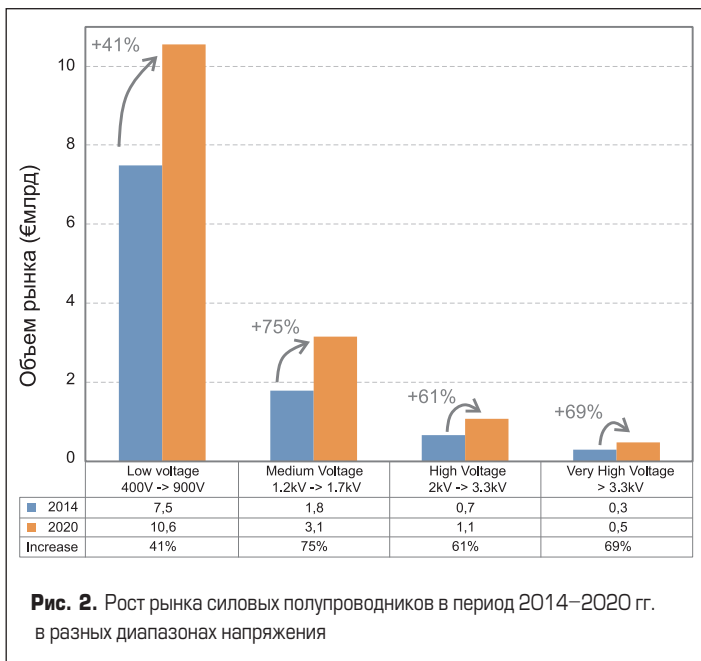


Рис. 1. Рынок силовых приборов в период 2006–2020 гг.



транспортные низковольтные IGBT-модули. Средства также инвестируются в разработку высоковольтных приборов, что связано с их высокой прибыльностью.

**Рынок Si IGBT**

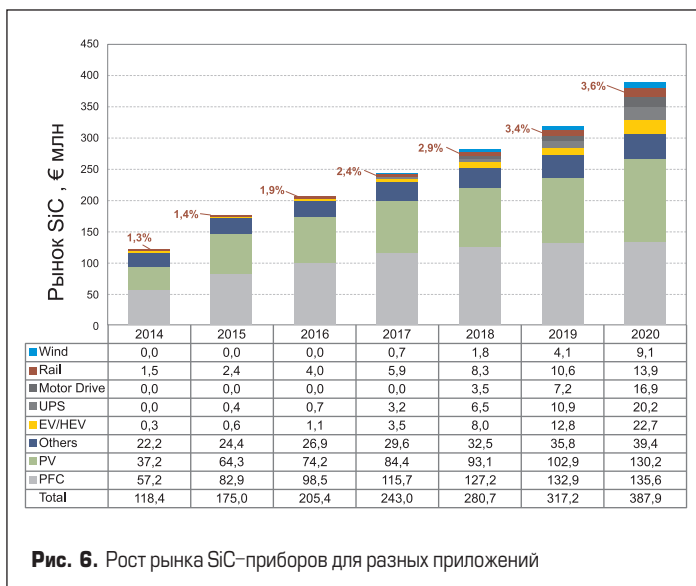
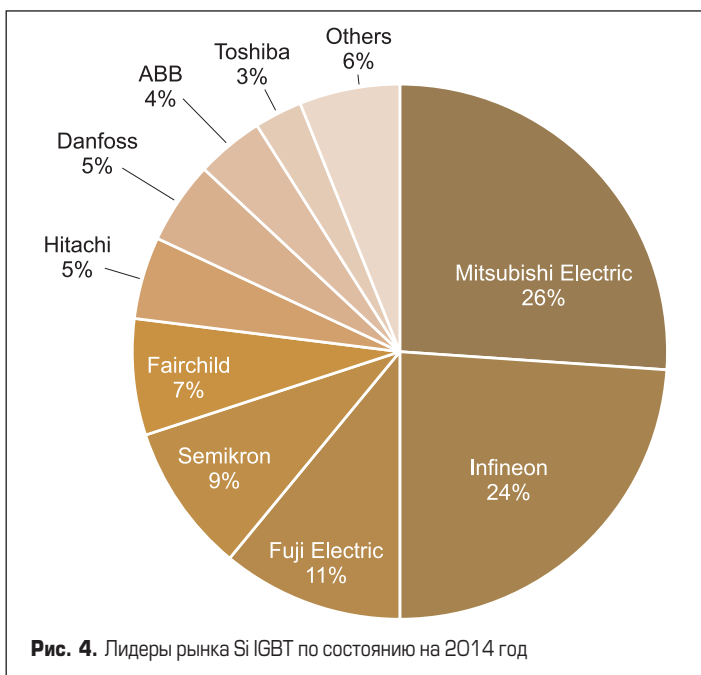
Общий объем рынка кремниевых IGBT составлял около €3,1 млрд в 2014 году, к 2020 году он вырос на 77%, до €5,5 млрд (рис. 3). Относительная доля IGBT в железнодорожных применениях невелика, она снизилась в относительных цифрах с 6% в 2014 году до 4% в 2020 году. Однако в абсолютном выражении показан рост на 22%: с €186 млн в 2014 году до €221 млн в 2020-м. Сектор электро- и гибридных автомобилей (EV/HEV) остается доминирующим для Si IGBT: он увеличился с €761 млн в 2014 году до €2,6 млрд в 2020-м.

**Цепочки поставок IGBT**

На рынке присутствуют более десяти поставщиков кремниевых силовых IGBT-модулей. В 2014 году наибольшую долю рынка (26%) занимала компания Mitsubishi Electric, второе место принадлежало Infineon с долей 24%. Приобретение фирмы International Rectifier укрепило позиции Infineon и сделало конкуренцию между двумя лидерами рынка еще более жесткой. В первую семерку поставщиков входят про-

изводители силовых модулей, такие как SEMIKRON и Danfoss. Лидеры, имеющие наибольшую долю рынка в 2014 году, представлены на рис. 4 и 5.

Общий объем рынка SiC-приборов оценивался в €118 млн в 2014 году, он вырос до €388 млн к 2020 году. Наибольшее распространение SiC-диоды находят в корректорах коэффициента мощности (PFC), активно расширяется применение карбида кремния в фотоэлектрических (PV) системах (рис. 6). Рынок SiC для железнодорожных применений пока



Общие требования

Цели и задачи

В данном отчете обозначены требования к усовершенствованному стандартизированному силовому модулю, ориентированному на применение в тяговом приводе. Основной целью европейского проекта R2R является повышение эффективности, надежности и срока службы тяговых железнодорожных преобразователей следующего поколения. Для решения этой задачи необходимо формирование общих требований с целью стандартизации основных параметров нового силового модуля, к которым относятся:

1. Габаритные размеры.
2. Топология и параметры распределенных (паразитных) элементов.
3. Надежность.
4. Условия окружающей среды.

Общие предложения по стандартизации и требования к электрическим характеристикам приборов, обеспечивающие будущие инновации и постоянное совершенствование технологий производства, не выработаны до настоящего времени. Задачей является снятие существующих технологических ограничений и реализация перспективных возможностей, в частности внедрение новых полупроводниковых материалов. Результатом исследований должно быть следующее:

- Повышение плотности мощности за счет:
  - увеличения стойкости к термоциклированию;
  - повышения рабочей температуры;
  - уменьшения теплового импеданса;
  - увеличения контактной поверхности чипов для полной реализации его нагрузочных характеристик;
  - увеличения скорости коммутации за счет снижения паразитных индуктивностей контура.
- Снижение стоимости.
- Совместимость характеристик модулей различных производителей.
- Модульность и масштабируемость.

Технические требования распространяются на полупроводниковые приборы на основе SiC и Si, то есть они относятся как к перспективным, так и к современным силовым модулям.

Максимальные значения

Напряжение изоляции

Напряжение изоляции определяется стандартом IEC 61287-1. Испытательное напряжение на уровне полупроводника должно быть немного выше уровня, используемого при тестах преобразователя. Исходя из этих соображений выбирают минимальные значения  $V_{iso\_rms}$  (50 Гц, 10 с) для каждого класса напряжений (табл. 1).

Частичный разряд

- Испытание на частичные разряды характеризует потенциальную деградацию изоляционных материалов при воздействии напряжения, поэтому этот тест является ключевым для оценки качества конструктива силового модуля.
- Минимальное требование заключается в том, что в процессе эксплуатации не должно происходить частичных разрядов в изоляции.

Таблица 1. Испытательные напряжения изоляции

$V_{CES}, В$	$V_{iso}, кВ$
1700	$\geq 3,5$
3300	$\geq 5,5$
4500	$\geq 8,5$
6500	$\geq 9,5$

Таблица 2. Уровни напряжения при испытаниях на частичный разряд

$V_{CES}, В$	$V_1 = 1,5 \times U_m / \sqrt{2}, кВ$	$V_1 = 1,1 \times U_m / \sqrt{2}, кВ$
1700	1,8	1,3
3300	3,5	2,6
4500	4,6	3,4
6500	6,9	5,1

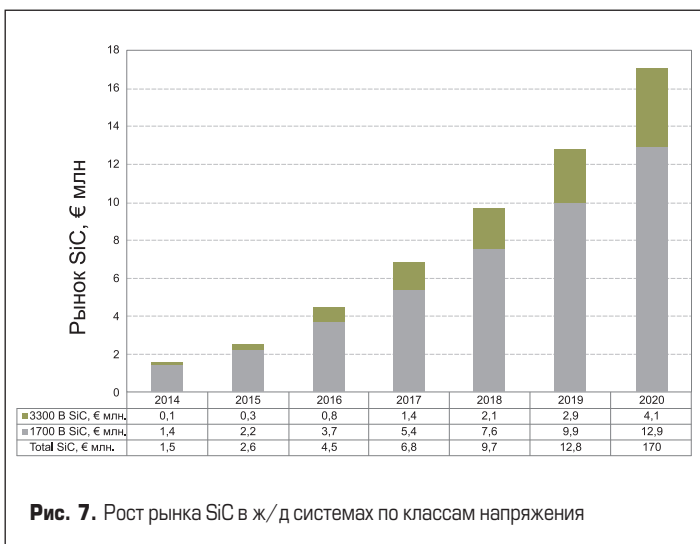


Рис. 7. Рост рынка SiC в ж/д системах по классам напряжения

невелик (около €14 млн в 2020-м). На рис. 7 показан рост сектора SiC-приборов в ж/д системах для разных классов напряжения.

Поставщики силовых SiC-приборов

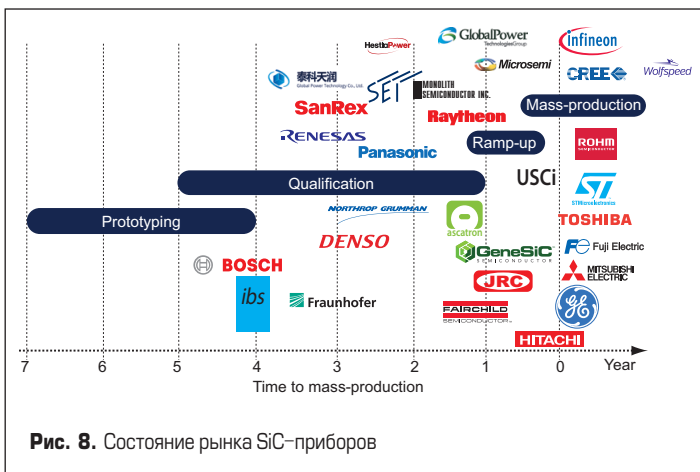


Рис. 8. Состояние рынка SiC-приборов

Оценка стоимости модулей SiC MOSFET

На рис. 9 показана эволюция рыночных цен SiC MOSFET, оценка основана на данных по приборам 600 и 1200 В, она экстраполирована на 1700 и 3300 В на основе толщины эпитаксиального слоя, пропорциональной блокирующему напряжению. Рыночная цена SiC MOSFET составляла около 0,4 €/А в 2015/2016 гг., она снизилась примерно на 70% до 0,15 €/А к 2020 году.

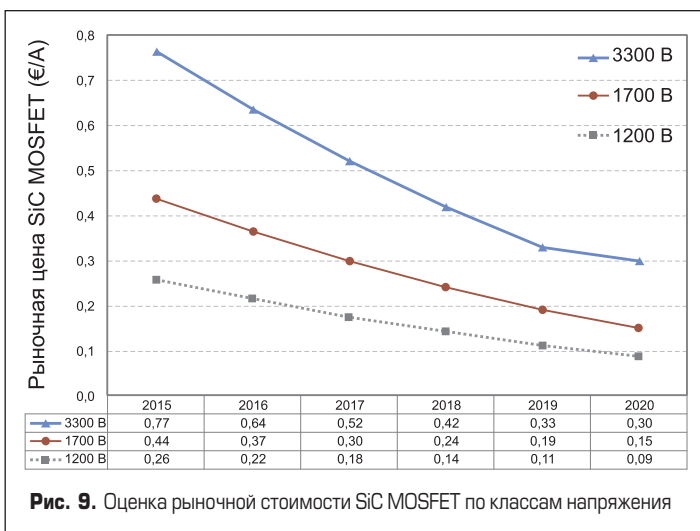


Рис. 9. Оценка рыночной стоимости SiC MOSFET по классам напряжения

- Протокол испытания и профиль тестового сигнала (с уровнем предварительного стресса напряжения и уровнем измерения) даны в IEC 61287-1. Для каждого класса напряжения эти два уровня определены в таблице 2 и на рис. 10.
- Критерий соответствия требованиям — менее 10 пКл (с учетом разрешающей способности испытательного оборудования).
- Тест на частичный разряд выполняется после проверки изоляции (для обнаружения потенциального предварительного повреждения при диэлектрических испытаниях).

**Температура**

Температура хранения: диапазон расширен относительно климатического класса TX по стандартам EN 50125-1 и IEC 62498-1 до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (с учетом требований российского рынка) и  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$  (с учетом транспортных требований и ситуаций нагрева от солнца в припаркованном транспортном средстве).

Рабочая температура кристалла:  $T_j$  — виртуальная температура кристалла по стандарту IEC 60747-9, определяющему, что в мультичиповых модулях она может отличаться от кристалла к кристаллу и не может быть измерена непосредственно, поэтому оценивается с помощью теплового импеданса.

Полупроводник должен обеспечивать безопасную эксплуатацию в заданном диапазоне температур, в том числе и в режиме повторяющейся коммутации.

Минимальное значение  $T_{j,min}$  определяется как минимальная температура окружающей среды по классу TX (EN 50125-1 и IEC 62498-1) внутри шкафа. Максимальное значение  $T_{j,max}$  для современных полупроводниковых кремниевых приборов  $+175\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Конструкция модуля: конфигурация и терминалы**

**Топология**

Новое поколение полупроводниковых модулей должно отличаться очень низкой паразитной индуктивностью силовых цепей, что по-

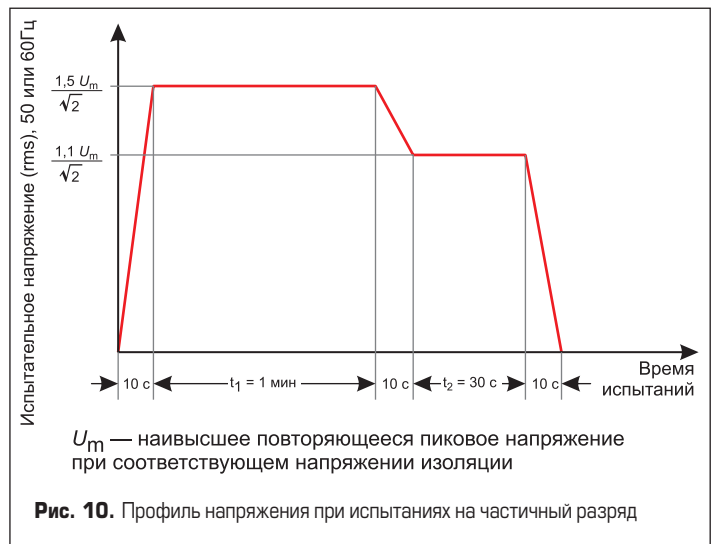


Рис. 10. Профиль напряжения при испытаниях на частичный разряд

зволит снизить коммутационные потери и увеличить скорость переключения.

Для силового модуля следующего поколения рассматривается три топологии (рис. 11):

- полумост (фазная стойка);
- чоппер с верхним ключом;
- фазная стойка выпрямителя (Si PiN).

Основная топология — полумостовой модуль (фазная стойка) с низкой внутренней коммутационной индуктивностью и расположением силовых выводов, обеспечивающим простоту и надежность подключения DC-шины. Также планируется выпуск низкоиндуктивного чоппера с ключом в верхнем плече. Потребность в диодном модуле (стойка выпрямителя) предусмотрена только для кремниевых PiN-диодов (не для SiC), поскольку технология карбида кремния в данном случае не дает

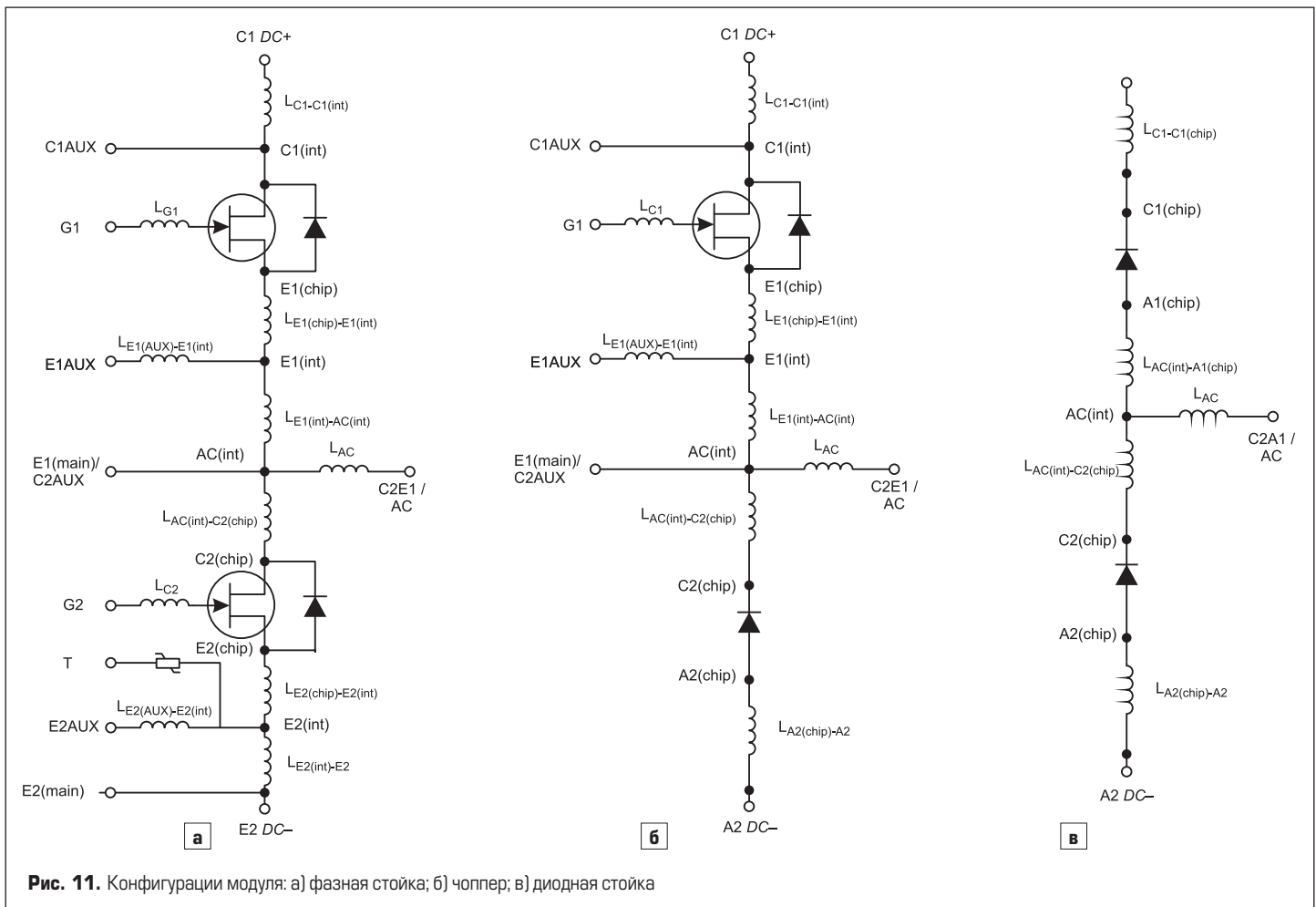


Рис. 11. Конфигурации модуля: а) фазная стойка; б) чоппер; в) диодная стойка

**Таблица 3.** Назначение сигнальных выводов. R — необходимые, T — планируемые

Вывод	Наименование	LVM	HVM	Использование
C1AUX	Коллектор (сигнальный)	R	R	Мониторинг $V_{ce}$ , детектирование КЗ
G1, G2	Затвор			Управление затвором
E1AUX, E2AUX	Эмиттер (сигнальный)			Управление затвором, мониторинг di/dt
E1(main), C2AUX	Эмиттер (силовой) / Коллектор (сигнальный)	T	T	Мониторинг di/dt, мониторинг $V_{ce}$ , детектирование КЗ
E2(main)	Эмиттер (силовой)			Мониторинг di/dt
T	Термистор			Мониторинг температуры

преимуществ. Перечисленные топологии модулей необходимы для обоих вариантов исполнения (LVM и HVM).

**Сигнальные выводы**

Схема расположения сигнальных выводов показана на рис. 11, функциональное назначение описано в таблице 3.

В дополнение к выводам управления затвором сигнальные клеммы коллектора и эмиттера считаются необходимыми для конструктива LVM и HVM. В низковольтном модуле (LVM) также требуются сенсорные выводы силового эмиттера и терморезистора. Эти клеммы не обязательны в высоковольтном модуле, но они считаются полезными и могут появиться в будущем.

**Габаритные и установочные размеры**

Основные размеры низковольтного (LVM) и высоковольтного (HVM) модуля показаны на рис. 12а, б, а также в таблице 4.

**Электрические характеристики**

Цель нормирования механических и электрических характеристик состоит не только в стандартизации, но и в обеспечении некоторой степени свободы для внедрения возможных инноваций производителями силовых модулей. Однако паразитная индуктивность является ключевым параметром, который необходимо ограничить, поскольку эта величина непосредственно влияет на параметры схемы и драйвера затвора. Основные распределенные индуктивности модулей показаны на рис. 11а.

**Коммутационная индуктивность модуля [C1–E2]**

- Динамические характеристики современных модулей (например, 190×140/140×130 мм) ограничены величиной индуктивности в цепи коммутации, наличие которой создает перенапряжение при выключении и, следовательно, требует ограничения скорости коммутации.
- Снижение коммутационной индуктивности является одной из основных задач при разработке нового силового модуля, особенно с применением SiC-приборов.

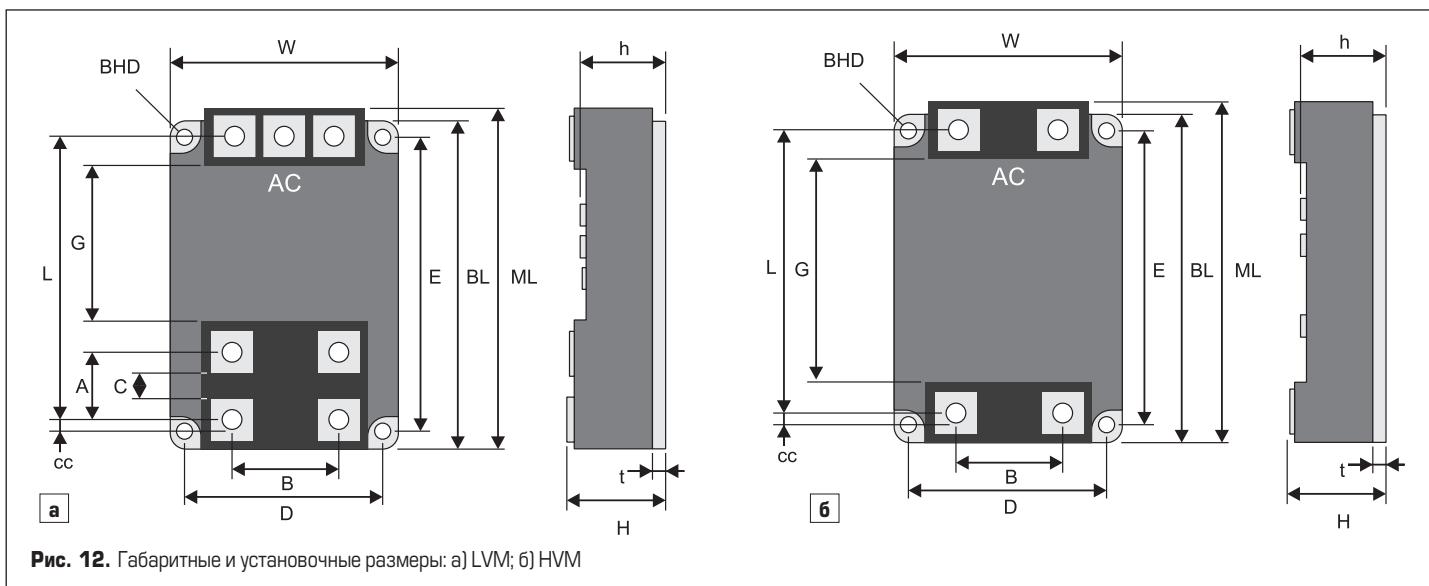
**Таблица 4.** Механические характеристики LVM и HVM

Размер	Описание	LVM, мм	HVM, мм
A	Расстояние между осями DC-/DC+ терминалов	29,5	–
B	Расстояние между осями DC-/DC+ терминалов	46	44
C	Расстояние между краями DC-/DC+ терминалов	> 8	–
D	Расстояние между крепежными отверстиями на базовой плате	86	
E	Расстояние между крепежными отверстиями на базовой плате	127	
BL	Длина базовой платы	140	
BL	Ширина базовой платы	100	
t	Толщина базовой платы	4–5	
BHD	Диаметр монтажного отверстия базовой платы	6,5	
ML	Длина модуля	140/144/150	144
L	Расстояние между осями DC+/AC– терминалов	118/112,5/128,5	118
G	Пространство для монтажа драйвера	65/69/75	81,5
h	Высота корпуса по сигнальным выводам	29,5/35	36
H	Высота корпуса по силовым выводам	38/40	40
cc	Расстояние между центрами терминала DC+ и монтажного отверстия	4,5	–

- Для исполнения LVM максимальное значение распределенной индуктивности установлено на уровне 10 нГн.
- Для исполнения HVM (принимая во внимание низкую скорость приборов с напряжением свыше 3,3 кВ) максимальное значение распределенной индуктивности установлено на уровне 30 нГн.
- Небаланс динамических характеристик из-за асимметрии цепи коммутации между верхним и нижним ключом должен быть минимизирован.

**Индуктивность цепи затвора [G1–E1, G2–E2]**

- Цепь затвора должна быть низкоиндуктивной, чтобы не вносить искажения в сигнал управления.
- Указать конкретные значения распределенных элементов невозможно, поскольку они зависят от паразитных емкостей чипов. Для предотвращения ложных включений следует подавлять паразитные осцилляции в контуре, образованном индуктивностью затвора и емкостями чипов. Необходимо выполнение условия  $R_g > 2\sqrt{L_{GX}/C}$ .
- Индуктивность затвора может играть роль «усилителя тока» во время формирования плато Миллера. Низкие коммутационные потери необязательно достигаются при малой индуктивности затвора.
- Следует минимизировать разницу скоростей коммутаций верхнего и нижнего плеча полумоста, топология силовых цепей должна быть максимально симметричной.
- При использовании параллельных модулей для увеличения тока, цепи управления параллельными ключами должны быть симметричными.



**Рис. 12.** Габаритные и установочные размеры: а) LVM; б) HVM

**Индуктивность цепи «сигнальный эмиттер — силовой эмиттер»** [ $E1_{aux}-E1_{main}$ ,  $E2_{aux}-E2_{main}$ ]

- Эта индуктивность используется для измерения и управления скоростью коммутации  $di/dt$ . Несмотря на ее вклад в общую индуктивность модуля, которую необходимо минимизировать, она должна иметь некоторую величину, чтобы сформировать сигнал обратной связи с разумной амплитудой для работы схемы управления.
- Для исполнения LVM минимальное значение индуктивности — 2 нГн.
- Для исполнения HVM (принимая во внимание низкую скорость приборов с напряжением свыше 3,3 кВ) минимальное значение индуктивности — 4 нГн.
- Указанные величины должны быть одинаковыми для верхнего и нижнего плеча полумоста.

**Условия окружающей среды, материалы**

По сравнению со стандартными промышленными применениями тяговые приводы работают в гораздо более жестких условиях окружающей среды, которые характеризуются следующими факторами:

- очень высокие или очень низкие температуры окружающей среды;
- высокий уровень влажности;
- образование конденсата;
- высокие вибрационные воздействия.

Используемые в настоящее время спецификации и стандарты ориентированы в основном на условия окружающей среды, в которых эксплуатируется транспортное средство, но они не учитывают влияние внешних условий на микроклимат в корпусе конвертера. Для надежной работы полупроводниковых элементов знание этих особенностей внутреннего климата является ключом к надежной работе всего преобразователя.

На рис. 13 продемонстрирован принцип трансформации условий внешней среды во внутренний микроклимат. Соответствующие климатические спецификации для полупроводникового модуля должны предусматривать требования к трем базовым интерфейсам и определенным зонам, показанным на рисунке. На первом этапе определяются статические климатические параметры на основе существующих стандартов, например IEC 60721-3-5, EN 50125-1 и IEC 62498-1, используемых в качестве шаблона, включающего соответствующие требования для трех определенных интерфейсов. Эту спецификацию планируется использовать для стандартизации полупроводников.

На втором этапе подготовки спецификации условия внешней среды преобразуются в более конкретные требования к параметрам внутреннего микроклимата. Выработка такой спецификации является одной из задач проекта Roll2Rail.

Кроме того, жесткость условий окружающей среды для тягового привода определяется наличием:

- химически активных веществ;
- загрязняющих жидкостей;
- механически активных веществ.

Химические воздействия определяются в IEC 60721-3-5 (класс 5C2), за исключением «условий соляного тумана» и «условий твердой соли и соленой воды». Для классификации загрязняющих жидкостей класс 5F1 стандарта IEC 60721-3-5 должен быть расширен на:

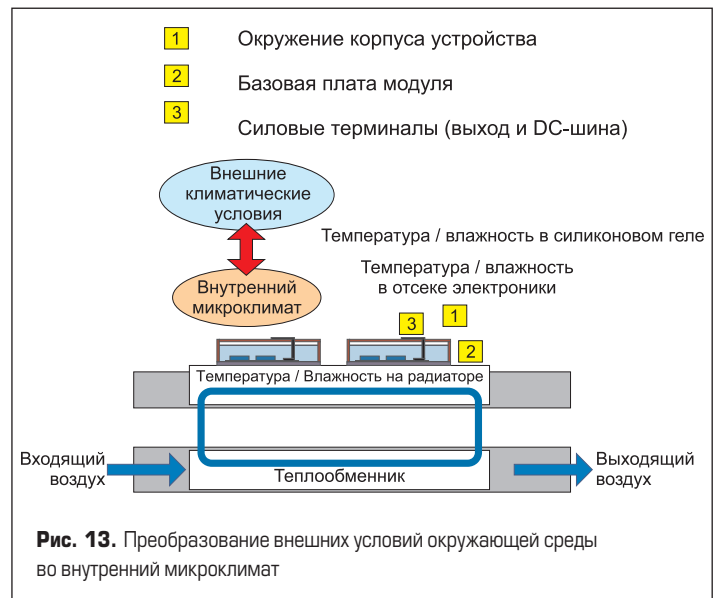
- чистящие жидкости: изопропанол и этанол;
- охлаждающую жидкость: этиленгликоль;
- термопасту.

Механически активные вещества рассматриваются в соответствии с классом 5S2, а биологические условия — в соответствии с классом 5B1 (стандарт IEC 60721-3-5).

**Термоциклирование, срок службы**

**Термоциклирование**

Срок службы IGBT в тяговых применениях ограничен стойкостью конструктива модуля к воздействию термоциклов. Поскольку будущие поколения полупроводников должны работать при более высоких температурах, тепловые стрессы, определяющие срок службы, также возрастут. Поэтому необходимо, чтобы модули следующего поколения не только имели высокую стойкость к циклическим изменениям нагрузки в заданных условиях эксплуатации, но и сохраняли эту способность при увеличении тепловых нагрузок. Оценка стойкости к термоцикли-



**Рис. 13.** Преобразование внешних условий окружающей среды во внутренний микроклимат

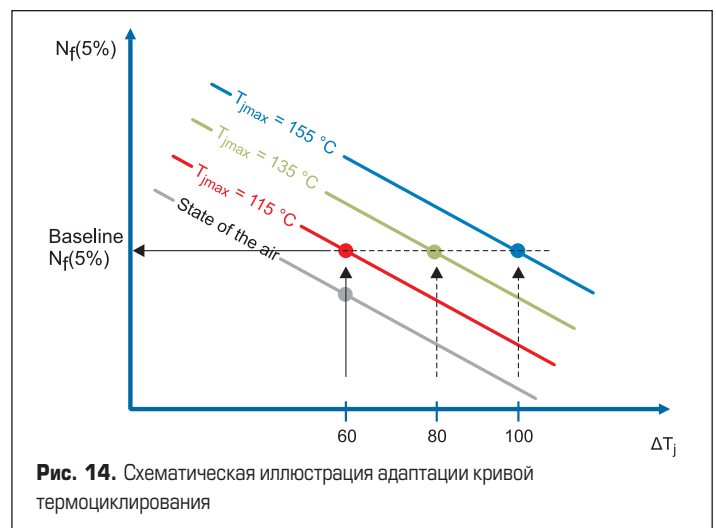
рованию при воздействии «активных» ( $\Delta T_j$ ) и «пассивных» градиентов ( $\Delta T_c$ ) изменения температуры производится следующим образом:

1. Рассчитываются возможности имеющегося конструктива для определенных условий эксплуатации («современное состояние»).
2. Для адаптации к повышенным нагрузкам требования увеличиваются примерно на 25%.
3. Кривая термоциклирования сдвигается для получения аналогичной циклической способности при более высоких тепловых стрессах.
4. Смещенная кривая используется для расчета требуемой стойкости к термоциклированию при заданном температурном градиенте → базовый уровень (Baseline  $N_f$  (5%), рис. 14).

**Расчетные параметры**

Требования по активному и пассивному термоциклированию (см. выше) задаются с помощью ряда условий (для полупроводников с номинальной рабочей температурой +150 и +175 °C соответственно), которые определяются следующим образом:

- $T_{jmax} + 135$  °C (+155 °C) — +15 °C — запас для полупроводниковых приборов с рабочей температурой +150 °C, +20 °C — запас для полупроводниковых приборов с рабочей температурой +175 °C;
- $\Delta T_j$  80K (100K) — предполагается, что система охлаждения стабилизируется на уровне +55 °C в периоды охлаждения (остановка станции);
- $t_{ON}$  (кристалл) 20 с — примерная длительность периода нагрева (ускоренные испытания);
- $T_{cmax} + 120$  °C (+135 °C) — примерная температура корпуса для величины  $T_p$  указанной выше;
- $\Delta T_c$  65K (80K) — предполагается, что система охлаждения стабилизируется на уровне +55 °C в периоды охлаждения (остановка станции);



**Рис. 14.** Схематическая иллюстрация адаптации кривой термоциклирования

- $t_{ON}$  (корпус) 30 с — предполагается, что тепловая инерция корпуса модуля выше, чем у кристалла.

#### Срок службы

Ожидаемый срок службы силового полупроводникового модуля в железнодорожных системах может составлять 35 лет и более. Причем, как правило, без какого-либо технического обслуживания. Если ресурс электронного модуля меньше, чем срок службы оборудования, то производитель должен подготовить замену, совместимую по конструктиву, способу подключения и функциональному назначению.

#### Квалификационные испытания

Силовые полупроводниковые приборы для железнодорожных применений испытываются и квалифицируются в соответствии со стандартом IEC 60747-15. Недавнее обнаружение эффекта деградации и отказов силовых полупроводниковых модулей, вызванных влажностью, указало на необходимость модификации или разработки новых квалификационных испытаний для подобных систем. Новые и дополнительные тесты могут потребоваться и для силовых SiC-приборов, что также является темой для рассмотрения в рамках программы Roll2Rail.

#### Заключение

В течение ближайших лет силовые IGBT-модули останутся основной «рабочей лошадкой» для применения в железнодорожных системах. Технология IGBT рассматривается как достаточно зрелая, и в ближайшем будущем не ожидается кардинальных изменений показателей плотности мощности и частоты коммутации. Однако недавнее появление модулей IGBT 7-го поколения показало, что потенциал кремниевых ключей далеко не исчерпан и по соотношению технических и коммерческих показателей они способны конкурировать с широкозонными полупроводниками. Ожидается также, что внедрение новых IGBT с обратной проводимостью (RC-IGBT) позволит снизить потери проводимости примерно на 25% по сравнению с нынешним поколением Trench IGBT. Отметим, что для полной реализации преимуществ RC-IGBT требуются гораздо более сложные схемы управления затвором.

Использование технологии карбида кремния в мощных тяговых приводах может обеспечить значительное снижение потерь по сравнению с Si IGBT. Но для этого необходимо решить проблемы с надежностью, обеспечить долговременную стабильность параметров и коммерческую привлекательность SiC MOSFET. Карбидокремниевые силовые модули с номинальными характеристиками, пригодными для применения на железнодорожном транспорте, пока не представлены на рынке. Коммерчески доступная технология 1200 В SiC MOSFET может быть расширена на более высокие классы напряжения, но сроки разработки модулей требуемой мощности с напряжением 1700 и 3300 В в значительной степени зависят от уровня инвестиций.

Железнодорожное тяговое оборудование обычно рассчитывается на срок службы 30–40 лет, соответственно, запасные части должны быть доступны в течение этого времени. Поэтому тема физического и морального старения силовых полупроводниковых приборов нуждается в дальнейшем изучении как производителями элементной базы, так и разработчиками оборудования для железной дороги.

Доля силовых полупроводниковых приборов на рынке железнодорожных систем составляет 4–6%, то есть достаточно мала в сравнении с другими областями применения. Например, этот же сектор в отношении электромобилей (EV/HEV), по прогнозам, в ближайшие годы превысит 50%. Так или иначе объем рынка IGBT в ж/д приводах составляет сейчас около €30 млн.

Крупнейшие инвестиции производителей силовых приборов в настоящее время направлены на разработку специализированных модулей для автомобильных приводов. Тем не менее применение полупроводниковых ключей в железнодорожных системах дает более высокую прибыль, что становится хорошей мотивацией для инвестирования в данный сектор экономики. В результате на рынке уже появились и будут разрабатываться новые, усовершенствованные силовые ключи, ориентированные на применение в ж/д приводе. Один из наглядных примеров — новый полумостовой модуль SEMITRANS 20 в конструктиве LDV, разработанный компанией SEMIKRON. Аналогичные компоненты анонсированы и другими производителями под торговыми марками LinPak, LV100/HV100, nHPD2, XHP.