

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С УЧЁТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

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

Кафедра теоретических основ электротехники

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: vadh@bsuir.by

*Предложен подход адаптивного моделирования, при котором учитывается влияние температурной зависимости теплопроводности материалов на нагрев компонентов силового преобразователя*

## ВВЕДЕНИЕ

Тепловые модели критически важны для надёжности, эффективности и долговечности силовой электроники. Они позволяют оценивать тепловые режимы компонентов и предотвращать перегрев, отказы и осуществлять оптимизацию конструкции. Без отвода тепла возможно превышение допустимой температуры кристалла, что ведёт к деградации или выходу из строя. Тепловые модели позволяют заранее оценить тепловые потоки и грамотно разместить компоненты, радиаторы и, повышая эффективность охлаждения и общую надёжность. Однако адекватное тепловое моделирование силовых преобразователей сталкивается с рядом трудностей: от сложности геометрии и многослойности материалов до нелинейных эффектов и ограничений программных средств. Нелинейность в тепловой модели могут вносить многочисленные факторы. К ним относятся механизмы распространения тепла, процессы конвективного охлаждения, а также зависимость свойств материалов от температуры и другие аспекты. Влияние температуры на тепловые параметры часто не учитывается в тепловых моделях, что может вызывать существенные погрешности в расчетах от 4% до 12% [1-2]. Однако тепловое поведение силового преобразователя напрямую зависит от окружающей температуры, что необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации.

## 1. КОРРЕКТИРОВКА ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ

В типовых силовых преобразователях активно используются такие классические материалы как кремний, алюминий, медь. Анализ тепловых свойств показывает, что теплопроводность кремния снижается с повышением температуры, в то время как удельная теплоёмкость увеличивается. При температуре около 250 °C теплопроводность кремния падает почти вдвое по сравнению с её значением при 25 °C. В то же время изменение плотности различных материалов, входящих в состав силовых полупроводниковых устройств, в диапазоне рабочих температур (от 25°C до примерно 200°C) является незначительным, поэтому влияние температуры на теплоёмкость можно

считать пренебрежительным и не учитывать в моделях.

Для учёта зависимости свойств от температуры, такие параметры как теплопроводность и теплоёмкость материалов в тепловой модели представлены в виде функций от температуры, путём корректировки соответствующих характеристик. На рис.1 приведены зависимости теплопроводности материалов, используемых в модуле преобразователя, в диапазоне температур. Эти данные позволяют более точно моделировать тепловое поведение модуля при различных условиях работы.

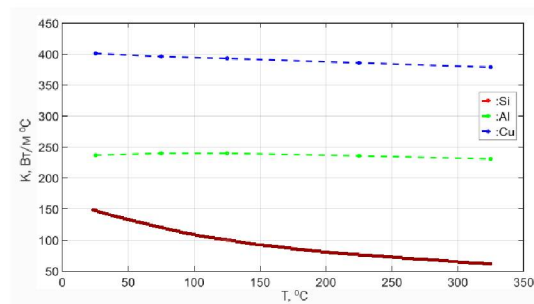


Рис. 1 – Влияние температуры на теплопроводность материалов

Для оценки погрешностей, вызванных игнорированием температурной зависимости тепловых свойств, выполняется решение полной нелинейной тепловой модели, в которой учитываются температурно-зависимые параметры материалов, такие как теплопроводность. Процесс переходного моделирования проводится итерационным методом при изменении температуры охлаждающей среды, которая обычно находится в диапазоне от 300 К до 370 К. На начальном этапе решается линейная модель, использующая свойства материалов при постоянной температуре, при различных значениях температуры окружающей среды. Аналогично, выполняется решение нелинейной модели, в которой свойства материалов зависят от температуры, при тех же условиях. После выполнения расчетов результаты сравниваются. Такой подход позволяет проанализировать влияние учета температурной зависимости свойств на точность моделирования тепловых процессов в силовых модулях.

## II. АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для апробации предложенной корректировки модели использовались результаты экспериментального исследования понижающего преобразователя на широко используемый микросхеме LM2596 при наименьшем выходном напряжении (12В в 3,3В). Предварительно были получены результаты SPICE моделирования оценки рассеиваемой мощности (рис. 2 и 3). Сравнительные результаты приведены в табл.1 на основе разработанной ранее термоэлектрической модели, рассматриваемой адаптивной тепловой модели и измеренных экспериментально. В целом, профили температуры хорошо согласуются, хотя наблюдается небольшое отклонение около 2,2 °С. Поскольку теплопроводность кремния уменьшается с повышением температуры окружающей среды, тепловое сопротивление системы увеличивается. В результате при сравнении линейной модели, использующей свойства при температуре 300 К с нелинейной моделью при температуре 370 К, наблюдается погрешность примерно в 8%. Эта ошибка обусловлена температурной зависимостью теплопроводности кремния. В основном погрешность в тепловом импедансе возникает из-за изменения теплопроводности кремния и меньшей активной площади кремниевого слоя по сравнению с алюминиевым или медным слоем. Вклад теплового сопротивления слоя кремния в общее тепловое сопротивление системы невелик, и его влияние на общие тепловые характеристики можно считать незначительным. Таким образом, использование свойств при средней температуре позволяет снизить погрешность до 3% (при текущей температуре).

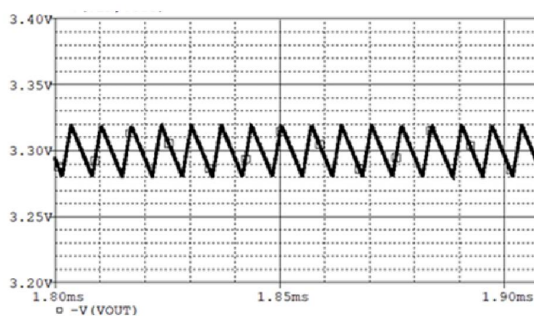


Рис. 2 – Форма напряжения на выходе

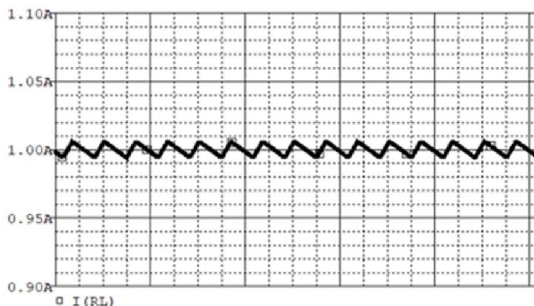


Рис. 3 – Форма тока нагрузки

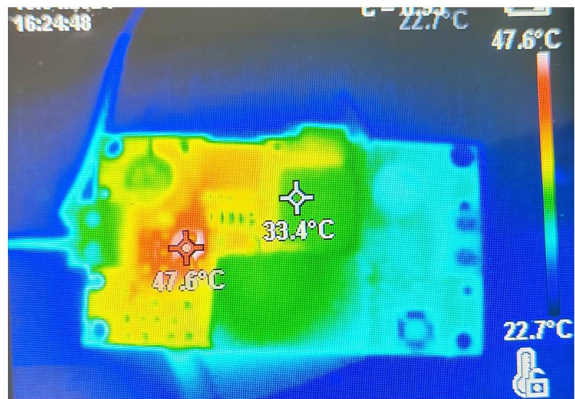


Рис. 4 – Вид измеренного распределения температуры

Таблица 1 – Значения температуры (°С)

Термоэлектрическая модель	Тепловая модель	Измерение
43,8	46,2	47,6

## III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время не существует наилучшего способа полностью учесть влияние температуры на тепловые свойства материалов силовых приборов. Такие факторы, как наличие и расположение миниатюрных пассивных компонентов (конденсаторов, резисторов), наличие их потерь также могут влиять на распределение температуры. Эти потери, если их не учитывать в модели, могут стать источниками дополнительного тепла, что ведет к повышению температуры в области расположения микросхемы. Игнорирование этих потерь в тепловой модели приводит к несоответствиям между расчетными тепловыми профилями и фактическим распределением температуры, наблюдаемым на экспериментах или моделях с учетом всех источников тепла. Использование упрощенной зависимости свойств материалов от средней температуры на заданном шаге, позволяет повысить адекватность моделирования.

## IV. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Race, A. Philipp, etc. Circuit-Based Electrothermal Modeling of SiC Power Modules with Nonlinear Thermal Models // IEEE Transactions on Power Electronics. – vol. 37, no. 7. – 2022. – P. 7965-7976.
2. G. Wang, Y. Zhou Thermal Management Modeling for  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ -Highly Thermal Conductive Substrates Heterostructures // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology – vol. 12, no. 4. – 2022. – P. 638-646.