

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТАХ

ДЭВИД ДИВИНС (DAVID DIVINS), технический специалист, International Rectifier

В статье рассматривается моделирование тепловых режимов работы изделий, основным источником тепла в которых являются полупроводниковые приборы. Приведены расчетные соотношения и рисунки, их поясняющие.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время разработчики стремятся увеличить функциональные возможности изделия и одновременно уменьшить его массогабаритные показатели. В состав большинства изделий входят полупроводниковые приборы (диоды, MOSFET- и IGBT-транзисторы), рассеивающие подчас значительную мощность. Из-за уменьшения габаритов изделия проектировщик все чаще предпочитает твердотельные реле электро-механическим. Однако, несмотря на ряд преимуществ, падения напряжения на «контактах» твердотельных реле, как правило, больше, чем на контактах электромеханических. Соответственно увеличивается и рассеиваемая мощность.

Из сказанного следует, что правильный выбор теплового режима работы становится не менее важным, чем, например, разработка топологии схемы. При расчете теплового режима необходимо учитывать множество параметров, среди которых: тип полупроводниковых приборов и их корпуса, материал печатной платы, расположение элементов, возможные варианты теплоотводов и т.д. Для приложений с высокой плотностью энергии возможно использование принудительного охлаждения — жидкостного или воздушного. При этом необходимо учитывать ограничения по себестоимости изделия.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

Расчеты тепловых режимов сложны и их проводят с помощью программного моделирования. Симуляторы используют математические модели компонентов в сочетании со схемотехническим анализом, чтобы предельно точно воспроизвести рабочие режимы каждого узла. Для силовых приборов может быть вычислена рассеиваемая мощность с учётом возбуждения затвора, переходных процессов при переключениях и обратного восстановления диода.

Традиционные схемотехнические симуляторы способны вычислять рабочие режимы маломощных схем на основе стационарной тепловой модели; такой

подход не годится для силовых схем, в которые происходит саморазогрев. В этом случае необходимо учитывать температурную зависимость режимов работы устройства. Разработчик должен добавлять в моделируемую схему элементы, описывающие такие режимы — так называемую «тепловую обвязку» (thermal wrapper). Только после этого можно оценить температуру и определить поведение различных вариантов схемы.

Эффекты от нагрева мощных полупроводниковых MOSFET- и IGBT-транзисторов могут быть смоделированы как функции ряда параметров, главным образом — приложенного напряжения, тока нагрузки, частоты переключения и схемы управления затвором. При установившейся температуре эти источники тепла находятся в состоянии равновесия с теплоотдачей в системе: корпус полупроводникового прибора — корпус изделия.

В нестационарных цепях, таких, как импульсные источники питания, оценка мощности рассеивания полупроводникового прибора в первом приближении даётся как произведение трёх переменных: среднее напряжение в открытом состоянии V , соответствующий средний ток в открытом состоянии I и коэффициент заполнения D импульсной последовательности:

$$P = DVI.$$

При анализе электрической схемы ток моделируется как функция режима работы цепи. Напряжение рассматривается как функция тока, типа полупроводникового прибора, температуры перехода и метода управления прибором. К примеру, напряжение на открытом MOSFET-транзисторе даётся как произведение тока стока (I_D) и сопротивления сток-исток в открытом состоянии ($R_{DS(on)}$). Само же $R_{DS(on)}$ рассматривается как функция сигнала управления затвором (I_g) и температуры.

В первом приближении перегрев полупроводникового прибора может быть определён перемножением мощ-

ности рассеивания и теплового сопротивления. Однако это слишком грубое упрощение, так как оно не учитывает переходные процессы. В силовых схемах часто возникают броски тока, особенно при коммутации нагрузки с доминирующей ёмкостной составляющей. В таком случае ток переходного процесса легко может достигать величины, в десять раз большей, чем показал бы анализ установившегося состояния.

Эти ограничения могут быть преодолены использованием характеристик теплового отклика, которые обычно приводятся в документации мощных приборов и позволяют разработчику графически определить тепловой отклик компонента на импульсы с определённой длительностью, амплитудой и коэффициентом заполнения импульсной последовательности. Эта информация может быть использована совместно с данными о рассеиваемой мощности для определения перегрева перехода полупроводникового прибора относительно его корпуса.

Однако и такой подход имеет ограничения — не учитывается способ монтажа компонента на плате. Это иллюстрируется полной thermal-stack-моделью, показанной на рисунке 1. Дальнейшие уточнения зависят от техники моделирования, которая может быть использована для вычисления полного теплового отклика. Традиционные схемотехнические симуляторы выполняют вычисления энергетических показателей на основе стационарной тепловой модели, поэтому необходимо добавлять квазидинамическую тепловую обвязку к стационарной (25°C) модели прибора (см. рис. 2). Это можно сделать разными способами. Сложные модели могут быть реализованы использованием языков описания высокого уровня (HDL). Например, пользователи Ansoft Simplorer могут написать обвязку в VHDL-AMS; симулятор Cadence's Spector может быть дополнен Verilog; совместно с Synopsys's Saber можно использовать MAST.

Однако наиболее распространённый и единственный доступный в большин-

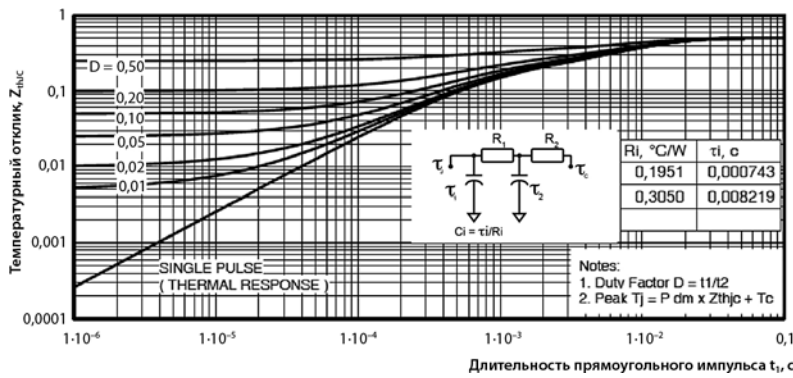


Рис. 1. Thermal-stack-модель

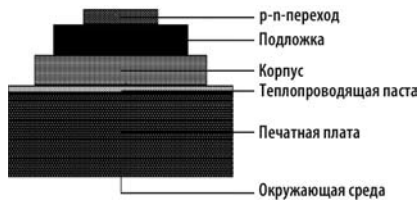


Рис. 2. Квазидинамическая тепловая обвязка к стационарной (25°C) модели

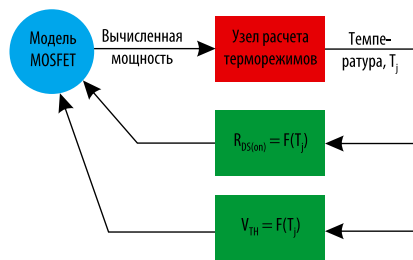


Рис. 3. Многозвенная тепловая цепь

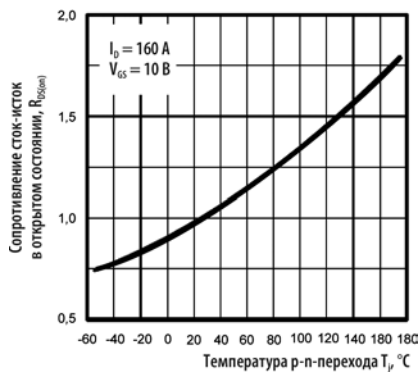


Рис. 4. Зависимость R_DS(on) от температуры

стве симуляторов, включая Spice, приём, являющийся стандартом de-facto среди аналоговых симуляторов в электронной инженерии, — реализация тепловой обвязки в макромоделях. Хотя такой подход имеет больше ограничений, чем при использовании HDL, макросы гораздо проще в реализации и, в зависимости от симулятора, могут быть довольно мощными.

В качестве примера рассмотрим задачу создания тепловой обвязки для

MOSFET-транзистора. При этом необходимо учитывать два температурно-зависимых параметра: пороговое напряжение, V_{TH} и сопротивление полностью открытого канала, $R_{DS(on)}$. Оба параметра сравнительно просто связаны с температурой. V_{TH} возрастает приблизительно линейно, с коэффициентом около $-7 \text{ мВ/}^\circ\text{C}$. Изменение $R_{DS(on)}$ с приемлемой точностью может быть описано квадратичной зависимостью. Взаимосвязь параметров легко выразить (и реализовать) математически:

$$R_{DS(on)}(T_j) = R_{DS(on)}(25^\circ\text{C}) \cdot [aT_j^2 + bT_j + c],$$

$$V_{TH}(T_j) = -0,007(T_j - 25).$$

Хотя сами выражения просты, определение рабочей температуры, от которой зависят функции, — сложная задача. Тепловая система обычно моделируется многозвенной цепью, состоящей из резисторов и конденсаторов с переходной характеристикой, напоминающей стандартную диаграмму одиночного импульса, которую указывают в документации на компонент как тепловой отклик. Документация на наиболее новые MOSFET-транзисторы содержит схемы таких многозвенных цепей; пользователи более старых компонентов могут обнаружить, что их снабдили только диаграммой. В многозвенной модели мощность — это аналог тока, а температура — аналог напряжения.

Первая задача, возникающая при реализации модели тепловой обвязки — установление количественной связи между сопротивлением канала и температурой, $R_{DS(on)}(T_j)$. Она может быть решена использованием простой процедуры квадратичной аппроксимации, которая по трём точкам характеристики, обычно приводимой в документации на MOSFET-транзистор, определяет два квадратичных коэффициента a и b и константу c , требуемые для модели. Последний элемент, необходимый для вычисления $R_{DS(on)}(T_j)$, — это величина $R_{DS(on)}(25^\circ\text{C})$. Она вычисляется симулятором по Spice-модели или другой модели прибора.

Влияние саморазогрева на $R_{DS(on)}$ находится путём вычисления производной от сопротивления канала по температуре:

$$dR_{DS(on)}(T_j) = R_{DS(on)}(25^\circ\text{C}) \cdot [2aT_j + b]dT_j.$$

В модели эта величина представлена резистором $dR_{DS(on)}$, включенным последовательно со стоком MOSFET-транзистора. Получив эти равенства, температуру перехода (T_j) можно вычислить из мгновенной мощности MOSFET-транзистора. Пренебрегая потерями на переключения, считаем, что рассеиваемая мощность определяется током стока и напряжением сток-исток. В тепловой многозвенной цепи (см. рис. 3) мощность представлена источником. Важно отметить, что модель должна работать с абсолютными величинами тока и напряжения, так как мощность рассеивания всегда увеличивает T_j , независимо от направления тока или полярности напряжения. Выходной параметр этой модели — напряжение, которое соответствует T_j . И наконец, уход порогового напряжения от номинального значения при температуре 25°C равен:

$$dV_{TH}(T_j) = -0,007(T_j - 25).$$

С точки зрения схемной модели этот уход представляет плавающий источник напряжения, включенный последовательно с выводом затвора MOSFET-транзистора. Получив эти соотношения, можно построить макромодель, включающую выражение для $dR_{DS(on)}(T_j)$, абсолютную величину мгновенной мощности и $dV_{TH}(T_j)$. Она также должна содержать выражения для расчёта режима работы MOSFET-транзистора во время симуляции. Обычно они определяют, что MOSFET-транзистор считается полностью открытым, только если V_{DS} меньше, чем, скажем, 100 мВ , что ведёт к необходимости добавления симулятором температурно-зависимого $dR_{DS(on)}$ (см. рис. 4).

Следующая степень точности в построении модели — учёт факта, что температура корпуса почти всегда выше температуры окружающей среды. Это сравнительно просто может быть сделано расширением модели тепловой обвязки. Вообще, большим преимуществом использования таких квазидинамических моделей является то, что они позволяют проводить анализ возможных вариантов различных топологий схемы. Это похоже на виртуальное макетирование. Больше того, будучи созданной, модель может быть оформлена как библиотечная функция и использоваться автоматически в дальнейших разработках.