

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕКСПОНЕНТ, ЩО АПРОКСИМУЮТЬ ПЕРЕХІДНИЙ ТЕПЛОВИЙ ОПІР ОХОЛОДЖУВАЧА

Запропоновано алгоритм визначення параметрів експонент, що апроксимують графік залежності перехідного теплового опору охолоджувача в часі. Це дає можливість включити охолоджувач у систему розрахунку температури напівпровідникової структури силових напівпровідникових приладів.

Ключові слова: напівпровідниковий прилад, охолоджувач, температура напівпровідникової структури, тепловий опір, параметри експонент, режими охолодження.

Надійність роботи силових напівпровідникових приладів в значній мірі залежить від температури їх напівпровідникової структури. Тому процесам нагріву та охолодження таких приладів завжди приділяється належна увага. Особливо це стосується нестационарних режимів навантаження приладів. Температура структури залежить від втрати потужності в приладі та від теплового опору системи «прилад – охолоджувач». Перехідний тепловий опір системи «прилад – охолоджувач» на момент часу t можна визначити за формулою

$$Z_{\text{thja}}(t) = Z_{\text{thjc}}(t) + R_{\text{thch}} + Z_{\text{thH}}(t), \quad (1)$$

де $Z_{\text{thjc}}(t)$ – перехідний тепловий опір «структура – корпус приладу»; R_{thch} – тепловий опір «корпус приладу – контактна поверхня охолоджувача»; $Z_{\text{thH}}(t)$ – перехідний тепловий опір охолоджувача.

Характеристики $Z_{\text{thjc}}(t)$ та параметри R_{thch} надаються більшістю великих виробників напівпровідникових приладів в інформаційних матеріалах, причому характеристики $Z_{\text{thjc}}(t)$ надаються як у графічно-

му, так і в аналітичному вигляді. В цей же час, характеристики охолоджувачів $Z_{\text{thH}}(t)$ надаються виробниками охолоджувачів у інформаційних матеріалах тільки у графічній формі [1]. Відсутність аналітичної форми представлення перехідного теплового опору охолоджувача значно ускладнює виконання розрахунків теплових режимів роботи напівпровідникових приладів. Тому розробка алгоритму визначення параметрів експонент, що апроксимують графік залежності перехідного теплового опору охолоджувача в часі, є актуальною.

Рекомендується такий алгоритм визначення параметрів експонент, що апроксимують графік залежності перехідного теплового опору охолоджувача та/або силового напівпровідникового приладу.

1. ВИЗНАЧЕННЯ ПОЧАТКОВИХ ДАНИХ ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКУ

Залежність теплового опору в часі у напівлогарифмічному масштабі показана на рис. 1.

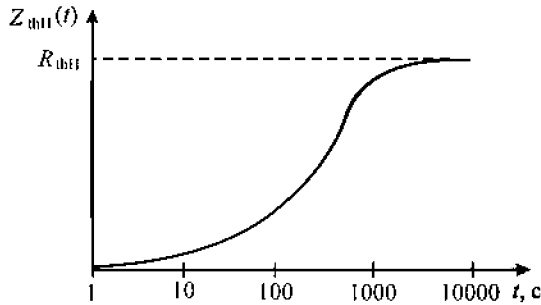


Рис. 1. Залежність перехідного теплового опору в часі

Графік, показаний на рис. 1, можна апроксимувати як суму експонент:

$$Z_{thH}(t) = \sum_{i=1}^n R_i [1 - \exp(-t/\tau_i)], \quad (2)$$

де $Z_{thH}(t)$ – перехідний тепловий опір охолоджувача; R_i, τ_i – параметри експонент, що апроксимують криву перехідного теплового опору, причому сума усіх R_i дорівнює значенню постійного теплового опору, тобто кінцевому значенню $Z_{thH}(t)$; n – кількість експонент, сума яких апроксимує перехідний тепловий опір.

Необхідно визначити: параметри експонент R_i, τ_i на основі графіку рис. 1 та кількість експонент n , яка апроксимує перехідний тепловий опір.

На основі експериментально визначеного графіка залежності перехідного теплового опору в часі, рис. 1, вибираємо точки, що найбільш повно характеризують цю залежність, причому на кожній ділянці часу, кратній 10, повинно бути 2–4 точки, а остання точка повинна бути на ділянці сталого теплового опору R_{thH} .

Координати вибраних точок заносимо у таблицю початкових даних (табл. 1), де $k = 1, 2, 3, \dots, K$ – порядковий номер точок апроксимації; t_{K-1} – передостання точка в ряду t_k ; t_K – остання точка в ряду t_k ; $Z_{thH}(t_k)$ – перехідний тепловий опір для моменту часу t_k .

Задаємо похибку апроксимації $\delta, \%$.

Таблиця 1. Початкові дані

| | | | | | | |
|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|----------------------|-----------|
| k | 1 | 2 | 3 | ... | $K-1$ | K |
| t_k | t_1 | t_2 | t_3 | ... | $t_{(K-1)}$ | t_K |
| $Z_{thH}(t_k)$ | $Z_{thH}(t_1)$ | $Z_{thH}(t_2)$ | $Z_{thH}(t_3)$ | ... | $Z_{thH}(t_{(K-1)})$ | R_{thH} |

Таблиця 2. Різниця значень теплового опору та перехідного теплового опору

| | | | | | | | |
|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|----------------------|----------------------|-------|
| k | 1 | 2 | 3 | ... | $K-2$ | $K-1$ | K |
| t_k | t_1 | t_2 | t_3 | ... | $t_{(K-2)}$ | $t_{(K-1)}$ | t_K |
| $Z_{thH}(t_k)$ | $Z_{thH}(t_1)$ | $Z_{thH}(t_2)$ | $Z_{thH}(t_3)$ | ... | $Z_{thH}(t_{(K-2)})$ | $Z_{thH}(t_{(K-1)})$ | 0 |

2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКУ

2.1. Визначення параметрів експонент, що апроксимують графік перехідного теплового опору, починаємо із заміни графіка нагріву на графік охолодження, як пропонується в роботі [2]. Для цього визначаємо різницю значень теплового опору та перехідного теплового опору

$$Z_{thH}(t_k) = R_{thH} - Z_{thH}(t_k) \quad (3)$$

та заносимо дані в табл. 2.

2.2. Визначення параметрів експонент, що апроксимують перехідний тепловий опір, слід починати з моменту часу передостанньої точки ($K-1$) табл. 2 з координатами $t_k = t_{(K-1)}$; $Z_{thH}(t_k) = Z_{thH}(t_{(K-1)})$, яка стає першою точкою відліку, рис. 2. Другою точкою апроксимації є точка ($K-2$), яка, згідно з табл. 2, має такі координати: $t_k = t_{(K-2)}$; $Z_{thH}(t_k) = Z_{thH}(t_{(K-2)})$.

2.3. Котангенс кута нахилу прямої, що з'єднає точки ($K-1$) – ($K-2$), до осі абсцис визначаємо за формулою

$$\text{ctg}\psi_1 = \tau_1 = \frac{t_{(K-1)} - t_{(K-2)}}{\ln Z'_{thH}(t_{(K-2)}) - \ln Z'_{thH}(t_{(K-1)})}, \quad (4)$$

де τ_1 – перша стала часу першої експоненти у формулі (2).

2.4. Логарифм ординати точки перетину лінії ($K-1$) – ($K-2$) з віссю ординат визначаємо за формулою

$$\ln R_1 = \ln Z_{thH}(t_{(K-1)}) + (t_{(K-1)}) \tau_1, \quad (5)$$

де R_1 – максимальне значення першої експоненти у формулі (1).

2.5. Значення ординати точки перетину лінії ($K-1$) – ($K-2$) з віссю ординат визначаємо потенціюванням $\ln R_1$ за формулою

$$R_1 = \exp(\ln R_1). \quad (6)$$

Таким чином визначається другий параметр першої експоненти для формули (2).

2.6. Далі перевіряємо, чи належить наступна точка ($K-3$) лінії ($K-1$) – ($K-2$), рис. 2.

Логарифм ординати для моменту часу $t_{(K-3)}$ при τ_1 визначаємо за формулою

$$\ln Z'_{thH}(t_{(K-3)}) = \ln Z_{thH}(t_{(K-2)}) + (t_{(K-2)} - t_{(K-3)}) / \tau_1. \quad (7)$$

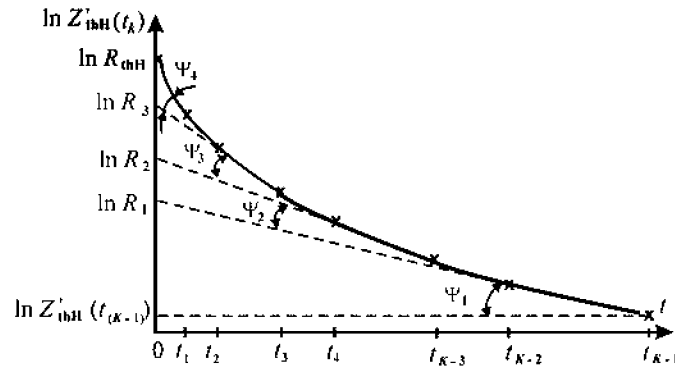


Рис. 2. Залежність логарифму $Z'_{thH}(t)$ в часі (процес визначення параметрів експонент)

2.7. Значення ординати для моменту часу $t_{(K-3)}$ при τ_1 , тобто на лінії $(K-1) - (K-2)$, визначаємо потенціюванням $\ln Z'_{thH}(t_{(K-3)})$:

$$Z'_{thH}(t_{(K-3)}) = \exp(\ln Z'_{thH}(t_{(K-3)})). \quad (8)$$

2.8. Визначаємо різницю значення $Z'_{thH}(t_{(K-3)})$ відносно значення $Z''_{thH}(t_{(K-3)})$ за формулою

$$\delta'' = \left(\frac{Z'_{thH}(t_{(K-3)}) - Z''_{thH}(t_{(K-3)})}{Z'_{thH}(t_{(K-3)})} \right) \cdot 100\%. \quad (9)$$

2.9. Якщо значення $\delta'' < 0$, тобто воно негативне, це означає, що значення $Z'_{thH}(t_{(K-3)})$ є хибним, бо не може прилад в режимі охолодження (при відсутності втраг потужності) підвищити свою температуру. В цьому випадку приймаємо, що $Z'_{thH}(t_{(K-3)}) = Z''_{thH}(t_{(K-3)})$, тобто точка $(K-3)$ належить експоненті, параметри якої визначені перед цим. Подальший розрахунок слід продовжувати з точки $(K-4)$.

Якщо значення $0 \leq \delta'' \leq \delta$, де δ – задана точність апроксимації, то це означає, що точка $(K-3)$ належить експоненті, параметри якої визначені перед цим, і подальший розрахунок слід продовжувати з точки $(K-4)$.

Якщо значення $\delta'' > \delta$, це означає, що точка $(K-3)$ не належить експоненті, параметри якої визначені перед цим, і подальший розрахунок слід продовжувати з цієї точки $(K-3)$.

2.10. Визначаємо різницю між значеннями $Z'_{thH}(t_k)$ (табл. 2) для точок, починаючи з $(k=1)$ до точки, з якої слід продовжувати розрахунок, яка визначена пунктом 2.9 та значеннями експоненти з параметрами (R_i, τ_i) , що визначені перед цим, за формулою

$$Z'_{thH(i+1)}(t_k) = Z'_{thH}(t_k) - R_i \exp(-t_k/\tau_i), \quad (10)$$

де $i = 1, 2, \dots$ – порядковий номер експонент, у яких ще не визначені параметри R_i, τ_i ; $k = 1, 2, \dots, K''$ –

індекс часу для точок частини кривої (рис. 2), яка не належить експонентам, у яких вже визначені параметри R_i, τ_i ; K'' – індекс часу для останньої точки частини кривої (рис. 2), яка не належить експонентам, у яких вже визначені параметри R_i, τ_i (визначається у пункті 2.9 як точка, з якої слід продовжити розрахунок).

2.11. Наступною точкою відліку призначаємо точку, визначену пунктом 2.9, та продовжуємо розрахунки для визначення параметрів наступної експоненти, повторюючи пункти 2.2–2.10 поки не будуть виконані розрахунками точок $2-1$.

2.12. Якщо кількість точок значень перехідного теплового опору така, що після виконання розрахунків зі значеннями точок $3-2$ не урахованим залишається значення точки $(k=1)$ і вона не належить попередній експоненті, то параметри останньої експоненти слід визначати таким чином.

Визначаємо різницю між значенням $Z'_{thH(n-1)}(t_1)$ та значенням експоненти з визначеними параметрами $(R_{(n-1)}, \tau_{(n-1)})$ за формулою

$$Z'_{thHn}(t_1) = Z'_{thH(n-1)}(t_1) - R_{(n-1)} \exp(-t_1/\tau_{(n-1)}). \quad (11)$$

2.13. Визначаємо параметри останньої експоненти, до якої належить точка $(k=1)$. Оскільки це остання точка, приймаємо її за точку відліку, а за другу точку апроксимації приймаємо значення R_n (значення ординати вище лінії $3-2$ при $t_0 = 0$), яке визначається за формулою

$$R_n = R_{thH} - (R_1 + R_2 + \dots + R_{(n-1)}). \quad (12)$$

2.14. Котангенс кута нахилу лінії $1-0$ (прямої, що з'єднує точку 1 та значення $\ln R_n$) до лінії $3-2$ визначаємо за формулою

$$\text{ctg } \psi_n = \tau_n = \frac{t_1 - 0}{\ln R_n - \ln Z'_{thHn}(t_1)}. \quad (13)$$

Таким чином завершується визначення параметрів останньої експоненти. Визначено кількість експонент, які апроксимують криву, що зображена на рис. 2; n – кількість експонент, якими апроксимується перехідний тепловий опір та яка визначається внаслідок проведення розрахунків.

2.15. Результатом виконаних розрахунків є параметри експонент, що апроксимують перехідний тепловий опір, які заносяться у табл. 3.

Таблиця 3. Результати розрахунків «назва приладу, охолоджувача, умов охолодження»

| | | | | | |
|--------------|----------|----------|----------|-----|----------|
| i | 1 | 2 | 3 | ... | n |
| R_p , К/Вт | R_1 | R_2 | R_3 | ... | R_n |
| τ_p , с | τ_1 | τ_2 | τ_3 | ... | τ_n |

2.16. Для визначення похибок у наданні початкових даних та похибок апроксимації необхідно виконати такі розрахунки.

2.16.1. Визначити значення

$$Z_{th\,Poz}(t_k) = \sum_{i=1}^n R_i [1 - \exp(-t_k / \tau_i)], \quad (14)$$

де $Z_{th\,Poz}(t_k)$ – розрахункове значення перехідного теплового опору для моментів часу t_k з табл. 1 (початкові дані) зі значеннями R_p , τ_i за результатами розрахунку, табл. 3.

2.16.2. Визначити абсолютну похибку.

$$\text{Абсолютна похибка} = Z_{th\,Poz}(t_k) - Z_{thH}(t_k), \quad (15)$$

де $Z_{th\,Poz}(t_k)$ – значення, визначені у пункті 2.16.1; $Z_{thH}(t_k)$ – значення з табл. 1.

2.16.3. Визначити відносну похибку.

$$\text{Відносна похибка} = [(\text{Абсолютна похибка}) / Z_{thH}(t_k)] \cdot 100 \%. \quad (16)$$

Результати розрахунків звести у таблицю з такими стовпчиками: t_k ; $Z_{thH}(t_k)$; $Z_{th\,Poz}(t_k)$; Абсолютна похибка; Відносна похибка.

2.17. Назву варіанту, початкові дані, результати розрахунків слід вивести на друк.

3. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКУ

Визначимо параметри експонент, що апроксимують перехідний тепловий опір охолоджувача типу О253 при швидкості охолоджуючого повітря 6 м/с, який представлено кривою 3 на рис. 3 [3].

Примітка. 0 м/с означає природну конвекцію охолоджуючого повітря, при якій в залежності від розсіюваної потужності швидкість потоку повітря знаходиться в діапазоні значень (0,3–1,2) м/с.

На кривій 3 рис. 3 вибираємо точки, що найбільш повно характеризують залежність перехідного теплового опору в часі при швидкості потоку охолоджуючого повітря 6 м/с, причому за першу точку ($k = 1$) приймаємо точку для моменту часу $t_1 = 2$ с, що найбільш точно характеризує початок кривої 3. Параметри вибраних точок заносимо у табл. 4.

Як видно з рис. 3 та з табл. 4, сталим значення перехідного теплового опору стає у точці ($k = 8$); значення $Z_{thH}(2000) = 0,0975$ К/Вт відповідає сталому режиму роботи охолоджувача, тобто $R_{thH} = 0,0975$ К/Вт. Задаємо, що похибка апроксимації не перевищує $\delta = 0,5 \%$.

Визначаємо різницю значень теплового опору та перехідного теплового опору згідно з формулою (3) та заносимо дані в табл. 5.

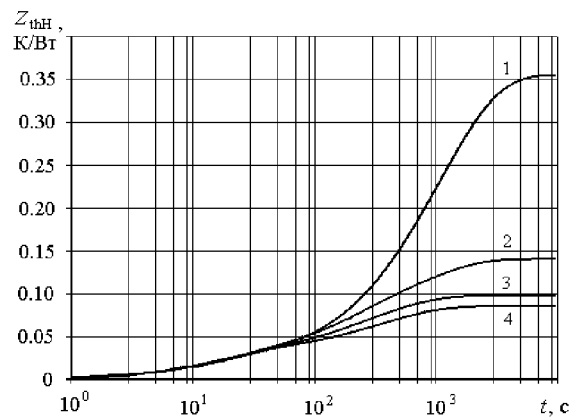


Рис. 3. Перехідний тепловий опір охолоджувача О253 при різних режимах охолодження:

1 – при 0 м/с; 2 – при 3 м/с; 3 – при 6 м/с; 4 – при 12 м/с

Таблиця 4. Значення перехідного теплового опору охолоджувача типу О253 при швидкості охолоджуючого повітря 6 м/с

| | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|--------|--------|-------|--------|------|--------|--------|
| k | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| t_k , с | 2 | 4 | 10 | 40 | 100 | 400 | 1000 | 2000 |
| $Z_{thH}(t_k)$, К/Вт | 0,004 | 0,0087 | 0,0161 | 0,037 | 0,0485 | 0,08 | 0,0928 | 0,0975 |

Таблиця 5. Різниця значень теплового опору та перехідного теплового опору охолоджувача типу О253 при швидкості охолоджуючого повітря 6 м/с

| | | | | | | | | |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|------|
| k | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| t_k , с | 2 | 4 | 10 | 40 | 100 | 400 | 1000 | 2000 |
| $Z_{thH}(t_k)$, К/Вт | 0,0935 | 0,0888 | 0,0814 | 0,0605 | 0,049 | 0,0175 | 0,0047 | 0 |

За першу точку відліку приймаємо точку ($k = 7$), яка, згідно з табл. 5, має такі координати: $t_7 = 1000$ с; $Z_{\text{thH}}(t_7) = 0,0047$ К/Вт. Другою точкою апроксимації є точка ($k = 6$), яка, згідно з табл. 5, має такі координати: $t_6 = 400$ с; $Z_{\text{thH}}(t_6) = 0,0175$ К/Вт.

Котангенс кута нахилу прямої, що з'єднує точки 7 – 6, до осі абсцис визначаємо за формулою (4):

$$\begin{aligned} \text{ctg}\psi_1 = \tau_1 &= \frac{t_7 - t_6}{\ln Z'_{\text{thH}}(t_6) - \ln Z'_{\text{thH}}(t_7)} = \\ &= \frac{1000 - 400}{\ln 0,0175 - \ln 0,0047} = \\ &= 600 / (-4,045554 + 5,360193) = 456,4. \end{aligned}$$

Логарифм ординати точки перетину лінії 7 – 6 з віссю ординат визначаємо за формулою (5):

$$\begin{aligned} \ln R_1 = \ln Z_{\text{thH}}(t_7) + t_7 / \tau_1 &= \ln 0,0047 + \\ + (1000 / 456,4) &= -5,360193 + 2,191 = -3,1692. \end{aligned}$$

Значення ординати точки перетину лінії 7 – 6 з віссю ординат визначаємо потенціюванням $\ln R_1$ за формулою (6):

$$R_1 = \exp(\ln R_1) = \exp(-3,1692) = 0,0421 \text{ К/Вт.}$$

Далі перевіряємо, чи належить наступна точка ($k = 5$) лінії 7 – 6.

Логарифм ординати для моменту часу $t_5 = 100$ с при $\tau_1 = 456,4$ визначаємо за формулою (7):

$$\begin{aligned} \ln Z'_{\text{thH}}(t_5) &= \ln Z_{\text{thH}}(t_6) + (t_6 - t_5) / \tau_1 = \\ &= \ln 0,0175 + (400 - 100) / 456,4 = \\ &= -4,045554 + 0,657318 = -3,388236. \end{aligned}$$

Значення ординати для моменту часу $t_5 = 100$ с при $\tau_1 = 456,4$ (тобто на лінії 7 – 6) визначаємо потенціюванням $\ln Z'_{\text{thH}}(t_5)$ за формулою (6):

$$\begin{aligned} Z'_{\text{thH}}(t_5) &= \exp(\ln Z'_{\text{thH}}(t_5)) = \\ &= \exp(-3,388236) = 0,03377 \text{ К/Вт.} \end{aligned}$$

Визначаємо відносну різницю значення $Z'_{\text{thH}}(t_5)$ та значення $Z_{\text{thH}}(t_5)$ за формулою (9):

$$\begin{aligned} \delta^* &= \left(\frac{Z'_{\text{thH}}(t_5) - Z_{\text{thH}}(t_5)}{Z_{\text{thH}}(t_5)} \right) \cdot 100 \% = \\ &= [(0,049 - 0,03377) / 0,049] \cdot 100 \% = \\ &= 31 \% > \delta = 0,5 \%. \end{aligned}$$

Це означає, що точка $Z_{\text{thH}}(t_5)$ не належить до цієї експоненти.

Визначаємо різницю між значеннями $Z_{\text{thH}}(t_k)$ (табл. 5) та значеннями експоненти з визначеними параметрами (R_1, τ_1) за формулою (10):

$$Z_{\text{thH2}}(t_k) = Z_{\text{thH}}(t_k) - R_1 \exp(-t_k / \tau_1);$$

$$\begin{aligned} Z_{\text{thH2}}(t_1) &= Z_{\text{thH}}(t_1) - R_1 \exp(-t_1 / \tau_1) = \\ &= 0,0935 - 0,0421 \cdot \exp(-2 / 456,4) = \\ &= 0,051584 \text{ К/Вт;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{\text{thH2}}(t_2) &= Z_{\text{thH}}(t_2) - R_1 \exp(-t_2 / \tau_1) = \\ &= 0,0888 - 0,0421 \cdot \exp(-4 / 456,4) = \\ &= 0,04707 \text{ К/Вт;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{\text{thH2}}(t_3) &= Z_{\text{thH}}(t_3) - R_1 \exp(-t_3 / \tau_1) = \\ &= 0,0814 - 0,0421 \cdot \exp(-10 / 456,4) = \\ &= 0,0402 \text{ К/Вт;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{\text{thH2}}(t_4) &= Z_{\text{thH}}(t_4) - R_1 \exp(-t_4 / \tau_1) = \\ &= 0,0605 - 0,0421 \cdot \exp(-40 / 456,4) = \\ &= 0,02193 \text{ К/Вт;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{\text{thH2}}(t_5) &= Z_{\text{thH}}(t_5) - R_1 \exp(-t_5 / \tau_1) = \\ &= 0,049 - 0,0421 \cdot \exp(-100 / 456,4) = \\ &= 0,01518 \text{ К/Вт.} \end{aligned}$$

Визначаємо параметри другої експоненти, до якої належать точки ($k = 5$) та ($k = 4$).

Тобто, за першу точку відліку приймаємо точку ($k = 5$), яка має такі координати: $t_5 = 100$ с; $Z_{\text{thH2}}(t_5) = 0,01518$ К/Вт. Другою точкою цієї апроксимації є точка ($k = 4$), яка має такі координати: $t_4 = 40$ с; $Z_{\text{thH2}}(t_4) = 0,02193$ К/Вт.

Котангенс кута нахилу прямої, що з'єднує точки 5 – 4, до лінії 7 – 6 визначаємо за формулою (4):

$$\begin{aligned} \text{ctg}\psi_2 = \tau_2 &= \frac{t_5 - t_4}{\ln Z'_{\text{thH2}}(t_4) - \ln Z'_{\text{thH2}}(t_5)} = \\ &= \frac{100 - 40}{\ln 0,02193 - \ln 0,01518} = 163,1. \end{aligned}$$

Логарифм ординати точки перетину лінії 5 – 4 з віссю ординат визначаємо за формулою (5):

$$\begin{aligned} \ln R_2 = \ln Z_{\text{thH2}}(t_5) + t_5 / \tau_2 &= \\ &= \ln 0,01518 + (100 / 163,1) = \\ &= -4,1877765 + 0,613121 = -3,5746555. \end{aligned}$$

Значення ординати точки перетину лінії 5 – 4 з віссю ординат визначаємо потенціюванням $\ln R_2$ за формулою (6):

$$R_2 = \exp(\ln R_2) = \exp(-3,5746555) = 0,0280 \text{ К/Вт.}$$

Далі перевіряємо, чи належить наступна точка ($k = 3$) лінії 5 – 4.

Логарифм ординати для моменту часу $t_3 = 10$ с при $\tau_2 = 163,1$ визначаємо за формулою (7):

$$\begin{aligned} \ln Z'_{\text{thH2}}(t_3) &= \ln Z_{\text{thH2}}(t_4) + (t_4 - t_3) / \tau_2 = \\ &= \ln 0,02193 + (40 - 10) / 163,1 = \\ &= -3,8198997 + 0,183994 = -3,635963. \end{aligned}$$

Значення ординати для моменту часу $t_3 = 10$ с при $\tau_2 = 163,1$ визначаємо потенціюванням $\ln Z'_{\text{thH2}}(t_3)$ за формулою (8):

$$Z'_{\text{thH2}}(t_3) = \exp(\ln Z'_{\text{thH2}}(t_3)) = \exp(-3,635963) = 0,02636 \text{ К/Вт.}$$

Визначаємо відносну різницю значення $Z'_{\text{thH2}}(t_3)$ та значення $Z_{\text{thH2}}(t_3)$ за формулою (9):

$$\delta'' = \left(\frac{Z'_{\text{thH2}}(t_3) - Z_{\text{thH2}}(t_3)}{Z'_{\text{thH2}}(t_3)} \right) \cdot 100\% = [(0,0402 - 0,02636) / 0,0402] \cdot 100\% = 34,4\% > \delta = 0,5\%.$$

Це означає, що точка $Z_{\text{thH2}}(t_3)$ не належить до другої експоненти, а належить до третьої експоненти.

Визначаємо різницю між значеннями $Z_{\text{thH2}}(t_k)$ та значеннями експоненти з визначеними параметрами (R_2, τ_2) за формулою (10):

$$\begin{aligned} Z_{\text{thH3}}(t_k) &= Z_{\text{thH2}}(t_k) - R_2 \exp(-t_k / \tau_2); \\ Z_{\text{thH3}}(t_1) &= Z_{\text{thH2}}(t_1) - R_2 \exp(-t_1 / \tau_2) = 0,051584 - 0,028 \cdot \exp(-2/163,1) = 0,02393 \text{ К/Вт}; \\ Z_{\text{thH3}}(t_2) &= Z_{\text{thH2}}(t_2) - R_2 \exp(-t_2 / \tau_2) = 0,04707 - 0,028 \cdot \exp(-4/163,1) = 0,01975 \text{ К/Вт}; \\ Z_{\text{thH3}}(t_3) &= Z_{\text{thH2}}(t_3) - R_2 \exp(-t_3 / \tau_2) = 0,0402 - 0,028 \cdot \exp(-10/163,1) = 0,01386 \text{ К/Вт}. \end{aligned}$$

Визначаємо параметри третьої експоненти, до якої належать точки ($k = 3$) та ($k = 2$).

Тобто, за першу точку відліку приймаємо точку ($k = 3$), яка має такі координати: $t_3 = 10$ с; $Z_{\text{thH3}}(t_3) = 0,01386$ К/Вт. Другою точкою цієї апроксимації є точка ($k = 2$), яка має такі координати: $t_2 = 4$ с; $Z_{\text{thH3}}(t_2) = 0,01975$ К/Вт.

Котангенс кута нахилу прямої, що з'єднує точки 3 – 2, до лінії 5 – 4 визначаємо за формулою (4):

$$\begin{aligned} \text{ctg} \psi_3 = \tau_3 &= \frac{t_3 - t_2}{\ln Z'_{\text{thH3}}(t_2) - \ln Z'_{\text{thH3}}(t_3)} = \\ &= \frac{10 - 4}{\ln 0,01975 - \ln 0,01386} = 16,942. \end{aligned}$$

Логарифм ординати точки перетину лінії 3 – 2 з віссю ординат визначаємо за формулою (5):

$$\begin{aligned} \ln R_3 &= \ln Z_{\text{thH3}}(t_3) + t_3 / \tau_3 = \\ &= \ln 0,01386 + (10 / 16,942) = \\ &= -4,2787483 + 0,59025 = -3,6884983. \end{aligned}$$

Значення ординати точки перетину лінії 3 – 2 з віссю ординат визначаємо потенціюванням $\ln R_3$ за формулою (6):

$$R_3 = \exp(\ln R_3) = \exp(-3,6884983) = 0,025 \text{ К/Вт.}$$

Далі перевіряємо, чи належить наступна точка ($k = 1$) до лінії 3 – 2.

Логарифм ординати для моменту часу $t_1 = 2$ с при $\tau_3 = 16,942$ визначаємо за формулою (7):

$$\begin{aligned} \ln Z'_{\text{thH3}}(t_1) &= \ln Z_{\text{thH3}}(t_2) + (t_2 - t_1) / \tau_3 = \\ &= \ln 0,01975 + (4 - 2) / 16,942 = -3,80655. \end{aligned}$$

Значення ординати для моменту часу $t_1 = 2$ с при $\tau_3 = 16,942$ визначаємо потенціюванням $\ln Z'_{\text{thH3}}(t_1)$ за формулою (8):

$$\begin{aligned} Z'_{\text{thH3}}(t_1) &= \exp(\ln Z'_{\text{thH3}}(t_1)) = \\ &= \exp(-3,80655) = 0,02222 \text{ К/Вт.} \end{aligned}$$

Визначаємо відносну різницю значення $Z'_{\text{thH3}}(t_1)$ та значення $Z'_{\text{thH3}}(t_1)$ за формулою (9):

$$\begin{aligned} \delta'' &= \left(\frac{Z'_{\text{thH3}}(t_1) - Z_{\text{thH3}}(t_1)}{Z'_{\text{thH3}}(t_1)} \right) \cdot 100\% = \\ &= [(0,02393 - 0,02222) / 0,02393] \cdot 100\% = \\ &= 7,1\% > \delta = 0,5\%. \end{aligned}$$

Це означає, що точка $Z_{\text{thH3}}(t_1)$ не належить до третьої експоненти, а належить до четвертої експоненти.

Визначаємо різницю між значенням $Z_{\text{thH3}}(t_1)$ та значенням експоненти з визначеними параметрами (R_3, τ_3) за формулою (11):

$$\begin{aligned} Z_{\text{thH4}}(t_1) &= Z_{\text{thH3}}(t_1) - R_3 \exp(-t_1 / \tau_3); \\ Z_{\text{thH4}}(t_1) &= Z_{\text{thH3}}(t_1) - R_3 \exp(-t_1 / \tau_3) = \\ &= 0,02393 - 0,025 \cdot \exp(-2 / 16,942) = \\ &= 0,001714 \text{ К/Вт.} \end{aligned}$$

Визначаємо параметри четвертої експоненти, до якої належить точка ($k = 1$). Оскільки це остання точка, приймаємо її за точку відліку, а за другу точку апроксимації приймаємо значення R_4 (значення ординати вище лінії 3 – 2 при $t_0 = 0$), яке визначається за формулою (12):

$$\begin{aligned} R_4 &= R_{\text{thH}} - (R_1 + R_2 + R_3) = \\ &= 0,0975 - (0,0421 + 0,028 + 0,025) = \\ &= 0,0024 \text{ К/Вт.} \end{aligned}$$

Котангенс кута нахилу лінії 1 – 0 (прямої, що з'єднує точку ($k = 1$) та значення $\ln R_4$) до лінії 3 – 2 визначаємо за формулою (13):

$$\begin{aligned} \text{ctg} \psi_4 = \tau_4 &= \frac{t_1 - 0}{\ln R_4 - \ln Z'_{\text{thH4}}(t_1)} = \\ &= \frac{2 - 0}{\ln 0,0024 - \ln 0,001714} = 5,941. \end{aligned}$$

Результатом виконаних розрахунків є параметри чотирьох експонент ($n = 4$), що апроксимують перехідний тепловий опір охолоджувача типу О253 при швидкості охолоджуючого повітря 6 м/с, які наведені у табл. 6.

Таблиця 6. Результати виконаних розрахунків

| i | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------------|--------|-------|-------|--------|
| $R_i, \text{К/Вт}$ | 0,0421 | 0,028 | 0,025 | 0,0024 |
| $\tau_i, \text{с}$ | 456,4 | 163,1 | 16,9 | 5,94 |

Визначимо похибки апроксимації перехідного теплового опору охолоджувача типу О253 при швидкості охолоджуючого повітря 6 м/с згідно з формулами (14), (15), (16) та наведемо їх у табл. 7.

Таблиця 7. Результати розрахунків похибок апроксимації

| $t_k, \text{с}$ | $Z_{\text{th}}(t_k), \text{К/Вт}$ | $Z_{\text{th,poz}}(t_k), \text{К/Вт}$ | Абсолютна похибка, К/Вт | Відносна похибка, % |
|-----------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------------------|
| 2 | 0,004 | 0,004 | 0 | 0 |
| 4 | 0,0087 | 0,0075 | -0,0012 | -13,8 |
| 10 | 0,0161 | 0,0157 | -0,0004 | -2,48 |
| 40 | 0,037 | 0,0347 | -0,0023 | -6,2 |
| 100 | 0,0485 | 0,0484 | -0,0001 | -0,2 |
| 400 | 0,08 | 0,0776 | -0,0024 | -3 |
| 1000 | 0,0928 | 0,0927 | -0,0001 | -0,1 |
| 2000 | 0,0975 | 0,0975 | 0 | 0 |

Значні похибки апроксимації можна пояснити недостатньою точністю відліку значень з рис. 3. Для зменшення похибок апроксимації необхідно скорегувати початкові дані у відповідності до табл. 7 та повторити розрахунок.

Таблиця 8. Результати розрахунків параметрів експонент, що апроксимують перехідний тепловий опір охолоджувача О253

| Природна конвекція охолоджуючого повітря при потужності розсіювання 220 Вт | | | | | |
|--|--------|---------|--------|---------|---------|
| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| $R_i, \text{К/Вт}$ | 0,2328 | 0,05165 | 0,0491 | 0,0187 | 0,00275 |
| $\tau_i, \text{с}$ | 1248,4 | 1326,4 | 356,5 | 13,55 | 21 |
| Швидкість охолоджуючого повітря 3 м/с | | | | | |
| i | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| $R_i, \text{К/Вт}$ | 0,0635 | 0,05216 | 0,0219 | 0,00244 | |
| $\tau_i, \text{с}$ | 865,6 | 178,6 | 16,17 | 6 | |
| Швидкість охолоджуючого повітря 6 м/с | | | | | |
| i | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| $R_i, \text{К/Вт}$ | 0,0421 | 0,028 | 0,025 | 0,0024 | |
| $\tau_i, \text{с}$ | 456,4 | 163,1 | 16,9 | 5,94 | |
| Швидкість охолоджуючого повітря 12 м/с | | | | | |
| i | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| $R_i, \text{К/Вт}$ | 0,0345 | 0,0195 | 0,0286 | 0,0024 | |
| $\tau_i, \text{с}$ | 496,6 | 212,4 | 18,17 | 5,8 | |

Результати розрахунків параметрів експонент, що апроксимують перехідний тепловий опір охолоджувача О253 для режимів охолодження, представлених його виробником (рис. 3), наведені в табл. 8.

ВИСНОВОК

Запропонований алгоритм виконання розрахунків для визначення параметрів експонент, що апроксимують перехідний тепловий опір, дозволяє включити охолоджувач в комп'ютерну систему розрахунку температури напівпровідникової структури приладів, що працюють в режимі змінного навантаження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Охлаждители воздушного охлаждения для приборов таблеточного исполнения [Электронный ресурс] : параметры охладителей / ОАО Электровыпрямитель. – Электрон. дані (1 файл). – Саранск : Электровыпрямитель, 2007. – Режим доступа: http://www.elvpr.ru/poluprovodnikprib/ohladiiteli/vozhd_tabl.php (вільний). – Назва з екрана.
2. Давидов, П. Д. Анализ и расчет тепловых режимов полупроводниковых приборов / Павел Давидович Давидов. – М. : Энергия, 1967. – 144 с.
3. Охлаждители воздушного охлаждения для приборов таблеточного исполнения типов О343, О253, О353 [Электронный ресурс] : размеры, параметры и характеристики охладителей / ОАО Электровыпрямитель. – Электрон. дані (1 файл). – Саранск : Электровыпрямитель, 2007. – Режим доступа: <http://www.elvpr.ru/poluprovodnikprib/ohladiiteli/O343%20O253%20O353.pdf> (вільний). – Назва з екрана.

Надійшла 08.11.2010

Остренко В. С.

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПОНЕНТ, КОТОРЫЕ АППРОКСИМИРУЮТ ПЕРЕХОДНОЕ ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОХЛАДИТЕЛЯ

Предложен алгоритм определения параметров экспонент, аппроксимирующих график зависимости переходного теплового сопротивления охладителя во времени. Это дает возможность включить охладитель в систему расчета температуры полупроводниковой структуры силовых полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: полупроводниковый прибор, охладитель, температура полупроводниковой структуры, тепловое сопротивление, параметры экспонент, режимы охлаждения.

Ostrenko V. S.

ALGORITHM FOR DETERMINATION OF EXPONENTS PARAMETERS WHICH APPROXIMATE HEAT SINK TRANSIENT HEAT RESISTANCE

The algorithm is proposed for determination of exponents parameters which approximate heat sink transient heat resistance as a function of time. It permits to include the heat sink into the system for calculation of power semiconductor structure temperature.

Key words: semiconductor device, heat sink, semiconductor structure temperature, heat resistance, exponents parameters, cooling modes.