

Модернизация силовых модулей

для повышения плотности мощности и срока службы

Улучшение тепловых характеристик может быть достигнуто за счет использования «волновой» концепции подключения базовой платы силового модуля, даже если все другие элементы остаются неизменными.

**Стефан Бушхорн
(Dr. Stefan Buschhorn)**

Клаус Вогел (Klaus Vogel)

**Перевод:
Евгений Карташов**

Электрификация приводов большегрузных автомобилей создает множество вызовов для производителей силовых полупроводниковых приборов. Одним из наиболее сложных требований является повышение устойчивости к циклическим нагрузкам: этот показатель во многом определяет срок службы силовых модулей. «Волновая» базовая плата усовершенствованного корпуса EconoDUAL3 уже хорошо себя зарекомендовала: такая структура задней стороны силового модуля значительно улучшает тепловые характеристики системы охлаждения с открытым жидкостным радиатором без изменения других

элементов конструкции модуля. В зависимости от радиатора подобный подход позволяет увеличить выходной ток более чем на 20% или, соответственно, значительно повысить срок службы при заданном профиле нагрузки.

Сравнение концепций радиаторов

Для пассажирских электромобилей и электробусов жидкостные радиаторы считаются стандартным решением, при этом существуют две различные конструктивные концепции, показанные на рис. 1. Первый вариант — охлаждающая плита закрытой системы охлаждения, в которой силовой модуль с термопастой устанавливается сверху на тепло-

сток. Четко определенный тепловой интерфейс «модуль-радиатор» позволяет по отдельности легко оптимизировать температуру обеих частей, а также использовать стандартные компоненты системы охлаждения. Однако повысить эффективность отвода тепла можно с помощью концепции «открытой» системы, при которой задняя сторона силового модуля находится в непосредственном контакте с жидкостью. В последнем случае тепловые характеристики определяются как комбинация параметров теплоотвода и силового модуля, поскольку зависят от свойств интерфейса между базовой платой и радиатором.

На рис. 1б представлен модуль с «волновой» базовой платой. При такой концепции задняя сторона модуля размещается в «открытом» радиаторе. Волновая структура увеличивает площадь поверхности и в то же время повышает турбулентность в жидкости. Оба эффекта снижают тепловое сопротивление, что обеспечивает уменьшение температуры полупроводниковых чипов по сравнению с обычным конструктивом с плоской базой. В противоположность этому стандартный силовой модуль с нанесенным интерфейсным слоем термопасты устанавливается на монтажную плоскость

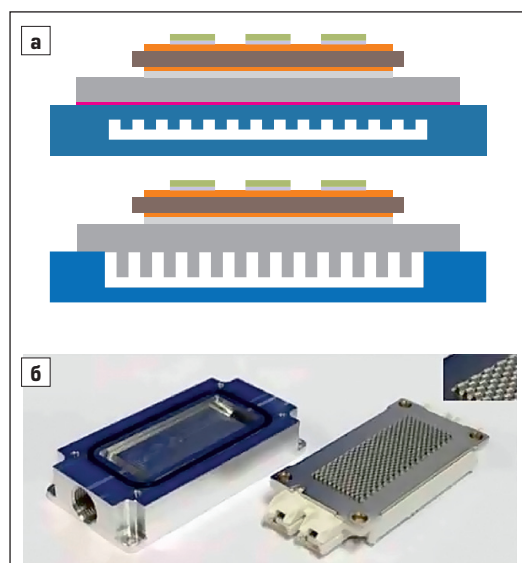


Рис. 1. Две концепции радиаторов: а) силовой модуль на закрытом (сверху) и открытом (снизу) жидкостном радиаторе; б) волновая технология — базовая плата силового модуля установлена на открытый радиатор

закрытого радиатора. Причем площадь охлаждаемой жидкостью поверхности и турбулентность определяются только свойствами радиатора.

Эффективность охлаждения в различных условиях

Сравнение производительности выполнено для полумостового модуля с номинальным током 900 А в корпусе EconoDUAL3. Для корректности сравнения оба варианта системы тестируются при различных токах I_{rms} и частоте переключения 4 кГц. Измерение температуры чипов выполнено с помощью тепловизора на специально подготовленных открытых модулях, окрашенных в черный цвет.

На рис. 2 показан тепловой профиль открытого модуля для двух различных концепций охлаждения при одинаковых условиях эксплуатации. Стандартный силовой ключ с плоской базовой платой установлен на закрытом радиаторе, такой же элемент с «волновой» базой работает на открытом теплоотводе. Преимущество второго варианта, обеспечивающего явное снижение температуры, очевидно.

Средняя температура чипов T_{jav} определенная по тепловому профилю, используется для дальнейшего анализа. На рис. 3 приведено значение T_{jav} для разных концепций охлаждения в зависимости от выходного тока. Температура воды на входе (+50 °С) показана горизонтальной линией для индикации максимальных пульсаций T_j в каждом рабочем режиме. И снова вариант с открытым теплоотводом и «волновой» базой обеспечивает гораздо меньший нагрев, который дополнительно уменьшается с увеличением объемного расхода жидкости. При скорости потока 15 л/мин и $I_{rms} = 500$ А достигается снижение температуры на 25 К. В свою очередь, будут сокращаться и пульсации T_j для заданного профиля нагрузки.

Полученные результаты очень привлекательны для большегрузных автомобилей, где максимальная рабочая температура должна быть ограничена во избежание больших градиентов T_j , приводящих к снижению срока службы. В качестве альтернативы решение с «волновой» базой позволяет увеличить выходной ток до 30%, что также увеличивает плотность мощности.

При рассмотрении графиков может показаться, что повышение скорости потока является хорошим решением, однако это достигается за счет увеличения перепада давления на теплоотводе. В конечном счете необходим тщательный анализ системы охлаждения, позволяющий найти оптимальный баланс между скоростью потока, перепадом давления и тепловыми характеристиками системы.

Улучшение показателей надежности

Еще один очень важный показатель для транспортных применений — срок служ-

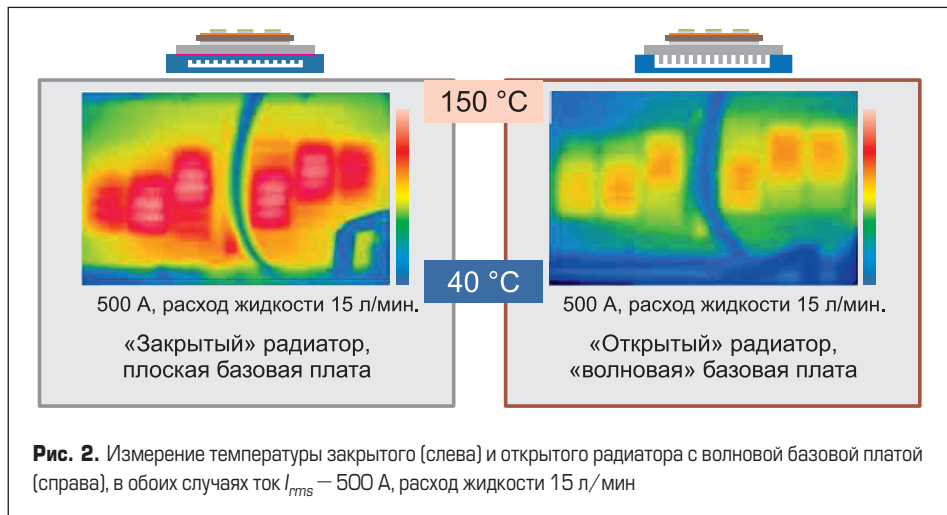


Рис. 2. Измерение температуры закрытого (слева) и открытого радиатора с волновой базовой платой (справа), в обоих случаях ток $I_{rms} = 500$ А, расход жидкости 15 л/мин

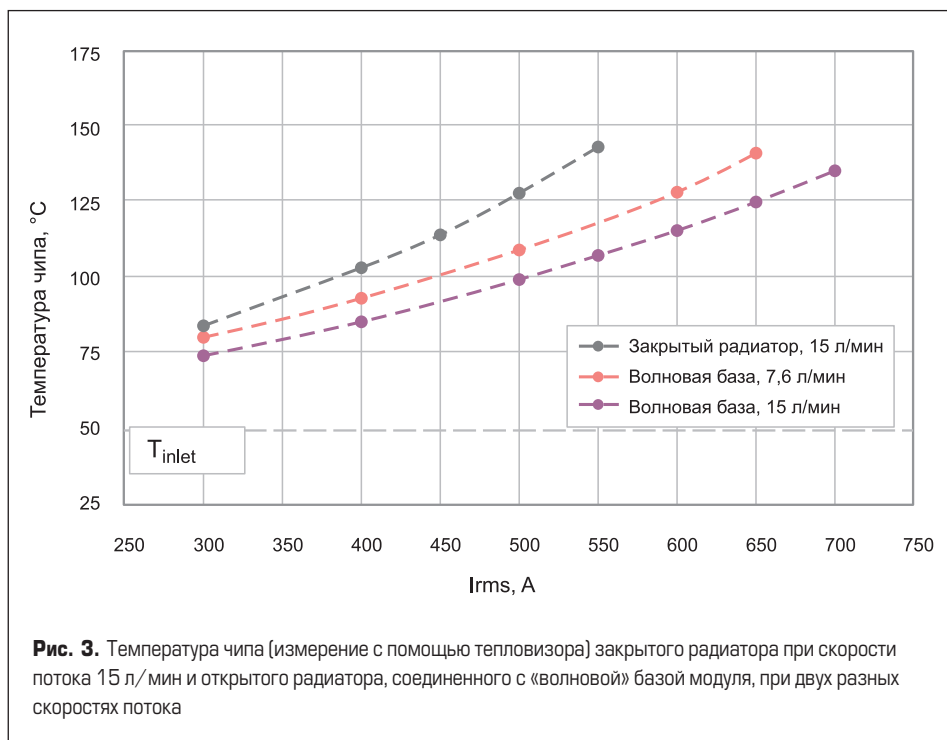


Рис. 3. Температура чипа (измерение с помощью тепловизора) закрытого радиатора при скорости потока 15 л/мин и открытого радиатора, соединенного с «волновой» базой модуля, при двух разных скоростях потока

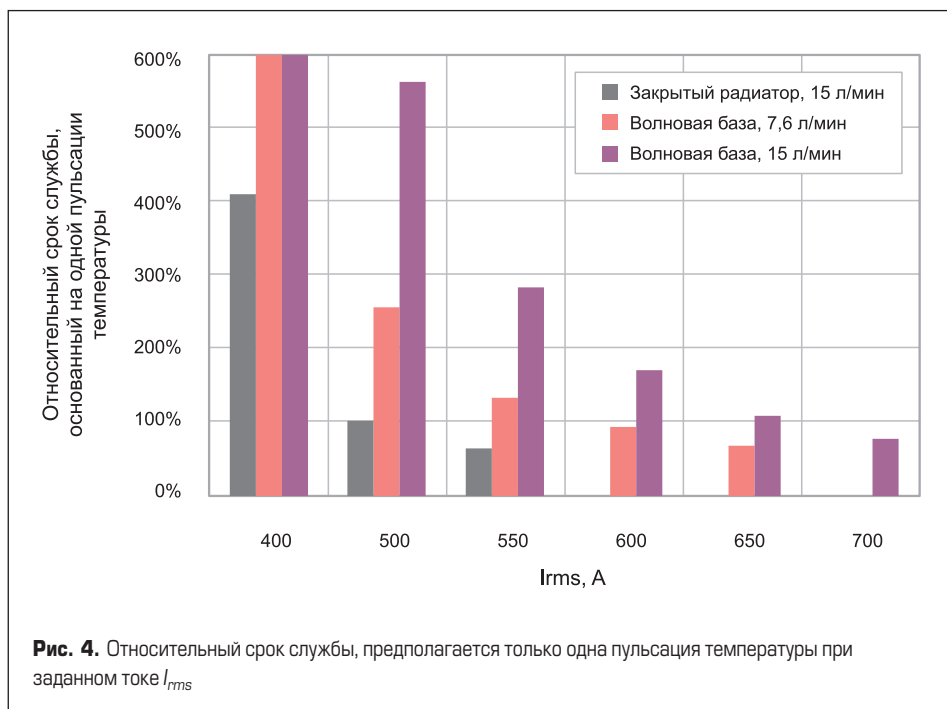


Рис. 4. Относительный срок службы, предполагается только одна пульсация температуры при заданном токе I_{rms}

бы силовых модулей. В первую очередь это относится к городскому транспорту, для которого характерно большое количество стартов и остановок, что требует от привода высокой надежности при воздействии циклических импульсов мощности (РС). Характеристики стойкости силовых модулей к термоциклированию предоставляются производителем, однако следует оценить использованный метод проверки, так как он может оказать существенное влияние на результаты испытаний.

Поскольку концепция «волновой» базы требует доработки только нижней стороны модуля, общая стойкость к РС в этом случае такая же, как и у стандартных компонентов. С учетом этого улучшение тепловых характеристик, как описано выше, приводит к уменьшению пульсаций температуры и, следовательно, к увеличению срока службы для заданного профиля нагрузки.

Первое представление о преимуществах новой концепции можно получить, сделав

постое сравнение: максимальный градиент температуры определяется температурой воды на входе системы и нагревом чипа при заданном токе I_{rms} . Если предположить, что это единственная пульсация температуры на одном цикле нагрузки, то возможное количество циклов напрямую определяется кривой РС.

На рис. 4 показан результирующий относительный срок службы модулей для различных концепций охлаждения. Исходя из этих данных при выходном токе 500 А срок службы может быть повышен в 2–5 раз. В то же время выходной ток может быть увеличен от 20% более чем до 30%, в зависимости от скорости потока для одного и того же конструктива без ущерба для надежности. Это очень многообещающие оценки, особенно с учетом того, что сам силовой модуль, его электрическая схема и плата драйвера вообще не меняются. Единственное отличие заключается в переходе от плоской базовой

платы к «волновой» с открытым теплоотводом.

Подводя итог, можно считать доказанным, что «волновая» технология обеспечивает явное преимущество для конкретного применения. Благодаря «волновой» конструкции задней стороны силового модуля достигается заметное улучшение тепловых характеристик, при этом все остальные элементы конструкции остаются неизменными. Это может быть использовано для увеличения выходного тока более чем на 20% или для значительного повышения ресурса модуля при заданных условиях эксплуатации. Последнее особенно привлекательно для применений с высокой циклической нагрузкой, таких как электробусы или электрические развозные грузовики, где режим «старт-стоп» предъявляет высокие требования к надежности силового модуля.

Литература

1. Infineon Technologies. www.infineon.com