

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

А.Ю. Степанов, П.А. Козынко
Факультет Автоматики и Вычислительной Техники

При моделировании силовых устройств необходимо учитывать, что они рассеивают значительное количество энергии, что вызывает их саморазогрев. Увеличение температуры вызывает изменение электрических характеристик элементов. Поэтому при моделировании мощных устройств важно учесть не только их электрические, но и тепловые характеристики. Необходимы электротепловые методы, которые учитывают саморазогрев приборов и его влияние на электрические режимы работы устройства.

Существуют специальные средства моделирования, которые позволяют решить задачу электро-теплового моделирования в системах современных САПР (например, IC Station фирмы Mentor Graphics). Они используют в основном **метод совмещения сред моделирования** для реализации электро-теплового моделирования, передавая данные между средствами теплового и электрического моделирования.

В данной работе была произведено сравнение метода совмещения сред моделирования с **методом электротепловой аналогии**. Для сравнения методов моделирования была использована схема стабилизатора напряжения (K142EH9), выполненная в базисе ТТЛ.

Сравнивались результаты моделирования нагрева мощных транзисторов по результатам проведения теплового моделирования в программе Перегрев-МС и электротеплового методом совмещения сред в программе EThSimCoupler с результатами моделирования с помощью электротепловой аналогии: для моделирования инерционных тепловых процессов и учета эффекта саморазогрева прибора в статическом режиме. Модели транзисторов были дополнены 4м узлом - тепловым (66_Qx), а эквивалентная схема была дополнена элементами электротепловой аналогии (см. рис. 1):

- тепловыми сопротивлениями (Rt);
- тепловыми емкостями (Ct);
- источником тепловой мощности (Gpower);
- температурой среды ($$G_ENV=27$).

В соответствии с электротепловой аналогией, напряжение узла (66_Qx) в любой момент времени численно равно текущей температуре полупроводникового кристалла транзистора в $^{\circ}\text{C}$. Величина тока, генерируемого источником Gpower, численно равна мощности, рассеиваемой транзистором, в ваттах. Тепловые величины, соответствующие электрическим величинам согласно электротепловой аналогии, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Электротепловая аналогия

Электрические величины		Тепловые величины	
Напряжение	Вольт	Температура	$^{\circ}\text{C}$
Ток	Ампер	Тепловой поток	Ватт
Сопротивление	Ом	Тепловое сопротивление	$^{\circ}\text{C}/\text{Ватт}$
Емкость	Фарада	Тепловая емкость	$\text{Джоул} / ^{\circ}\text{C}$

Из топологии, в программе IC Station, используя модуль EThModGen, была сделана экстракция физических параметров, необходимых для электротеплового моделирования. Из сгенерированного программой EThModGen файла, были выбраны элементы топологии, оказывающие наибольшее тепловое воздействие на кристалл.

Программа Перегрев-МС сгенерировала матрицу тепловых сопротивлений (Ом) и емкостей (Φ):

```
Rt1 66_Q10 $G_ENV 1.19E+02
Rt2 66_Q10 66_Q12 9.75E+02
Rt3 66_Q10 66_Q17 8.68E+02
Rt4 66_Q10 66_Q15 3.10E+02
Rt5 66_Q10 66_Q16 4.49E+01
Rt6 66_Q12 $G_ENV 2.94E+02
Rt7 66_Q12 66_Q17 7.46E+02
Rt8 66_Q12 66_Q15 1.36E+05
Rt9 66_Q12 66_Q16 8.28E+01
Rt10 66_Q17 $G_ENV 2.20E+02
Rt11 66_Q17 66_Q15 6.33E+03
Rt12 66_Q17 66_Q16 7.69E+01
Rt13 66_Q15 $G_ENV 1.64E+02
Rt14 66_Q15 66_Q16 1.78E+01
Rt15 66_Q16 $G_ENV 1.44E+01

Ct1 66_Q10 $G_ENV 1.91E-03
Ct2 66_Q12 $G_ENV 5.23E-04
Ct3 66_Q17 $G_ENV 6.55E-04
Ct4 66_Q15 $G_ENV 5.28E-03
Ct5 66_Q16 $G_ENV 2.48E-02
```

Здесь записаны по порядку: имя элемента, два узла, между которыми находится элемент, и его номинал. Большие емкости в мФ показывают большую тепловую инерционность микросхемы.

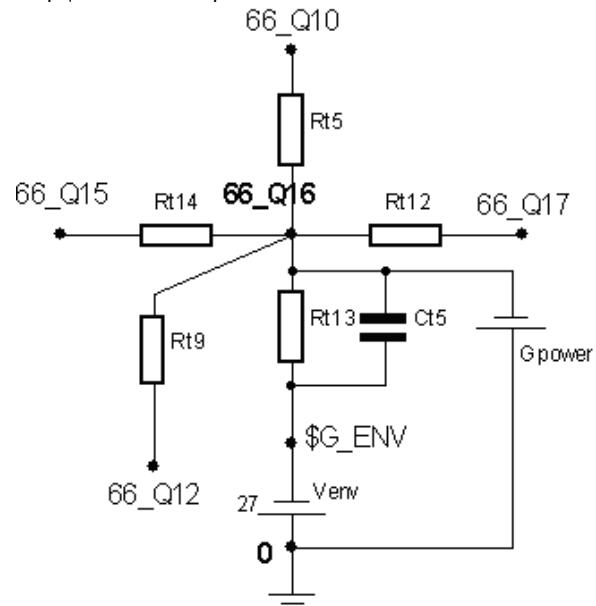


Рис. 1 Тепловой узел 66_Q16 транзистора Q16 и связь с другими тепловыми узлами схемы.

Мощный транзистор Q16 на топологии (см. рис. 2) состоит из 10 секций, но в схеме он описан одним элементом для удобства расчета, а температура на нем взята усредненной.

Программа Перегрев-МС рассчитала картину тепловых полей на поверхности кристалла (см. рис. 2). Точные значения температур берутся из файла с

выходными данными, полученного после просчета дополненной электротепловой схемы в приложении Eldo среди проектирования Mentor (таблица 2).

Электротепловое моделирование в программе EThSimCoupler позволяет проводить смешанное электрическое и тепловое моделирование. Для этого нужно загрузить файл, сгенерированный из топологии микросхемы и указать Delta параметр – 0.01Вт. Это коэффициент для расчета мощности на шагах i и $i+1$. Выходными данными будут результаты работы Перегрев-МС на последней итерации – когда мощности на шагах i и $i+1$ различаются менее чем на Delta: матрица распределения температур по поверхности (см. рис. 2) и температуры транзисторов на последней итерации (таблица 2).

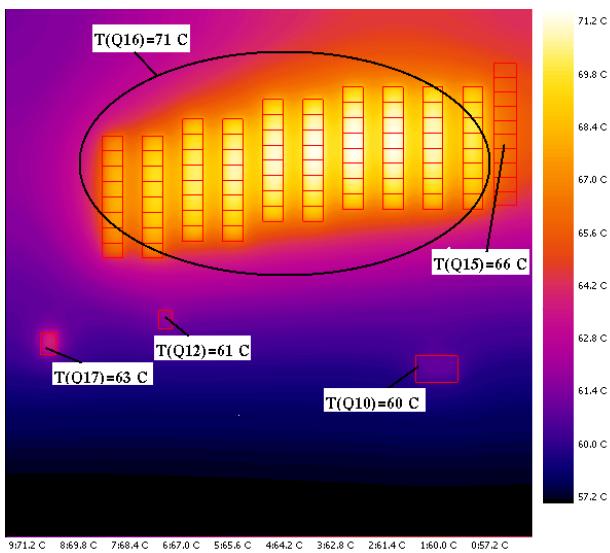


Рис. 2. Термическая картина распределения температур на поверхности кристалла стабилизатора напряжения K142ЕН9.

**Таблица 2. Температуры, полученные с помощью
Перегрев-МС, EThSimCoupler и методом
электротепловой аналогии в Eldo.**

Метод	Температура транзисторов, Т, °C				
	Q10	Q12	Q15	Q16	Q17
EThSC	60.5	61.6	67	71.7	63.5
Перегрев-МС	60	61	66	71	63
Электротепловая аналогия	60	61.1	66.1	69.3	62.6

По результатам сравнения можно сказать, что метод электротепловой аналогии даёт достаточную точность при расчёте; следовательно, необходимо иметь набор электротепловых моделей, чтобы эффективно применять их в тех случаях, когда метод электротепловой аналогии более удобен для применения, чем метод совмещения сред моделирования.