

# Следующее поколение IGBT-модулей повышенной мощности

Высокомощные общепромышленные применения требуют добротной силовой компонентной базы с широким диапазоном рабочих токов, высокой надежностью, а также большой плотностью мощности и низкой индуктивностью. Для удовлетворения данных потребностей линейка высоковольтных модулей LV100, представленная в 2017 году [1], была адаптирована под нужды общепромышленных применений.

Виктор Толстопятов

Victor.Tolstopyatov@mer.mee.com

Томас Радке

Нарендер Лакшманан

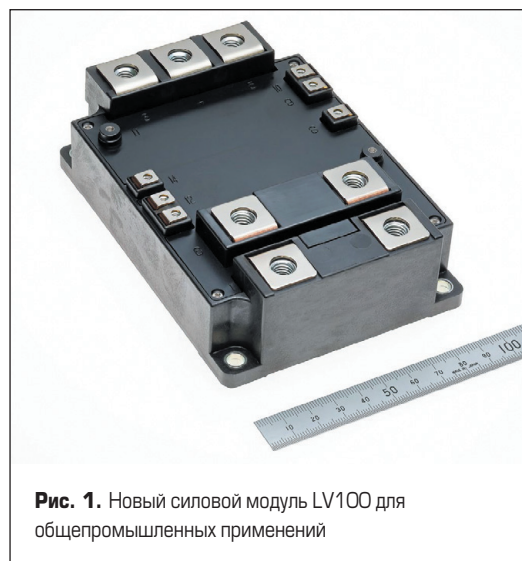


Рис. 1. Новый силовой модуль LV100 для общепромышленных применений

### Концепт LV100

Силовые IGBT-модули, используемые в преобразователях общепромышленного исполнения в классах напряжения 1200 и 1700 В, зачастую должны обладать повышенной плотностью тока, высокой надежностью, возможностью масштабирования результирующего выходного тока. Специально для соответствия всем вышеперечисленным свойствам разработан концепт модулей, базирующийся на высоковольтной линейке LV100 (рис. 1, 2). Концепция обещает стать успешной, так как модули выполнены в стандартизованных корпусах (полностью совместимых с LV100), имеют высокий номинальный ток с возможностью кратного увеличения при параллельном включении, а также низкую паразитную индуктивность и равномерное распределение тока внутри модуля и, как следствие, возможность работы с быстродействующими транзисторами (SiC MOSFET). В сочетании с новейшими чипами седьмого поколения и технологией корпусирования SLC [2], обеспечивающей бесконечное количество длинных термоциклов, производительность новых модулей находится на самом высоком уровне. В классе напряжения 1700 В максимальный ток модуля составляет 1200 А, что при размерах основания модуля 144×100 мм<sup>2</sup> позволяет достичь плотности тока 8,3 А/см<sup>2</sup>.

### Внутренняя структура LV100

Поскольку размеры одного IGBT-кристалла ограничены, в мощных IGBT-модулях высокий выходной ток достигается параллельным включением нескольких чипов током около 200 А каждый для классов напряжения 1200 и 1700 В. Таким образом, для достижения суммарного тока модуля 1200 А необходимо параллельное включение по меньшей мере шести IGBT-кристаллов. Основной задачей при разработке корпуса модуля становится равномерное распределение суммарного тока между параллельно включенными чипами. Это необходимо для обеспечения ра-

Топология	Корпус	Целевое применение	Тип	I <sub>C</sub> , А	V <sub>CE(S)</sub> , В		
					1200	1700	3300
	LV100 (V <sub>isol</sub> = 4 kV) SLC-структура	<b>NEW</b> промышленное применение	Si IGBT	800		★	
				1000	(в плане)		
				1200			
				1400	(в плане)		
	LV100 (V <sub>isol</sub> = 6 kV)	тяговое применение (пассажирский транспорт)	Si IGBT	450			
				600			
				1000			
			SiC	1200			
				600			SiC гибрид
				750			Full-SiC
			1200		SiC гибрид		

★ Дополнительная версия с диодом повышенной мощности

Рис. 2. Линейка общепромышленных модулей LV100

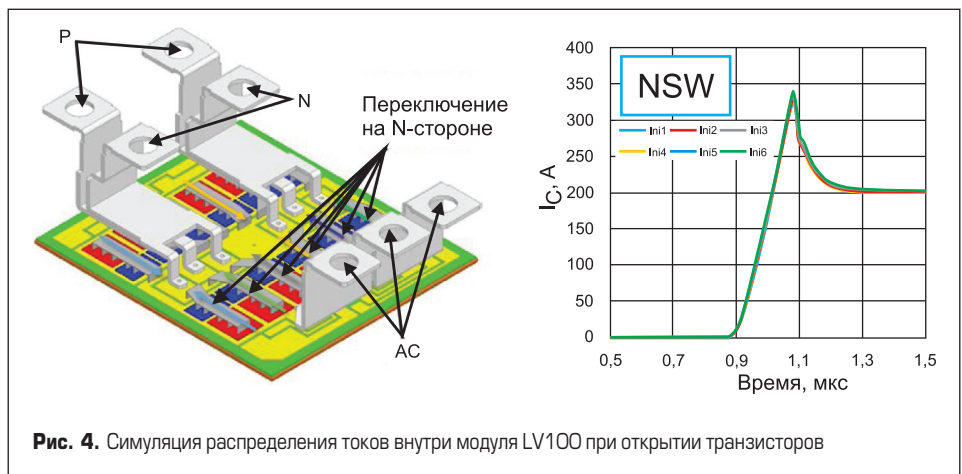
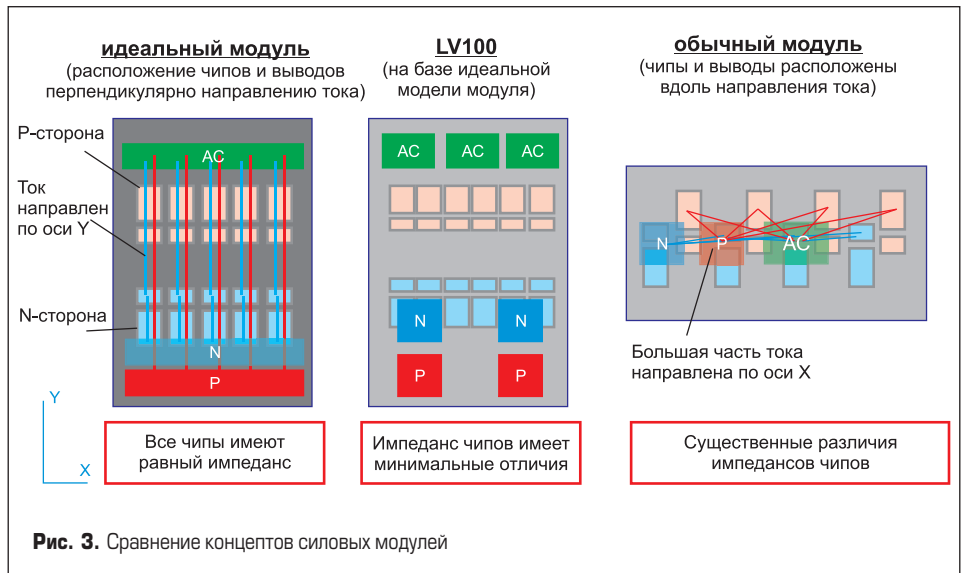
венства потерь в кристаллах и, соответственно, их эквивалентному нагреву. Неравномерности распределения тока приводят к перегреву наиболее нагруженного чипа, что ограничивает не только производительность, но и срок службы всей системы. Наиболее существенную роль здесь играют паразитные сопротивления (как активные, так и индуктивные) цепей подключения каждого отдельного кристалла. Так, неравенство паразитных индуктивностей приводит к динамическому дисбалансу токов в параллельных ветвях при переключении IGBT. При этом расположение силовых выводов и чипов относительно них является основным фактором, влияющим на величину и неравенство внутренних индуктивностей модуля. В самом идеальном случае расстояния от силовых выводов до каждого из чипов должны быть равны. Это может быть достигнуто за счет перпендикулярного расположения терминалов и чипов относительно направления течения тока (рис. 3) [3]. В модели идеального прибора направление тока (голубые и красные стрелки) предусмотрено только вдоль оси Y, в то время как кристаллы и выводы расположены по перпендикулярной оси X.

При таком подходе достигаются равные паразитные импедансы параллельных чипов. Данная идея легла в основу создания концепции модулей LV100, за счет чего удалось достичь высокой равномерности распределения тока внутри модуля (рис. 4). При этом в большинстве современных модулей высокой мощности, сегодня используемых в промышленности, силовые выводы, кристаллы транзисторов и пути протекания тока располагаются параллельно, что не позволяет добиться эквивалентных сопротивлений между ветвями, и дисбаланс токов неизбежен. И если в номинальном режиме работы модуля разброс токов компенсируется запасами, заложенными в чипы, то в аварийных режимах, таких, например, как перегрузка или короткое замыкание, вероятность выхода модуля из строя существенно увеличивается.

В случае с быстродействующими полупроводниками с крутыми фронтами переключения  $di/dt$  отличия в индуктивностях между параллельно включенными чипами приводят к недопустимому дисбалансу токов. Концепция модулей LV100 хорошо подходит для высокоскоростных кристаллов, в том числе на основе карбида кремния (SiC) [4]. Таким образом, переход с Si-IGBT- на SiC-MOSFET-модули [5] в будущем не потребует изменения конструкции преобразователя.

**Корпус с неограниченным количеством длинных термоциклов**

Во многих электроприводах высокой мощности IGBT-модули подвержены переменной нагрузке, ввиду чего происходят постоянные перепады температуры корпуса  $T_c$  (длинные термоциклы) [6]. Силовые модули преобразователя карьерного самосвала, к примеру, испытывают многократные температурные перепады в течение суток из-за остановок машины, преодоления уклона и движения под

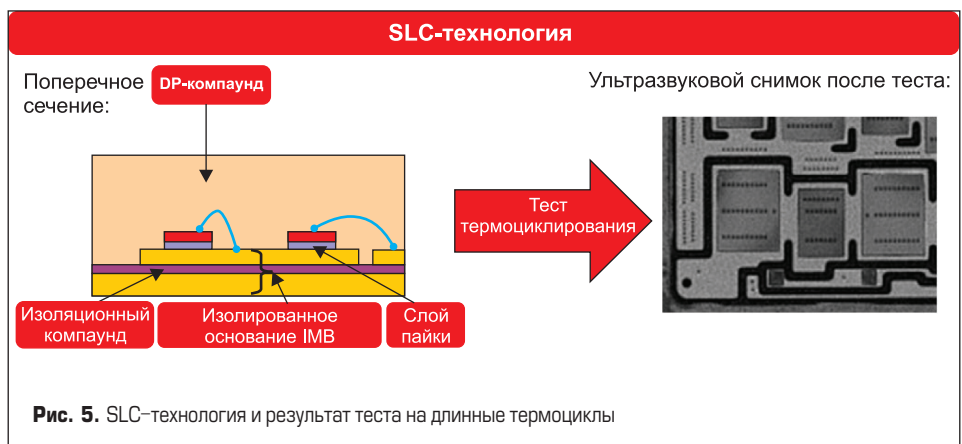


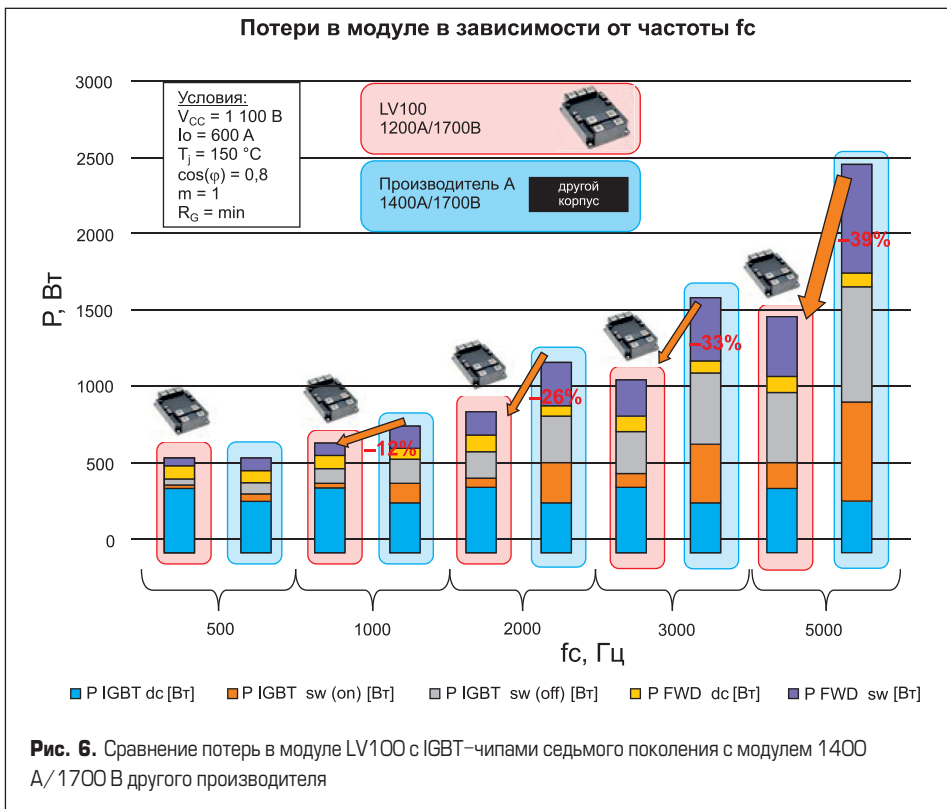
горку. Учитывая высокие требования к сроку службы преобразователя, силовые модули должны безотказно преодолевать по меньшей мере несколько тысяч длинных термоциклов. Количество термоциклов модулей с классической структурой корпуса (несколько керамических изоляционных подложек, запаянных на медном основании) ограничено. В модулях LV100 используется SLC-технология корпусирования, которая за несколько лет присутствия на рынке (IGBT-модули серии NX7) отлично себя зарекомендовала [7, 8]. Как видно на рис. 5, вместо традиционной структуры с керамикой модули LV100 построены на базе ИМВ-структуры (Insulated Metal Baseplate —

изолированное металлическое основание) в сочетании с изоляционным компаундом вместо силиконового геля. Коэффициент теплового расширения (КТР) изоляционного материала в данной структуре в точности совпадает с КТР меди. Ввиду совпадения КТР и отсутствия пайки соединение изоляции с базовой плитой не разрушается и по факту количество длинных термоциклов неограниченно.

**IGBT-кристаллы седьмого поколения на 1700 В**

Седьмое поколение IGBT-транзисторов и диодов, применяемых в новых модулях,





имеет оптимизированную структуру и меньшую толщину в сравнении с предшествующей, шестой серией. Баланс между статическими и динамическими потерями в кристаллах также был смещен в сторону снижения энергии переключения [9]. С помощью утилиты для теплового расчета IGBT-модулей Mitsubishi Electric Melcosim [10] были рассчитаны потери в модуле при типовых параметрах работы инвертора. Результаты расчета отражены на рис. 6 в разрезе сравнения с модулем 1400 А/1700 В другого производителя. Видно, что при частоте коммутации ключей 500 Гц суммарные потери в модулях соизмеримы. Однако благодаря снижению динамических потерь в модулях LV100 при увеличении частоты ШИМ более 500 Гц разница в потерях становится существенной. Например, при частоте 5 кГц модуль LV100 обладает на 39% меньшими суммарными по-

терями. В конечном итоге разница в потерях выливается в снижение стоимости преобразователя за счет меньших размеров охлаждаителя и позволяет достичь более высокой плотности мощности инвертора.

### Заключение

В данный момент в разработке находятся IGBT-модули стандарта LV100, оптимизированные под общепромышленные применения с высокой выходной мощностью. Корпус устройств полностью повторяет концепцию высоковольтных LV100, ставшую фактически новым стандартом на рынке. Благодаря технологии корпусирования SLC новые модули не имеют ограничений по количеству длинных термоциклов, тем самым увеличивая надежность системы. IGBT-кристаллы седьмого поколения обеспечивают низкие динамиче-

ские потери, дающие существенный прирост производительности в области частот коммутации свыше 500 Гц. За счет особого расположения чипов и силовых выводов модули LV100 обладают минимальной паразитной индуктивностью, а также высокой равномерностью распределения тока между параллельно включенными кристаллами, что позволяет использовать данный корпус с высокоскоростными полупроводниками.

### Литература

1. Толстой В., Хатори К. Седьмое поколение IGBT-модулей с новой SLC-технологией // Силовая электроника. 2017. № 5.
2. Толстой В., Радке Т., Коичи М. LV100 — полумостовой модуль для тяговых инверторов новых поколений // Силовая электроника. 2015. № 5.
3. Borghoff G. Implementation of low inductive strip line concept for symmetric switching in a new high power module. PCIM Europe, 2013.
4. Soltau N. et al. 3.3 kV Full SiC MOSFETs — Towards High-Performance Traction Inverters // Bodo's Power Systems. Jan. 2018.
5. Soltau N. et al. Switching Performance of 750A/3300V Dual SiC-Modules // Bodo's Power Systems. Feb. 2019.
6. Power Module Reliability. Mitsubishi Electric Application note. [www.mitsubishielectric.com/semiconductors/products/pdf/reliability/0512\\_e.pdf](http://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/products/pdf/reliability/0512_e.pdf)
7. Takahashi T. et al. A 1700V-IGBT module and IPM with new insulated metal baseplate (IMB) featuring enhanced isolation properties and thermal conductivity. PCIM Europe, 2016.
8. Asada S. et al. Resin Encapsulation Combined with Insulated Metal Baseplate for Improving Power Module Reliability. PCIM Europe, 2016.
9. Miyazawa M. et al. Mitsubishi 7th generation 1700 V IGBT Modules: Loss Reduction and Excellent System Performance // Bodo's Power Systems. March 2018.
10. Melcosim simulation software for Mitsubishi Electric power modules [www.mitsubishielectric.com/semiconductors/simulator/index.html](http://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/simulator/index.html)