

УДК 621.362.192

Зайков В.П. канд. техн. наук.¹,
Мещеряков В.І. доктор техн. наук.²,
Журавльов Ю.І. канд. техн. наук.³

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.*

МОДЕЛЬ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ОДНОКАСКАДНОГО ОХОЛОДЖУВАЧА З ГЕОМЕТРІЄЮ ГЛЮК ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ

Роботу присвячено підвищенню показників надійності однокаскадного термоелектричного охолоджувача конструктивним методом шляхом розробки та аналізу надійнісно-орієнтованої моделі, що зв'язує показники надійності з геометрією термоелементів. Дослідження проведено для різних перепадів температури, фіксованого теплового навантаження для різних режимів роботи. Показано, що зі зменшенням відношення висоти термоелемента до перерізу збільшується максимальна потужність охолодження, зменшується кількість термоелементів і підвищується ймовірність безвідмовної роботи. При цьому не змінюється існуюча технологія виготовлення охолоджувачів, зберігаються результати існуючих механічних і кліматичних випробувань, матеріал термоелементів, вартість модулів. Бібл. 12, Рис. 11, Табл. 3.

Ключові слова: термоелектричний охолоджувач, геометрія термоелементів, показники надійності, потужність охолодження, перепад температур.

Вступ

Надійність належить до найважливіших показників засобів забезпечення теплових режимів теплонавантаженої радіоелектронної апаратури [1]. За масогабаритними показниками, швидкодією, кліматичними та механічними умовами експлуатації термоелектричні пристрої (ТЕП) мають незаперечну перевагу перед компресійними охолоджувачами [2]. Математичне моделювання показників надійності ТЕП на всіх етапах життєвого циклу стало обов'язковою умовою створення бортової апаратури, вимоги до функціонування якої постійно зростають [3]. Розробка та аналіз моделей дозволяє врахувати вплив технології виготовлення [4], вологи [5], механічних [6] та кліматичних [7] факторів, теплового навантаження [8], матеріалів термоелементів [9] на показники надійності, оскільки саме на стадії моделювання закладається потенціал зниження ступеня їх впливу [10]. Разом з тим, у літературі недостатньо висвітлено питання впливу конструктивної складової на показники експлуатаційної надійності термоелектричних пристроїв. При проектуванні термоелектричних охолоджувальних пристроїв застосовується декілька підходів:

1. Задано геометрію гілок термоелементів $l/s = \text{const}$, де l – висота, s – площа поперечного перерізу гілки термоелемента. У цьому випадку, варіюючи величиною робочого струму I , можна забезпечити функціонування ТЕП в різних режимах роботи від $Q_{0\text{max}}$ до $Q_0 = 0$ і тим самим підвищити надійність [11].

2. У той же час у термоелектричному приладобудуванні застосовуються різні конструкції уніфікованих модулів з різною геометрією гілок термоелементів $l/s = \text{var}$, і перед розробником виникає питання про вибір геометрії гілок термоелементів у ТЕП для різних умов функціонування, що дозволяє підвищити показники надійності. Раціональний вибір геометрії гілок термоелементів з урахуванням всіх обмежувальних вимог є досить актуальним завданням.

Метою роботи є розробка математичної моделі термоелектричного охолоджувача, що зв'язує показники надійності з геометрією гілок термоелементів, аналіз якої дозволяє оптимізувати показники надійності при різних перепадах температур і режимах функціонування.

Розробка й аналіз моделі взаємозв'язку показників надійності, конструктивних і енергетичних параметрів у режимах λ_{min} , ΔT_{max} і теплового насоса ($\Delta T = 0$ К).

Розглянемо вплив геометрії гілок термоелементів на основні параметри й показники надійності однокаскадного ТЕП для різних перепадів температури ΔT від 0 К до 60 К.

Як відомо, холодопродуктивність ТЕП Q_0 можна записати у вигляді виразу

$$Q_0 = nI_{\text{max}}^2 R(2B - B^2 - \Theta) = n\gamma(2B - B^2 - \Theta), \quad (1)$$

де n – кількість термоелементів, шт.;

I_{max} – максимальний робочий струм, $I_{\text{max}} = \bar{e}T_0/R$, А;

R – електричний опір гілок термоелемента, $R = l/\bar{\sigma}s$, Ом;

\bar{e} , $\bar{\sigma}$ – відповідно, усереднений коефіцієнт термоЕРС, В/К, та електропровідність гілок термоелемента, См/см;

T_0 – температура теплопоглинаючого спаю, К;

B – відносний робочий струм $B = I/I_{\text{max}}$ у відносних одиницях;

I – величина робочого струму, А;

Θ – відносний перепад температури, $\Theta = \Delta T/\Delta T_{\text{max}} = (T - T_0)/\Delta T_{\text{max}}$ у відносних одиницях;

T – температура тепловиділяючого спаю, К;

ΔT_{max} – максимальний перепад температури, $\Delta T_{\text{max}} = 0,5\bar{z}T_0^2$, К;

\bar{z} – усереднена термоелектрична ефективність гілок термоелемента, K^{-1}

γ – максимальна термоелектрична потужність охолодження, $\gamma = I_{\text{max}}^2 R = \bar{e}^2 \bar{\sigma} T_0^2 s/l$, Вт.

Потужність споживання ТЕП можна записати у вигляді:

$$W = 2n\gamma B(B + (\Delta T_{\text{max}}/T_0)\Theta) \quad (2)$$

Охолоджувальний коефіцієнт E визначається виразом

$$E = Q_0/W = (2B - B^2 - \Theta)/2B(B + (\Delta T_{\text{max}}/T_0)\Theta) \quad (3)$$

Відносну величину інтенсивності відмов λ / λ_0 [12] можна подати у вигляді:

$$\lambda / \lambda_0 = \frac{nB^2 (\Theta + C) (B + (\Delta T_{\max} / T_0) \Theta)^2}{(1 + (\Delta T_{\max} / T_0) \Theta)^2} K_T \quad (4)$$

де λ_0 – номінальна інтенсивність відмов, год⁻¹,

C – відносна величина теплового навантаження, $C = Q_0 / (nI_{\max}^2 R) = Q_0 / n\gamma$;

K_T – коефіцієнт значущості, що залежить від температури.

Імовірність безвідмовної роботи ТЕП можна визначити за відомою формулою

$$P = \exp(-\lambda t) \quad (5)$$

де t – призначений ресурс, год.

Режим λ_{\min}

У табл. 1 наведено результати розрахунків основних параметрів і показників надійності однокаскадного ТЕП для різних відношень l/s у режимі $\lambda_{\min} (B = \eta\Theta)$ за наступних вихідних даних:

- теплове навантаження $Q_0 = 2,0$ Вт;
- температура тепловиділяючого спая $T = 300$ К;
- перепад температури $\Delta T = 0$ К, 20 К, 40 К, 60 К;
- усереднена термоелектрична ефективність $\bar{z}_M = 2,4 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹;
- $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ год⁻¹; $t = 10^4$ год.

За однакового теплового навантаження Q_0 та перепаду температури ΔT для різної геометрії гілок термоелемента ($l/s = \text{var}$) величина $n\gamma = \text{const}$.

Таблиця 1

Результати розрахунків основних параметрів і показників надійності однокаскадного ТЕП для різних перепадів температури ΔT і геометрій гілок термоелементів (l/s) при $T = 300$ К, $Q_0 = 2.0$ Вт, $\bar{z} = 2.4 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹; $l = 4$ мм у режимі λ_{\min}

l/s , см ⁻¹	γ , Вт	n , шт.	$R, 10^{-3}$ Ом	I_{\max} , А	I , А	U , В	λ/λ_0	$\lambda, 10^{-8}$, 1/год	P	$S = (a \times b)$, мм
$\Delta T = 10$ К										
$\Theta = 0.10$; $B = 0.071$; $\Delta T_{\max} = 100.9$ К; $\Delta T_{\max} / T_0 = 0.35$; $W = 0.81$ Вт; $E = 2.46$; $K_T = 1.007$; $\bar{z} = 2.4 \cdot 10^{-3}$ К ⁻¹										
40.0	0.0762	709.4	44.4	1.31	0.093	8.83	0.0052	0.0155	0.99999845	1.0×1.0
20.0	0.162	335.5	22.2	2.70	0.192	4.23	0.00245	0.00735	0.99999926	1.5×1.5
10.0	0.324	167.0	11.1	5.40	0.383	2.12	0.00122	0.00366	0.99999963	2.1×2.1
4.5	0.720	75.1	5.0	12.0	0.852	0.953	0.00055	0.00164	0.99999984	3.1×3.1
3.25	0.997	54.3	3.61	16.6	1.18	0.69	0.00040	0.00119	0.99999988	3.6×3.6
2.0	1.62	33.4	2.22	27.0	1.92	0.423	0.000243	0.00073	0.99999993	4.6×4.6
1.0	3.24	16.7	1.11	54.0	5.0	0.212	0.000122	0.000365	0.999999964	6.5×6.5
$\Delta T = 20$ К										
$\Theta = 0.214$; $B = 0.146$; $\Delta T_{\max} = 93.3$ К; $\Delta T_{\max} / T_0 = 0.33$; $W = 2.23$ Вт; $E = 0.90$; $K_T = 1.01$; $\bar{z} = 2.38 \cdot 10^{-3}$ К ⁻¹										

Продовження таблиці 1

40.0	0.071	499.4	42.6	1.29	0.19	11.7	0.1179	0.354	0.999965	1.0×1.0
20.0	0.143	246.7	21.3	2.60	0.38	5.90	0.059	0.177	0.999982	1.4×1.4
10.0	0.286	123.3	10.64	5.2	0.76	2.90	0.030	0.089	0.9999911	2.0×2.0
4.5	0.676	52.2	4.79	11.5	1.70	1.33	0.0125	0.038	0.9999963	3.1×3.1
3.25	0.880	40.0	3.46	15.9	2.30	0.96	0.0096	0.029	0.9999971	3.5×3.5
2.0	1.43	24.7	2.13	25.9	3.80	0.60	0.0059	0.018	0.9999982	4.5×4.5
1.0	2.86	12.3	1.06	52.0	9.9	0.30	0.0030	0.0089	0.99999911	6.3×6.3
ΔT = 40 К										
Θ = 0.5; B = 0.40; ΔT _{max} = 79.8 К; ΔT _{max} /T ₀ = 0.31; W = 6.34 Вт; E = 0.315; K _T = 1.022; z̄ = 2.37·10 ⁻³ К ⁻¹										
40.0	0.0625	228.6	40.8	1.24	0.494	12.8	5.52	16.56	0.99835	1.0×1.0
20.0	0.125	114.3	20.4	2.47	1.0	6.40	2.76	8.30	0.99917	1.4×1.4
10.0	0.249	57.4	10.2	4.95	2.0	3.20	1.39	4.20	0.99958	2.0×2.0
4.5	0.554	25.8	4.59	11.0	4.4	1.44	0.625	1.87	0.99981	3.0×3.0
3.25	0.767	18.6	3.32	15.2	6.1	1.04	0.45	1.35	0.999865	3.5×3.5
2.0	1.246	11.5	2.04	2.47	10.0	0.64	0.28	0.84	0.999917	4.5×4.5
1.0	2.49	5.70	1.02	49.5	19.8	0.32	0.14	0.42	0.999958	6.3×6.3
ΔT = 60 К										
Θ = 0.9; B = 0.855; ΔT _{max} = 66.8 К; ΔT _{max} /T ₀ = 0.28; W = 47.9 Вт; E = 0.042; K _T = 1.035; z̄ = 2.32·10 ⁻³ К ⁻¹										
40.0	0.053	477.8	38.8	1.17	1.0	47.9	276.6	830	0.9204	1.0×1.0
20.0	0.106	238.8	19.4	2.34	2.0	24.0	138.3	414.8	0.9594	1,4×1,4
20.0	0.106	238.8	19.4	2.34	2.0	24.0	138.3	414.8	0.9594	1.4×1.4
10.0	0.212	119.4	9.71	4.67	4.0	12.0	69.15	207.5	0.9795	2.0×2.0
4.5	0.471	53.8	4.37	10.4	8.90	5.40	31.1	93.3	0.99071	3.0×3.0
3.25	0.625	38.8	3.16	14.3	12.3	3.90	22.4	67.3	0.9933	3.5×3.5
2.0	1.06	23.9	1.94	23.4	20.0	2.40	13.8	41.4	0.9959	4.5×4.5
1.0	2.12	11.9	0.97	46.8	40.0	1.20	6.9	20.6	0.9979	6.3×6.3

Аналіз розрахункових значень основних параметрів і показників надійності показав, що зі зменшенням відношення l/s за заданого перепаду температури ΔT та теплового навантаження Q_0 в режимі λ_{\min} :

- збільшується величина робочого струму I (рис. 1а);
- збільшується максимальна потужність охолодження γ (рис. 1а);
- зменшується спад напруги U (рис. 1, б);
- зменшується інтенсивність відмов λ і збільшується ймовірність безвідмовної роботи P (рис. 2).

Зі зростанням перепаду температури ΔT для різних значень l/s у режимі λ_{\min} :

- зменшується максимальна термоелектрична потужність охолодження γ ;
- збільшується величина робочого струму I (рис. 3а);
- функціональна залежність кількості термоелементів n у ТЕП від перепаду температури ΔT має мінімум для різних значень відношення l/s (рис. 3б), що можна пояснити зростанням

холодопродуктивності у розрахунку на один термоелемент Q_0/n при ΔT_{opt} в точці мінімуму;

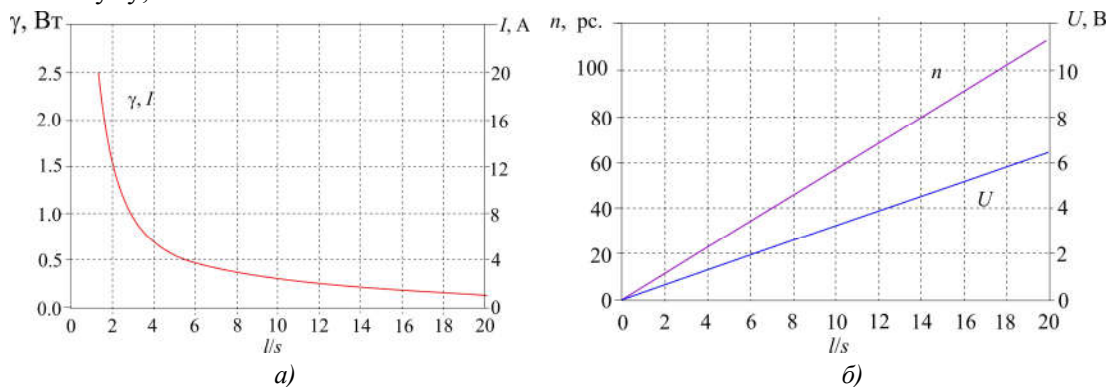


Рис. 1. Залежність параметрів γ , I (а) та n , U (б) однокаскадного ТЕП від значення відношення l/s при $T = 300\text{ K}$, $\Delta T = 40\text{ K}$ і $Q_0 = 2,0\text{ Вт}$ у режимі λ_{min}

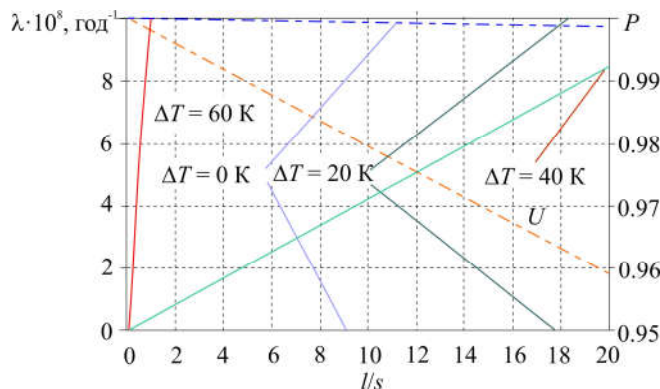


Рис. 2. Залежність інтенсивності відмов λ (суцільні лінії) та ймовірності безвідмовної роботи P (пунктирні лінії) однокаскадного ТЕП від значення відношення l/s при $T = 300\text{ K}$, $Q_0 = 2,0\text{ Вт}$, $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}\text{ год}^{-1}$, $t = 10^4\text{ год}$ і різних значеннях ΔT у режимі λ_{min}

– збільшується інтенсивність відмов λ/λ_0 і зменшується ймовірність безвідмовної роботи P (рис. 4).

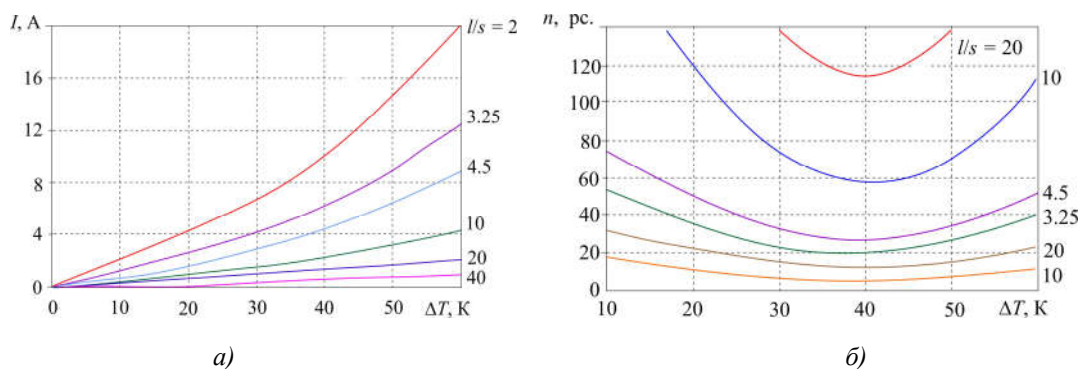


Рис. 3. Залежність робочого струму I (а) і кількості термоелементів n (б) однокаскадного ТЕП від перепаду температури Δt при $T = 300\text{ K}$, $Q_0 = 2,0\text{ Вт}$ і різних значеннях відношення l/s у режимі λ_{min} .

Слід зазначити, що зі зменшенням відношення l/s збільшується робочий струм I (рис. 5).

Для режиму λ_{\min} за $\Delta T = 40$ К та $Q_0 = 2.0$ Вт зменшення відношення l/s від 20 К до 10 К зволяє знизити інтенсивність відмов удвічі (з $8.3 \cdot 10^{-8}$ до $4.2 \cdot 10^{-8}$ год $^{-1}$), а, отже, збільшити ймовірність безвідмовної роботи P . При цьому кількість термоелементів n зменшується в 2 рази, робочий струм I збільшується від 1 до 2 А, а потужність споживання та охолоджувальний коефіцієнт не змінюються ($W = 6.34$ Вт, $E = 0.315$).

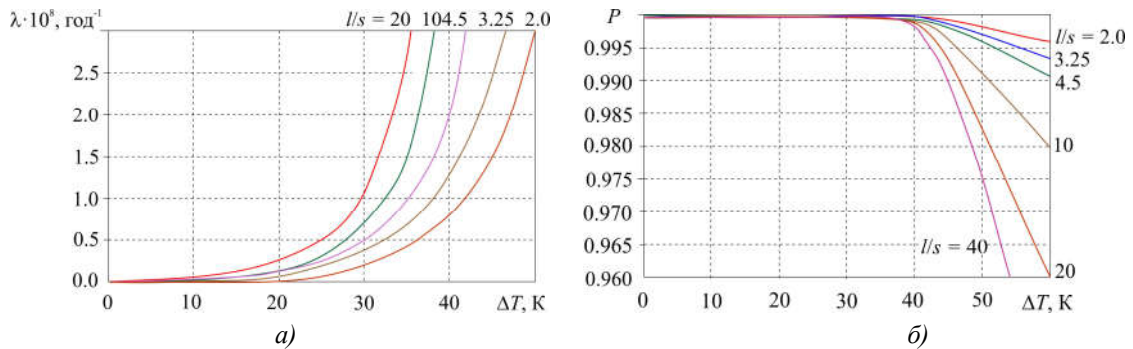


Рис. 4. Залежність інтенсивності відмов λ (а) та ймовірності безвідмовної роботи P (б) однокаскадного ТЕП від перепаду температури ΔT за $T = 300$ К, $Q_0 = 2,0$ Вт, $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ год $^{-1}$, $t = 10^4$ год та різних значеннях відношення l/s у режимі λ_{\min}

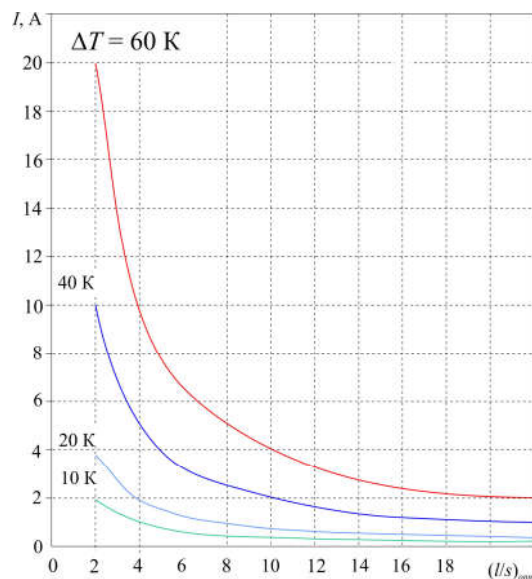


Рис. 5. Залежність робочого струму I від оптимального відношення $(l/s)_{\text{opt}}$ однокаскадного ТЕП за $T = 300$ К, $Q_0 = 2.0$ Вт та різних значеннях ΔT у режимі λ_{\min}

Режим $\Delta T_{\max}(Q_0 = 0)$. Розглянемо однокаскадний ТЕП та визначимо оптимальну геометрію гілок термоелементів, що забезпечує максимальний перепад температури ΔT_{\max} .

Для цього скористаємося відомими співвідношеннями [12].

Холодопродуктивність Q_0 охолоджувального термоелемента можна записати так:

$$Q_0 = 2n \left[\bar{\alpha} T_0 - \frac{1}{2} \frac{I^2 (l/s)}{\bar{\sigma}} - \frac{\bar{\chi}}{(l/s)} (T - T_0) \right] \quad (6)$$

де \bar{e} , $\bar{\sigma}$, $\bar{\chi}$ – усереднені значення, відповідно, коефіцієнта термоЕРС, В/К, електропровідності, См/см та коефіцієнта теплопровідності гілки термоелемента, Вт/(см·К).

Тоді залежність температури теплопоглинального спаю T_0 від геометрії гілок термоелементів за заданої величини робочого струму I можна подати у вигляді:

$$T_0 = \frac{I^2 (l/s)^2 + 2\bar{\chi}\bar{\sigma}T + (Q_0\bar{\sigma}l/ns)}{2\bar{\sigma}[\bar{\chi}^2 + \bar{e}I(l/s)]} \quad (7)$$

З умови $dT_0/d(l/s) = 0$ можна визначити оптимальну геометрію гілок термоелементів $(l/s)_{opt}$, що забезпечує максимальний перепад температури $\Delta T_{max} = T - T_{0max}$ за заданого робочого струму I :

$$(l/s)_{opt} = \frac{\bar{\chi}}{\bar{e}I} \left[\sqrt{1 + 2\bar{z}T \left(1 - \frac{Q_0}{2n\bar{e}IT} \right)} - 1 \right] \quad (8)$$

З цього виразу видно, що зі зростанням теплового навантаження Q_0 величина $(l/s)_{opt}$ зменшується, а за $Q_0 \rightarrow 0$, тобто за відсутності теплового навантаження, вона набуде вигляду:

$$(l/s)_{opt} = \frac{\bar{\chi}}{\bar{e}I} \left[\sqrt{1 + 2\bar{z}T} - 1 \right] \quad (9)$$

Легко показати, що значення $(l/s)_{opt}$, яке забезпечує максимальний перепад температури ΔT_{max} , практично таке ж, як і в режимі Q_{0max} ($\Theta \rightarrow 1.0$), коли воно дорівнює:

$$(l/s)_{opt} = \bar{e}\bar{\sigma}T_0/I \quad (10)$$

Як видно з рис. 6, у режимі ΔT_{max} зі зменшенням l/s робочий струм I збільшується.

Для розрахунків основних параметрів і показників надійності однокаскадного ТЕП скористаємося вищенаведеними співвідношеннями. Результати розрахунків за оптимальної геометрії гілок термоелементів наведено у табл. 2

Таблиця 2

Результати розрахунків основних параметрів і показників надійності однокаскадного ТЕП з оптимальною геометрією гілок термоелементів за $T = 300$ К; $T_{0min} = 235$ К; $Q_0 = 0$ Вт; $\Delta T_{max} = 65$ К; $K_T = 1,04$, $\bar{z} = 2.4 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹; $\bar{e} = 2.0 \cdot 10^{-4}$ В/К; $\bar{\sigma} = 900$ См/см; $\bar{\chi} = 1.5$ Вт/(м·К) у режимі ΔT_{max}

$(l/s)_{opt}$	$R, 10^3$ Ом	$I = I_{max},$ А	$n,$ шт.	$\lambda\lambda_0$	$\lambda, 10^{-8}$ год ⁻¹	P	$l,$ мм	$S = (a \times b),$ мм	$\gamma,$ Вт
38.0	35.5	1.25	3	3.12	9.36	0.99906	4.0	1.0 × 1.0	0.055
			9	9.36	28.1	0.9972	3.0	0.8 × 0.8	
			27	28.1	84.2	0.99162	2.0	0.7 × 0.7	
							1.5	0.6 × 0.6	
							1.0	0.5 × 0.5	
19.0	17.7	2.25	3	3.12	9.36	0.99906	4.0	1.45 × 1.45	0.110
			9	9.36	28.1	0.9972	3.0	1.25 × 1.25	

Продовження таблиці 2

							2.0	1.0 × 1.0	
			27	28.1	84.2	0.99162	1.5	0.9 × 0.9	
							1.0	0.7 × 0.7	
9.4	8.85	5.0	3	3.12	9.36	0.99906	4.0	2.0 × 2.0	0.220
			9	9.36	28.1	0.9972	3.0	1.7 × 1.7	
							2.0	1.4 × 1.4	
			27	28.1	84.2	0.99162	1.5	1.2 × 1.2	
							1.0	1.0 × 1.0	
4.3	4.0	11.0	3	3.12	9.36	0.99906	4.0	3.0 × 3.0	0.484
			9	9.36	28.1	0.9972	3.0	2.6 × 2.6	
							2.0	2.1 × 2.1	
			27	28.1	84.2	0.99162	1.5	1.8 × 1.8	
							1.0	1.5 × 1.5	
1.9	1.8	25.0	3	3.12	9.36	0.99906	4.0	4.5 × 4.5	
			9	9.36	28.1	0.9972	3.0	3.9 × 3.9	
							2.0	3.2 × 3.2	
			27	28.1	84.2	0.99162	1.5	2.7 × 2.7	1.089

Режим теплового насоса ($\Delta T = 0$). Одним з можливих застосувань термоелектрики є використання термоелектричних модулів як теплового насоса для відведення теплової потужності при $\Delta T = 0$ К.

Основною характеристикою такого режиму є так званий тепловий коефіцієнт μ , який являє собою відношення величини теплової потужності Q_N , яка відводиться, до витраченої (споживаної) W за $\Delta T = 0$ К:

$$\mu = Q_N = Q_0/W = 2 - B/B \quad (11)$$

На рис. 7а представлена залежність теплового коефіцієнта μ від відносного робочого струму B в режимі теплового насоса. З ростом відносного робочого струму B коефіцієнт μ зменшується й при $B = 1.0$ стає рівним $\mu = 0.5$, тобто досягає свого мінімального значення.

За заданої величині теплової потужності Q_N , що виділяється, можна використовувати модулі або ТЕП з різною кількістю термоелементів n за $T = 300$ К, $\Delta T = 0$ К

На рис. 7б наведено залежність теплового коефіцієнта μ від кількості термоелементів n для різної величини теплової потужності Q_N , яка відводиться при $T = 300$ К, $\Delta T = 0$ К. Зі зростанням кількості термоелементів n тепловий коефіцієнт μ збільшується для різних значень теплової потужності Q_N , яка відводиться. Зі зростанням величини Q_N теплової потужності, яка відводиться, за заданої кількості термоелементів n тепловий коефіцієнт μ зменшується.

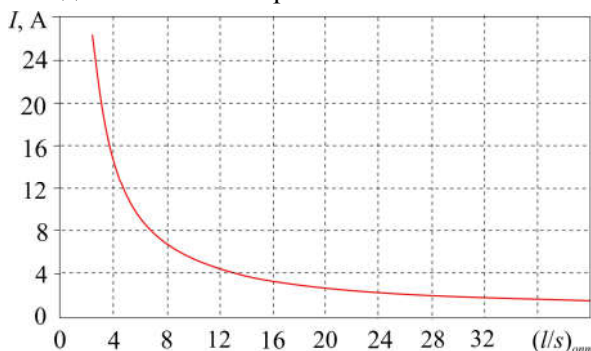


Рис. 6. Залежність робочого струму I від оптимального відношення $(I/s)_{opt}$ однокаскадного ТЕП за $T = 300$ К, $Q_0 = 2.0$ Вт у режимі ΔT_{max}

Величину відносного робочого струму B для різних величин Q_N та n можна визначити з виразу

$$B = 1 - \sqrt{1 - C} \quad (12)$$

де $C = \frac{Q_N}{nI_{\max}^2 R} = \frac{Q_N}{n\gamma}$;

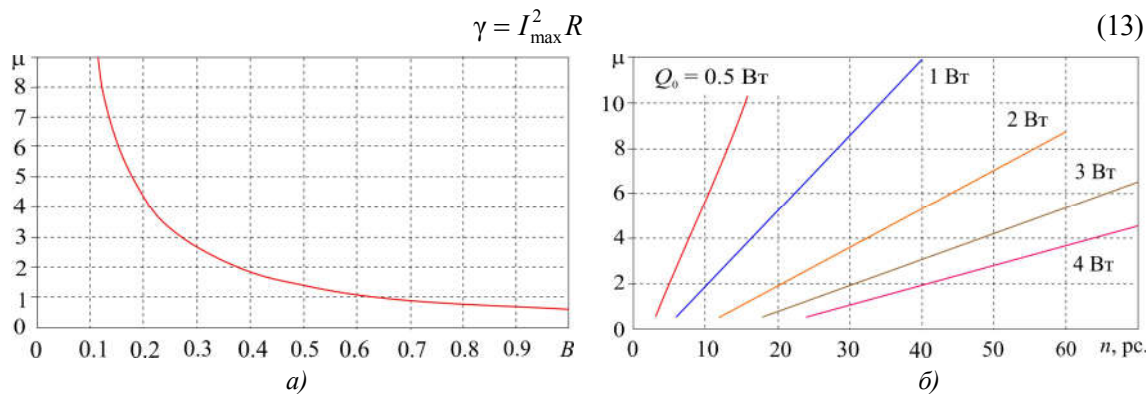


Рис. 7. Залежність теплового коефіцієнта μ однокаскадного ТЕП від відносного робочого струму B (а) та кількості термоелементів n для різних значень теплової потужності, що відводиться (б) за $T = 300 \text{ K}$, $l/s = 20$ у режимі теплового насоса ($\Delta T = 0 \text{ K}$)

На рис. 8 представлено залежність відносного робочого струму B від кількості термоелементів n для різної теплової потужності Q_N , що відводиться, за $T = 300 \text{ K}$, $\Delta T = 0 \text{ K}$. Зі зростанням кількості термоелементів n відносний робочий струм B зменшується для різних Q_N . За заданої кількості термоелементів n зі зростанням теплової потужності Q_N , що виділяється, відносний робочий струм B збільшується.

Відносну величину інтенсивності відмов λ/λ_0 однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса ($\Delta T = 0 \text{ K}$) можна подати у вигляді [12]:

$$\lambda/\lambda_0 = nB^4 C \quad (14)$$

На рис. 9 представлено залежності відносної величини інтенсивності відмов λ/λ_0 та ймовірності безвідмовної роботи P однокаскадного ТЕП від кількості термоелементів n для різних значень теплової потужності Q_N , яка відводиться, в режимі теплового насосу.

Розглянемо вплив геометрії гілок термоелементів однокаскадного теплового насоса на його основні параметри та показники надійності за заданої кількості термоелементів $n = 27$ у ТЕП та різної теплової потужності Q_N , яка відводиться, а саме 1.0; 2.2; 2.9; 4.0; 8.8 Вт.

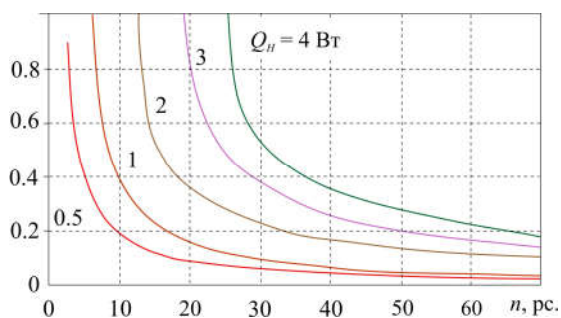


Рис. 8. Залежність відносного робочого струму B однокаскадного ТЕП від кількості термоелементів n за $T = 300 \text{ K}$, $l/s = 20$ та різних значень теплової потужності Q_N , яка відводиться

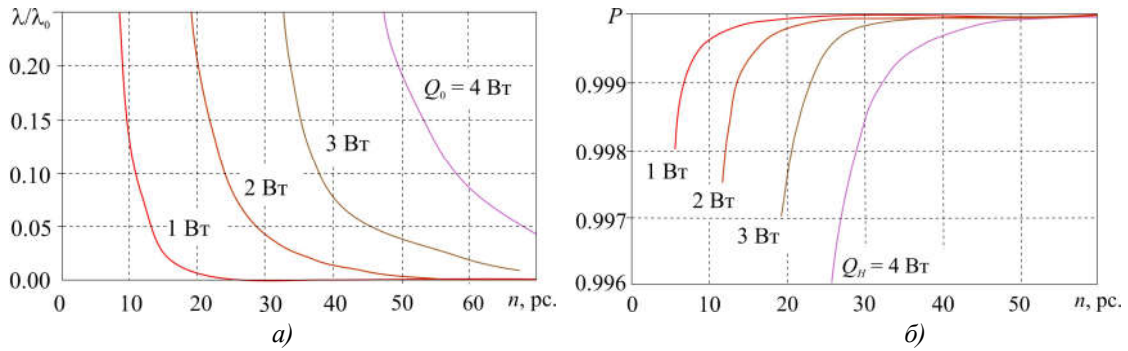


Рис. 9. Залежність відносної інтенсивності відмов λ/λ_0 (а) та ймовірності безвідмовної роботи P (б) однокаскадного ТЕП від кількості термоелементів n за $T = 300 \text{ K}$, $l/s = 20$, $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$, $t = 10^4 \text{ год}$ та різних значень теплової потужності, яка відводиться, у режимі теплового насоса $\Delta T = 0 \text{ K}$.

Результати розрахунків основних параметрів і показників надійності однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса наведено в табл. 3.

Зі зростанням кількості термоелементів n інтенсивність відмов λ/λ_0 зменшується. За заданої кількості термоелементів n інтенсивність відмов λ/λ_0 збільшується зі збільшенням Q_N від 1.0 до 4.0 Вт. Зі зростанням кількості термоелементів n у ТЕП ймовірність безвідмовної роботи P збільшується для різних значень Q_N .

За заданої кількості термоелементів n ймовірність безвідмовної роботи P однокаскадного ТЕП зменшується зі зростанням теплової потужності Q_N , яка відводиться.

Аналіз результатів розрахунків показав, що зі зменшенням відношення l/s за заданого n для різної потужності Q_N , яка відводиться, у режимі теплового насоса:

- зменшується відносний робочий струм B (рис. 10);
- збільшується максимальний робочий струм I_{\max} ;
- зменшується робочий струм I ;
- зменшується витрачена потужність W ;
- зменшується спадання напруги U ;
- збільшується тепловий коефіцієнт μ ;
- зменшується інтенсивність відмов λ/λ_0 і збільшується ймовірність безвідмовної роботи P (рис. 11).

Таблиця 3

Результати розрахунків основних параметрів і показників надійності однокаскадного ТЕП для різної геометрії гілок термоелементів за $T = 300 \text{ K}$, $n = 27$, $Q_N = 2.2 \text{ Вт}$, $\bar{z} = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $\bar{e} = 2.0 \cdot 10^{-4} \text{ В/К}$; $\bar{\sigma} = 900 \text{ См/см}$; $\bar{\chi} = 1.5 \text{ Вт/(м·К)}$ та різного теплового навантаження в режимі теплового насоса ($\Delta T = 0 \text{ K}$)

l/s	$R, 10^{-3} \text{ Ом}$	B	$I_{\max}, \text{ А}$	$I, \text{ А}$	C	$W, \text{ Вт}$	$U, \text{ В}$	μ	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8, \text{ год}^{-1}$	P
$Q_N = 1.0 \text{ Вт}$											
40.0	44.4	0.26	1.35	0.36	0.458	0.30	0.84	3.3	0.06	0.18	0.999982
30.0	33.3	0.189	1.80	0.34	0.343	0.21	0.61	4.8	0.012	0.036	0.9999965
20.0	22.2	0.122	2.70	0.33	0.229	0.13	0.39	7.7	$1.37 \cdot 10^{-3}$	$4.1 \cdot 10^{-11}$	0.99999959
10.0	11.1	0.059	5.40	0.32	0.114	0.061	0.19	16.4	$3.73 \cdot 10^{-5}$	$11.2 \cdot 10^{-13}$	≈ 1.0
4.5	5.0	0.026	12.0	0.31	0.0514	0.026	0.085	38.0	$6.3 \cdot 10^{-7}$	$19.0 \cdot 10^{-15}$	≈ 1.0

Продовження таблиці 3

2.0	2.22	0.0115	27.0	0.305	0.023	0.0116	0.037	86.2	$1.1 \cdot 10^{-8}$	$3.3 \cdot 10^{-16}$	≈ 1.0
$Q_H = 2.2 \text{ Вт}$											
40.0	44.4	1.0	1.35	1.35	1.0	4.37	3.2	0.50	27.0	81.0	0.9919
30.0	33.3	0.0	1.80	0.90	0.752	1.46	1.62	1.50	1.27	3.81	0.99962
20.0	22.2	0.29	2.70	0.79	0.50	0.735	0.33	3.0	0.0955	0.286	0.9999714
10.0	11.1	0.134	5.40	0.72	0.25	0.314	0.44	7.0	0.0022	0.0065	0.99999935
4.5	5.0	0.058	12.0	0.69	0.113	0.131	0.19	16.7	0.000034	0.0001	0.999999990
2.0	2.22	0.025	2.70	0.68	0.05	0.056	0.082	39.1	$5.53 \cdot 10^{-7}$	$1.65 \cdot 10^{-6}$	$\rightarrow 1.0$
$Q_H = 2.9 \text{ Вт}$											
30.0	33.3	0.93	1.80	1.67	0.996	5.0	3.0	0.58	19.8	59.3	0.9941
20.0	22.2	0.42	2.70	1.13	0.664	1.54	1.36	1.88	0.56	1.67	0.99983
10.0	11.1	0.182	5.40	0.98	0.332	0.58	0.59	5.0	0.01	0.030	0.9999970
4.5	5.0	0.078	12.0	0.94	0.149	0.237	0.25	12.8	$1.49 \cdot 10^{-4}$	0.00045	0.999999956
2.0	2.22	0.034	27.0	0.92	0.0664	0.101	0.11	28.7	$2.4 \cdot 10^{-6}$	$7.2 \cdot 10^{-14}$	$\rightarrow 1.0$
$Q_H = 4.0 \text{ Вт}$											
20.0	22.2	0.708	2.7	1.91	0.915	4.38	2.3	0.91	6.2	18.6	0.9981
10.0	11.1	0.263	5.4	1.42	0.458	1.21	0.85	3.3	0.06	0.18	0.999982
4.5	5.0	0.109	1.0	1.31	0.206	0.46	0.35	8.7	$7.85 \cdot 10^{-4}$	$2.36 \cdot 10^{-12}$	1.0
2.0	2.22	0.047	27.0	1.27	0.0915	0.193	0.152	20.7	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$3.6 \cdot 10^{-13}$	1.0
$Q_H = 8.8 \text{ Вт}$											
10.0	11.1	1.0	5.4	5.4	1.0	17.5	3.24	0.50	27.0	81.0	0.9919
4.5	5.0	0.26	12.0	3.12	0.453	2.63	0.84	3.35	0.056	0.17	0.999983
2.0	2.22	1.106	27.0	2.86	0.89	2.21	0.77	4.0	$3 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-12}$	$\rightarrow 1.0$

Так, наприклад, при необхідності відводу теплової потужності $Q_N = 2.2 \text{ Вт}$ використання модуля М40-27 замість модуля М30-27 дозволяє зменшити інтенсивність відмов λ в 21 раз і при цьому в 3 рази зменшити споживану потужність.

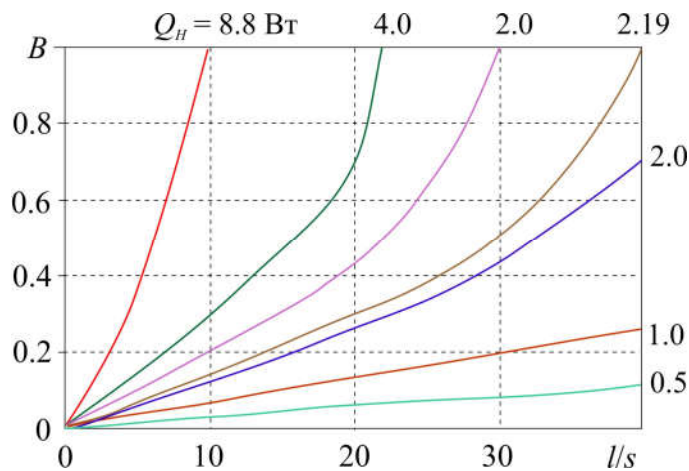


Рис. 10. Залежність відносного робочого струму B однокаскадного ТЕП від відношення l/s при $T = 300 \text{ K}$, $n = 27$ і різних значеннях теплової потужності, що приділяється, у режимі теплового насоса ($\Delta T = 0 \text{ K}$).

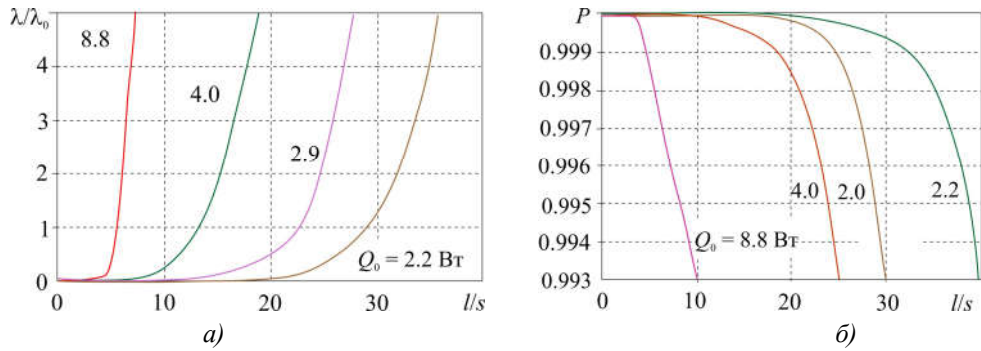


Рис. 11. Залежність відносної інтенсивності відмов λ/λ_0 (а) та ймовірності безвідмовної роботи P (б) однокаскадного ТЕП від відношення l/s при $T = 300$ К, $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ год $^{-1}$, $t = 10^4$ год, $n = 27$ і різних значеннях теплової потужності, що приділяється, у режимі теплового насоса ($\Delta T = 0$ К)

Обговорення результатів досліджень.

Аналіз даних, отриманих розрахунковим шляхом, засвідчив, що:

1. Зі зменшенням відношення (l/s) гілки термоелемента однокаскадного ТЕП для різних перепадів температури ΔT за заданого теплового навантаження Q_0 в режимі λ_{\min} :

- збільшується максимальна потужність охолодження γ ;
- зменшується необхідна кількість термоелементів n ;
- збільшується величина робочого струму I ;
- зменшується величина падіння напруги U ;
- зменшується інтенсивність відмов λ ;
- збільшується ймовірність безвідмовної роботи P .

З ростом перепаду температури ΔT за заданого теплового навантаження Q_0 для різних значень відношення l/s гілки термоелемента однокаскадного ТЕП в режимі λ_{\min} :

- зменшується максимальна потужність охолодження γ ;
- збільшується необхідна кількість термоелементів $n(Q_{0\max})$; функціональна залежність $n = f(\Delta T)$ має яскраво виражений мінімум, що можна пояснити наявністю максимуму холодопродуктивності за оптимального ΔT .

- збільшується величина робочого струму I (крім режиму $Q_{0\max}$);
- збільшується величина падіння напруги U ;
- збільшується інтенсивність відмов λ ;
- зменшується ймовірність безвідмовної роботи P .

2. Зі зменшенням відношення l/s гілки термоелемента однокаскадного ТЕП за $Q_0 = 0$ Вт:

- зменшується електричний опір R_B ;
- збільшується максимальний робочий струм I_{\max} ;
- максимальний перепад температури ΔT_{\max} не змінюється;
- інтенсивність відмов λ залишається сталою величиною для заданої кількості термоелементів n .

3. Зі зменшенням відносини l/s гілки термоелемента однокаскадного ТЕП за заданого n :

- зменшується відносний робочий струм B та величина робочого струму I ;
- збільшується тепловий коефіцієнт μ ;
- зменшується інтенсивність відмов λ і, отже, збільшується ймовірність безвідмовної роботи P .

4. Зі збільшенням кількості термоелементів n у ТЕП за заданого відношення l/s та величини

теплого навантаження Q_N :

- підвищується тепловий коефіцієнт μ ;
- зменшується відносний робочий струм B ;
- зменшується величина робочого струму I ;
- зменшується інтенсивність відмов λ ;
- збільшується ймовірність безвідмовної роботи P .

Висновки

1. Запропоновано та обґрунтовано модель взаємозв'язку показників надійності й основних параметрів однокаскадного ТЕП за варіації геометрії гілок термоелементів для різних перепадів температури ΔT за фіксованого теплового навантаження для режимів роботи λ_{\min} , ΔT_{\max} ($Q_0 = 0$) і теплового насоса ($\Delta T = 0$).
2. Визначена можливість підвищення показників надійності однокаскадного ТЕП як у режимі λ_{\min} за рахунок вибору геометрії гілок термоелементів з меншим відношенням l/s .
3. Максимальний перепад температури ΔT_{\max} не залежить від геометрії гілок термоелементів l/s у ТЕП, а залежить лише від термоелектричної ефективності вихідних матеріалів.
4. Інтенсивність відмов λ охолоджувального термоелемента в режимі ΔT_{\max} не залежить від геометрії гілок термоелементів l/s за заданої їх кількості n у ТЕП, а, отже, і ймовірність безвідмовної роботи P залишається сталою.
5. Для підвищення показників надійності однокаскадного теплового насоса слід використовувати термоелектричні модулі з більшою кількістю термоелементів n і малим відношенням l/s .

Література

1. Моисеев, В. Ф. Системы обеспечения тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры специального назначения / В. Ф. Моисеев // ТРИО. – 2003. – Вып. 1. – С. 43–48.
2. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. – К.: Наукова думка, 1979. – 768 с.
3. Tsarev, A.V., Chugunkov, V.V. Investigation of thermoelectric devices characteristics for temperature control systems launch facilities. *Actual problems of Russian cosmonautics: Materials of XXXII Academic Conference on Astronautics, Moscow: The Board of RAS*, 2008, 320–321.
4. Rowe, D. M. Thermoelectrics and its Energy Harvesting. Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics. *Boca Raton: CRC Press*, 2012, 544.
5. Hyoung –Seuk Choi. Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and Physics –of–failure. *Electronic Materials Letter*, 2011, 7, 271.
6. Wereszczak A. A., Wang H. Thermoelectric Mechanical Reliability. *Vehicle Technologies Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting*. – Arlington, 2011, 18.
7. Melcor Thermoelectric Cooler Reliability Report. (2002). *Melcor Corporation*, April 9th., 36.
8. Singh, R. (2008). Experimental Characterization of Thin Film Thermoelectric Materials and Film Deposition VIA Molecular Beam Epitaxial. *University of California*, 54.
9. Jurgensmeyer, A. L. High Efficiency Thermoelectric Devices Fabricated Using Quantum Well Confinement Techniques. *Colorado State University*, 2011, 54.
10. Ping Yang. Approach on thermoelectricity reliability of board –level backplane based on the orthogonal experiment design. *International Journal of Materials and Structural Integrity*, 2010, 4(2–4), 170–185.
11. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu. Analysis of the model of interdependence of thermoelement

branch geometry and reliability indicators of the single-stage cooler. *Eastern – European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, 1/1 (85), P. 26–33.

12. Зайков, В. П. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 1. Однокаскадные устройства / В. П. Зайков, Л. А. Киншова, В. Ф. Моисеев // Одесса: Политехперіодика, 2009 г. – 120 с.

Надійшла до редакції 19.01.2018

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

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

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

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

МОДЕЛЬ ВЗАИМОСВЯЗИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ОДНОКАСКАДНОГО ОХЛАДИТЕЛЯ С ГЕОМЕТРИЕЙ ВЕТВЕЙ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ

Работа посвящена повышению показателей надежности однокаскадного термоэлектрического охладителя конструктивным методом путем разработки и анализа надежно-ориентированной модели, связывающей показатели надежности с геометрией термоэлементов. Исследования проведены для различных перепадов температуры, фиксированной тепловой нагрузки для различных режимов работы. Показано, что с уменьшением отношения высоты термоэлемента к сечению увеличивается максимальная мощность охлаждения, уменьшается количество термоэлементов и повышается вероятность безотказной работы. При этом не изменяется существующая технология изготовления охладителей, сохраняются результаты существующих механических и климатических испытаний, материал термоэлементов, стоимость модулей. Библ. 12, Рис. 11, Табл. 3.

Ключевые слова: термоэлектрический охладитель, геометрия термоэлементов, показатели надежности, мощность охлаждения, перепад температур.

V.P.Zaykov¹, *Candidate of Tech. science,*
V.I.Mescheryakov², *Doctor of Tech. science,*
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@ya.ru.

MODEL OF INTERRELATION BETWEEN RELIABILITY INDICATORS OF A SINGLE-STAGE COOLER AND THE GEOMETRY OF THERMOELEMENT LEGS

The paper deals with improving the reliability indicators of a single-stage thermoelectric cooler using a constructive method by developing and analyzing a reliability-oriented model relating reliability indicators to the geometry of thermoelements. The investigations were carried out for various temperature differences, a fixed thermal load for various operating modes. It is shown that with decreasing the ratio of thermoelement height to its cross section, the maximum cooling power is increased, the number of thermoelements is decreased and the probability of failure-free operation is increased. At the same time, the existing technology of manufacturing coolers does not change, the results of existing mechanical and climatic tests, the material of thermoelements, the cost of modules remain unvaried. *Bibl. 12, Fig. 11, Table. 3.*

Key words: thermoelectric cooler, geometry of thermoelements, reliability indicators, cooling power, temperature difference.

References

1. Moiseev V.F. (2003). Systems for providing of thermal modes for special-purpose radioelectronic equipment. *TRiO*, 1, 43–48 [in Russian].
2. Anatychuk L.I. (1979). Thermoelements and thermoelectric devices: Handbook. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian]. .
3. Tsarev, A.V., Chugunkov, V.V.(2008). Investigation of thermoelectric devices characteristics for temperature control systems launch facilities. *Actual problems of Russian cosmonautics: Materials of XXXII Academic Conference on Astronautics*. Moscow: The Board of RAS [in Russian].
4. Rowe, D. M. (2012). *Thermoelectrics and its energy harvesting. Materials, preparation, and characterization in thermoelectrics*. Boca Raton: CRC Press.
5. Hyoung –Seuk Choi. (2011). Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and physics –of –failure. *Electronic Materials Letter*, 7, 271.
6. Wereszczak A. A., Wang H. (2011). Thermoelectric mechanical reliability. *Vehicle Technologies Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting*. Arlington, 2011.
7. Melcor thermoelectric cooler reliability report. (2002). *Melcor Corporation*, April 9th., 36.
8. Singh, R. (2008). *Experimental characterization of thin film thermoelectric materials and film deposition VIA molecular beam epitaxial*. University of California, 54.
9. Jurgensmeyer, A. L. (2011). *High efficiency thermoelectric devices fabricated using quantum well confinement techniques*. Colorado State University, 2011.
10. Ping Yang. (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.
11. Zaikov V., Mescheryakov V., Zhuravlov 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 [in Russian].
12. Zaikov V.P., Kinshova L.A., Moiseev V.F. (2009). *Prediction of reliability figures of thermoelectric cooling devices. Vol.1. Single-state devices*. Odessa: Politekhperiodica [in Russian].

Submitted 19.01.2018