

# Прямое жидкостное охлаждение силовых модулей

**Вопрос охлаждения любого полупроводникового устройства является одним из наиболее важных для обеспечения его надежной эксплуатации. Он актуален для всех полупроводниковых изделий, начиная от дискретных компонентов и маломощных микросхем с милливаттными тепловыми потерями и заканчивая силовыми полупроводниковыми приборами, от которых необходимо отводить до нескольких киловатт мощности потерь. В статье представлены результаты разработки новых силовых диодно-тиристорных модулей со встроенным жидкостным охладителем, применение которого позволяет значительно увеличить показатели удельной коммутируемой мощности и нагрузочную способность. Использование подобных модулей позволяет снизить массогабаритные показатели преобразовательной техники за счет уменьшения материалоемкости.**

Дмитрий Немаев

Вячеслав Мускатиньев

Рафаэль Биктиев

nicssp@elvpr.ru

Несмотря на продолжающееся активное развитие в преобразовательной технике IGBT- и MOSFET-технологий, по-прежнему на рынке силовой электроники остаются востребованными диоды и тиристоры. Для некоторых традиционных применений они остаются предпочтительными как из-за простоты управления и надежности в эксплуатации, так и из-за более привлекательных ценовых параметров. Особенно это относится к биполярным силовым полупроводниковым приборам (СПП) высокой мощности. По мере увеличения плотности коммутируемой мощности растут тепловые потери в расчете на единицу площади кремниевой структуры, поэтому в настоящее время для создания относительно компактных преобразовательных устройств недостаточно эффективности воздушных охладителей, и в этом случае наступает очередь жидкостных охлаждающих систем [1]. Вопрос эффективного теплоотвода вдвойне актуален для силовых модулей [2], которые очень популярны среди разработчиков преобразовательных устройств из-за удобства монтажа и электрически изолированного основания. Однако у модулей есть свои минусы, и один из них — одностороннее охлаждение, да еще и через теплопроводящий изолятор, увеличивающий и без того высокое тепловое сопротивление модуля в сравнении с прижимными СПП. При плотном направленном потоке отводимой мощности потеря, который характерен для жидкостного охлаждения, когда практически весь тепловой поток направлен только в сторону охладителя, любой дополнительный интерфейсный слой на его пути вносит существенный вклад в увеличение тепло-

вого сопротивления системы. В частности, перепад температур  $\Delta T$  на слое теплопроводящей пасты между жидкостным охладителем и модулем может превышать 10–12 °С. Поэтому главной задачей в улучшении жидкостного теплоотвода является минимизация дополнительных переходных слоев и максимальное приближение хладагента к источнику тепла, то есть к кремниевой структуре.

Мощные модули имеют унифицированную конструкцию, позволяющую использовать их с различными типами охладителей [2, 3]. Прижимная конструкция модулей предполагает необходимость применения достаточно толстого медного основания (в сравнении с паяной модульной конструкцией), которое участвует в системе прижима и обеспечивает жесткость механической системы. Жидкостный охладитель имеет большую толщину, чем стандартное основание модуля, это дает возможность смонтировать модуль прямо на охладитель. Данное конструктивное отличие фактически само предопределяет возможность исключения из системы теплопередачи дополнительного контакта между основанием модуля и охладителем, в том числе интерфейса теплопроводящей пасты.

На рис. 1 показаны переходные тепловые характеристики модуля M2T-320 с дискретным (M2T-320 + OB) и встроенным (M2T-320OB) жидкостным охладителем. Зависимости приведены для суммарного теплового сопротивления «переход — охлаждающая жидкость» в одинаковых условиях по температуре и расходу охлаждающей воды.

На рис. 1 видно, что применение встроенного охлаждения улучшает эффективность теплоотвода

на 25% в сравнении с классической системой, что в свою очередь ведет к увеличению токовых характеристик на 15–20%.

Однако на этом возможности снижения суммарного теплового сопротивления не ограничиваются. Эффективность жидкостного охлаждения также значительно зависит и от конфигурации каналов охлаждения, которая, в свою очередь, определяется расположением входа и выхода для охлаждающей жидкости. Для различных вариантов применения модулей входные и выходные отверстия охладителя могут быть размещены как на одной стороне (рис. 2), так и на противоположных сторонах основания (рис. 3).

На рис. 4 показаны переходные тепловые характеристики обоих вариантов модуля М1Д-2500-...ОВ. Из зависимостей видно, что при оппозитном расположении входного и выходного каналов (тип 2) суммарное тепловое сопротивление «переход — охлаждающая жидкость» снижается более чем на 7% в сравнении с расположением рядом (тип 1).

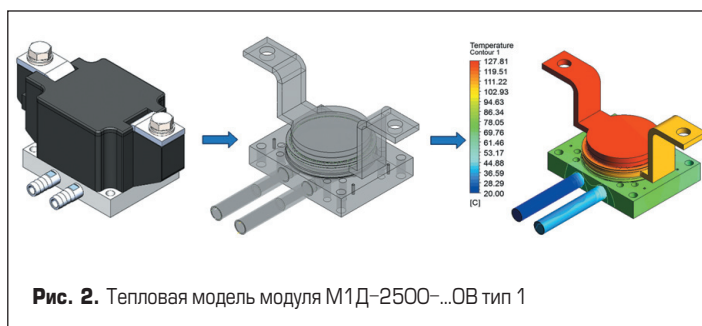
**Закключение**

Встроенное охлаждение не является новым принципом улучшения теплоотвода, многие производители силовой электроники имеют собственные технические решения в этом направлении. Однако в большинстве случаев СПП с прямым жидкостным охлаждением являются эксклюзивным продуктом и отсутствуют в программе серийных поставок. Кроме того, у многих производителей прямое жидкостное охлаждение связано со значительным усложнением конструкции системы, что ведет к существенному увеличению цены готового изделия. В описанном варианте конструкции силовых модулей используется собственная технология изготовления охладителей и деталей модулей, что предоставляет возможность оперативно

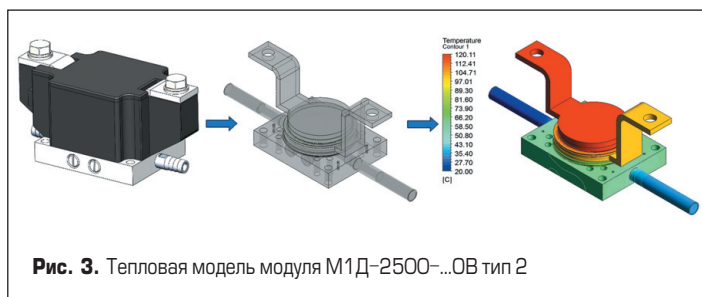
выполнять производственную программу модулей со встроенным жидкостным охлаждением в нескольких конструктивных исполнениях [4]. Причем, кроме существенного улучшения тепловых параметров, данное техническое решение является для потребителя более дешевым вариантом, чем приобретение отдельных компонентов (модуль и охладитель).

**Литература**

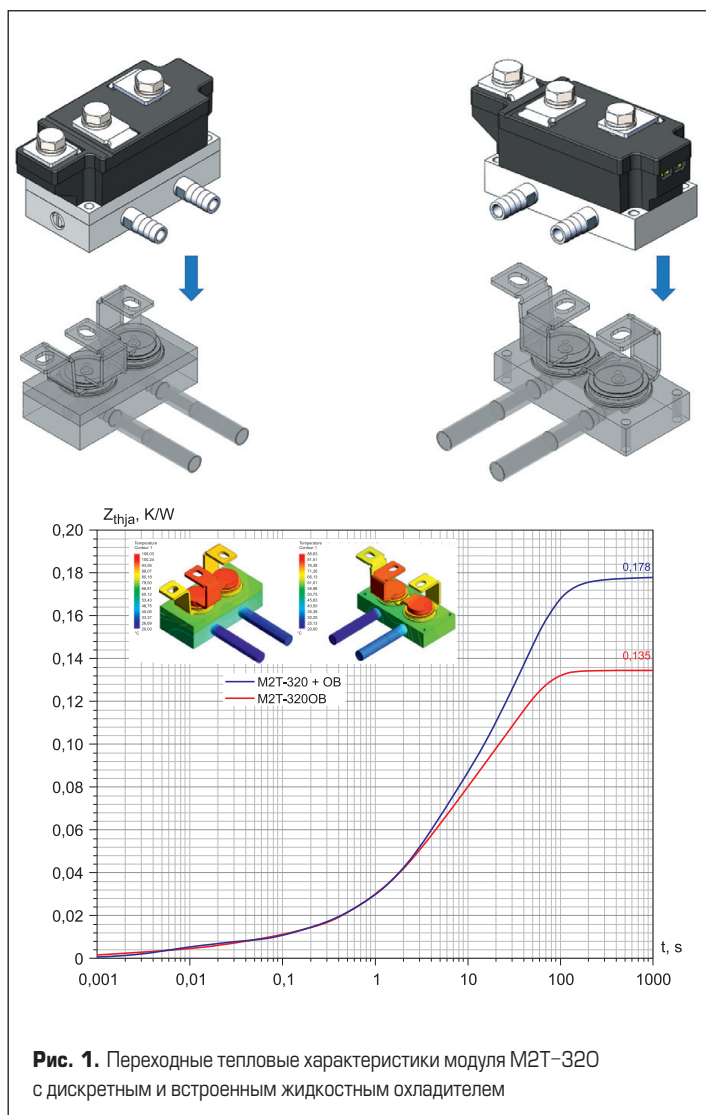
1. Биктiev P., Немаев Д., Мускатинов В., Кучумова М., Мещеряков В., Гришанин А. Высокоэффективные жидкостные охладители для изделий силовой электроники // Силовая электроника. 2019. № 6.
2. Варянова Г., Матвеев В., Дружинин А., Немаев Д., Оруджев Х., Тишкина Л., Учайкина А., Мушкетова Н. Тиристорные модули высокой мощности для электропривода // Силовая электроника. 2021. № 2.
3. Сабешкин А., Мускатинов В., Гришанин А., Елисеев В., Иванова С., Потапов С., Аширов Р., Немаев Д. Силовые блоки на основе тиристоров и фототиристоров для промышленных применений // Силовая электроника. 2020. № 1.
4. [www.elvpr.ru](http://www.elvpr.ru)



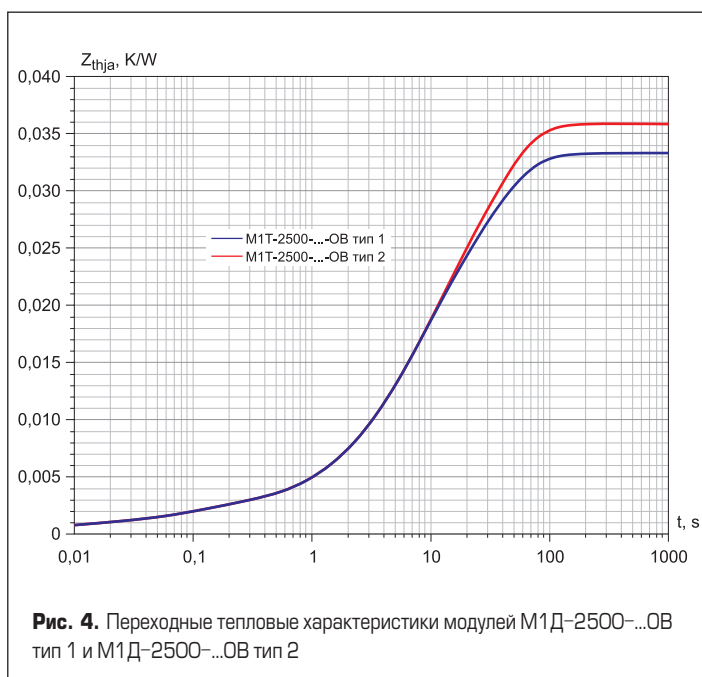
**Рис. 2.** Тепловая модель модуля М1Д-2500-...ОВ тип 1



**Рис. 3.** Тепловая модель модуля М1Д-2500-...ОВ тип 2



**Рис. 1.** Переходные тепловые характеристики модуля М2Т-320 с дискретным и встроенным жидкостным охладителем



**Рис. 4.** Переходные тепловые характеристики модулей М1Д-2500-...ОВ тип 1 и М1Д-2500-...ОВ тип 2