

Л.А. Потапов, А.Н. Школин, Д.Г. Гадашев
(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

ТЕПЛОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

По переходной характеристике и табличным значениям тепловых сопротивлений для высокочастотных импульсных преобразователей напряжения LM 2676 получена теплоэлектрическая модель в виде схемы Фостера, электрический переходный процесс в которой численно совпадает с переходной тепловой характеристикой. С помощью полученной теплоэлектрической модели исследован процесс изменений температуры при кратковременном увеличении нагрузки и мощности потерь.

According to the transient characteristic and tabulated values of thermal resistances for high-frequency impulse voltage converters LM 2676, a thermoelectric model was obtained in the form of a Foster circuit, in which the electrical transient process coincides numerically with the transient thermal characteristic. With the help of the obtained thermoelectric model, the process of temperature change with a short-term increase in load and power loss is investigated.

Ключевые слова: тепловое сопротивление, теплоэлектрическая модель, схема Фостера.

Keywords: thermal resistance, thermoelectric model, Foster circuit.

Предисловие

Надежность полупроводниковых приборов в значительной степени зависит от температуры их $p-n$ -перехода. Превышение температуры в номинальном режиме сверх рекомендуемого на 10-15% может сократить срок службы изделия более чем на 50%. Часто это обнаруживается только на этапе эксплуатации, как скрытый дефект, поскольку при контроле электрических параметров температура $p-n$ -перехода обычно не контролируется. Такая ситуация недопустима для высокочастотных импульсных преобразователей напряжения (ВИПН), работающих в сложных автоматизированных системах, в авиационной и космической технике и во многом определяющих их надежность.

Во многих статьях [1-4] и др. используются теплоэлектрические модели в виде схем Фостера или Кауэра. При этом основное внимание авторов сосредоточено на определении тепловых сопротивлений в начале нагрева. Полученные четырехзвенные или шестизвенные модели в виде схем

Фостера[1] используются в статическом режиме для корректировки технологического процесса.

Для практических целей более оправданы двухзвенные теплоэлектрические модели из RC -элементов, обеспечивающие в переходных режимах численное совпадение с переходной тепловой характеристикой (ПТХ) исследуемого полупроводникового прибора (ПП). Такие модели позволяют оценить изменение температуры кристалла и корпуса ПП при кратковременном увеличении нагрузки, при изменении тепловых сопротивлений и других параметров ВИПН.

Моделирование тепловых процессов высокочастотного импульсного преобразователя напряжения

Целью моделирования тепловых процессов является построение электрической цепи из RC элементов, переходный процесс в которой численно совпадает с переходной тепловой характеристикой (ПТХ) высокочастотного импульсного преобразователя напряжения (ВИПН).

Если переходная тепловая характеристика (ПТХ) исследуемого ВИПН аппроксимируется двумя экспонентами

$$T(t) = T_0 - A_T \exp(-p_{1T}t) - B_T \exp(-p_{2T}t), \quad (1)$$

то в электрической цепи напряжение на одном из элементов должно определяться аналогичной зависимостью

$$U(t) = U_0 - A_U \exp(-p_{1U}t) - B_U \exp(-p_{2U}t), \quad (2)$$

$$\text{где } U_0 = T_0, p_{1U} = p_{1T}, p_{2U} = p_{2T}, A_T = A_U, B_T = B_U. \quad (3)$$

При исследовании полученных электрических цепей (моделей) с помощью программ Orcad, Multisim, Electronics Workbench целесообразно изменить масштаб времени, например, корни характеристического уравнения увеличить в 1000 раз, а постоянные времени во столько же раз уменьшить, полагая

$$p_{1U} = 1000p_{1T}, p_{2U} = 1000p_{2T}.$$

Чтобы получить напряжения в узлах схемы (рис.1) в установившемся режиме численно равными температуре кристалла и корпуса исследуемого ВИПН, задаем $R_1 = R_{thjc}$, $R_2 = R_{thca}$, $J = P$, где P - мощность нагрева (потерь). Емкости определим сначала в общем виде, рассматривая переходный процесс в схемах

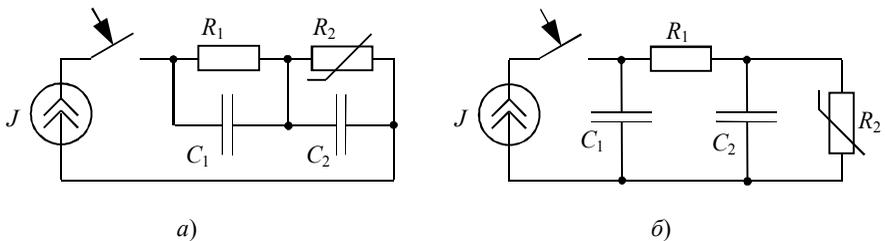


Рис.1. Схемы: а – Фостера; б – Кауэра.

В схеме Кауэра потенциал узла 1 (эквивалент температуры p - n -перехода) можно определить из операторной схемы замещения, применяя метод узловых потенциалов:

$$\begin{cases} U_1(p) \left(\frac{1}{R_1} + pC_1 \right) - U_2(p) \frac{1}{R_1} = \frac{J}{p} \\ U_2(p) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + pC_2 \right) - U_1(p) \frac{1}{R_1} = 0 \end{cases}$$

$$U_1(p) = \frac{JR_1^2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + pC_2 \right)}{p \left(p^2 R_1^2 C_1 C_2 + p \left(R_1 C_2 + R_1 C_1 + \frac{R_1^2}{R_2} C_1 \right) + \frac{R_1}{R_2} \right)} = \frac{N(p)}{M(p)}.$$

Знаменатель этого уравнения позволит определить корни характеристического уравнения p_{1U} и p_{2U} и $p_{3U}=0$

$$p_{1,2U} = -\frac{C_1 + C_2 + \frac{R_1}{R_2} C_1}{2R_1 C_1 C_2} \pm \sqrt{\left(\frac{C_1 + C_2 + \frac{R_1}{R_2} C_1}{2R_1 C_1 C_2} \right)^2 - \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}.$$

Если определена ПТХ и соответственно корни характеристического уравнения

$$p_{1U} = p_{1T} \quad \text{и} \quad p_{2U} = p_{2T},$$

то можно определить емкости C_1 и C_2 при известных R_1 и R_2 , используя теорему Виетта:

$$\begin{cases} \frac{C_1 + C_2 + \frac{R_1}{R_2} C_1}{2R_1 C_1 C_2} = \frac{p_{1U} + p_{2U}}{2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} = p_{1U} \cdot p_{2U} \end{cases} \quad (6)$$

Подставляя уравнение (6) в (5), получим:

$$\left(C_1 + C_2 + \frac{R_1}{R_2} C_1 \right) p_{1U} \cdot p_{2U} R_2 = (p_{1U} + p_{2U}). \quad (7)$$

Из уравнения (6)

$$C_2 = \frac{1}{C_1 R_1 R_2 \cdot p_{1U} \cdot p_{2U}}. \quad (8)$$

Подставляя уравнение (8) в (7), получим:

$$C_1 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) + \frac{1}{C_1 R_1 R_2 \cdot p_{1U} \cdot p_{2U}} = \frac{(p_{1U} + p_{2U})}{R_2 p_{1U} p_{2U}};$$

$$C_1 = \frac{(p_{1U} + p_{2U})}{2(R_1 + R_2)p_{1U} p_{2U}} \pm \sqrt{\left[\frac{(p_{1U} + p_{2U})}{2(R_1 + R_2)p_{1U} p_{2U}} \right]^2 - \frac{1}{R_1 R_2 \cdot p_{1U} \cdot p_{2U} (1 + R_1/R_2)}}.$$

В большинстве случаев параметры ВИПН таковы, что

$$\left[\frac{(p_{1U} + p_{2U})}{2(R_1 + R_2)p_{1U} p_{2U}} \right]^2 < \frac{1}{R_1 R_2 \cdot p_{1U} \cdot p_{2U} (1 + R_1/R_2)}.$$

При этом емкости оказываются комплексные. В этих случаях построить электрическую цепь по схеме Кауэра и получить теплоэлектрическую модель ВИПН невозможно.

Для схемы Фостера потенциал узла 1 можно определить из системы операторных уравнений

$$\begin{cases} U_1 \left(\frac{1}{R_1} + pC_1 \right) - U_2 \left(\frac{1}{R_1} + pC_1 \right) = \frac{J}{p} \\ U_2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + pC_1 + pC_2 \right) - U_1 \left(\frac{1}{R_1} + pC_1 \right) = 0 \end{cases}$$

$$U_1 = \frac{J \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2} + p(C_1 + C_2) \right)}{p \left(\frac{1}{R_1} + pC_1 \right) \left(\frac{1}{R_2} + pC_2 \right)} = \frac{N(p)}{M(p)}.$$

Приравнявая знаменатель нулю, определяем корни характеристического уравнения

$$p_{1U} = -\frac{1}{R_1 C_1}, \quad p_{2U} = -\frac{1}{R_2 C_2}, \quad p_3 = 0.$$

Тогда уравнение переходного процесса будет иметь вид

$$U_1 = U_0 + Ae^{p_{1U}t} + Be^{p_{2U}t}.$$

Если определена ПТХ исследуемого ВИПН и аппроксимирована уравнением (1), то можно определить емкости C_1 и C_2 , полагая $R_1 = R_{thjc}$, $R_2 = R_{thca}$, $p_{1U} = p_{1T}$, $p_{2U} = p_{2T}$. Тогда

$$C_1 = \frac{1}{R_1 |p_{1T}|}, \quad C_2 = \frac{1}{R_2 |p_{2T}|}.$$

На рис.2 приведена теплоэлектрическая модель ВИПН LM2676, в которой из справочных данных взяли $R_1=2$ Ом, $R_2=63$ Ом, имитирующие тепловое сопротивление «переход – корпус» $R_{\theta jc}$ и «корпус – окружающая среда» $R_{\theta ca}$

$$R_{\theta CA} = R_{\theta JA} - R_{\theta JC} = 65 - 2 = 63 \text{ Ом.}$$

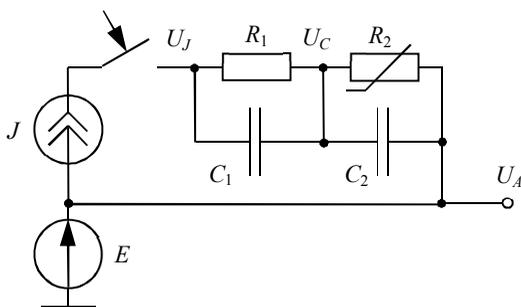


Рис.2. Теплоэлектрическая модель LM2676

Сопротивление R_2 нелинейное и может изменяться при изменении напряжения U_C , имитирующего температуру корпуса ПП. Потенциалы U_A , U_1 , U_2 соответствуют численным значениям температуры T_A , T_J , T_C (окружающей среды, кристалла и корпуса).

По экспериментально определенной ПТХ

$$T_1(t) = 85 - 8e^{-0,02t} - 57e^{-0,003t}$$

с учетом (4) определяем емкости

$$C_1 = 10 \text{ Ф, } C_2 = 5,3 \text{ Ф.}$$

Как отмечается в стандарте [4], емкость C_2 не следует связывать с теплоемкостью корпуса, а емкость C_1 с теплоемкостью остальных узлов ПП.

Чтобы изменить масштаб времени и сделать наглядным переходный процесс, изменяем в 1000 раз емкости C_1 и C_2 и p_1 и p_2 . Тогда уравнение переходного процесса будет иметь вид

$$U_1(t) = 85 - 8e^{-20t} - 57e^{-3t}. \quad (4)$$

На рис.3 приведена ПТХ с измененным масштабом времени.

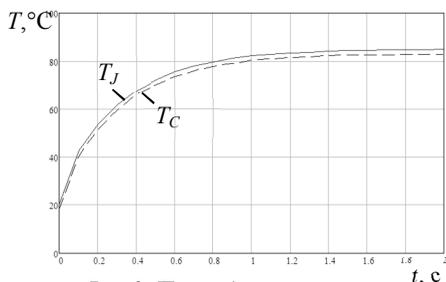


Рис.3. Переходная тепловая характеристика ВППН LM2676 с изменением масштаба времени

Сплошная линия на рис. 3 определяет зависимость температуры кристалла от времени $T(t)$ – переходную тепловую характеристику (ПТХ) ВППН LM2676; пунктирная – зависимость температуры корпуса от времени.

Для получения зависимости напряжения от времени $U(t)$ использована программа Electronics Workbench, дающая возможность наблюдать переходный процесс в теплоэлектрической модели после замыкания ключа.

На рис.4 приведена теплоэлектрическая модель (по схеме Фостера), в программе Electronics Workbench (EWB512), имитирующая переходную тепловую характеристику ВИПН LM2676.

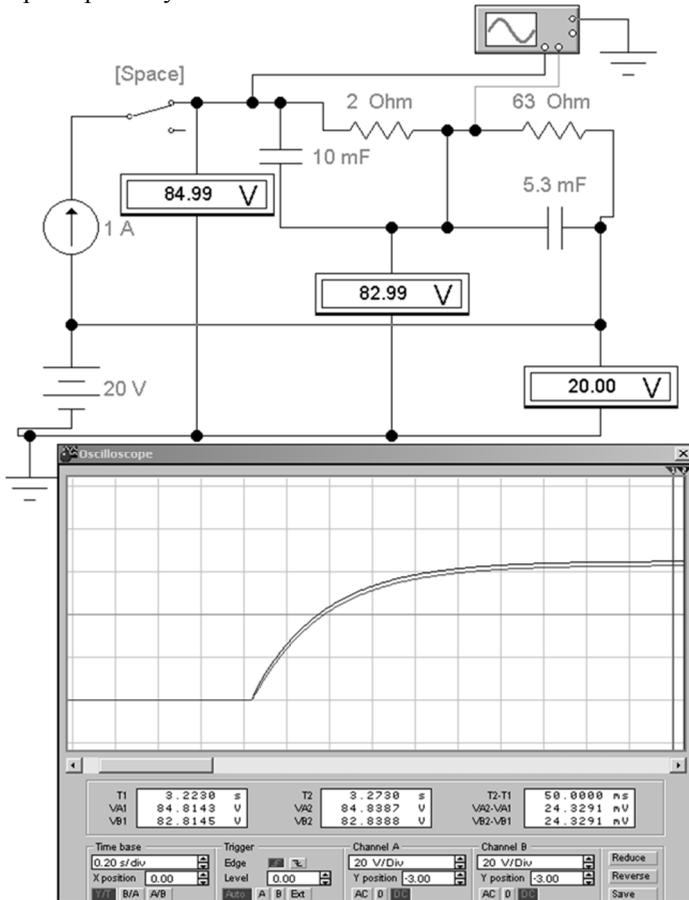


Рис.4. Теплоэлектрическая модель ВИПН LM2676 в программе Electronics Workbench (EWB512)

В этой модели для наглядности добавлены вольтметры, фиксирующие напряжения в конце переходного процесса U_J , U_C , U_A и соответственно температуры T_J , T_C , T_A . На осциллографе (рис.4) выводится сначала в течение 0,8 с напряжение U_A , имитирующее температуру окружающей среды $T_A = 20^\circ\text{C}$, затем переходный процесс $U(t)$, имитирующее температуру p-n перехода и соответственно кристалла ВИПН. Зависимость $U(t)$ (рис.4) хорошо совпала с зависимостью $T(t)$ (рис.3), что позволяет считать построенную теплоэлектрическую модель вполне адекватной ПТХ LM2676.

Используя полученную теплоэлектрическую модель, можно исследовать различные режимы работы ВИПН.

С помощью теплоэлектрической модели можно исследовать процесс изменения температуры ВИПН при кратковременном увеличении нагрузки. На рис.5 приведена осциллограмма изменения напряжения U_1 и соответственно температуры $p-n$ -перехода при увеличении нагрузки в 2 раза за время $t_U=0,3$ с. Напряжение достигло величины 150 В, что соответствует недопустимой температуре $p-n$ -перехода 150°C .

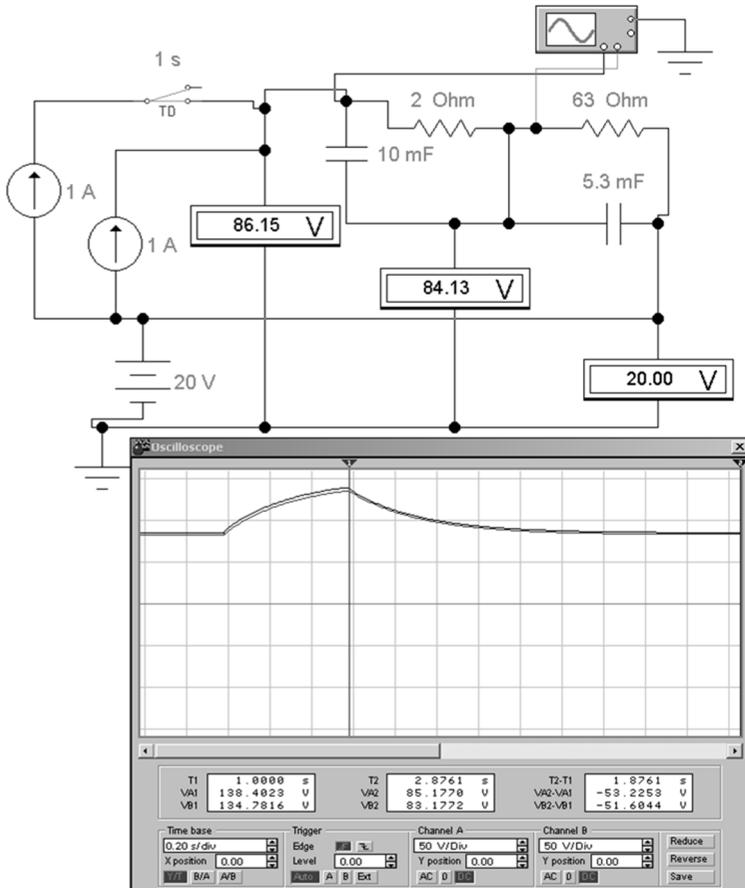


Рис.5. Исследование процесса изменения температуры ВИПН при кратковременном увеличении нагрузки

Варьируя длительность включения перегрузки, можно определить допустимую длительность включения с двойной нагрузкой (не превышая допустимую температуру).

Аналогичным образом можно исследовать, как изменяется ПТХ при изменении сопротивлений R_1 и R_2 .

Модель наглядно демонстрирует неэффективность применяемого иногда способа «контроля посадки кристалла», заключающегося в кратковременном на доли секунд включении ПП под напряжение. Такой способ не позволит выявить даже пятикратное увеличение теплового сопротивления. В то же время увеличение сопротивления R_{thjc} в 1,3 раза (предел допуска) за время

равное $\tau_1 = \frac{1}{|p_1|} = R_1 C_1$ приведет к увеличению температуры от 37,7 до

38,4°C. Эта разность температур достаточна для организации 100%-ного контроля ВИПН методом сравнения с эталоном.

Заключение

По переходной тепловой характеристике и табличным значениям тепловых сопротивлений для высокочастотных импульсных преобразователей напряжения LM 2676 получена теплоэлектрическая модель в виде схемы Фостера, электрический переходный процесс в которой численно совпадает с переходной тепловой характеристикой. С помощью полученной теплоэлектрической модели исследован процесс изменений температуры при кратковременном увеличении нагрузки и мощности потерь. Полученная теплоэлектрическая модель может быть использована при проектировании и исследовании режимов работы изделий с ВИПН и другими ИМС.

Исследование выполнено по заданию Минобрнауки № 8.1729.2017/ПЧ.

Список литературы

1. Нисс, В.С. Оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии/ В.С. Нисс, О.С. Васьков, А.С. Турцевич, А.Ф. Керенцев, В.К. Кононенко // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т. 6. – № 2. – С. 249–256.

2. Смирнов, В.И. Метод измерения компонент теплового сопротивления полупроводниковых приборов и его практическая реализация [и др.] /В.И. Смирнов, А.А. Гавриков, А.М. Шорин // Автоматизация процессов управления. – 2017. – № 2.

3. Гавриков, А.А. Измеритель теплового импеданса полупроводниковых диодов с широтно-импульсной модуляцией греющей мощности / В.А. Сергеев, В.И. Смирнов, А.А. Гавриков, М. Л. Конторович // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2010. – №3. – С.45-47.

4. JEDEC JESD51-14 standard. Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction to Case of Semiconductor Devices with Heat Flow through a Single Path.

5. T3Ster – Thermal Transient Tester. – URL:<https://www.mentor.com/micred/t3ster>.

Материал поступил в редколлегию 15.10.18.