

**Зайков В.П.** канд. техн. наук.<sup>1</sup>,  
**Мещеряков В.І.** доктор техн. наук.<sup>2</sup>,  
**Журавльов Ю.І.** канд. техн. наук.<sup>3</sup>

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

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

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

## **ВПЛИВ СЕРЕДНЬОБ'ЄМНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ГІЛОК ТЕРМОЕЛЕМЕНТА НА ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ, ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ТА ДИНАМІКУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА**

*Розглянуто вплив середньооб'ємної температури гілок термоелемента на основні параметри, показники надійності та динаміку функціонування термоелектричного теплового насоса за заданого теплового навантаження для різної геометрії гілок термоелементів. Визначено співвідношення для оцінки середньооб'ємної температури залежно від відносного робочого струму і відносного робочого струму, який відповідає максимуму холодопродуктивності. Показано, що з врахуванням середньооб'ємної температури зменшується холодопродуктивність на один термоелемент, збільшується відносний перепад температури, кількість термоелементів за заданого теплового навантаження, інтенсивність відмов, збільшується час виходу на стаціонарний режим роботи. Бібл. 12, Рис. 9, Табл. 5.*

**Ключові слова:** термоелектричний охолоджувач, середньооб'ємна температура, динаміка функціонування термоелемента, показники надійності, перепад температур.

### **Вступ**

Перспективність термоелектричних теплових насосів обумовлена відсутністю рухомих частин, незалежністю функціонування від просторового розташування виробу, наслідком чого є підвищені, у порівнянні з парогенераторними та абсорбційними машинами, показники надійності [1]. Малі габарити й маса, принцип перетворення енергії, електричне керування дають істотний вигравш у динамічних характеристиках термоелектричних пристроїв [2]. Разом з тим, більш низька ефективність перетворення веде до того, що основною сферою застосування термоелектричних насосів є теплонавантажена радіоелектроніка, де висуваються найбільш критичні вимоги до масогабаритних та динамічних характеристик, а також показників надійності систем забезпечення теплових режимів [3]. Постійне зростання вимог до бортових інформаційних систем розповсюджується й на системи забезпечення теплових режимів, що є їх невід'ємною частиною [4]. Експлуатаційні показники надійності термоелектричних пристроїв

залежать від впливу зовнішніх кліматичних [5], механічних [6] факторів, теплового навантаження [7], конструктивних параметрів [8], струмових режимів роботи [9]. Спільне вирішення питань підвищення показників надійності й динамічних характеристик становить проблему, оскільки підвищення градієнтів перепадів температури у часі знаходиться у суперечності з показниками надійності [10]. Актуальність аналізу даної проблеми очевидна й з тих міркувань, що прискорені випробування термоелектричних пристроїв з метою встановлення показників надійності проводять у перемикальних режимах, за яких час експлуатації знижується на порядок. До даних умов можуть короткочасно наблизитися робочі режими швидкодіючих термоелектричних систем забезпечення теплових режимів теплонавантажених радіоелектронних елементів.

**Метою роботи** є розробка й аналіз математичної моделі, що пов'язує показники надійності й динаміки гілки термоелемента з конструктивними параметрами й енергетичними показниками термоелектричного теплового насоса.

### **Модель взаємозв'язку показників надійності та динаміки гілок термоелемента з конструктивними та енергетичними параметрами в режимі теплового насоса**

У деяких випадках проектування термоелектричних охолоджувальних пристроїв (ТЕП), особливо в режимі теплового насоса ( $\Delta T = 0$ ), виникає необхідність оцінки середньооб'ємної температури  $\bar{T}$  гілок термоелементів, яка перевищує температуру тепловиділяючого спаю  $T$ , що суттєво позначається на основних параметрах, показниках надійності й динаміки функціонування термоелемента.

Розглянемо нелінійний розподіл температури уздовж галузі термоелемента  $T(x) = T$  при  $x = 0$  і  $T(x) = T_0$  при  $x = l$  [11] яке, можна представляти у вигляді:

$$\bar{T} = \frac{1}{l} \int_0^l \left\{ T + \frac{\Delta T_{\max}}{l} x \left[ B_K^2 \left( 1 - \frac{x}{l} \right) - \Theta \right] \right\} dx, \quad (1)$$

де  $B_K = I/I_{\max K}$  – відносний робочий струм при  $\tau$ , А;

$I$  – величина робочого струму  $\tau$ , А;

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

$T_0$  – температура теплопоглинального спаю, К;

$\bar{e}$  – усереднене значення термоЕРС гілки термоелемента, В/К;

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

$\bar{\sigma}$  – усереднене значення електропровідності гілки термоелемента, См/см;

$l, S$  – відповідно, висота, см, і площа, см<sup>2</sup>, поперечного перерізу гілок термоелемента;

$\Delta t_{\max} = 0.5zT_0^2$  – максимальний перепад температури, К;

$z$  – усереднене значення добротності термоелектричного матеріалу в модулі, 1/К;

$\Theta = (T - T_0)/\Delta t_{\max}$  – відносний перепад температури.

Проінтегрувавши вираз (1), отримаємо співвідношення для визначення середньооб'ємної температури у більш простому вигляді:

$$\bar{T} = \frac{T + T_0}{2} + \frac{B_K^2 I_{\max K}^2 R}{12K}, \quad (2)$$

де  $K = \kappa S/l$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/К;

$\kappa$  – усереднене значення коефіцієнта теплопровідності, Вт/(см·К).

Співвідношення (2) можна представити у вигляді

$$\bar{T} = \frac{T_0 + T}{2} + \frac{B_K^2 \Delta T_{\max}}{6}. \quad (3)$$

Зі зростанням відносного робочого струму  $B_K$  збільшується середньооб'ємна температура  $\bar{T}$  для різної геометрії гілок термоелементів при  $T = 300$  К в режимі теплового насоса (рис. 1, 2).

З виразу (2) можна визначити відносний перепад температури

$$\Theta = B_K^2 \frac{I_{\max K}^2 R}{12K \Delta T_{\max}} = \frac{B_K^2}{6}. \quad (4)$$

З ростом відносного робочого струму  $B_K$  збільшується відносний перепад температури для різної геометрії галузей термоелементів при  $T = 300$  К в режимі теплового насоса (мал. 3).

Співвідношення для холодопродуктивності однокаскадного ТЕП можна записати у вигляді

$$Q_0 = n I_{\max}^2 R (2B_K - B_K^2 - \Theta), \quad (5)$$

де  $n$  – кількість термоелементів.

Підставивши (4) у (5) знайдемо:

$$K = \frac{Q_0}{n I_{\max}^2 R} = 2B_K - B_K^2 - B_K^2 \frac{I_{\max K}^2 R}{12K \Delta T_{\max}}. \quad (6)$$

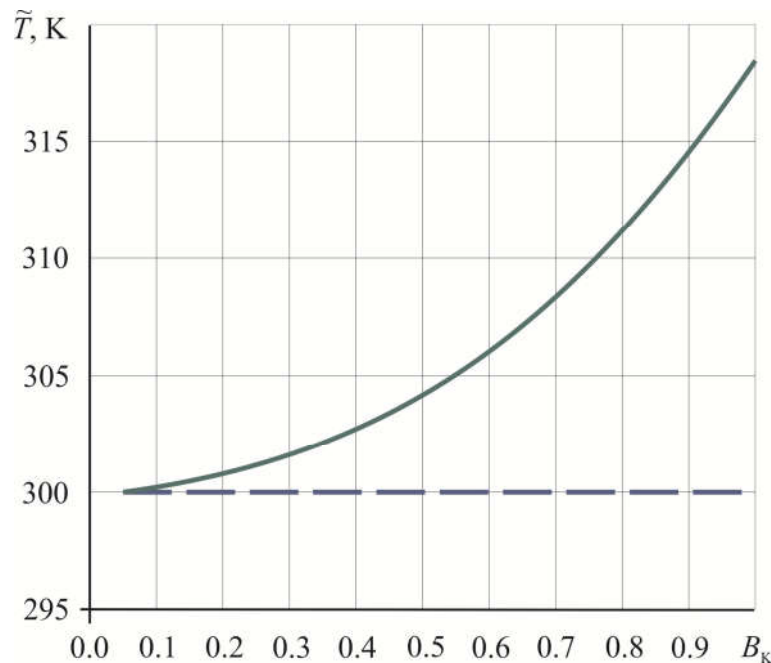


Рис. 1. Залежність середньооб'ємної температури  $\tilde{T}$  гілок однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса від відносного робочого струму  $B_K$  за  $T = 300$  К: суцільні лінії  $\dot{\tilde{T}}$  – з урахуванням перегріву; пунктир – без урахування перегріву

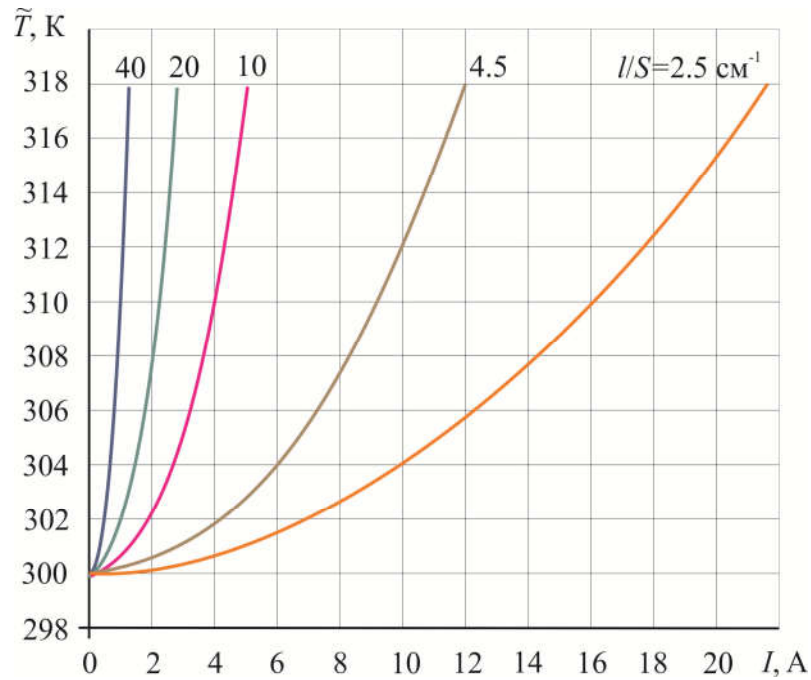


Рис. 2. Залежність середньооб'ємної температури  $\tilde{T}$  гілок однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса від робочого струму  $I$  за  $T = 300$  К для різної геометрії гілок термоелементів

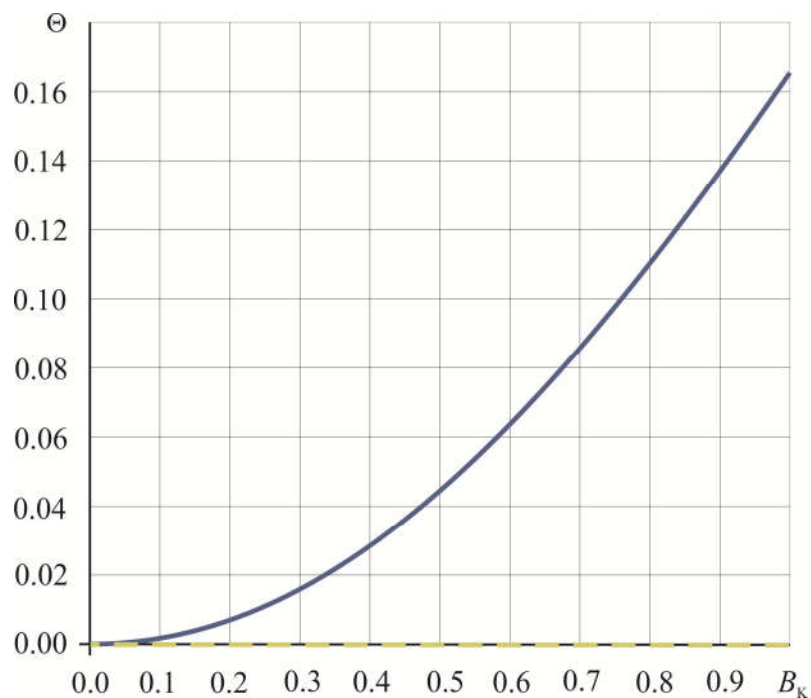


Рис. 3. Залежність відносного перепаду температури  $\Theta$  гілки однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса від відносного робочого струму  $B_k$  при  $T = 300$  К: суцільна лінія – з урахуванням перегріву; пунктир – без урахування перегріву

З умови  $dK/dB_k = 0$  одержимо співвідношення для оптимального відносного робочого струму  $B_{opt}$ , який відповідає максимуму холодопродуктивності в режимі теплового насоса:

$$B_{\text{опт}} = \left( 1 + \frac{I_{\text{макс}K}^2 R}{12K\Delta T_{\text{макс}}} \right)^{-1} = \frac{6}{7}. \quad (7)$$

Оптимальна величина відносного робочого струму  $B_{\text{опт}}$  не залежить від геометрії гілок термоелементів.

На рис. 4 представлено залежності холодопродуктивності від відносного робочого струму  $B_K$  з урахуванням і без урахування перегріву для різної геометрії гілок термоелементів за  $T = 300 \text{ K}$  для заданої кількості термоелементів  $n = 5$ .

Зі зростанням відносного робочого струму  $B_K$  функціональна залежність холодопродуктивності  $Q_0$  від відносного робочого струму  $B_K$  з урахуванням перегріву гілок термоелементів має максимум (мал. 4)

Відповідно до [12] час виходу  $\tau$  на стаціонарний режим роботи однокаскадного ТЕП можна визначити з виразу:

$$\tau = \frac{\sum_i m_i C_i}{K_K (1 + 2B_K \Delta T_{\text{макс}}/T_0)} \ln \frac{\gamma B_H (2 - B_H)}{2B_K - B_K^2 - \Theta}, \quad (8)$$

де  $\gamma = \frac{I_{\text{макс}H}^2 R_H}{I_{\text{макс}K}^2 R_K}$ ;

$I_{\text{макс}H} = e_H T / R_H$  – максимальний робочий струм за  $\tau_H = 0$  на початку процесу відведення теплової потужності, А;

$I_{\text{макс}K} = e_K T_0 / R_K$  – максимальний робочий струм у момент часу  $\tau_K$  наприкінці процесу відведення теплової потужності, А;

$e_H, e_K$  – відповідно, коефіцієнт термоЕРС гілки термоелемента на початку й наприкінці процесу відведення теплової потужності, В/К;

$R_H, R_K$  – відповідно, електричний опір галузей термоелемента на початку й наприкінці процесу відводу теплової потужності, Ом;

$B_H = I / I_{\text{макс}H}$  – відносний робочий струм у момент часу  $\tau = 0$  на початку процесу відводу теплової потужності;

$B_K = I / I_{\text{макс}K}$  – відносний робочий струм у момент часу  $\tau_K$  наприкінці процесу відводу теплової потужності;

$\Theta = \Delta T / \Delta T_{\text{макс}}$  – відносний перепад температури;

$\Delta T = T - T_0$  – робочий перепад температури в ТЕП, К;

$\sum_i m_i C_i$  – сумарна величина добутку теплоємності та маси складових конструктивних та технологічних елементів (КТЕ) ТЕП.

За умови рівності струмів на початку й наприкінці процесу відведення теплової потужності

$$I = B_H I_{\text{макс}H} = B_K I_{\text{макс}K}. \quad (9)$$

Кількість термоелементів  $n$  можна визначити зі співвідношення

$$n = \frac{Q_H}{I_{\text{макс}K}^2 R_K (2B_K - B_K^2 - \Theta)}, \quad (10)$$

де  $Q_H$  – теплова потужність, що виділяється, Вт.

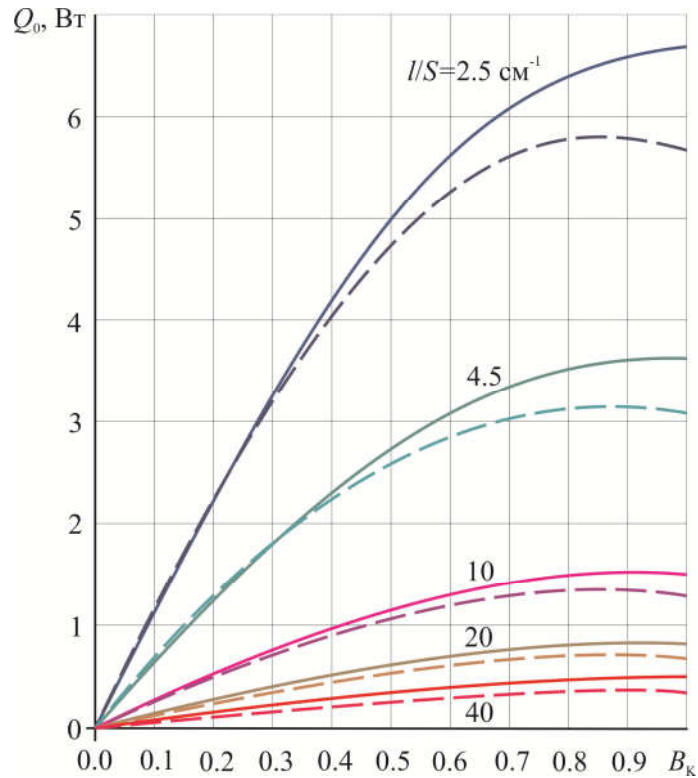


Рис. 4. Залежність холодопродуктивності  $Q_0$  однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса від відносного робочого струму  $B_K$  для різної геометрії гілок термоелементів за  $T = 300 \text{ K}$ ,  $n = 5$ : суцільні лінії – з урахуванням перегріву; пунктир – без урахування перегріву

Потужність споживання  $W_K$  ТЕП можна визначити з виразу

$$W_K = 2nI_{\max K}^2 R_K B_K \left( B_K + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right). \quad (11)$$

Спад напруги  $U_K$  можна визначити зі співвідношення:

$$U_K = W_K / I. \quad (12)$$

Тепловий коефіцієнт  $\mu$  можна обчислити за формулою:

$$m = Q_H / W_K. \quad (13)$$

Відносну величину інтенсивності відмов  $\lambda/\lambda_0$  можна визначити з виразу [11]:

$$\lambda/\lambda_0 = nB_K^2 (\Theta + C) \left[ \frac{B_K + (\Delta T_{\max}/T_0)\Theta}{1 + (\Delta T_{\max}/T_0)\Theta} \right] K_{T_1}, \quad (14)$$

де  $C = Q_H/nI_{\max K}^2 R_K$  – відносне теплове навантаження;

$K_{T_1}$  – значимий температурний коефіцієнт.

Імовірність безвідмовної роботи  $P$  ТЕП можна визначити за формулою

$$P = \exp[-\lambda t], \quad (15)$$

де  $t$  – призначений ресурс, год.

### Аналіз моделі взаємозв'язку показників надійності та динаміки гілок термоелемента з конструктивними та енергетичними параметрами

Результати розрахунків основних параметрів і показників надійності при функціонуванні ТЕП з різною геометрією гілок термоелементів ( $l/S$ ) у режимі теплового насоса за заданого теплового навантаження  $Q_0 = 5.5$  Вт,  $l/S = 2.5; 4.5; 10; 20; 40$  см<sup>-1</sup> для різних струмових режимів роботи наведено в табл. 1 – 5.

Таблиця 1

$$T = 300 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 108 \text{ K}; Q_0 = 5,5 \text{ Вт}; \sum_i m_i C_i = 0.114 \text{ Дж/К}; R_H = 2,78 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_K = 2.91 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; I_{\max H} = 22.0 \text{ А}; I_{\max K} = 21.3 \text{ А}; K = 6.16 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/К}; l/S = 2,5 \text{ см}^{-1}$$

$\Delta T, \text{ K}$	$B_K$	$\bar{T}, \text{ K}$	$\Theta$	$\mu$	$W, \text{ Вт}$	$U, \text{ В}$	$n, \text{ шт.}$	$\tau, \text{ с}$	$I, \text{ А}$	$B_H$	$\lambda/\lambda_0$	$\lambda, 10^{-8} \text{ год}^{-1}$	$P$
18.0	1.0	318*	0,167	0,393	14.0	0.66	5.0	2.16	21.3	0.969	5.0	15.0	0.9985
		300	0,0	0,417	13.2	0.62	4.17				4.17	12.5	0.99875
15.0	0.916	315*	0,139	0,444	11.4	0.59	4.88	1.83	19.5	0.886	3.45	10.3	0.99897
		300	0,0	0,466	9.3	0.48	4.20				2.53	7.58	0.99924
13.0	0.853	313*	0,120	0,480	9.8	0.54	4.85	1.62	18.2	0.827	2.55	7.65	0.99923
		300	0,0	0,500	8.2	0.45	4.27				1.94	5.83	0.99942
10.0	0.748	310*	0,093	0,546	7.62	0.48	4.94	1.31	16.0	0.724	1.48	4.44	0.99956
		300	0,0	0,626	6.57	0.41	4.45				1.174	3.52	0.99965
5.0	0.529	305*	0,046	0,680	4.30	0.38	5.70	0.80	11.3	0.512	0.360	1.07	0.999893
		300	0,0	0,735	3.95	0.35	5.35				0.306	0.92	0.999908
3.0	0.410	303*	0,028	0,750	3.05	0.35	6.70	0.55	8.7	0.397	0.127	0.38	0.999962
		300	0,0	0,795	2.84	0.33	6.40				0.112	0.337	0.999966
1.0	0.237	301*	0,009	0,860	1.53	0.31	10.20	0.18	5.0	0.229	0.014	0.041	0.9999960
		300	0,0	0,881	1.48	0.30	9.97				0.013	0.039	0.9999961

\* – дані отримано з урахуванням перегріву.

Таблиця 2

$$T = 300 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 108 \text{ K}; Q_0 = 5.5 \text{ Вт}; \sum_i m_i C_i = 0.04517 \text{ Дж/К}; R_H = 5.0 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_K = 5.23 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; I_{\max H} = 12.24 \text{ А}; I_{\max K} = 11.9 \text{ А}; K = 3.42 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/К}; l/S = 4.5 \text{ см}^{-1}$$

$\Delta T, \text{ K}$	$B_K$	$\bar{T}, \text{ K}$	$\Theta$	$\mu$	$W, \text{ Вт}$	$U, \text{ В}$	$n, \text{ шт.}$	$\tau, \text{ с}$	$I, \text{ А}$	$B_H$	$\lambda/\lambda_0$	$\lambda, 10^{-8} \text{ год}^{-1}$	$P$
18.0	1.0	318*	0.167	0.393	14.0	1.17	8.9	1.47	11.9	0.972	8.9	22.3	0.9973

Продовження таблиці 2

		300	0.0	0.50	11.0	0.925	7.4				7.4	22.3	0.99777
15.0	0.912	315*	0.139	0.445	11.3	1.04	8.7	1.25	10.9	0.886	6.0	18.0	0.9982
		300	0.0	0.544	9.23	0.85	7.5				4.42	13.3	0.99867
13.0	0.825	313*	0.120	0.465	9.82	0.97	8.75	1.10	10.1	0.825	4.47	13.4	0.9987
		300	0.0	0.575	8.18	0.80	7.66				3.37	10.1	0.9990
10.0	0.744	310*	0.093	0.547	7.56	0.85	8.83	0.90	8.9	0.724	2.58	7.75	0.99923
		300	0.0	0.63	6.52	0.74	8.0				2.05	6.15	0.99939
5.0	0.526	305*	0.046	0.68	4.31	0.69	10.2	0.53	6.3	0.512	0.62	1.87	0.99981
		300	0.0	0.74	3.93	0.63	9.6				0.534	1.60	0.99984
3.0	0.410	303*	0.028	0.75	3.0	0.63	12.0	0.30	4.85	0.40	0.22	0.664	0.99993
		300	0.0	0.80	2.81	0.58	11.4				0.20	0.590	0.99994
1.0	0.235	301*	0.0093	0.86	1.52	0.54	18.3	0.09	2.80	0.23	0.022	0.066	0.999993
		300	0.0	0.88	1.46	0.52	17.9				0.022	0.066	0.999994
0.5	0.166	300.5*	0.0046	0.90	1.114	0.56	24.8	0.05	1.98	0.16	0.0076	0.023	0.999997
		300	0.0	0.903	1.0	0.50	24.4				0.0056	0.017	0.999998

\* – дані отримано з урахуванням перегріву.

Таблиця 3

$$T = 300 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 108 \text{ K}; Q_0 = 5.5 \text{ Вт}; \sum_i m_i C_i = 0.0175 \text{ Дж/К};$$

$$R_H = 1.11 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}; R_K = 1.163 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}; I_{\max H} = 5.51 \text{ А};$$

$$I_{\max K} = 5.34 \text{ А}; K = 1.54 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/К}; l/S = 10 \text{ см}^{-1}$$

$\Delta T, \text{ K}$	$B_K$	$\bar{T}, \text{ K}$	$\Theta$	$\mu$	$W, \text{ Вт}$	$U, \text{ В}$	$n, \text{ шт.}$	$\tau, \text{ з}$	$I, \text{ А}$	$B_H$	$\lambda/\lambda_0$	$\lambda, 10^{-8}, \text{ год}^{-1}$	$P$
18.0	1.0	318*	0.167	0.393	14.0	2.62	19.9	1.29	5.34	0.969	19.9	59.7	0.9940
		300	0.0	0.50	11.0	2.0	16.6				16.6	41.5	0.9959
15.0	0.914	315*	0.139	0.445	11.3	2.32	19.4	1.10	4.90	0.886	13.6	40.8	0.9959
		300	0.0	0.542	9.25	1.90	16.7				9.96	29.9	0.9970
13.0	0.851	313*	0.120	0.480	9.74	0.96	19.3	0.97	4.54	0.827	10.0	30.0	0.9970
		300	0.0	0.575	8.12	0.80	16.9				7.62	22.9	0.9977
10.0	0.746	310*	0.093	0.547	7.60	1.90	19.7	0.78	4.0	0.723	5.8	17.4	0.9983
		300	0.0	0.627	6.53	1.63	17.7				4.6	13.8	0.9986
5.0	0.528	305*	0.046	0.68	4.33	1.54	22.7	0.46	2.8	0.512	1.41	4.23	0.99958
		300	0.0	0.74	3.94	1.40	21.3				1.29	3.63	0.99964
3.0	0.410	303*	0.028	0.75	3.04	1.39	26.6	0.30	2.2	0.40	0.50	1.50	0.99985
		300	0.0	0.80	2.83	1.29	25.4				0.47	1.40	0.99986
1.0	0.236	301*	0.0093	0.86	1.52	1.21	40.7	0.10	1.3	0.23	0.054	0.162	0.999984
		300	0.0	0.882	1.41	1.12	39.8				0.053	0.159	0.999984
0.5	0.167	300.5*	0.0046	0.90	1.03	1.15	55.0	0.02	0.89	0.16	0.0134	0.040	0.9999960
		300	0.0	0.916	1.0	1.13	54.2				0.0129	0.039	0.9999961

\* – дані отримано з урахуванням перегріву.



Таблиця 4

$$T = 300 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 108 \text{ K}; Q_0 = 5.5 \text{ Вт}; \sum_i m_i C_i = 8.58 \cdot 10^{-3} \text{ Дж К}; R_H = 2.22 \cdot 10^{-2} \text{ Ом};$$

$$R_K = 2.326 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}; I_{\max H} = 2.76 \text{ А}; I_{\max K} = 2.67 \text{ А}; K = 7.7 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/К}; l/S = 20 \text{ см}^{-1}$$

$\Delta T, \text{ K}$	$B_K$	$\bar{T}, \text{ K}$	$\Theta$	$\mu$	$W, \text{ Вт}$	$U, \text{ В}$	$n, \text{ шт.}$	$\tau, \text{ з}$	$I, \text{ А}$	$B_H$	$\lambda/\lambda_0$	$\lambda, 10^{-8}, \text{ год}^{-1}$	$P$
18.0	1.0	318*	0.167	0.393	14.0	5.24	39.8	1.30	2.67	0.967	39.8	119.4	0.9881
		300	0.0	0.50	11.0	4.12	33.2				33.2	99.6	0.9900
15.0	0.914	315*	0.139	0.410	11.37	4.66	38.9	1.10	2.44	0.884	27.2	81.6	0.99187
		300	0.0	0.543	9.25	3.79	33.4				23.1	69.4	0.9931
13.0	0.851	313*	0.120	0.480	9.74	4.29	38.6	0.97	2.27	0.823	20.1	60.4	0.9940
		300	0.0	0.575	8.14	3.59	33.9				17.4	52.2	0.9948
10.0	0.741	310*	0.093	0.547	7.60	3.80	39.4	0.80	2.0	0.722	11.66	35.0	0.99650
		300	0.0	0.627	6.53	3.27	35.4				10.26	30.8	0.99692
5.0	0.528	305*	0.046	0.680	4.33	3.10	45.4	0.48	1.40	0.511	2.82	8.46	0.99915
		300	0.0	0.736	3.95	2.82	42.7				2.58	7.74	0.99923
3.0	0.410	303*	0.028	0.754	3.03	2.78	53.1	0.34	1.09	0.397	1.0	3.0	0.99970
		300	0.0	0.795	2.84	2.61	51.0				0.938	2.81	0.99972
1.0	0.236	301*	0.0093	0.860	1.52	2.41	81.5	0.16	0.63	0.229	0.108	0.324	0.9999676
		300	0.0	0.880	1.41	2.24	79.7				0.106	0.318	0.999968
0.5	0.167	300,5*	0.0046	0.900	1.03	2.31	110.0	0.07	0.45	0.162	0.027	0.080	0.9999920
		300	0.0	0.916	1.0	2.25	108.4				0.026	0.77	0.9999923

\* – дані отримано з урахуванням перегріву.

Таблиця 5

$$T = 300 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 108 \text{ K}; Q_0 = 5.5 \text{ Вт}; \sum_i m_i C_i = 3.61 \cdot 10^{-3} \text{ Дж К}$$

$$; R_H = 4.44 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}; R_K = 4.545 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}; I_{\max H} = 1.378 \text{ А}; I_{\max K} = 1.35 \text{ А};$$

$$K = 3.85 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/К}; l/S = 40 \text{ см}^{-1}$$

$\Delta T, \text{ K}$	$B_K$	$\bar{T}, \text{ K}$	$\Theta$	$\mu$	$W, \text{ Вт}$	$U, \text{ В}$	$n, \text{ шт.}$	$\tau, \text{ з}$	$I, \text{ А}$	$B_H$	$\lambda/\lambda_0$	$\lambda, 10^{-8}, \text{ год}^{-1}$	$P$
18.0	1.0	318*	0.167	0.393	14.0	10.4	79.7	1.09	1.35	0.967	79.7	239.1	0.9764
		300	0.0	0.50	11.0	8.15	66.4				66.4	199.2	0.9803
15.0	0.914	315*	0.139	0.410	11.4	9.32	77.8	0.92	1.22	0.884	54.4	163.2	0.9838
		300	0.0	0.543	9.25	7.58	66.8				46.2	138.6	0.9862
13.0	0.851	313*	0.120	0.480	9.74	8.6	77.2	0.81	1.14	0.823	40.2	120.6	0.9880
		300	0.0	0.575	8.14	7.2	67.8				34.8	104.4	0.9895
10.0	0.746	310*	0.093	0.547	7.60	7.6	78.8	0.66	1.0	0.722	23.3	70.0	0.9930
		300	0.0	0.627	6.53	6.54	70.8				20.5	61.6	0.9939
5.0	0.528	305*	0.046	0.680	4.33	6.19	90.8	0.40	0.7	0.511	5.64	16.9	0.9983
		300	0.0	0.736	3.95	5.64	85.4				5.16	15.5	0.99845
3.0	0.410	303*	0.028	0.754	3.03	5.51	106.2	0.31	0.55	0.397	2.0	6.0	0.99940

Продовження таблиці 5

		300	0.0	0.795	2.84	5.16	102.0				1.88	5.63	0.99944
1.0	0.236	301*	0.0093	0.860	1.52	4.90	163.0	0.12	0.31	0.229	0.22	0.65	0.999935
		300	0.0	0.880	1.41	4.55	160.0				0.21	0.64	0.999936
0.5	0.167	300.5*	0.0046	0.900	1.03	4.64	220.0	0.04	0.22	0.162	0.054	0.161	0.999984
		300	0.0	0.916	1.0	4.50	216.8				0.052	0.155	0.999985

\* – дані отримано з урахуванням перегріву.

Для однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса за заданого теплового навантаження  $Q_0 = 5.5$  Вт і різної геометрії гілок термоелементів  $l/S$  функціональна залежність кількості термоелементів від відносного робочого струму  $n = f(B_K)$ , визначена з урахуванням перегріву гілок термоелементів, має мінімум при  $B_{\text{опт}} = 0.856$ ; якщо ж перегріву не враховувати, екстремум функції  $n = f(B_K)$  не спостерігається (рис. 5).

За заданої величини відносного робочого струму  $B_K$  кількість термоелементів  $n$ , визначена з урахуванням перегріву гілок термоелементів, збільшується в порівнянні з  $n$ , отриманим без такого врахування. Для різної геометрії гілок термоелементів у максимумі для  $B_K = 1$  збільшення ( $\Delta n/n$ , %) становить у середньому 20 %. При цьому зі зменшенням відносного робочого струму  $B_K$  величина  $\Delta n/n$  теж зменшується.

Зі зменшенням відносного робочого струму  $B_K$ :

- зменшується величина теплового коефіцієнта  $\mu$  як при розрахунках з урахуванням перегріву гілок термоелементів, так і без нього (рис. 6). При  $B = 1$   $\Delta \mu/\mu$  становить 22 %, тобто тепловий коефіцієнт, визначений з урахуванням перегріву, зменшується на 22 %. Зі зменшенням  $B_K$  величина  $\Delta \mu/\mu$  теж зменшується. При цьому слід зазначити, що величина  $\Delta \mu/\mu$  не залежить від геометрії галузей термоелементів;

- збільшується відносна величина інтенсивності відмов  $\lambda/\lambda_0$  (рис. 7). За заданої величини відносного робочого струму  $B$  величина  $\lambda/\lambda_0$  збільшується при врахуванні перегріву. Для різних  $l/S$  ця різниця ( $[\Delta \lambda/\lambda_0]/[\lambda/\lambda_0]$ , %) для  $B = 1$  становить близько 20%. З ростом  $l/S$  величина  $\lambda/\lambda_0$  збільшується. Зі зменшенням відносного робочого струму  $B$  величина  $[\Delta \lambda/\lambda_0]/[\lambda/\lambda_0]$  теж зменшується;

- зменшується ймовірність безвідмовної роботи  $P$  (рис. 8). За заданої величини відносного робочого струму  $B$  ймовірність безвідмовної роботи  $P$  для різних  $l/S$  при врахуванні перегріву зменшується при розрахунках з урахуванням перегріву. Зі зростанням  $l/S$  ймовірність безвідмовної роботи  $P$  також зменшується;

- збільшується час виходу на стаціонарний режим  $\tau$  (рис. 9) для різної геометрії галузей термоелементів  $l/S$ . При заданій величині відносного робочого струму  $B_K$  з ростом  $l/S$  час виходу на стаціонарний режим  $\tau$  зменшується.

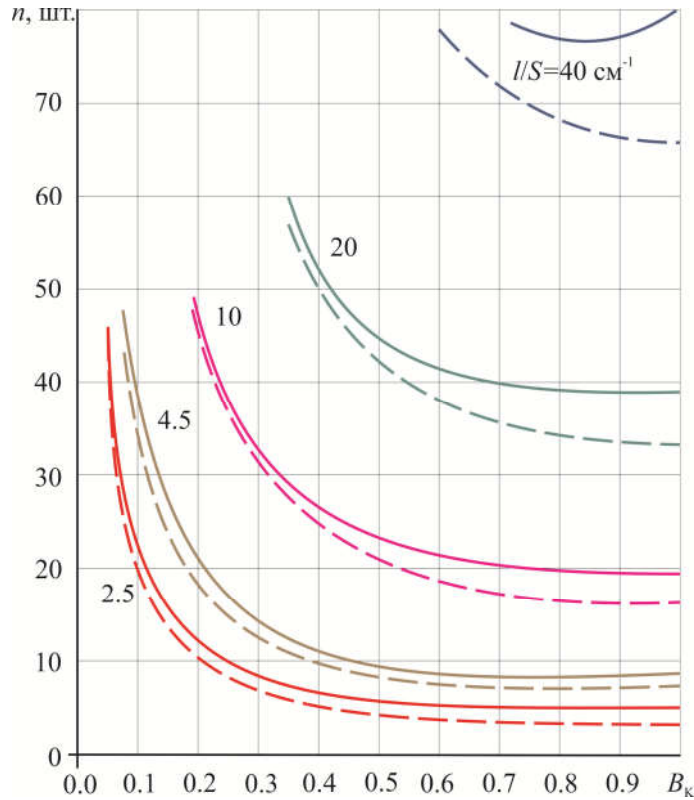


Рис. 5. Залежність кількості термоелементів  $n$  однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса від відносного робочого струму  $V_k$  для різної геометрії гілок термоелементів при  $T = 300 \text{ K}$ ,  $Q_0 = 5,5 \text{ Вт}$ : суцільні лінії – з урахуванням перегріву; пунктир – без врахування перегріву

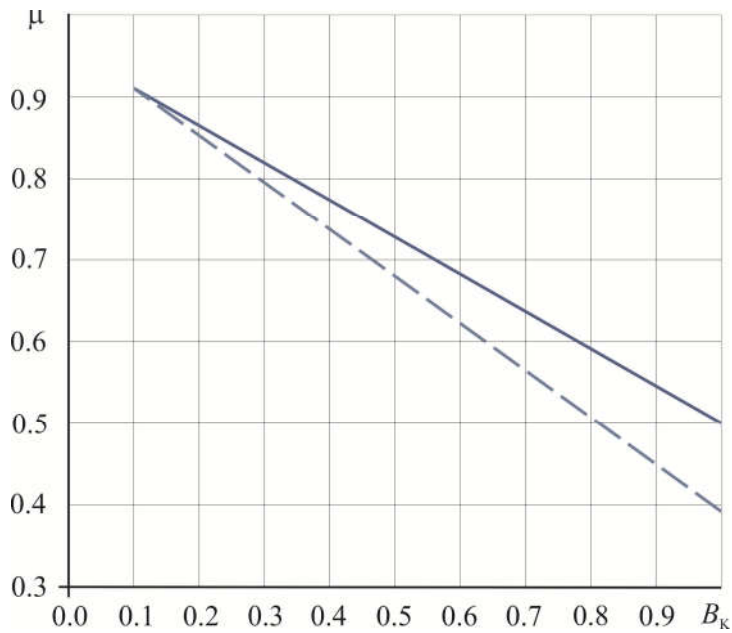


Рис. 6. Залежність теплового коефіцієнта  $\mu$  однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса від відносного робочого струму  $V_k$  при  $T = 300 \text{ K}$ ,  $Q_0 = 5,5 \text{ Вт}$ : суцільна лінія – з урахуванням перегріву; пунктир – без врахування перегріву

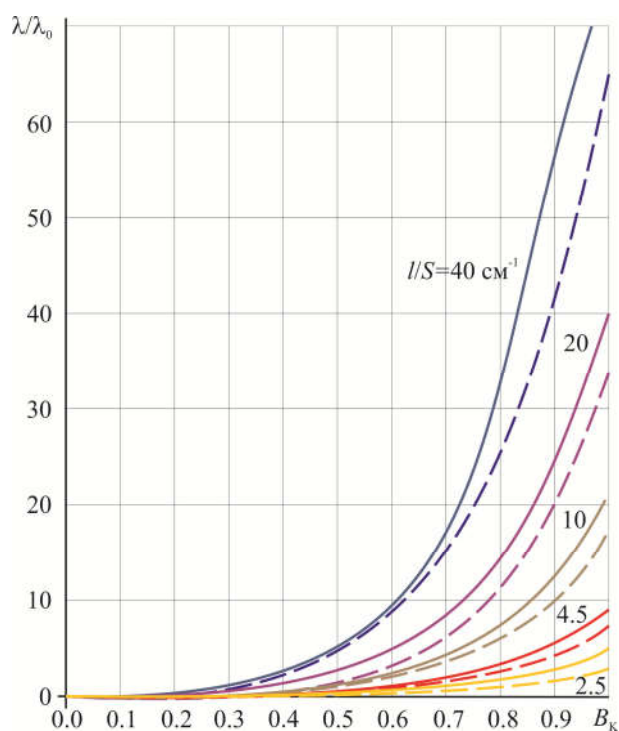


Рис 7. Залежність відносної величини інтенсивності відмов  $\lambda/\lambda_0$  однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса від відносного робочого струму  $V_k$  для різної геометрії гілок термоелементів при  $T = 300\text{ K}$ ,  $Q_0 = 5.5\text{ Вт}$ : суцільні лінії – з урахуванням перегріву; пунктир – без урахування перегріву

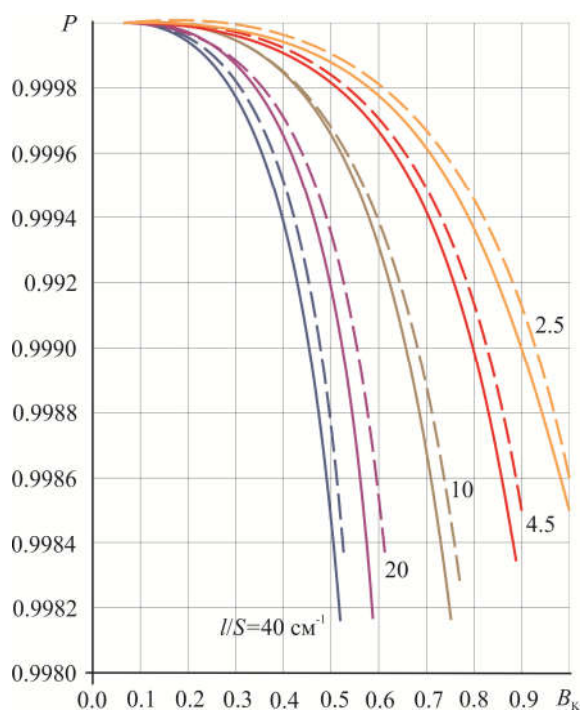


Рис 8. Залежність імовірності безвідмовної роботи  $P$  однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса від відносного робочого струму  $V_k$  для різної геометрії гілок термоелементів при  $T = 300\text{ K}$ ,  $Q_0 = 5.5\text{ Вт}$ ,  $t = 10^4\text{ год}$ : суцільні лінії – з урахуванням перегріву; пунктир – без обліку перегріву

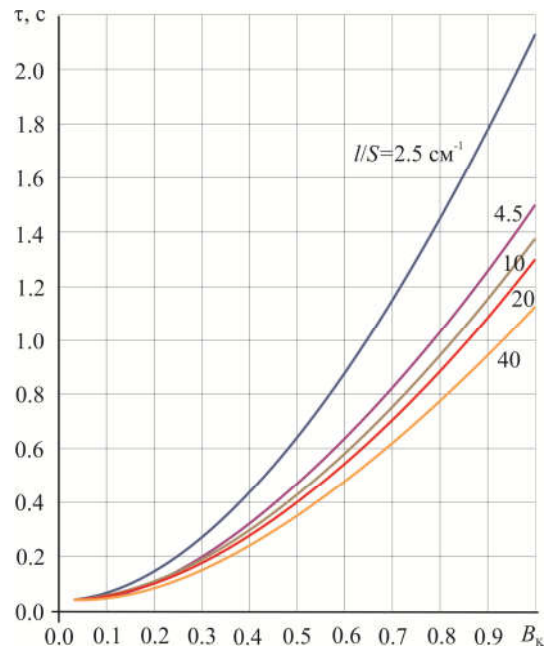


Рис. 9. Залежність часу виходу на стаціонарний режим роботи  $\tau$  однокаскадного ТЕП в режимі теплового насоса від відносного робочого струму  $B_k$  для різної геометрії гілок термоелементів при  $T = 300 \text{ K}$ ,  $Q_0 = 5.5 \text{ Вт}$ : суцільні лінії – з урахуванням перегріву; пунктир – без урахування перегріву

### Обговорення результатів аналізу моделі взаємозв'язки показників надійності, динаміки гілок термоелемента з конструктивними енергетичними параметрами

1) Визначено оптимальну величину відносного робочого струму  $B_{\text{опт}}$ , відповідну до максимуму холодопродуктивності з урахуванням перегріву.

2) З ростом середньооб'ємної температури за заданого теплового навантаження  $Q_0 = 5.5 \text{ Вт}$ :

- збільшується відносний робочий струм  $B_k$ ;
- збільшується відносний перепад температури  $\Theta$ ;
- зменшується тепловий коефіцієнт  $\mu$ ;
- збільшується споживана потужність  $W_k$ ;
- збільшується падіння напруги  $U_k$ ;
- зменшується кількість термоелементів  $n$ ;
- збільшується робочий струм  $I$ ;
- збільшується час виходу на стаціонарний режим роботи  $\tau$ ;
- збільшується відносна величина інтенсивності відмов  $\lambda/\lambda_0$ ;
- зменшується ймовірність безвідмовної роботи  $P$ .

3) Зі зростанням відношення  $l/S$ , яке характеризує геометрію гілок термоелементів, за заданої величини відносного робочого струму  $B_k$  та теплового навантаження  $Q_H$ :

- зменшується час виходу на стаціонарний режим роботи  $\tau$ ;
- збільшується кількість термоелементів  $n$ ;
- збільшується відносна величина інтенсивності  $\lambda/\lambda_0$ ;
- зменшується ймовірність безвідмовної роботи  $P$ .

4) Від геометрії гілок термоелементів ( $l/S$ ) не залежать середньооб'ємна температура  $\bar{T}$ , відносний перепад температури  $\Theta$ , тепловий коефіцієнт  $\mu$ .

## Висновки

1. Визначено взаємозв'язок середньооб'ємної температури  $\bar{T}$  гілки термоелемента й відносного робочого струму  $B_K$  для різної геометрії гілок термоелементів, який дозволяє визначати показники надійності та час виходу на стаціонарний режим.

2. Показано, що при проектуванні термоелектричних охолоджувальних пристроїв у режимі теплового насоса необхідно враховувати вплив середньооб'ємної температури на основні параметри, показники надійності й динаміку функціонування.

## Література

1. Анатычук Л.И. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества. *Термоэлектричество*. 2007. № 2. С.7–20.
2. Rowe D. M. Thermoelectric materials Energy Harvesting. Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics. Boca Raton: CRC Press, 2012. 544 p.
3. Jurgensmeyer A. L. High Efficiency Thermoelectric Devices Fabricated Using Quantum Well Confinement Techniques. Colorado State University, 2011, 54 p.
4. 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. P.320–321.
5. Hyung –Seuk Choi. Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and Physics –of –failure. *Electronic Materials Letter*. 2011. № 7. P. 271.
6. Wereszczak A. A., Wang H. Thermoelectric Mechanical Reliability. *Vehicle Technologies Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting*. – Arlington. 2011. P. 18.
7. Singh, R. Experimental Characterization of Thin Film Thermoelectric Materials and Film Deposition VIA Molecular Beam Epitaxial. University of California, 2008. 54 p.
8. 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). P.170–185.
9. 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.
10. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu. Analysis of relationship between the dynamics of a thermoelectric cooler and its design and modes of operation. *Eastern –European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 1/8 (91). P. 12–24.
11. Зайков В. П., Киншова Л. А., Моисеев В. Ф. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 1. Однокаскадные устройства. Одесса: Политех періодика, 2009. 120 с.
12. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu., Mescheryakov D. Analysis of dynamics and prediction of reliability in dicators of a cooling thermoelement with the predefined geometry of branches. *Eastern –European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 5/8 (95). P. 41–51.

Надійшла до редакції: 19.04.2018

**Зайков В.П.** канд. техн. наук.<sup>1</sup>,  
**Мещеряков В.И.** доктор техн. наук.<sup>2</sup>,  
**Журавлев Ю.И.**<sup>3</sup> канд. техн. наук.

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ШТОРМ,  
ул. Терешковой, 27, Одесса, Украина; *e-mail*: grand@i.ua;  
<sup>2</sup>Одесский государственный экологический университет,  
ул. Львовская, 15, Одесса, Украина; *e-mail*: grand@ua.fm;  
<sup>3</sup>Национальный университет «Одесская морская академия»,  
ул. Дидрихсона, 8, Одесса, Украина; *e-mail*: zhuravlov.y@ya.ru.

### **ВЛИЯНИЕ СРЕДНЕОБЪЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕТВИ ТЕРМОЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ И ДИНАМИКУ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА**

*Рассмотрено влияние среднеобъемной температуры ветви термоэлемента на основные параметры, показатели надежности и динамику функционирования термоэлектрического теплового насоса при заданной тепловой нагрузке для различной геометрии ветвей термоэлементов. Определено соотношение для оценки среднеобъемной температуры в зависимости от относительного рабочего тока и относительного рабочего тока, соответствующего максимуму холодопроизводительности. Показано, что с учетом среднеобъемной температуры уменьшается холодопроизводительность на один термоэлемент, увеличивается относительный перепад температуры, количество термоэлементов при заданной тепловой нагрузке, интенсивность отказов, увеличивается время выхода на стационарный режим работы. Библ. 12, Рис. 9, Табл. 5.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический охладитель, среднеобъемная температура, динамика функционирования термоэлемента, показатели надежности, перепад температур.

**V.P.Zaykov**<sup>1</sup>, *Candidate of Tech. science,*  
**V.I.Mescheryakov**<sup>2</sup>, *Doctor of Tech. science,*  
**Yu. I. Zhuravlov**<sup>3</sup>, *Candidate of Tech. science*

<sup>1</sup>SHTORM Research Institute, 27, Tereshkova str.,  
Odesa, Ukraine; *e-mail*: grand@i.ua;  
<sup>2</sup>Odesa State Ecological University, 15, Lvivska  
str., Ukraine; *e-mail*: grand@ua.fm;  
<sup>3</sup>National University "Odesa Maritime Academy", 8,  
Didrikhson str., Ukraine; *e-mail*: zhuravlov.y@ya.ru.

### **EFFECT OF THE VOLUMETRIC AVERAGE TEMPERATURE OF THERMOELEMENT LEG ON THE BASIC PARAMETERS, RELIABILITY INDICATORS AND DYNAMICS OF THERMOELECTRIC HEAT PUMP OPERATION**

*The effect of the volumetric average temperature of thermoelement leg on the basic parameters, reliability indicators and dynamics of thermoelectric heat pump operation at a given thermal load for different geometry of thermoelement legs is considered. The ratio has been determined to estimate the volumetric average temperature depending on the relative operating current corresponding to the maximum cooling capacity. It is shown that with regard to the volumetric average temperature, the cooling capacity per one thermoelement decreases, the relative temperature difference, the number of thermoelements at a given thermal load, the failure rate, the time to reach steady-state mode of operation increase. Bibl. 12, Fig. 9, tabl. 5.*

**Key words:** thermoelectric cooler, volumetric average temperature, dynamics of thermoelement operation, reliability indicators, temperature difference.

## References

1. Anatyshuk L.I. (2007). The current state and some perspectives of thermoelectricity. *J. Thermoelectricity*, 2, 7–20.
2. Rowe D. M. (2012). *Thermoelectrics and its Energy Harvesting. Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics*. Boca Raton: CRC Press.
3. Jurgensmeyer A. L. (2011). *High efficiency thermoelectric devices fabricated using quantum well confinement techniques*. Colorado State University.
4. 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*.
5. Hyung –Seuk Choi. (2011). Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and Physics –of –failure. *Electronic Materials Letters*, 7, 271.
6. Wereszczak A. A., Wang H. (2011). Thermoelectric mechanical reliability. *Vehicle Technologies Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. – Arlington*.
7. Singh, R. (2008). *Experimental characterization of thin film thermoelectric materials and film deposition via molecular beam epitaxial*. University of California.
8. 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.
9. Zaykov 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.
10. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu. (2018). Analysis of relationship between the dynamics of a thermoelectric cooler and its design and modes of operation. *Eastern –European Journal of Enterprise Technologies*, 1/8 (91), 12–24.
11. 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.
12. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu., Mescheryakov D. (2018). Analysis of dynamics and prediction of reliability indicators of a cooling thermoelement with the predefined geometry of branches. *Eastern –European Journal of Enterprise Technologies*, 5/8 (95), 41–51.

Submitted 19.04.2018