Влияние тепловой модели печатной платы на точность моделирования температуры электронных компонентов

Алексей Решетников, Владимир Мичурин (pro@ensol-ltd.ru)

В своей практике инженеры регулярно сталкиваются с необходимостью решения задач по обеспечению функционирования радиоэлектронных компонентов в требуемых тепловых режимах. Одним из важнейших вопросов, возникающих при тепловом моделировании электроники, является корректная оценка влияния структуры печатной платы на температуру расположенных на ней электронных компонентов.

Существует ряд электронных компонентов, охлаждаемых, главным образом, посредством печатной платы: транзисторы цепей питания, силовые диоды, микросхемы без радиаторов и т.д. Для таких элементов 90% (и более) теплового потока от компонента отводится через плату. Поэтому корректный учёт структуры печатной платы становится важнейшей задачей.

У микросхем, охлаждаемых через установленный на них радиатор (процессоры, память, мосты, ПЛИС), в плату уходит порядка 5–10% от общего теплового потока, и им, как правило, в процессе моделирования пренебрегают. Однако зачастую такую методику расчёта переносят на всю исследуемую систему, что нередко приводит к существенным ошибкам.

В настоящей статье проводится сравнение разных методик теплового моделирования печатных плат и исследуется их влияние на конечный результат анализа – температуру компонентов.

Постановка задачи и методы моделирования

Сложность задачи корректного моделирования печатной платы зависит от устройства самой печатной платы и сложности устройства в целом. Простые печатные платы с малым числом слоёв (1-2) и небольшой площадью (100...200 см²) могут быть без особых трудностей детально промоделированы с использованием классических 3D-решателей без каких-либо упрощений. Однако подавляющее большинство современных электронных изделий строятся на более сложных печатных платах, имеющих более полутора десятков слоёв и площадь в несколько сотен десятков квадратных

сантиметров. Детальное моделирование внутренней структуры таких плат классическими 3D-решателями потребует существенных временных затрат и вычислительных ресурсов.

Задача моделирования заключается в построении вычислительной сетки с разрешением, достаточным для расчёта модели с требуемой точностью. Структура же печатной платы такова, что соотношение её длины и ширины к толщине слишком велико для разбиения расчётной модели на конечные объёмные элементы [1]. Толщина слоёв проводника измеряется микронами, а протяжённость трасс проводников - единицами и десятками сантиметров. Сетка для такой структуры содержит десятки и сотни миллионов ячеек, что потребует больших вычислительных ресурсов. Даже с учётом доступности современных вычислительных мощностей, их использование для подобных задач не является оправданным. Поэтому инженеры-расчётчики вынуждены искать компромиссное решение и упрощать структуру платы при моделировании.

Существуют следующие основные методы моделирования печатных плат:

- Детализированное моделирование печатной платы без упрощения её реальной структуры.
- Усреднение свойств теплопроводности при помощи материала с анизотропными свойствами проводимости – отдельно поперечная и продольная проводимость. Продольная проводимость моделирует теплопроводность в медных слоях проводников, поперечная – теплопроводность от слоя к слою, через текстолит и переходные отверстия.
- Усреднение свойств теплопроводности с учётом слоистой структуры пла-

ты. Свойства материала задаются в зависимости от количества и толщины слоёв проводников и доли металлизации в каждом слое.

- 4. Усреднение свойств послойно по двумерной сетке. Каждый из слоёв разбивается двухмерной сеткой с заданным разрешением. В пределах каждого квадрата сетки тепловые свойства структуры печатной платы усредняются.
- Комбинированные методы сочетание разных методов, когда, например, наиболее критичные участки платы вокруг горячих компонентов моделируются с большей детализацией, чем вся плата.

Не все средства САПР для теплового моделирования позволяют реализовать все рассмотренные выше методы. Проблемы, как правило, возникают при использовании детализированной модели и усреднении по сетке. Детализированную модель бывает непросто корректно перенести из ЕСАD в САПР теплового моделирования, а утилиты усреднения по двумерной сетке, к сожалению, имеются не во всех программных средствах теплового моделирования.

Ниже проводится сравнение двух методов моделирования печатной платы в различных САПР. В САПР № 1 (SolidWorks Flow Simulation) классическим 3D-решателем строится модель с усреднением свойств платы при помощи анизотропного материала. В САПР № 2 (Cadence Sigrity) выполняется детализированное моделирование структуры платы с использованием 2,5D-сетки.

В качестве примера для расчёта используется модель силового диода с участком печатной платы. Силовой диод (выпрямитель с барьером Шоттки) является хорошим примером электронного компонента, охлаждаемого преимущественно через плату, что предусмотрено конструкцией его корпуса – D2PAK или TO263. При этом важно знать, насколько сильно он будет нагреваться, т.к. от температуры существенно зависят электрические характеристики диода. Неверная оценка нагрева диода может привести



Рис. 1. Общий вид диода-выпрямителя на печатной плате

к недооценке его нагрева и получению неработоспособного устройства или к переоценке и необходимости построения избыточной системы охлаждения, т.е. к увеличению сложности устройства, его массы, габаритов, стоимости и времени разработки.

Существует несколько методов теплового моделирования электронных компонентов, характеризующихся разной точностью, сложностью, применимостью в той или иной расчётной САПР и т.д. Используемые методы моделирования и тепловые модели делятся на два больших класса – детализированные тепловые модели (DTM - Detailed Thermal Model) и компактные тепловые модели (СТМ -Compact Thermal Model) [2]. В зависимости от решаемой задачи и доступности, необходимых для расчёта данных, выбирается та или иная модель. В настоящей статье используется двухрезистивная модель компонента - 2R-модель.

Для наглядности при моделировании решается внешняя задача, имитирующая простейший случай – охлаждение платы с установленным компонентом посредством естественной конвекции, без корпуса. Температура окружающей среды задаётся равной +25°С.

Модель и результаты моделирования в САПР № 1

При моделировании в САПР №1 строится упрощённая модель части электронного устройства, т.е. моделируется непосредственно сам диод-выпрямитель и участок платы 100×100 мм, посредством которого осуществляется охлаждение.

Сам диод-выпрямитель представляется 2R-моделью, геометрия компонента описывается двумя параллелепипедами с размерами, аналогичными размерам корпуса, как показано на рисунке 1. Данный метод удобен тем, что в документации на электронные компоненты обычно указывают данные по тепловым свойствам как раз для такой модели, а именно: тепловые сопротивления «источник – пла-

Signal\$TOP	45	copper
Medium\$medium41	300	FR4
Signal\$L2	36	copper
Medium\$medium43	285	FR4
Signal\$L3-GND1	70	copper
Medium\$medium45	300	FR4
Signal\$L4-GND2	70	copper
Medium\$medium47	285	FR4
Signal\$L5-PWR1	70	copper
Medium\$medium49	300	FR4
Signal\$L6-PWR2	70	copper
Medium\$medium51	285	FR4
Signal\$L7-GND5	70	copper
Medium\$medium53	300	FR4
Signal\$L8-GND6	70	copper
Medium\$medium55	285	FR4
Signal\$L9	36	copper
Medium\$medium57	300	FR4
Signal\$BOTTOM	45	copper

Рис. 2. Стек печатной платы

та» (R_{ыв}) и «источник – корпус» или «источник – окружающая среда» (R_{ыс} или R_{ата}). Стоит отдельно упомянуть одну особенность, связанную с указанием сопротивлений для компонентов, охлаждаемых через платы. Фактически, охлаждение таких компонентов идёт через корпус на плату, поэтому сопротивление «источник - корпус» (R_{отс}) стоит трактовать как сопротивление «источник - плата» и в модели задавать его именно так. Сопротивление «источник - окружающая среда» фактически эквивалентно сопротивлению «источник - корпус» для компонентов, охлаждаемых через радиатор. В расчётных САПР, как правило, для 2R-моделей задаются сопротивления «источник-корпус» и «источникплата», и незнание указанной выше особенности может привести к путанице и неверным результатам моделирования.

Плата описывается параллелепипедом с соответствующими размерами и анизотропным материалом со свойствами, рассчитанными из усреднения стека слоёв реальной платы, с поперечной теплопроводностью 0,45 Вт/м·К и продольной теплопроводностью 131,5 Вт/м·К. Металлизация по слоям задаётся в 90%. Стек платы показан на рисунке 2.

Максимальная температура компонента составила +60°С. Температурное поле на поверхности модели показано на рисунке 3. Далее требуется оценить влияние топологии печатной платы на температуру диода.

Модель и результаты моделирования в САПР № 2

Сравним теперь результаты моделирования в САПР № 1 с результатами моделирования в САПР № 2, где учитывается детализированная структура печатной платы. Модель компонента в САПР № 2 задаётся в виде 2R-модели с соответству-



Рис. 3. Температурное поле (SolidWorks Flow Simulation)



Рис. 4. Детализированная модель верхнего слоя



Рис. 5. Температурное поле на поверхности платы и диоде (Cadence Sigrity)

ющими тепловыми сопротивлениями. Печатная плата моделируется детально, с учётом структуры слоёв (стек платы показан на рисунке 2), разводки трасс внутри слоёв и переходных отверстий. На рисунке 4 показан верхний слой печатной платы. Как видно из рисунка, электронный модуль обладает тройным дублированием канала питания, и в один момент времени функционирует только один канал.

В результате моделирования расчётная температура нагрева диода составляет +80,5°С. Температурное поле показано на рисунке 5. Видно, что результат моделирования в САПР № 2 отличается в большую сторону от результатов моделирования в САПР № 1 приблизительно на 20°С.

Как видно из графика зависимости среднего прямого тока от температуры (см. рис. 6), падение тока начинается при температуре корпуса около +120...+125°С [3]. Полученная в расчё-



Рис. 6. Допустимая температура корпуса диода в зависимости от прямого тока



Рис. 7. Распределение температуры по переходному отверстию (Cadence Sigrity)

тах температура не является критической для диода в заданных условиях эксплуатации. Однако в реальных изделиях температурный диапазон окружающей среды, как правило, достаточно широк – от –40 до +55°С. При размещении электронного модуля в герметичном корпусе охлаждение диода ещё более ухудшится. В таком случае недооценка нагрева на 20...25°С может привести к приближению реальной температуры к эксплуатационному порогу и спровоцировать перебои в системе питания.

В чём же причина столь большой разницы в расчётах? Обнаружилось, что в модуле токопроводящие слои сформированы не совсем обычно. Полигон питания с верхнего слоя (Тор) через переходные отверстия соединяется только с нижним слоем (Bottom) и через разъёмы питания направляется на следующий электронный модуль в стойке. Распределение температуры по переходному отверстию показано на рисунке 7.

По результатам расчёта температура переходного отверстия в верхнем слое равна +75,5°С, а в нижнем слое – +60°С. Таким образом, разница составляет более 15°С. Следовательно, теплопроводности переходных отверстий недостаточно для качественного распределения теплового потока, и печатная плата препятствует качественному охлаждению диода.



Рис. 8. Внутренний слой печатной платы до оптимизации



Рис. 9. Внутренний слой печатной платы после оптимизации



Рис. 10. Температурное поле на поверхности платы и диоде после оптимизации

Было принято решение добавить полигоны питания на внутренних слоях и уплотнить шаблон переходных отверстий под площадкой диода. На рисунках 8 и 9 показан один из внутренних слоёв платы до и после оптимизации соответственно. В результате оптимизации расчётная температура диода снизилась до +63°С. Температурное поле показано на рисунке 10. По результатам расчётов температура переходного отверстия в верхнем слое оказалась равной +60°С, а в нижнем - +56°С, разница между ними составила всего 4°С. Распределение температуры по переходному отверстию показано на рисунке 11. Расчётные температуры представлены в таблице.

Выводы

Учёт реальной топологии печатной платы при моделировании теплового состояния радиоэлектронной аппаратуры позволяет устранить неопределённость, возникающую при использовании анизотропного материала, а также выбирать направление оптимизации более осмысленно.



Рис. 11. Распределение температуры по переходному отверстию после оптимизации (Cadence Sigrity)

Расчётные температуры

Элемент	САПР № 1 (°С)	САПР № 2 (°С)			
		До оптимизации	После оптимизации		
Диод	60	80,5	63		
Переходное отверстие					
Верхний слой	-	75,5	60		
Нижний слой	_	60	56		

Дополнительно стоит отметить, что такое моделирование позволяет рассчитать тепловое состояние электронного модуля с учётом разогрева от протекающих токов и оценить влияние температуры на физические характеристики меди. Это, в свою очередь, повлияет на уровень падения напряжений и плотности токов. Данный эффект при моделировании был сознательно отключён, так как САПР № 1 не позволяет его учитывать.

Понимание границ применимости средств моделирования повышает вероятность получения результата, коррелирующего с реальными испытаниями, обеспечивает нахождение оптимального технического решения с минимальными временными затратами и улучшает технико-экономические характеристики изделия.

Литература

- Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975.
- Решетников А., Мичурин В. Особенности применения детализированных тепловых моделей для тепловых расчётов микросхем в корпусах BGA, LGA и PGA. Современная электроника. №5, 2019. С. 44–47.
- Vishay Semiconductors, High Performance Schottky Rectifier, 2 x 20 A. URL: https:// w w w . v i s h a y . c o m / d o c s / 94963 / vs-42ctq030shm3.pdf



ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ УЖЕ ОПЛАЧЕНА РЕКЛАМОДАТЕЛЯМИ

Бесплатная подписка для специалистов



3 идентичные версии: печатная, электронная, мобильная



WWW.CTA.RU

WWW.SOEL.RU

Подписка оформляется на сайтах журналов