

Зайков В.П. канд. техн. наук.¹,
Мещеряков В.І. доктор техн. наук.²,
Гнатовська А.А.²
Журавльов Ю.І. канд. техн. наук³

¹Науково-дослідний інститут ШТОРМ,
вул. Терешкової, 27, Одеса, Україна;
e-mail: grand@i.ua;

²Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, Україна; *e-mail: grand@ua.fm;*

³Національний університет «Одеська морська академія»,
вул. Дідріхсона, 8, Україна; *e-mail: zhuravlov.y@ua.ru.*

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ОДНОКАСКАДНОГО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ОХОЛОДЖУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ З РІЗНОЮ ГЕОМЕТРІЄЮ ГІЛОК ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ

Проведено порівняльний аналіз динаміки функціонування однокаскадного термоелектричного охолоджувального пристрою при варіації геометрії гілок термоелементів з урахуванням впливу конструктивних і технологічних елементів для різних характерних струмових режимів роботи, перепадів температури й теплового навантаження. Показане, що з ростом відношення висоти до площі перерізу гілки термоелемента зменшується час виходу на стаціонарний режим роботи та величина робочого струму, збільшується падіння напруги за сталого енергоспоживання для різних режимів роботи. Зі зростанням перепаду температури збільшується час виходу на стаціонарний режим роботи для різних режимів роботи. Бібл. 12, рис. 13, Табл. 2.

Ключові слова: термоелектричний охолоджувач, геометрія гілок термоелементів, показники надійності, час виходу на режим, перепад температур.

Вступ

Термоелектричні охолоджувачі належать до найбільш швидкодіючих пристроїв забезпечення теплових режимів радіоелектронної апаратури, що пов'язано, у першу чергу, з принципом генерації тепла й холоду [1], малими габаритами й масою [2]. Найважливішим показником термоелектричних охолоджувачів є експлуатаційна надійність, яка визначається інтенсивністю відмов і ймовірністю безвідмовної роботи [3], і перевищує показники компресійних охолоджувачів у силу відсутності рухомих компонентів [4]. Разом з тим, постійно зростаючі вимоги до експлуатаційних показників теплонавантажених елементів призводять до необхідності пошуку шляхів підвищення показників надійності при впливі негативних кліматичних [5] і механічних [6] факторів, теплового навантаження [7]. Підвищення вимог щодо швидкодії, пов'язане з ростом температурних градієнтів [8] та показників

надійності й не отримало належної уваги при проектуванні термоелектричних охолоджувачів. Аналіз одного з аспектів цієї проблеми, пов'язаний із впливом геометрії гілок термоелементів на динаміку та показники надійності однокаскадних термоелектричних охолоджувачів є актуальним завданням. Практична значимість такого підходу обумовлена й тим фактом, що при цьому не потрібна зміна технології виготовлення модулів, яка також впливає на показники надійності [9].

Метою роботи є аналіз динамічних характеристик і показників надійності однокаскадного термоелектричного охолоджувача в діапазоні уніфікованої геометрії гілок термоелементів у різних струмових режимах роботи від мінімуму інтенсивності відмов до максимальної холодопродуктивності.

Модель зв'язку часу виходу термоелектричного охолоджувача на стаціонарний режим з конструктивними параметрами й енергетичними показниками.

У працях [10, 11], розглянуто вплив струмових режимів роботи на основні параметри, показники надійності й динаміку функціонування термоелектричного пристрою (ТЕП) з урахуванням конструктивних і технологічних елементів (КТЕ) у діапазоні перепадів температури від $\Delta T = 5$ К до $\Delta T = 60$ К за теплового навантаження від $Q_0 = 0.5$ Вт до $Q_0 = 20$ Вт при заданому відношенні $l/s = 10$. У той же час становить інтерес оцінити вплив на динаміку й показники надійності уніфікованого діапазону зміни геометрії галузей термоелементів від $l/s = 4.5$ до $l/s = 40$ (відношень висоти термоелемента l до площі його поперечного перерізу s). При цьому слід врахувати вплив конструктивно-технологічних елементів для різних перепадів температури й теплового навантаження за різних струмових режимів роботи.

Для цієї мети скористаємося раніше отриманими співвідношеннями [12]. Вираз для визначення часу виходу на стаціонарний режим роботи τ залежно від струмового режиму роботи можна записати у вигляді:

$$\tau = \frac{\sum_i M_i C_i}{K_k \left(1 + 2B_K \Delta T_{\max} / T_0\right)} \cdot \ln \frac{\gamma \cdot B_H (2 - B_H)}{2B_K - B_K^2 - \theta} \quad (1)$$

$$\text{де } \gamma = \frac{I_{\max H}^2 \cdot R_H}{I_{\max K}^2 \cdot R_K},$$

$\sum_i M_i C_i$ – сума добутків теплоємності на масу складових КТЕ за заданої геометрії гілок термоелементів, Дж/К;

$I_{\max H}, R_H$ – відповідно, максимальний робочий струм (А), і електричний опір (Ом) гілки термоелемента на початку процесу охолодження $\tau_H = 0$;

$I_{\max K}, R_K$ – відповідно, максимальний робочий струм (А), і електричний опір (Ом) гілки термоелемента наприкінці процесу охолодження τ_K ;

$B_H = \frac{I}{I_{\max H}}$ – відносний робочий струм при $\tau_H = 0$;

$B_K = \frac{I}{I_{\max K}}$ – відносний робочий струм при τ_K ;

$$I_{\max_H} = \frac{\bar{e}_H T}{R_H} - \text{максимальний робочий струм при } \tau_H = 0;$$

$$I_{\max_K} = \frac{\bar{e}_K T_0}{R_K} - \text{максимальний робочий струм при } \tau_K.$$

При рівності струмів на початку й наприкінці процесу охолодження:

$$I = B_H I_{\max_H} = B_K I_{\max_K}$$

\bar{e}_H, \bar{e}_K – усереднений коефіцієнт термоЕРС гілки термоелемента на початку й наприкінці процесу охолодження;

T_0 – температура теплополинаючого спаю наприкінці процесу охолодження (К), при τ_K ;

T – температура теплополинаючого спаю на початку процесу охолодження (К), при $\tau_H = 0$;

$$\theta = \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} - \text{відносний перепад температур};$$

$\Delta T = T - T_0$ – робочий перепад температур ТЕП (К);

$\Delta T_{\max} = 0.5\bar{z} \cdot T_0^2$ – максимальний перепад температури (К);

\bar{z} – усереднене значення ефективності термоелектричного матеріалу в модулі (К⁻¹);

$K_K = \bar{\chi}_K / l/S$ – коефіцієнт тепловіддачі, (Вт/К)

$\bar{\chi}_K$ – усереднене значення коефіцієнта теплопровідності (Вт/см·К);

I – величина робочого струму (А).

Кількість термоелементів n можна визначити зі співвідношення:

$$n = \frac{Q_0}{I_{\max_K}^2 \cdot R_K (2B_K - B_K^2 - \theta)}$$

де Q_0 – величина теплового завантаження, (Вт)

Потужність споживання W_K ТЕП можна підрахувати за формулою:

$$W_K = 2nI_{\max_K}^2 R_K B_K (B_K + \Delta T_{\max} \theta / T_0)$$

падіння напруги $U_K = W_K / I$

і охолоджувальний коефіцієнт $E = Q_0 / W_K$.

Інтенсивність відмов λ / λ_0 відповідно до [12], можна визначити за формулою:

$$\lambda / \lambda_0 = n B_K^2 (\theta + C_K) \frac{(B_K + \Delta T_{\max} \theta / T_0)^2}{(1 + \Delta T_{\max} \theta / T_0)^2} \cdot K_{T_i}$$

де $C_K = Q_0 / I_{\max_K}^2 \cdot R_K \cdot n$ – відносне теплове навантаження;

K_{T_i} – значимий коефіцієнт зниження температури.

Результати розрахунків основних параметрів показників надійності й часу виходу на стаціонарний режим роботи для різних l/s і струмових режимів роботи при перепаді

температури $\Delta T = 40 \text{ К}$ й тепловому навантаженню $Q_0 = 1.0 \text{ Вт}$ при $T = 300 \text{ К}$ $T = 300 \text{ К}$; $m_0 c_0 \rightarrow 0$ (відсутність об'єкта охолодження); $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$, $t = 10^{-4} \text{ год}$ наведено в табл. 1.

Аналіз результатів розрахунків, наведених у таблиці 1, показав, що з ростом відношення l/s для різних режимів роботи:

– зменшується величина $\sum_i m_i c_i$ КТЕ (рис. 1);

– зменшується час виходу на стаціонарний режим роботи τ (рис. 2) у середньому на 30 – 33%:

від $\tau = 7.8 \text{ год}$ за $l/s = 4.5$ до $\tau = 5.2 \text{ год}$ за $l/s = 40$ для режиму $Q_{0\text{max}}$;

від $\tau = 9.2 \text{ год}$ за $l/s = 4.5$ до $\tau = 6.3 \text{ год}$ за $l/s = 40$ для режиму $(Q_0/I)_{\text{max}}$;

Таблиця 1

Результати розрахунків основних параметрів часу виходу на стаціонарний режим і показників надійності

Режим $Q_{0\text{max}}$ – $\Delta T = 40 \text{ К}$; $Q_0 = 1.0 \text{ Вт}$; $\theta = 0.5$												
l/s	n , шт	I , А	W , Вт	U , В	E	τ , год.	B_H	B_K	$\sum_i m_i c_i$	λ/λ_0	λ , 10^{-8} год $^{-1}$	P
4.5	3.6	11.1		0.36		7.8			451.7	3.15	9.45	0.99906
10	7.8	5.0	4.0	0.91	0.25	6.50	0.93	1.0	175.0	8.0	24.0	0.99760
20	15.8	2.50		1.62		6.0			85.8	12.3	36.9	0.9963
40	32.0	1.25		3.50		5.20			36.1	24.4	73.2	0.9927
Режим $(Q_0/I)_{\text{max}}$												
4.5	4.6	8.0		0.38		9.2			451.7	0.88	2.65	0.99974
10	9.4	3.55	2.80	0.83	0.36	7.85	0.656	0.707	175.0	2.46	7.4	0.99926
20	20.6	1.78		1.70		7.4			85.8	4.0	12.0	0.99880
40	41.6	0.88		3.40		6.30			36.1	7.9	23.7	0.9976
Режим $(Q_0/I^2)_{\text{max}}$ ($B = \theta$)												
l/s	n , шт	I , А	W , Вт	U , В	E	τ , Год.	B_H	B_K	$\sum_i m_i c_i$	λ/λ_0	λ , 10^{-8} год $^{-1}$	P
4.5	8.4	5.6		0.52		12.9			451.7	0.38	1.13	0.999887
10	15.8	2.51	2.70	1.04	0.37	11.0	0.465	0.50	175.0	1.0	3.0	0.99970
20	36.6	1.26		2.30		10.6			85.8	1.66	5.0	0.99950
40	74.8	0.63		4.7		8.9			36.1	2.82	8.46	0.99915
Режим λ_{min} ($B = \eta\theta$)												
4.5	13.2	4.80		0.74		16.0			451.7	0.30	0.90	0.999909
10	24.0	2.10	3.20	1.40	0.31	14.0	0.395	0.425	175.0	0.71	2.14	0.99979
20	58.6	1.07		3.24		13.3			85.8	1.35	4.0	0.99960
40	119	0.53		6.60		11.2			36.1	2.70	8.10	0.99920

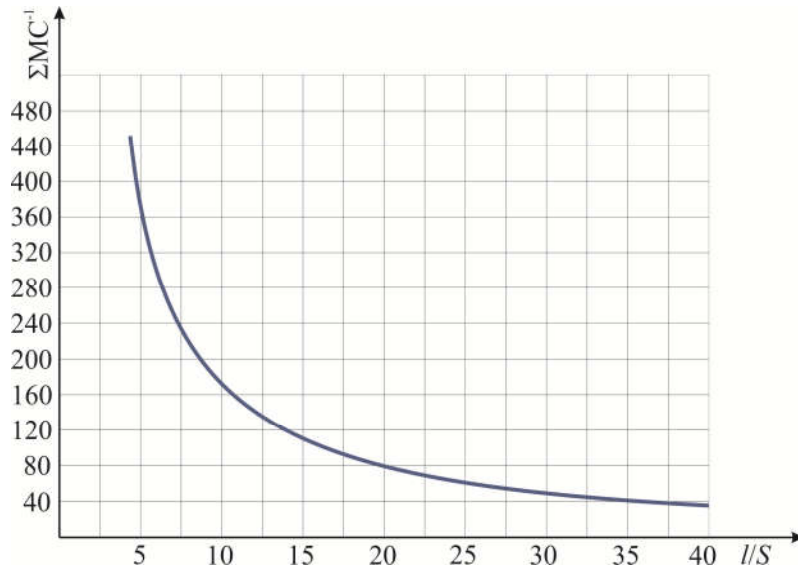


Рис. 1. Залежність величини $\sum_i M_i C_i$ однокаскадного ТЕП від геометрії гілок термоелементів l/s за $T = 300\text{ K}$

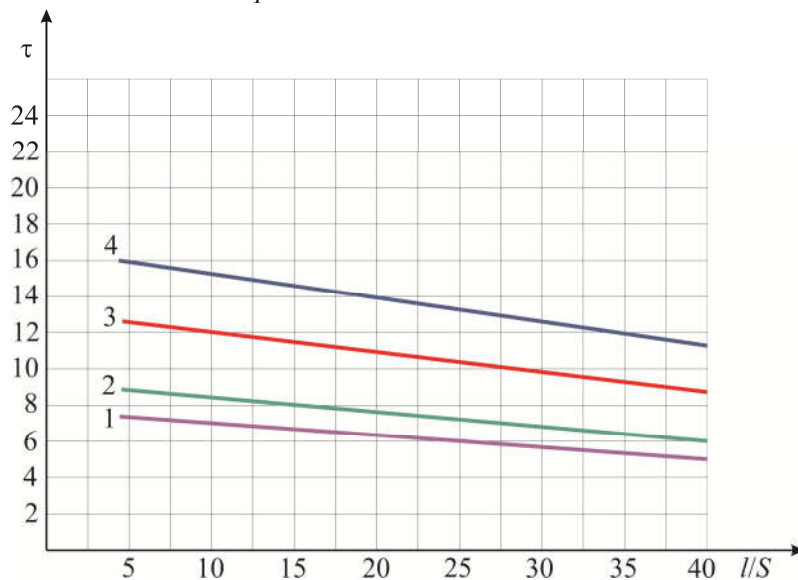


Рис. 2. Залежність часу виходу на стаціонарний режим роботи τ однокаскадного ТЕП від відношення l/s для різних режимів роботи при $T = 300\text{ K}$; $\Delta T = 40\text{ K}$; $Q_0 = 1.0\text{ Вт}$. 1 – режим $Q_{0\max}$ 2 – режим; $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – режим $(Q_0^2/I)_{\max}$; 4 – режим λ_{\min}

від $\tau = 12.9$ год. При $l/s = 4.5$ до $\tau = 8.9$ год. за $l/s = 40$ для режиму $(Q_0^2/I)_{\max}$;
 від $\tau = 16.0$ год. при $l/s = 4.5$ до $\tau = 11.2$ год. за $l/s = 40$ для режиму λ_{\min} .

Мінімальний час виходу на стаціонарний режим роботи τ_{\min} забезпечується в режимі $Q_{0\max}$ при $l/s = 40$:

– зменшується величина робочого струму I (рис. 3) для різних режимів роботи (у середньому на 89%);

від $I = 11.1\text{ А}$ при $l/s = 4.5$ до $I = 1.25\text{ А}$ при $l/s = 40$ для режиму $Q_{0\max}$;

від $I = 8.0\text{ А}$ при $l/s = 4.5$ до $I = 0.88\text{ А}$ при $l/s = 40$ для режиму; $(Q_0/I)_{\max}$;

від $I = 5.6\text{ А}$ при $l/s = 4.5$ до $I = 0.63\text{ А}$ при $l/s = 40$ для режиму; $(Q_0^2/I^2)_{\max}$;

від $I = 4.8$ А при $l/s = 4.5$ до $I = 0.53$ А при $l/s = 40$ для режиму λ_{\min} ;
 Мінімальна величина робочого струму I_{\min} забезпечується в режимі λ_{\min} при $l/s = 40$;
 - збільшується кількість термоелементів (рис. 4) для різних режимів роботи (у середньому в 9 раз):

- Від $n = 4$ шт за $l/s = 4.5$ до $n = 32$ шт за $l/s = 40$ для режиму $Q_{0\max}$;
- Від $n = 5$ шт за $l/s = 4.5$ до $n = 41.6$ шт за $l/s = 40$ для режиму $(Q_0/I)_{\max}$;
- Від $n = 9$ шт за $l/s = 4.5$ до $n = 74.8$ шт за $l/s = 40$ для режиму $(Q_0/I^2)_{\max}$;
- Від $n = 13$ шт за $l/s = 119$ до $n = 74.8$ шт за $l/s = 40$ для режиму λ_{\min} .

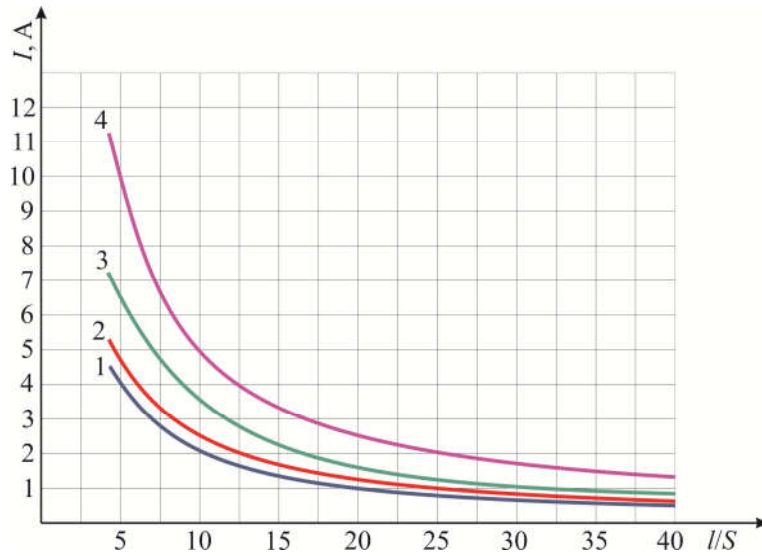


Рис. 3. Залежність робочого струму I від відношення l/s для різних режимів роботи $T = 300$ К; $\Delta T = 300$ К; $Q_0 = 1.0$ Вт. 1 – режим $Q_{0\max}$; 2 – режим; $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – режим $(Q_0/I^2)_{\max}$; 4 – режим λ_{\min}

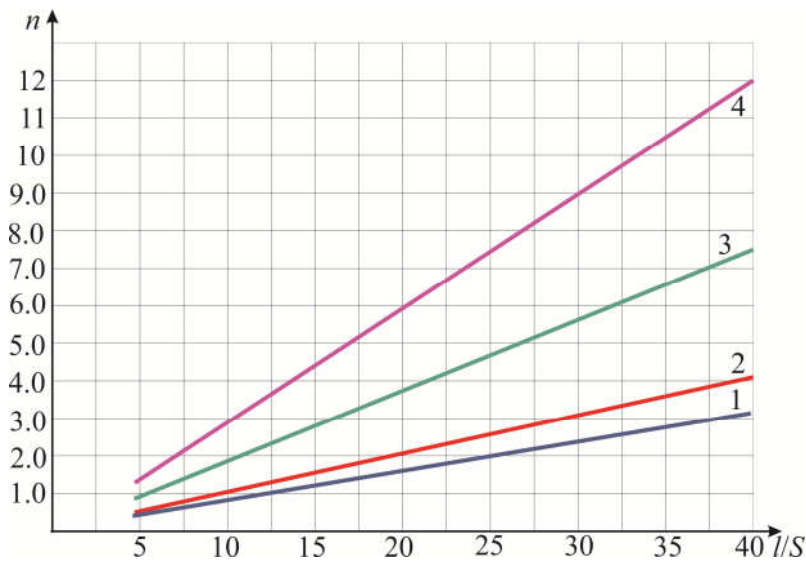


Рис. 4. Залежність кількості термоелементів n за $T = 300$ К; $\Delta T = 40$ К; $Q_0 = 1.0$ Вт від відношення l/s для режимів роботи: 1 – $Q_{0\max}$; 2 – $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – $(Q_0/I^2)_{\max}$; 4 – λ_{\min}

Мінімальна кількість термоелементів n_{\min} забезпечується в режимі $Q_{0\max}$:

– охолоджувальний коефіцієнт E залишається сталим для різних режимів роботи й не залежить від геометрії галузей термоелементів:

$E = 0.25$ при $l/s = 4.5; 10; 20; 40$; в режимі $Q_{0\max}$;

$E = 0.36$ при $l/s = 4.5; 10; 20; 40$; в режимі $(Q_0/I)_{\max}$;

$E = 0.37$ при $l/s = 4.5; 10; 20; 40$; в режимі $(Q_0/I^2)_{\max}$;

$E = 0.31$ при $l/s = 4.5; 10; 20; 40$; в режимі λ_{\min} .

Максимальна величина охолоджувального коефіцієнта $E = 0.37$ забезпечується в режимі $(Q_0/I^2)_{\max}$:

– відносний робочий струм B_K і B_H залишається сталим і не залежить від геометрії галузей термоелементів;

– збільшується величина спаду напруги U (рис. 5) у середньому в $9.0 \div 9.7$ рази.

$U = 0.36$ В при $l/s = 4.5$ й $U = 3.5$ В при $l/s = 40$ для режиму $Q_{0\max}$;

$U = 0.38$ В при $l/s = 4.5$ й $U = 3.4$ В при $l/s = 40$ для режиму $(Q_0/I)_{\max}$;

$U = 0.52$ В при $l/s = 4.5$ й $U = 4.7$ В при $l/s = 40$ для режиму $(Q_0/I^2)_{\max}$;

$U = 0.74$ В при $l/s = 4.5$ й $U = 6.6$ В при $l/s = 40$ для режиму λ_{\min} .

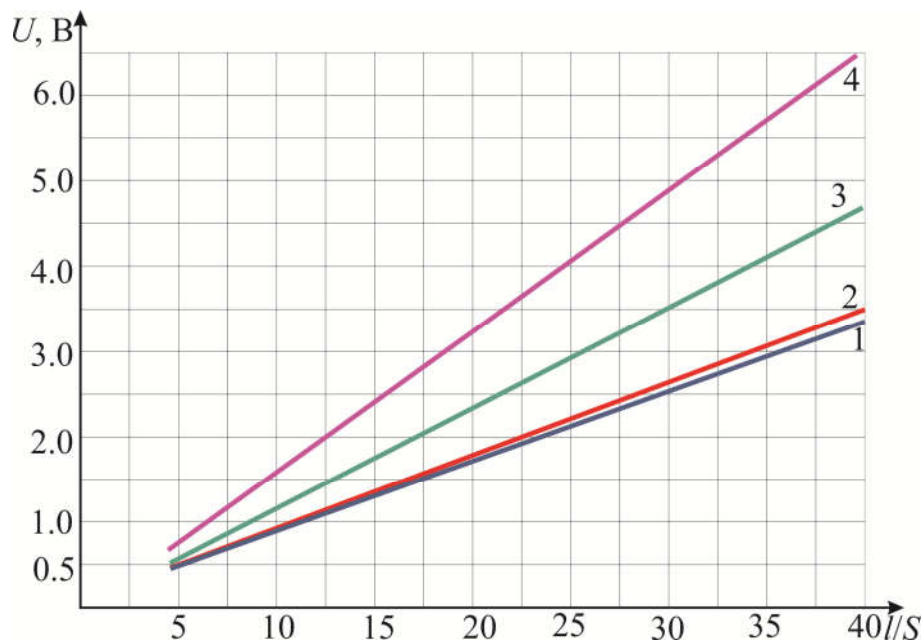


Рис. 5. Залежність падіння напруги U однокаскадного ТЕП від відношення l/s для різних режимів роботи $T = 300$ К; $\Delta T = 40$ К; $Q_0 = 1.0$ Вт від відношення l/s для режимів роботи: 1 – режим $Q_{0\max}$; 2 – режим $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – режим $(Q_0/I^2)_{\max}$; 4 – режим λ_{\min}

Максимальне падіння напруги U_{\max} забезпечується в режимі λ_{\min} :

– збільшується інтенсивність відмов λ/λ_0 (рис. 6) у середньому від 7.4 до 9.0 рази:

$\lambda/\lambda_0 = 3.15$ при $l/s = 4.5$ й $\lambda/\lambda_0 = 24.4$ при $l/s = 40$ для режиму $Q_{0\max}$;

$\lambda/\lambda_0 = 0.88$ при $l/s = 4.5$ й $\lambda/\lambda_0 = 7.9$ при $l/s = 40$ для режиму $(Q_0/I)_{\max}$;

$\lambda/\lambda_0 = 0.38$ при $l/s = 4.5$ й $\lambda/\lambda_0 = 2.82$ при $l/s = 40$ для режиму $(Q_0/I^2)_{\max}$;

$\lambda/\lambda_0 = 0.30$ при $l/s = 4.5$ й $\lambda/\lambda_0 = 2.70$ при $l/s = 40$ для режиму λ_{\min} .

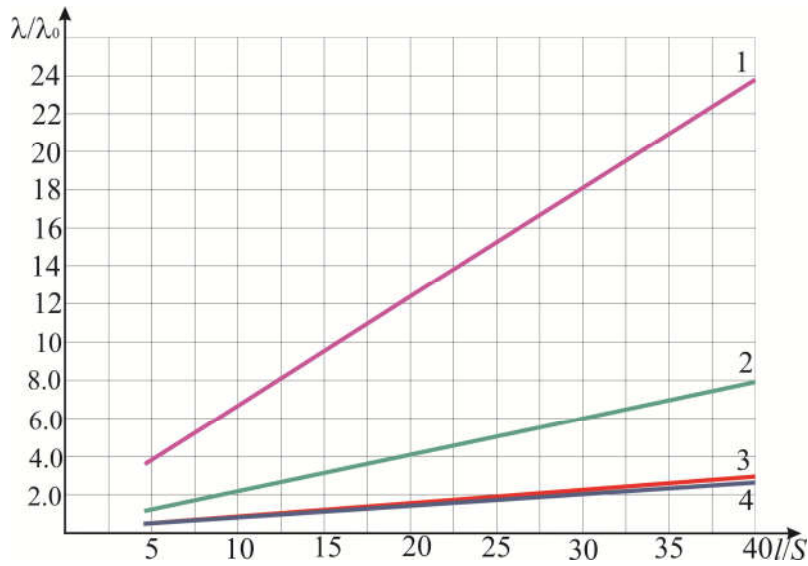


Рис. 6. Залежність інтенсивності відмов λ/λ_0 однокаскадного ТЕП від відношення l/s для різних режимів роботи $T = 300 \text{ K}$; $\Delta T = 40 \text{ K}$; $Q_0 = 1.0 \text{ Вт}$

Мінімальна інтенсивність відмов λ/λ_0 забезпечується в режимі λ_{\min} :

– зменшується ймовірність безвідмовної роботи P (рис. 7).

Максимальна ймовірність безвідмовної роботи P забезпечується в режимі λ_{\min} :

- збільшується відносна величина часу виходу на стаціонарний режим роботи $\Delta\tau/\tau = \tau_{4.5} - \tau_i/\tau_{4.5} \%$ однокаскадного ТЕП від геометрії гілок термоелементів l/s для різних режимів роботи (рис. 8).

Зі зростанням відносного робочого струму B_K зменшується час виходу на стаціонарний режим роботи τ для різної геометрії гілок термоелементів l/s (рис. 9) при $T = 300 \text{ K}$; $\Delta T = 40 \text{ K}$; $Q_0 = 1.0 \text{ Вт}$. При заданому B_K (струмовому режимі роботи) час виходу на стаціонарний режим роботи τ зменшується від $l/s = 4.5$ до $l/s = 4.0$.

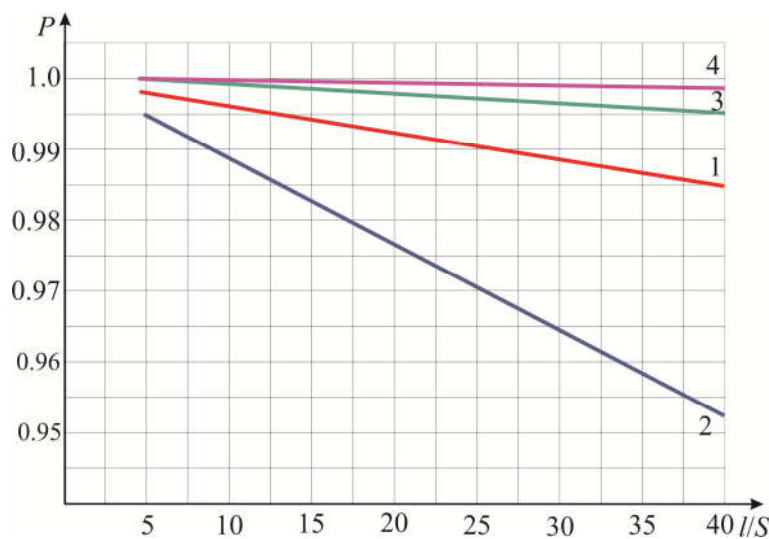


Рис. 7. Залежність ймовірності безвідмовної роботи P однокаскадного ТЕП від відношення l/s для різних режимів роботи $T = 300 \text{ K}$; $\Delta T = 40 \text{ K}$; $Q_0 = 1.0 \text{ Вт}$ $t = 10^4$ год 1 – режим $Q_{0\max}$ 2 – режим $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – режим $(Q_0^2/I)_{\max}$; 4 – режим λ_{\min}

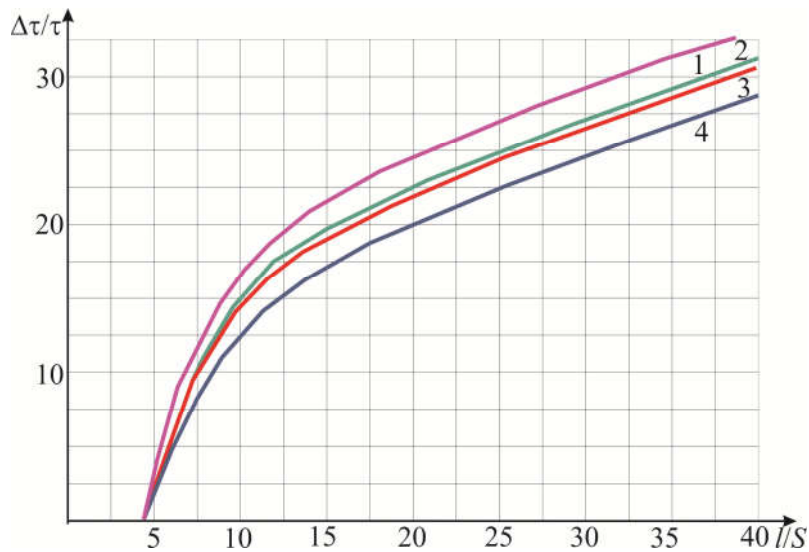


Рис. 8. Залежність відносної величини часу виходу на стаціонарний режим роботи $\Delta\tau/\tau = \tau_{4.5} - \tau_i / \tau_{4.5} \%$ однокаскадного ТЕП від геометрії гілок термоелементів l/s для різних режимів роботи $T = 300 \text{ K}$; $\Delta T = 40 \text{ K}$; $Q_0 = 1.0 \text{ Вт}$ ($i = 4.5; 10; 20; 40$); $t = 10^4 \text{ год}$ 1 – режим $Q_{0\max}$ 2 – режим $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – режим $(Q_0/I^2)_{\max}$; 4 – режим λ_{\min}

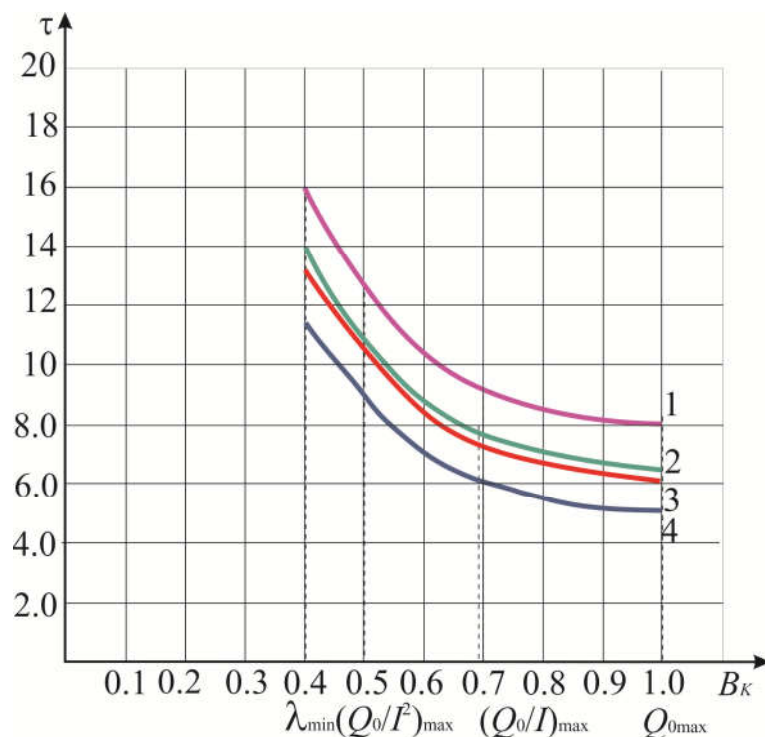


Рис. 9. Залежність часу виходу на стаціонарний режим роботи τ однокаскадного ТЕП від відносного робочого струму B_K для різної геометрії гілок термоелементів l/s при $T = 300 \text{ K}$; $\Delta T = 40 \text{ K}$; $Q_0 = 1.0 \text{ Вт}$ Режими роботи: λ_{\min} ; $(Q_0/I^2)_{\max}$; $(Q_0/I)_{\max}$; $Q_{0\max}$
 1 – $l/s = 4.5 \text{ см}^{-1}$; 2 – $l/s = 10 \text{ см}^{-1}$; 3 – $l/s = 20 \text{ см}^{-1}$; 4 – $l/s = 40 \text{ см}^{-1}$

Результати розрахунків динаміки функціонування для різних перепадів температури ΔT й різних режимів роботи наведено в таблиці 2 а, б.

Таблиця 2а

Результати розрахунків динаміки функціонування ТЕП для різних температур для струмових режимів $Q_{0\max}$ і $(Q_0/I)_{\max}$

$T = 300 \text{ K}, Q_0 = 1.0 \text{ Вт}$										
l/s	режим $Q_{0\max}$					режим $(Q_0/I)_{\max}$				
	$I, \text{ A}$	B_H	B_K	$\tau, \text{ год.}$	λ / λ_0	$I, \text{ A}$	B_H	B_K	$\tau, \text{ год.}$	λ / λ_0
$\Delta T = 10 \text{ K}, T_0 = 290 \text{ K}, \Delta T_{\max} = 100,5 \text{ K}, \theta = 0.10$										
4.5	11.9	0.988	1.0	1.36	1.58	3.80	0.31	0.316	2.9	0.02
10	5.32	0.985	1.0	1.0	3.6	1.68	0.31	0.316	2.3	0.046
20	2.67	0.99	1.0	0.96	6.9	0.85	0.31	0.316	2.2	0.088
40	1.33	0.985	1.0	0.85	13.6	0.42	0.31	0.316	1.86	0.17
$\Delta T = 20 \text{ K}, T_0 = 280 \text{ K}, \Delta T_{\max} = 93,7 \text{ K}, \theta = 0.213$										
4.5	11.6	0.97	1.0	3.0	1.86	5.45	0.447	0.46	4.7	0.105
10	5.24	0.970	1.0	2.3	4.4	2.42	0.445	0.46	3.8	0.26
20	2.62	0.97	1.0	2.2	7.8	1.21	0.45	0.46	3.65	0.47
40	1.31	0.97	1.0	1.91	15.6	0.60	0.45	0.46	3.10	0.94
$\Delta T = 30 \text{ K}, T_0 = 270 \text{ K}, \Delta T_{\max} = 86,5 \text{ K}, \theta = 0.346$										
4.5	11.5	0.96	1.0	4.9	2.33	6.90	0.565	0.588	6.7	0.4
10	5.19	0.96	1.0	4.0	5.7	3.05	0.565	0.588	5.5	0.87
20	2.59	0.959	1.0	3.8	9.7	1.52	0.56	0.59	5.3	1.52
40	1.30	0.96	1.0	3.3	19.3	0.76	0.56	0.588	4.5	3.0
$\Delta T = 40 \text{ K}, T_0 = 260 \text{ K}, \Delta T_{\max} = 79.8 \text{ K}, \theta = 0.50$										
4.5	11.1	0.93	1.0	7.8	3.15	8.0	0.656	0.707	9.2	2.888
10	5.02	0.93	1.0	6.4	8.0	3.55	0.656	0.707	7.7	2.46
20	2.51	0.93	1.0	6.0	12.3	1.78	0.66	0.707	7.4	4.0
40	1,25	0.93	1.0	5.2	24.4	0.88	0.66	0.707	6.3	7.9
$\Delta T = 50 \text{ K}, T_0 = 250 \text{ K}, \Delta T_{\max} = 73.4 \text{ K}, \theta = 0.68$										
4.5	10.9	0.91	1.0	12.2	5.16	9.1	0.75	0.825	13.1	2.5
10	4.90	0.91	1.0	10	13.6	4.0	0.75	0.825	11.0	7.2
20	2.45	0.91	1.0	9.5	19.5	2.0	0.75	0.825	10.6	10.9
40	1.22	0.91	1.0	8.3	38.6	1.0	0.75	0.825	9.2	22.2
$\Delta T = 60 \text{ K}, T_0 = 240 \text{ K}, \Delta T_{\max} = 66.8 \text{ K}, \theta = 0.90$										
4.5	10.5	0.88	1.0	22.8	19.3	10.2	0.83	0.95	22.5	15.1
10	4.74	0.88	1.0	19.0	47.8	4.5	0.83	0.95	19.1	40.4
20	2.38	0.88	1.0	18.3	69.4	2.3	0.836	0.95	18.6	67.0
40	1.18	0.88	1.0	15.3	139	1.12	0.836	0.95	15.7	135

Таблиця 26

Результати розрахунків динаміки функціонування ТЕП для різних температур для струмових режимів $(Q_0/I^2)_{\max}$ і λ_{\min} .

$T = 300 \text{ K}, Q_0 = 1.0 \text{ Вт}$										
l/s	режим $(Q_0/I^2)_{\max}$					режим λ_{\min}				
	$I, \text{ A}$	B_H	B_K	$\tau, \text{ год.}$	λ / λ_0	$I, \text{ A}$	B_H	B_K	$\tau, \text{ год.}$	λ / λ_0
$\Delta T = 10 \text{ K}, T_0 = 290 \text{ K}, \Delta T_{\max} = 100,5 \text{ K}, \theta = 0.10$										
4.5	1.20	0.098	0.10	9.9	0.00051	0.85	0.070	0.071	16.9	0.0008
10	0.53	0.098	0.10	8.2	0.0012	0.38	0.070	0.071	14.5	0.0009
20	0.27	0.098	0.10	8.0	0.0023	0.19	0.071	0.072	13.7	0.0013
40	0.133	0.98	0.10	6.8	0.0045	0.096	0.071	0.072	11.5	0.0025
$\Delta T = 20 \text{ K}, T_0 = 280 \text{ K}, \Delta T_{\max} = 93,7 \text{ K}, \theta = 0.213$										
4.5	2.5	0.206	0.213	10.6	0.010	1.9	0.155	0.16	16.5	0.0016
10	1.12	0.207	0.213	8.8	0.025	0.84	0.155	0.16	13.8	0.015
20	0.56	0.207	0.213	8.6	0.047	0.42	0.155	0.16	13.5	0.029
40	0.28	0.207	0.213	7.3	0.094	0.21	0.155	0.16	11.4	0.048
$\Delta T = 30 \text{ K}, T_0 = 270 \text{ K}, \Delta T_{\max} = 86,5 \text{ K}, \theta = 0.346$										
4.5	4.0	0.33	0.35	11.5	0.078	3.2	0.266	0.28	15.5	0.054
10	1.80	0.33	0.35	9.45	0.19	1.44	0.27	0.28	13.3	0.13
20	0.90	0.33	0.35	9.40	0.35	0.72	0.266	0.277	13.1	0.24
40	0.45	0.33	0.35	7.90	0.70	0.36	0.267	0.277	11.0	0.49
$\Delta T = 40 \text{ K}, T_0 = 260 \text{ K}, \Delta T_{\max} = 79.8 \text{ K}, \theta = 0.50$										
4.5	5.6	0.464	0.50	12.9	0.38	4.8	0.39	0.425	16.0	0.3
10	2.51	0.465	0.50	11.0	0.98	2.1	0.39	0.425	14.0	0.4
20	1.26	0.465	0.50	10.6	1.66	1.07	0.395	0.425	13.3	1.35
40	0.63	0.463	0.50	8.9	2.82	0.53	0.394	0.405	11.2	2.7
$\Delta T = 50 \text{ K}, T_0 = 250 \text{ K}, \Delta T_{\max} = 73.4 \text{ K}, \theta = 0.68$										
4.5	7.5	0.62	0.68	15.6	1.71	6.80	0.355	0.612	17.9	1.58
10	3.33	0.62	0.68	13.4	4.4	3.0	0.555	0.612	15.2	3.7
20	1.67	0.62	0.68	12.9	7.6	1.5	0.555	0.612	14.9	7.0
40	0.83	0.62	0.68	10.9	15.2	0.75	0.553	0.612	12.6	14.0
$\Delta T = 60 \text{ K}, T_0 = 240 \text{ K}, \Delta T_{\max} = 66.8 \text{ K}, \theta = 0.90$										
4.5	9.6	0.79	0.90	23.4	15.9	9.30	0.766	0.87	24.2	16.6
10	4.3	0.79	0.90	20.4	35.0	4.1	0.76	0.87	21.0	34.6
20	2.14	0.79	0.90	19.4	70.0	2.07	0.77	0.87	20.2	75.6
40	1.07	0.79	0.90	16.4	140.0	1.0	0.77	0.87	17.0	162

Слід зазначити, що з ростом перепаду температури ΔT для різної геометрії гілок термоелементів l/s і режимів роботи:

– збільшується час виходу на стаціонарний режим τ для режиму $Q_{0\max}$ (рис. 10).

Так за заданого перепаду температури ΔT , наприклад, $\Delta T = 40 \text{ K}$ час виходу на стаціонарний режим роботи τ зменшується від $\tau = 7.8 \text{ год.}$ для $l/s = 4.5$ до $\tau = 5.2 \text{ год.}$ для $l/s = 40$ тобто на 33 %:

– збільшується час виходу на стаціонарний режим роботи τ для режиму $(Q_0/I)_{\max}$ (рис. 11).

Так при заданому перепаді температури ΔT , наприклад, $\Delta T = 40$ К час виходу на стаціонарний режим роботи τ зменшується від $\tau = 9.2$ год. для $l/s = 4.5$ до $\tau = 6.3$ год. для $l/s = 40$ тобто на 31.5%:

– збільшується час виходу на стаціонарний режим роботи τ для режиму $(Q_0/I^2)_{\max}$ (рис. 12).

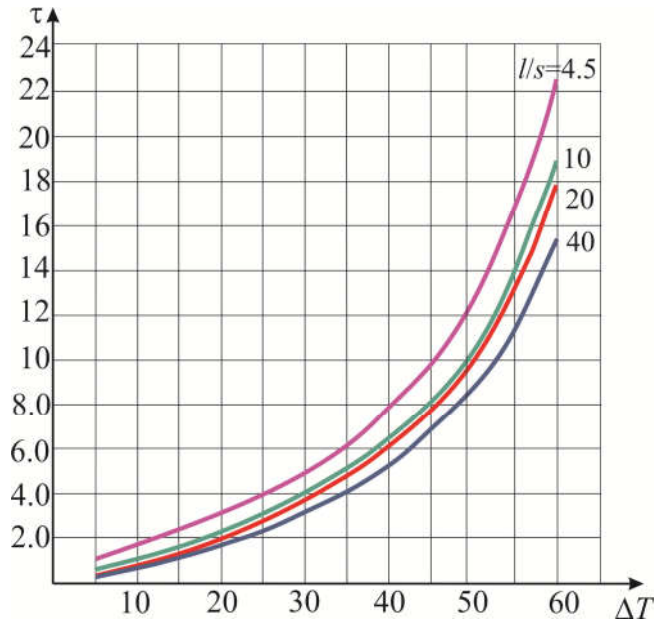


Рис. 10. Залежність часу виходу на стаціонарний режим роботи τ однокаскадного ТЕП від перепаду температури ΔT для різної геометрії гілок термоелементів l/s у режимі $Q_{0\max}$ при $T = 300$ К

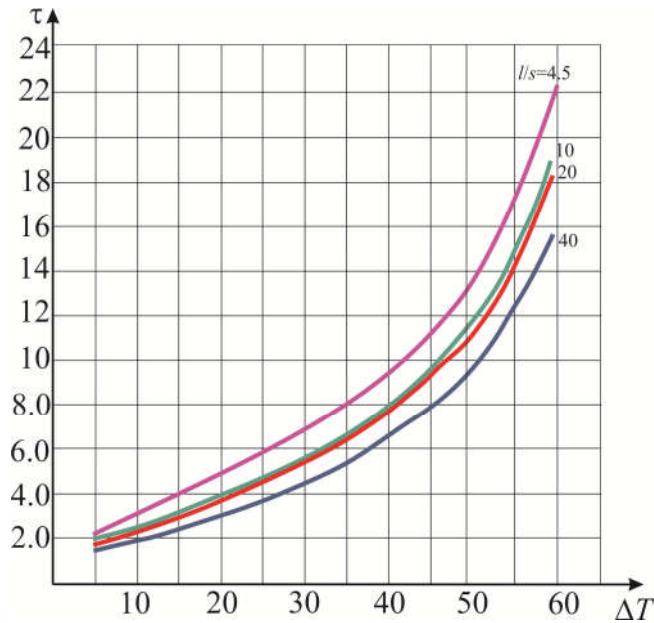


Рис. 11. Залежність часу виходу на стаціонарний режим роботи τ однокаскадного ТЕП від перепаду температури ΔT для різної геометрії гілок термоелементів l/s у режимі $(Q_0/I)_{\max}$ при $T = 300$ К $Q_0 = 1.0$ Вт

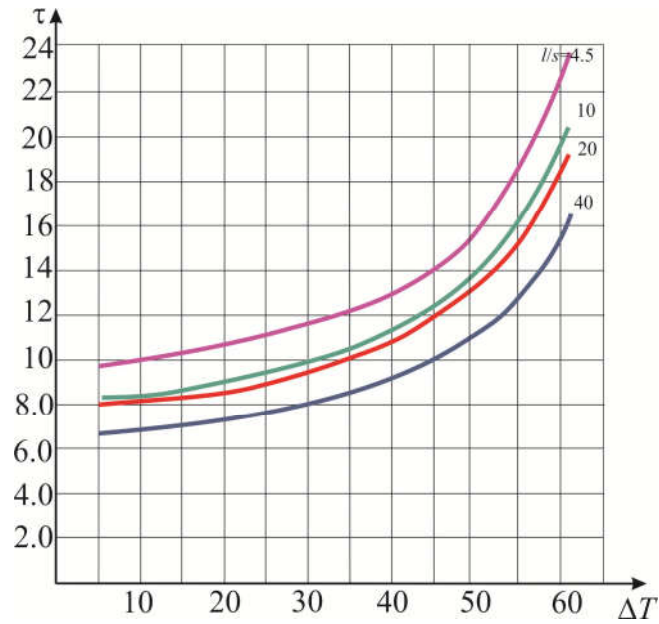


Рис. 12. Залежність часу виходу на стаціонарний режим роботи τ однокаскадного ТЕП від перепаду температури ΔT для різної геометрії гілок термоелементів l/s у режимі $(Q_0/P)_{max}$ при $T = 300 \text{ K}$ $Q_0 = 1.0 \text{ Вт}$

Так за заданого перепаду температури ΔT , наприклад, $\Delta T = 40 \text{ K}$ час виходу на стаціонарний режим роботи τ зменшується від $\tau = 12.9$ год. для $l/s = 4.5$ до $\tau = 8.9$ год. $l/s = 40$ тобто на 31.0%.

– функціональна залежність $\tau = f(\Delta T)$ має пологий мінімум при $\Delta T = 30 \text{ K}$ (рис. 13) для режиму λ_{min} .

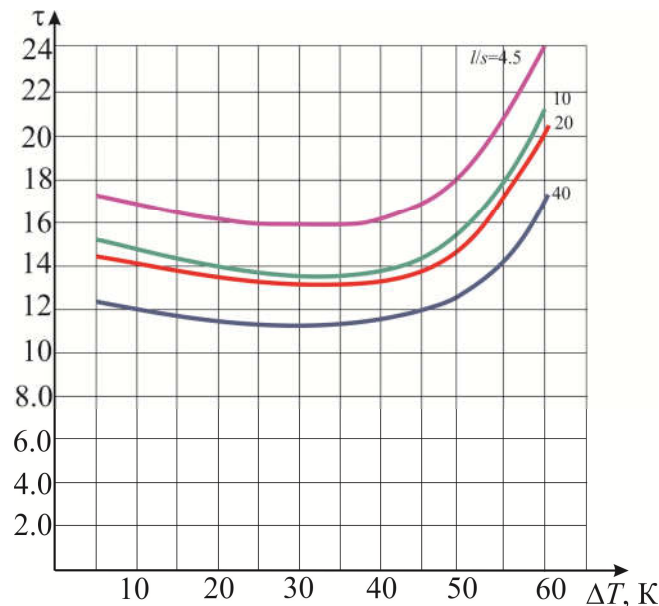


Рис. 13. Залежність часу виходу на стаціонарний режим роботи τ однокаскадного ТЕП від перепаду температури ΔT для різної геометрії гілок термоелементів l/s у режимі λ_{min} при $T = 300 \text{ K}$ $Q_0 = 1.0 \text{ Вт}$

Так при заданому перепаді температури ΔT , наприклад, $\Delta T = 40 \text{ K}$ час виходу на стаціонар-

ний режим роботи τ зменшується від $\tau = 16$ год. для $l/s = 4.5$ до $\tau = 11.2$ год. $l/s = 40$ тобто на 30%.

Обговорення результатів аналізу динаміки функціонування однокаскадного термоелектричного охолоджувального обладнання з різною геометрією галузей термоелементів

Час виходу на стаціонарний режим роботи τ однокаскадного термоелектричного охолоджувального обладнання при заданому перепаді температури ΔT й тепловому навантаженню Q_0 залежить від геометрії гілок термоелементів (відношення l/s) для різних режимів роботи.

З ростом відношення l/s від $l/s = 4.5$ до $l/s = 40$ для різних режимів роботи:

- зменшується час виходу на стаціонарний режим роботи τ в середньому на 30 – 33%;
- мінімальний час виходу на стаціонарний режим роботи τ_{min} забезпечується в режимі Q_{0max} ;
- зменшується величина робочого струму I до 9 разів;
- збільшується кількість термоелементів n до 9 разів;
- мінімальна кількість термоелементів n_{min} забезпечується в режимі Q_{0max} ;
- холодильний коефіцієнт E залишається сталим і не залежить від геометрії гілок термоелементів;
- найбільший холодильний коефіцієнт E забезпечується в режимі $(Q_0/I^2)_{max}$;
- збільшується спад напруги U до 9 разів;
- максимальне спадання напруги U_{max} забезпечується в режимі λ_{min} ;
- збільшується інтенсивність відмов λ/λ_0 ;
- мінімальна інтенсивність відмов λ/λ_0 забезпечується в режимі λ_{min} ;
- зменшується ймовірність безвідмовної роботи P ;
- максимальна ймовірність безвідмовної роботи P_{max} забезпечується в режимі λ_{min} ;
- з ростом перепаду температури ΔT час виходу на стаціонарний режим роботи τ збільшується для різних режимів роботи.

Порівняльний аналіз основних параметрів, показників надійності й динамічних характеристик дає можливість вибору компромісних розв'язків при побудові ТЕП з урахуванням вагомості кожного з обмежувальних вимог.

Висновки

1. Зміною геометрії галузей термоелементів у діапазоні уніфікації для широкого використання при проектуванні термоелектричних охолоджувальних обладнань можливе зменшення динамічних характеристик до 30% без зміни технології їх виготовлення.
2. Показаний взаємозв'язок динамічних характеристик термоелектричних охолоджувачів з показниками надійності, що дозволяє варіацією геометрії термоелементів і струмових режимів роботи вибирати охолоджувачі, що забезпечують обґрунтований компроміс при проектуванні термоелектричних систем забезпечення теплових режимів теплонавантаженої радіоелектронної апаратури.

Література

1. Анатичук Л.І., Термоелементи й термоелектричні обладнання: Довідник / Л.І. Анатичук // К.: Наукова думка, 1979. - 768 с.

2. Zebarjadi, M. Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device applications / M. Zebarjadi, K. Esfarjani, M. S. Dresselhaus, Z. F. Ren, G. Chen // *Energy & Environmental Science*, № 5, 2012. – P. 5147–5162.
3. Hyoung–Seuk, Choi. Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and Physics –of –failure / Choi Hyoung–Seuk // *Electronic Materials Letter*, 7, 2011. – P. 271.
4. Царьов, А.В. Дослідження характеристик термоелектричних обладнань для систем термостативування стартових комплексів / А.В. Царьов, В.В. Чавунців // *Актуальні проблеми російської космонавтики: Матеріали XXXII академічних читань по космонавтиці* – М.: Комісія РАН, 2008. - С. 320-321.
5. Ping, Yang. Approach on thermoelectricity reliability of board –level backplane based on the orthogonal experiment design / Ping Yang // *International Journal of Materials and Structural Integrity*, 4(2–4), 2010. – Ping 70–185.
6. Wereszczak, A. A. Thermoelectric Mechanical Reliability / A. A. Wereszczak, H. Wang // *Vehicle Technologies Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting*. – Arlington, 11 May 2011. – P. 18.
7. Rowe, D. M. Thermoelectrics and its Energy Harvesting. Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics/ D. M. Rowe // Boca Raton: CRC Press, 2012. – 544 p.
8. Zaykov, V. Analysis of the model of interdependence of thermoelement branch geometry and reliability indicators of the single-stage cooler / V. Zaykov, V. Mescheryakov, Yu. Zhuravlov // *Eastern –European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, 1/1 (85), P. 26-33.
9. Зайков, В.П. Модель взаємозв'язку показників надійності однокаскадного охолоджувача з геометрією галузей термоелементів / В.П. Зайков, В.І. Мещеряков, Ю.І. Журавльов // *Термоелектрика*, № 6. -2017. - С. 59 –76.
10. Zaykov, V. Analysis of the possibility to control the inertia of the thermoelectric cooler / V. Zaykov, V. Mescheryakov, Yu. Zhuravlov // *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, 6/8 (90), P.17-24.
11. Zaykov, V. Analysis of relationship between of a thermoelectric cooler and its design and mode of operation / V. Zaykov, V. Mescheryakov, Yu. Zhuravlov // *Eastern –European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, 1/8 (91), P.12-24.
12. Зайков, В. П. Прогнозування показників надійності термоелектричних охолоджувальних обладнань. Книга 1. Однокаскадні обладнання / В.П. Зайков, Л.А. Киншова, В.Ф. Моисеев // *Одеса: Политехперіодика*, 2009 р. – 120 с.

Надійшла до редакції 12.03.2018

Зайков В.П. канд. техн. наук.¹,
Мещеряков В.И. доктор техн. наук.²,
Гнатовська А.А.²
Журавлев Ю.И.³ канд. техн. наук.

¹Научно-исследовательский институт ШТОРМ,
ул. Терешковой, 27, Одесса, Украина; e-mail: grand@i.ua;

²Одесский государственный экологический университет,
ул. Львовская, 15, Одесса, Украина; e-mail: grand@ua.fm;

³Национальный университет «Одесская морская академия»,
ул. Дидрихсона, 8, Одесса, Украина; e-mail: zhuravlov.y@ua.ru.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОДНОКАСКАДНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ВЕТВЕЙ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ

Проведен сравнительный анализ динамики функционирования однокаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства при вариации геометрии ветвей термоэлементов с учетом влияния конструктивных и технологических элементов для различных характерных токовых режимов работы, перепадов температуры и тепловой нагрузки. Показано, что с ростом отношения высоты к площади сечения ветви термоэлемента уменьшается время выхода на стационарный режим работы, величины рабочего тока, увеличивается падение напряжения при постоянном энергопотреблении для различных режимов работы. С ростом перепада температуры увеличивается время выхода на стационарный режим работы для различных режимов работы. Библи. 12, рис. 13, Табл. 2.

Ключевые слова: термоэлектрический охладитель, геометрия ветвей термоэлементов, показатели надежности, время выхода на режим, перепад температур.

V.P.Zaykov¹, *Candidate of Tech. science,*
V.I.Mescheryakov², *Doctor of Tech. science,*
Gnatovskaya A.A.²
Yu. I. Zhuravlov³, *Candidate of Tech. science*

¹SHTORM Research Institute, 27, Tereshkova str.,
Odesa, Ukraine; e-mail: grand@i.ua;

²Odesa State Ecological University, 15, Lvivska
str., Ukraine; e-mail: grand@ua.fm;

³National University "Odesa Maritime Academy", 8,
Didrikhson str., Ukraine; e-mail: zhuravlov.y@ua.ru.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF OPERATION OF A SINGLE-STAGE THERMOELECTRIC COOLING DEVICE WITH DIFFERENT GEOMETRY OF THERMOELEMENT LEGS

A comparative analysis was carried out of the dynamics of operation of a single-stage thermoelectric cooling device with a variation in the geometry of thermoelement legs taking into account the influence of structural and technological elements for different characteristic current operating modes, temperature drops and thermal load. It is shown that as the aspect ratio of thermoelement leg increases, the time to reach the steady-state operating mode and the magnitude of the operating current decrease, the voltage drop with constant energy consumption for various operating modes increases. As the temperature drop grows, the time to reach the steady-state operating mode for different operating modes increases. Bibl. 12, Fig. 13, table 2.

Key words: thermoelectric cooler, geometry of thermoelement legs, reliability indicators, time to reach the mode, temperature drop.

References

1. Anatyshuk L.I. (1979). *Termoelementy I termoelektric heskiiustroistva. Spravochnik [Thermoelements and thermoelectric devices. Handbook]*. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian].
2. Zebarjadi M., Esfarjani K., Dresselhaus M.S., Ren Z.F., Chen G. (2012). Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device applications. *Energy & Environmental Science*, 5, 5147–5162.
3. Hyoung–Seuk Choi. (2011). Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and Physics –of –failure. *Electronic Materials Letters*, 7, 271.
4. Tsarev A.V., Chugunkov V.V. (2008). Issledovaniie k harakteristik termoelektricheskikh ustroistv dlia system termostatirovaniia startovykh kompleksov [Research on characteristics of thermoelectric devices for thermostating systems of start complexes]. *Aktualnyie problem rossiiskoi kosmonautiki. Materialy XXXII akademicheskikh chtenii po kosmonautike [Current Problems of Russian Cosmonautics: Proc. of XXXII Academic Readings on Cosmonautics]*. (pp.320-321). M: Commission of the Russian Academy of Sciences [in Russian].
5. Yang Ping (2010). Approach on thermoelectricity reliability of board –level backplane based on the orthogonal experiment design. *International Journal of Materials and Structural Integrity*, 4(2–4), 170–185.
6. Wereszczak A. A., Wang H. (2011). Thermoelectric mechanical reliability. *Vehicle Technologies Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting (USA, Arlington, 11 May 2011)* (P. 18).
7. Rowe, D. M. (2012). Thermoelectrics and its Energy Harvesting. Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics. (Boca Raton: CRC Press, 2012) (544 p).
8. Zaikov V., Meshcheriakov V., Zhuravlev Yu. (2017). Analysis of the model of interdependence of thermoelement branch geometry and reliability indicators of the single–stage cooler. *Eastern – European Journal of Enterprise Technologies*, 1/1 (85), 26–33.
9. Zaikov, V., Meshcheriakov V., Zhuravlev Yu. (2017). Model of interrelation between indicators of a single-stage cooler and the geometry of thermoelement legs. *J. Thermoelectricity*, 6, 59 –76.
10. Zaikov, V., Meshcheriakov V., Zhuravlev Yu. (2017). Analysis of the possibility to control the inertia of the thermoelectric cooler. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*, 6/8 (90), 17–24.
11. Zaikov, V., Meshcheriakov V., Zhuravlev (2018). Analysis of relationship between of a thermoelectric cooler and its design and mode of operation. *Eastern –European Journal of Enterprise Technologies*, 1/8 (91), 12–24.
12. Zaikov V.P., Kinshova L.A., Moiseev V.F. (2009). *Prognozirovaniie pokazatelei nadezhnosti termoelektricheskikh okhlazhdaiushchikh ustroistv. Kniga 1. Odnokaskadnyie ustroistva. [Prediction of reliability indicators of thermoelectric cooling devices. Book 1. Single-stage devices]*. Odessa: Politekhperiodika [in Russian].

Submitted 12.03.2018