

И. И. ЭПШТЕЙН, доктор техн. наук, проф., директор по науке
 ЧАО «Харьковский электрошитовой завод»;
Я. С. БАЛТЕР, главный специалист АО НПП «Укрэлэтекс», Харьков

ОПИСАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ

В последние десятилетия возрос интерес к расчету температуры в кристалле сложных полупроводниковых силовых приборов. Чем более точно эта температура рассчитывается, тем большие токи можно снять с указанных приборов при сохранении высокой надежности. Все поставщики силовых полупроводниковых приборов приводят большое число тепловых характеристик приборов для установившихся и переходных режимов работы. Эффективность и точность проектирования полупроводниковых преобразователей возрастает, если в составе компьютерной программы расчета будет универсальная модель тепловых процессов. Такая постановка задачи не новая, но она, на наш взгляд, нуждается в более углубленном математическом обосновании.

1. Схема тепловой модели полупроводникового прибора

1.1 Идеализированная тепловая модель может быть представлена в виде цепочки конструктивных теплопроводящих элементов:

- полупроводниковая структура (как правило, несколько элементов),
- корпус прибора,
- теплопроводящая смазка,
- охладитель.

Принято, что для каждого элемента внутреннее тепловое сопротивление равно нулю, тепловое сопротивление существует при переходе от одного конструктивного элемента к другому. Поэтому тепловая модель каждого конструктивного элемента может быть представлена в виде теплоемкости Q и сопротивления перехода к следующему элементу R .

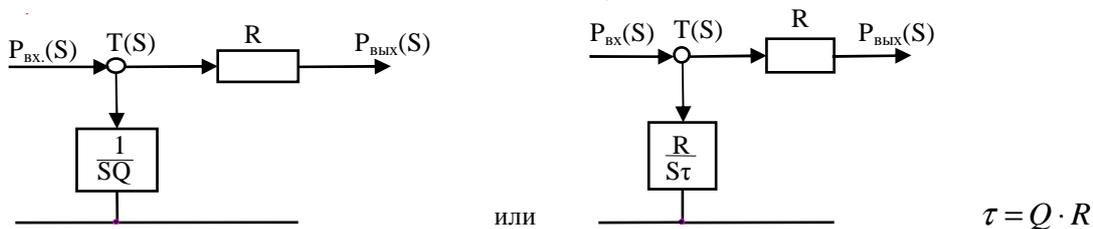


Рис.1

Переменные на рис.1 – операторные выражения действительных переменных; S- оператор Лапласа.

1.2. При последовательном включении ряда (k) элементов, тепловая модель прибора имеет вид (рис.2)

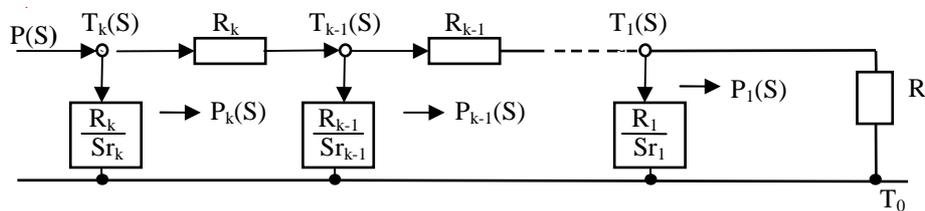


Рис.2

T_0 - температура окружающей среды

$T_{k(S)}$ – температура внутренней полупроводниковой структуры, в которой выделяется мощность потерь.

В информационных материалах изготовителей приборов приводятся данные $r^{инф.}$, $\tau^{инф.}$ элементов, а в обосновании достаточности указанных данных дается ссылка на схему тепловой модели (рис.3)

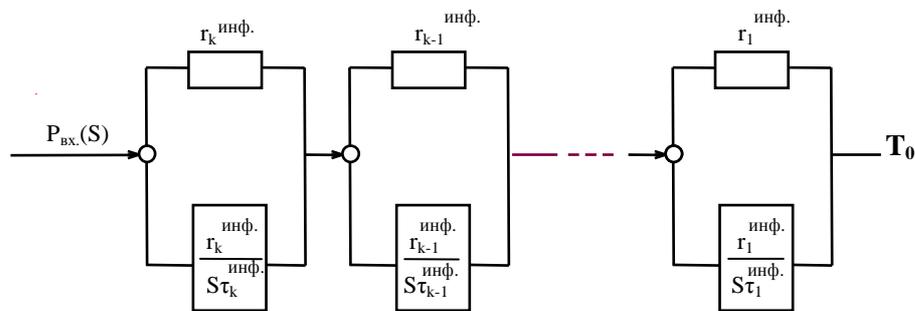


Рис.3

Сопоставление двух схем замещения (рис.2 и рис.3) показывает следующее:

- параметры на рис.2 (R и τ) – это реальные физические параметры элементов, а параметры на рис.3 – это информационные величины, значения которых приводятся без математического обоснования. Следствием чего схема на рис.3 воспринимается как искусственная, не имеющая физического объяснения.

- если входная мощность $P_{вх}$ меняется скачком, то согласно схеме (рис.3) она в первый момент при температуре $T_k = T_0$ передается в окружающую среду, что противоречит физике процессов. Это не способствует ее логическому восприятию, более того вызывает сомнение в правильности последующих выводов. Схема на рис.3 может рассматриваться как схемная абстракция с неочевидными параметрами, позволяющая рассчитать температуру T_k в функции входной мощности $P_{вх}$.

При этом возникает ряд практических вопросов:

- параметры схемы $\gamma^{инф.}$ и $\tau^{инф.}$ приводятся для конкретной конструкции полупроводникового устройства, но на практике в полном объеме предлагаемая конструкция не используется. В частности, разработчики преобразователей самостоятельно выбирают охладитель (индивидуальный, групповой, естественное охлаждение, принудительное при разной скорости воздуха, жидкостное). Даже если тепловые параметры принятого охладителя известны, не очевидно, как при этом меняются параметры элементов схемы замещения (рис.3).

На основании рис.3 приводится следующая формула для расчета $T_k(S)$

$$T_K(S) = P_{вх.}(S) \sum_{n=1}^K \frac{\gamma_n^{инф.}}{1 + S\tau_n^{инф.}} \quad (1)$$

2. Вывод формулы для расчета температуры $T_k(S)$

Из схемы (рис.2) очевидна следующая упрощенная схема, показанная на рис.4.

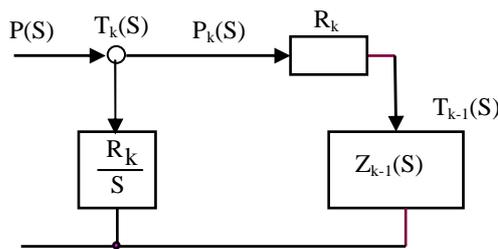


Рис.4

Здесь $Z_{K-1}(S)$ - суммарное операторное сопротивление всех $K-1$ элементов, следующих за рассматриваемым звеном,

R_K и τ_K - индивидуальные параметры K -го звена,

$Z_K(S)$ - суммарное операторное сопротивление всех элементов

$$Z_K(S) = \frac{\frac{R_K}{S \cdot \tau_K} \cdot [Z_{K-1}(S) + R_K]}{\frac{R_K}{S \cdot \tau_K} + Z_{K-1}(S) + R_K} \quad (2)$$

Операторное изображение температуры на входе звена $Z_K(S)$ равно:

$$T_K(S) = P(S) \cdot Z_K(S) \quad (3)$$

Расчет операторного сопротивления $Z_K(S)$ выполняется последовательным подключением каждого последующего звена к предыдущему суммарному согласно (2), начиная от внешнего звена ($k=1$) и заканчивая тем, в котором выделяется мощность потерь.

$$\text{Для первого звена} \quad Z_1(S) = \frac{A_1(S)}{B_1(S)} = \frac{R_1}{1 + S\tau} = \frac{a_{11}}{b_{12} + b_{22} \cdot S} \quad (4)$$

Операторное сопротивление первого и второго звеньев $Z_2(S)$ согласно (2) равно:

$$Z_2(S) = \frac{A_2(S)}{B_2(S)} = \frac{A_1(S) + R_2 B_1(S)}{B_1(S) + \frac{A_1(S)}{R_2} \cdot S\tau_2 + B_1(S) \cdot S\tau_2} = \frac{a_{21} + a_{22}S}{b_{21} + b_{22}S + b_{23}S^2} \quad (5)$$

Последовательным суммированием сопротивлений «по восходящей» получаем

$$Z_K(S) = \frac{A_K(S)}{B_K(S)} = \frac{A_{(K-1)}(S) + R_K B_{(K-1)}(S)}{B_{(K-1)}(S) + \frac{A_{(K-1)}(S)}{R_K} \cdot S\tau_K + B_{(K-1)}(S) \cdot S\tau_K} \quad (6)$$

$$Z_K(S) = \frac{A_K(S)}{B_K(S)} = \frac{a_{K,1} \cdot S^0 + a_{K,2} \cdot S^1 + a_{K,3} \cdot S^2 + \dots + a_{K,K} \cdot S^{K-1}}{b_{K,1} \cdot S^0 + b_{K,2} \cdot S^1 + b_{K,3} \cdot S^2 + \dots + b_{K,K+1} \cdot S^K} \quad (7)$$

Двойная индексация коэффициентов а и б означает следующее:

- первый индекс – число элементов, учитываемых в суммарном сопротивлении $Z_K(S)$,
- второй индекс – порядковый номер члена полинома S, к которому относится данный коэффициент.

Полином числителя $A_K(S)$ содержит K членов, порядок полинома K-1.

Полином знаменателя содержит K+1 членов, порядок полинома K.

С увеличением второго индекса увеличивается степень оператора S.

Известным математическим приемом представляем $Z_K(S)$ в виде суммы K-операторных
звеньев 1^{ого} порядка:

$$Z_K(S) = \sum_{n=1}^{n=K} C_n \frac{1}{S - S_n} \quad (8)$$

где S_n - корень уравнения $B_K(S) = 0$, всего K – корней

$$C_n = \frac{[A_K(S)](S = S_n)}{\left[\frac{d}{dS} B_K(S) \right] (S = S_n)} \quad (9)$$

$$\frac{d}{dS} B_K(S) = b_{k,2} + 2b_{k,3}S + 3b_{k,4}S^2 + \dots + kb_{n,k+1}S^{k-1} \quad (10)$$

Корни S_n уравнения $B_K(S) = 0$ проще всего определяются путем подстановки в уравнение отрицательных значений S от 0 до получения k корней, что при компьютерных расчетах не вызывает сложностей.

Согласно (3) записываем

$$T_K(S) = P_k(S) \left(\sum_{n=1}^K C_n \frac{1}{S - S_n} \right) \quad (11)$$

Поскольку значения корней S_n отрицательные, приведем соотношение (11) к более привычной для апериодического звена формуле

$$T_K(S) = P_k(S) \left(\sum_{n=1}^K R_n^P \frac{1}{1 + S\tau_n^P} \right) = P_k(S) Z_k(S) \quad (12)$$

где $R_n^p = \frac{C_n}{|S_n|}, \tau_n^p = \frac{1}{|S_n|}$,

Индекс P означает рассчитанные.

Пример

Заданы параметры схемы замещения трехзвенной (k=3) структуры. Заданные и рассчитанные согласно (12) параметры приведены в таблице 1

Таблица 1

Номер структуры	Заданные параметры	Рассчитанные параметры
k	$R_k=1; \tau_k=1$	$R_k^p = 0,173; \tau_k^p = 0,451$
k-1	$R_{k-1}=3; \tau_{k-1}=3$	$R_{k-1}^p = 0,419; \tau_{k-1}^p = 1,92$
k-2	$R_{k-2}=10; \tau_{k-2}=10$	$R_{k-2}^p = 13,4; \tau_{k-2}^p = 34,6$
:	-----	-----
1	-----	-----

Таблица заполняется до тех пор, пока значение номера структуры не станет равным 1.

3. Расчет температуры других (от k-1 до 1) элементов.

Расчет температуры промежуточных элементов имеет практическую значимость, поскольку непосредственное измерение температуры полупроводниковой структуры прибора невозможно. Поэтому измеряют температуру доступных элементов и по ней судят о температуре кристалла.

Согласно схеме (рис.2) записываем:

$$\left. \begin{aligned} T_{k-1}(S) &= T_k(S) - P_k(S)R_k \\ P_k(S) &= P(S) - T_k(S) \frac{S\tau_k}{R_k} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

или $T_{k-1}(S) = T_k(S)(1 + S\tau_k) - P_k P(S)$

а с учетом (3) $T_{k-1}(S) = P(S)[Z_k(S)(1 + S\tau_k) - R_k] = P(S) \cdot Z_{k-1}(S)$ (14)

Аналогичные (14) соотношения могут быть записаны для для любого звена цепочечной схемы (рис.2) от k-1 и далее по «нисходящей».

Пример

Для используемого в качестве примера трехзвенного прибора передаточные функции имеют вид

$$\left. \begin{aligned} Z_k(S) &= \sum_{n=k}^1 R_n^p \frac{1}{1 + ST_n^p} \quad \text{см. (12)} \\ Z_{k-1}(S) &= Z_k(S)[1 + S\tau_k] - R_k \\ Z_{k-2}(S) &= Z_k(S) \left[(1 + S\tau_k)(1 + S\tau_{k-1}) + S \frac{\tau_k}{R_k} R_{k-1} \right] - (R_k + R_{k-1} + S\tau_{k-1}R_k) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Из приведенного следует, что для расчета передаточной функции всех элементов необходимы физические параметры схемы замещения (рис.2).

Располагая передаточными функциями и операторным выражением мощности потерь, можно рассчитать текущую температуру каждого элемента полупроводникового прибора. Операторное выражение переходной

тепловой характеристики прибора $\frac{Z_n(S)}{S}$ (16)

Пример

Полученные обратным преобразованием Лапласа переходные характеристики температуры элементов трехзвенного прибора описываются выражениями (17) и показаны на рис.5.

$$\left. \begin{aligned}
 T_k^{nep.}(t) &= \sum_{n=k}^1 R_n^p (1 - e^{-\frac{t}{\tau_n^p}}) \\
 T_{k-1}^{nep.}(t) &= \left\{ \sum_{n=k}^1 R_n^p \left[1 - \left(1 - \frac{\tau_k}{\tau_n^p}\right) e^{-\frac{t}{\tau_n^p}} \right] \right\} - R_k \\
 T_{k-2}^{nep.}(t) &= \left\{ \sum_{n=k}^1 R_n^p \left[1 - \left(1 - \frac{\tau_k + \tau_{k+1} + \tau_k \frac{R_{n-1}}{R_k} + \frac{\tau_k \tau_{k-1}}{(\tau_n^p)^2}\right) e^{-\frac{t}{\tau_n^p}} \right] \right\} - R_k - R_{k-1}
 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

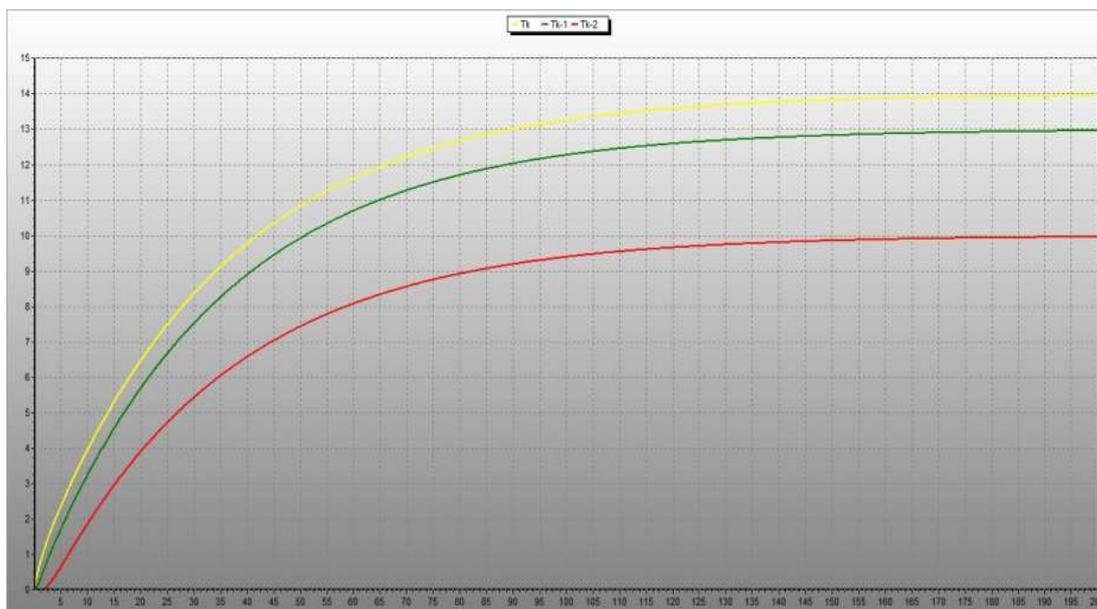


Рис.5

Следует отметить, что громоздкость выражения передаточной функции каждого последующего элемента по сравнению с предыдущим существенно возрастает, поэтому рекомендуют расчет ограничивать практически необходимым числом элементов.

Заключение

1. В статье приведена математически обоснованная методика расчета температурного режима любого элемента силового полупроводникового прибора, позволяющая разработчикам силовых преобразователей и поставщикам приборов выполнить на компьютере расчеты тепловых режимов для любой тепловой нагрузки.

2. В информационных материалах должна быть исключена тепловая схема замещения, аналогичная рис.3, а приводиться схема на рис.2.

3. Рекомендуем поставщикам приборов кроме информационных параметров частной тепловой модели приводить реальные теплофизические параметры всех элементов.

4. Настоящее исследование было проведено в том числе для того, чтобы дать специалистам по силовой полупроводниковой технике возможность сознательного восприятия информационных материалов поставщиков приборов.

Список литературы: 1. SemiSel is SEMIKRON online calculation and simulation tool for losses, temperatures and optimal choice of power electronic components. <http://www.semikron.com/service-support/semisel-simulation.html> 2. "SEMIKRON innovation + service Power Electronics" Printed in Germany 10/1996 for 1997/98 <http://www.semikron.com/products/product-classes/ipm.html> <http://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheet-skiip-603-gd123-3dul-v3-20451028> <http://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheet-skiip-1814-gb12e4-3dul-20601123>

Поступила (received) 25.08.2015