

ТЕПЛОВЫЙ ИМПЕДАНС В СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ РАЗОГРЕВА КОМПОНЕНТОВ СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Журавлёв В. И., Петровский И. И., Свито И. Л., Стешенко П. П.
Кафедра теоретических основ электротехники
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь
E-mail: vadh@bsuir.by

Рассматривается эквивалентная тепловая сеть для моделирования двух взаимосвязанных силовых компонентов. Показано влияние саморазогрева и взаимного нагрева компонентов на тепловой импеданс системы вследствие неоднородного выделения избыточной мощности

ВВЕДЕНИЕ

Реализация методов прямого измерения температуры в силовой электронике с помощью специально встроенных электронных компонентов или инфракрасного излучения нередко оказывается затруднена из-за стоимости, точности и сложности применения. В качестве альтернативы методам прямого измерения можно рассматривать компактные тепловые модели как средство сравнительно точного прогнозирования температуры силовых компонентов при относительно низкой стоимости. Задача заключается в эффективности алгоритма управления мощностью, которая напрямую зависит от точности тепловой модели, используемой для прогнозирования температуры.

Компактное тепловое моделирование силовых преобразователей для нахождения температуры их критических электронных компонентов можно выполнить посредством построения тепловой модели на основе эквивалентной RC-цепи. Благодаря своей простоте, RC-сети Фостера или Кауэра предпочтительны для решения линейных переходных тепловых задач [1]. Основная задача при этом заключается в необходимости получения тепловых свойств компонентов и теплового импеданса с учётом эффектов саморазогрева и перекрестных связей между компонентами [2].

1. СЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМНОГО РАЗОГРЕВА

Аналогия между электрической RC-цепью и тепловой RC-цепью позволяет оценить тепловой режим прибора в зависимости от выделяемой избыточной мощности. В электрической цепи ток протекает через RC-сеть, в результате чего на двух её концах возникает разность напряжений. Аналогично, в тепловой цепи генерируемая мощность проходит через тепловую сеть, что приводит к разнице температур в сети. На рис. 1 показана одноступенчатая RC-цепь Фостера. Основные соотношения для этой цепи можно получить, если просуммировать ток, протекающий через её ветви. Тепловая ёмкость C_{th} может быть представлена как произведение $\rho c V$, тогда управляющее уравнение теплопереноса может быть записано следующим образом:

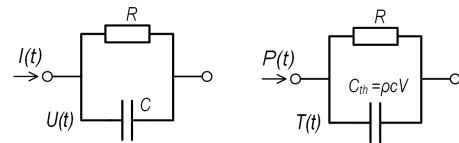


Рис. 1 – Рис. 1 – Электрическая (слева) и эквивалентная тепловая (справа) сети

$$P(t) = C_{th} \frac{dT(t)}{dt} + \frac{T(t)}{R_{th}},$$

где T – температура; t – текущий момент времени; P – мощность теплового потока; c – удельная теплоёмкость; ρ – плотность материала компонента; V – объём компонента.

Рассмотрим структуру топологии, тепловые характеристики которой получены ранее методом конечных элементов [2]. Как правило, компактная сетевая модель должна удовлетворять принципу суперпозиции. Для этого извлекаются параметры единичной RC-сети для моделирования эффектов саморазогрева для каждой рассматриваемой области корпуса компонента. Извлечённые параметры RC-сети представляют собой тепловые ветви от кристалла к системе охлаждения, включая ключевые участки, например, слои припоя. С другой стороны, эффекты перекрёстных связей включаются в связанную модель путём рассмотрения подмоделей саморазогрева. Эта дополнительная тепловая сеть представляет собой связанный тепловой импеданс между двумя корпусами. Мощность, рассеиваемая соседним компонентом, включается в тепловую сеть в качестве источника тепла. Для моделирования эффекта тепловой связи IGBT, представляется сетью, включающей саморазогрев по рассеиваемой мощности, полученной из электрической модели, и соответствующие слои тепловой эквивалентной сети, к которой подключается модель диода. Для прогнозирования температуры в диоде тепловая модель представляется потерями мощности диода и соответствующими цепями тепловой эквивалентной сети.

При построении матрицы теплового сопротивления ступенчатая потеря мощности прикла-

дывается в качестве постоянного источника тепла к одному кристаллу в течение определённого времени. Тепловой отклик отслеживается во всех остальных намеченных точках на соседнем компоненте. Кривые переходного теплового сопротивления получаются в виде серии кривых в каждой рассматриваемой точке. Для определения теплового сопротивления конкретной тепловой ветви между двумя слоями, обусловленной эффектом саморазогрева, выбираются две последовательные точки. При оценке переходного теплового сопротивления саморазогрева между двумя слоями полученные температурные кривые вычитаются из соседних точек и делятся на величину рассеиваемой мощности микросхемы в качестве источника тепла. Тепловой импеданс Z саморазогрева между переходом кристалла и припоем можно оценить как:

$$Z_{th}^{j-cs} = \frac{T_j - T_{cs}}{P_{IGBT}},$$

где T_j – температура перехода в предполагаемой точке контроля на кристалле IGBT, T_{cs} – температура припоя кристалла в соответствующей точке контроля, P_{IGBT} – ступенчатые потери мощности IGBT.

Соответствующая эквивалентная тепловая сеть Фостера, показана на рис. 2. Её параметры могут быть извлечены из данных, полученных ранее в результате расчёта методом конечных элементов [3]. Каждый слой в IGBT-модуле представлен тремя RC-ячейками Фостера. Пары RC показаны до третьего порядка для точности аппроксимированной кривой $Z_{th}(T)$. При необходимости в дальнейшем сеть Фостера может быть преобразована в сеть Кауэра.

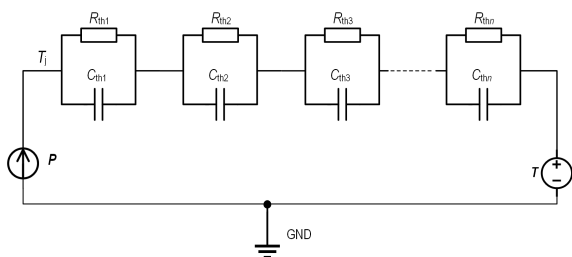


Рис. 2 – Эквивалентная тепловая сеть Фостера рассматриваемой структуры

II. ТЕПЛОВЫЙ ИМПЕДАНС В СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ

Для получения параметров тепловой сети используются ступенчатые потери мощности на основе полученного переходного теплового профиля при анализе методом конечных элементов [2]. Переходные тепловые характеристики преобразуются в кривые переходного теплового сопротивления для получения эквивалентных RC-параметров тепловой сети для соответствующих тепловых ветвей между двумя последовательными

слоями. Для рассматриваемой сети определяется разность температур между переходом и припоем в каждой контрольной точке корпуса, когда к другому корпусу прикладывается ступенчатая потеря мощности. Затем разность температур делится на потери мощности соседнего элемента. Далее фиксируется повышение температуры в контрольной точке вследствие теплового влияния между IGBT и диодом за минусом саморазогрева и затем делится на потери мощности, рассеиваемые в транзисторе IGBT. Полученный таким образом импеданс является связанным импедансом IGBT с диодом. Рассчитанный тепловой импеданс саморазогрева вследствие избыточной мощности с учётом взаимного нагрева показан на рис. 3.

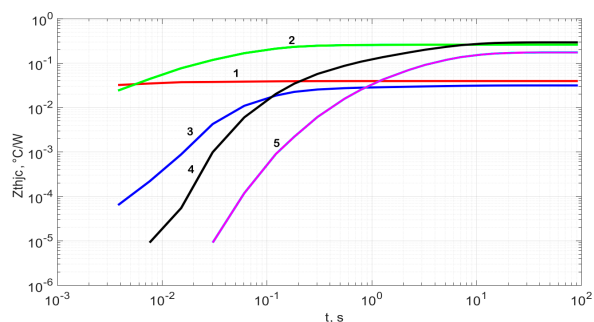


Рис. 3 – Тепловой импеданс при саморазогреве и взаимном нагреве: 1 – «переход кристалла– припой»; 2 – «припой – кристаллодержатель»; 3 – «кристаллодержатель – стенка корпуса»; 4 – «стенка корпуса – теплоотвод»; 5 – с учётом взаимного нагрева

Как видно, температура кристалла достигает стабилизированного участка в течение 100 с из-за большего влияния теплоотводящих элементов корпуса. При взаимном тепловом влиянии в начале происходит временная задержка в повышении температуры, так как самонагревающиеся кристаллы находятся рядом на одном уровне относительно внешнего теплоотводящего основания. Как следствие, происходит задержка и в повышении температуры кристаллов за счёт взаимного теплового взаимодействия.

III. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Faria de Souza, D. *et.al.* Estimation of IGBT Module Degradation Using Foster's Model and Structure Function // 2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference (SPEC). – Florianopolis, 2023. – P. 1–7.
2. Журавлёв, В. И. Моделирование взаимного разогрева компонентов силовых преобразователей / В. И. Журавлёв, И. И. Петровский, И. Л. Свито // Информационные технологии и системы 2023 (ИТС 2023) : материалы Международной научной конференции, Минск, 22 ноября 2023 г. – Минск : БГУИР, 2023. – С. 141–142.
3. K. Ma, M. Xu and B. Liu Modeling and Characterization of Frequency-Domain Thermal Impedance for IGBT Module Through Heat Flow Information // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2021. – vol. 36, no. 2. – P. 1330–1340.