

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМНОГО РАЗОГРЕВА КОМПОНЕНТОВ СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Журавлёв В. И., Петровский И. И., Свито И. Л.

Кафедра теоретических основ электротехники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь
E-mail: vadzh@bsuir.by

Предложен подход для оценки взаимного разогрева полупроводниковых компонентов силовых преобразователей на основе теплового моделирования. Показано отличие в получаемых результатах в зависимости от учёта параметров компонентов преобразователя

ВВЕДЕНИЕ

В последние несколько лет возрос интерес к оценке надёжности силовых электронных устройств на основе физики отказов [1]. Электронные полупроводниковые ключи являются наиболее уязвимыми частями силовых преобразователей и, следовательно, играют важную роль в их надёжности. Механизм термомеханического разрушения имеет большое значение из-за скачков температуры перехода и разности коэффициентов теплового расширения различных слоёв [2]. При выделении тепловой мощности на различных компонентах на плате между ними могут возникнуть термомеханические напряжения. Это проявляется в увеличении напряжения включения и повышении теплового сопротивления компонентов [3]. Как результат, это сказывается на выходных параметрах всего преобразователя и приводит к ухудшению электрических и тепловых характеристик эксплуатации, что приводит к ускоренной деградации. Эти процессы могут быть спрогнозированы посредством построения соответствующих моделей теплового моделирования.

I. ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ

При построении тепловой модели важно учитывать взаимное влияние рядом находящихся компонентов в конструкции преобразователя. Поэтому строится САД-модель преобразователя с использованием геометрической информации о структуре компонентов. Далее задаются термофизические параметры структуры и производится решение методом конечных элементов. В качестве исходной структуры рассматривается схема преобразователя, содержащего ключевой IGBT транзистор и диод, имеющих общую систему охлаждения (рис. 1).

Наиболее информативным параметром оценки нагрева электронного компонента является температура его самой нагретой части – температура перехода. Оценить температуру перехода (самой нагретой зоны кристалла) каждого из компонентов можно из функциональных уравнений, связывающих температуру окружающей среды, тепловое сопротивление «переход

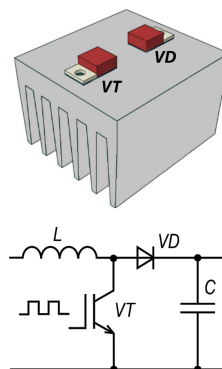


Рис. 1 – Компоненты преобразователя

– окружающая среда», тепловое сопротивление «переход – печатная плата» (основание), среднюю температуру платы непосредственно около корпуса ключа с его рассеиваемой мощностью. В дальнейшем оценивается тепловое взаимодействие транзистора и диода.

Для получения решения необходимо рассчитать рассеиваемую мощность, которая используется в качестве источника тепла в тепловой модели. Потери мощности могут быть рассчитаны с помощью термоэлектрической модели в SPICE, учитывающей электрическое поведение, а значение избыточной рассеиваемой мощности может быть получено из характеристик тепловых потерь мощности компонента [4]. Для извлечения параметров модели и определения теплового сопротивления между двумя рассматриваемыми компонентами на основе температурных откликов в зависимости от времени, полученных с помощью метода конечных элементов [5].

II. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМНОГО РАЗОГРЕВА

Для получения значений теплового импеданса в рамках предлагаемого метода были проведены два переходных моделирования, в которых в качестве единственного источника тепла использовались потери мощности либо IGBT, либо диода. Для упрощения САД-модели компоненты установлены на ребристом радиаторе с направленным воздушным охлаждением с возможностью комбинации попеременного задания теплового источника (рис.3). При моделировании на рёбра радиатора накладывается граничное условие

конвективного теплообмена, коэффициент теплоотдачи составляет 35 (Вт*м/К), а температура окружающей среды задаётся равной 20°C. Выделяемая мощность в IGBT транзисторе и диоде составила примерно 11 Вт и 7 Вт соответственно.

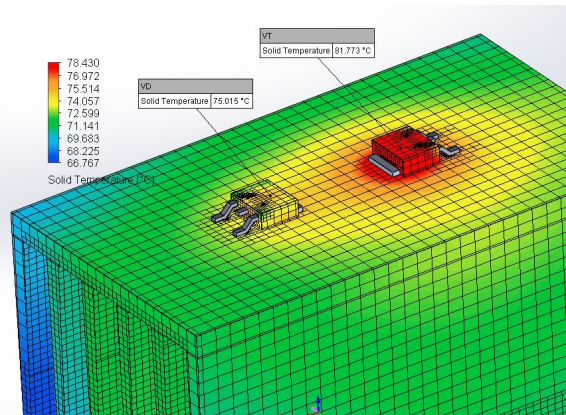


Рис. 2 – Упрощённая тепловая модель разогрева

Для анализа влияния нелинейности и взаимной тепловой связи между компонентами проанализированы четыре варианта модели: линейная модель без связи, в которой электрические свойства не зависят от температуры; нелинейная модель без связи; нелинейная связанная, в которой учитывается тепловая связь компонентов и нелинейная не связанная, в которой связь не учитывается. При анализе связанной модели учитывается взаимный импеданс нагрева, в то время как в несвязанной модели взаимный импеданс устанавливается равным нулю. Сравнение температурных профилей показано на рис. 3. Графики 1 и 2 показывают температуру перехода IGBT транзистора и диода без учёта взаимной тепловой связи соответственно. Эти значения существенно отличаются от результатов для вариантов модели, когда взаимный разогрев учитывается (графики 3 и 4).

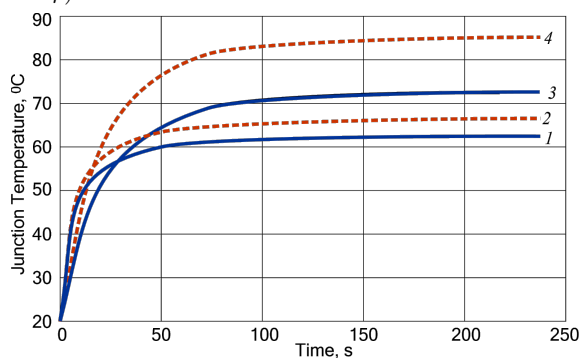


Рис. 3 – Рассчитанные тепловые профили

Прогнозируемые температуры варианты моделей с тепловой связью и моделей без связи существенно различаются. Модель без учёта взаимного нагрева показывает меньшую температуру перехода диода и IGBT транзистора на 12°C и 25°C соответственно по сравнению с моделью со связью. Полная температура перехода транзистора или диода складывается из вклада от саморазогрева, взаимного разогрева и температуры окружающей среды. Помимо наличия значительного теплового градиента, такая разница может быть причиной возникновения термомеханических напряжений в корпусах приборов и при их размещении на печатной плате.

Однако в зависимости от применяемого способа охлаждения взаимное влияние друг на друга полупроводниковых приборов оказывается весьма значительным. В результате моделирования потерь и теплового режима можно сделать вывод о том, что на срок службы действительно влияет взаимное влияние синхронности работы управляемых и неуправляемых ключей преобразователя.

Предложенный подход позволяет получить более релевантные результаты, чем при расчётах, основанных на единичных параметрах, полученных из спецификации производителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang, H., et al. Transitioning to Physics-of-Failure as a Reliability Driver in Power Electronics // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2014. – vol. 2, no. 1. – P. 97-114.
2. Chen, J. et al. E. Impact of load pulse duration on failure mechanism of high power IGBT modules under power cycling condition / The 16th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2020). – 2020. – P. 412-417.
3. Durand, C., et al. Power Cycling Reliability of Power Module: A Survey // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. – 2016. – vol. 16, no. 1. 2016. – P. 80-97.
4. Shahjalal, M. Electro-thermal modelling of multichip power modules for high power converter application / M. Shahjalal, H. Lu, C. Bailey / 2017 18th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), Harbin, China, 2017. – P. 940-945.
5. Bahman, A.S. et al. A 3-D-Lumped Thermal Network Model for Long-Term Load Profiles Analysis in High-Power IGBT Modules // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2016.– vol. 4, no. 3. – P. 1050-106.