

УДК 621.362.192

**В.П. Зайков<sup>1</sup>, В.И. Мещеряков<sup>2</sup>, Ю.И. Журавлев<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт ШТОРМ, Терешковой, 27, Одесса, 65012, Украина<sup>2</sup> Одесский государственный экологический университет, Львовская, 15, Одесса, 65016, Украина**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОДНОКАСКАДНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ СОЧЕТАНИЙ ПАРАМЕТРОВ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ОДИНАКОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

*Рассмотрены возможности повышения показателей надежности однокаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства при использовании различных вариантов сочетаний усредненных параметров исходных материалов одинаковой эффективности, а именно, коэффициента термоЭДС и электропроводности. Показана возможность уменьшения интенсивности отказов за счет использования исходных материалов с большей электропроводностью.*

**Ключевые слова:** Надежность – Термоэлектрические устройства – Материалы – Интенсивность отказов – Холодопроизводительность

**В.П. Зайков<sup>1</sup>, В.И. Мещеряков<sup>2</sup>, Ю.И. Журавлев<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Науково-дослідний інститут ШТОРМ, Терешкової, 27, Одеса, 65012, Україна<sup>2</sup> Одеський державний екологічний університет, Львівська, 15, Одеса, 65016, Україна**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ОДНОКАСКАДНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ОХОЛОДЖУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ РІЗНИХ ВАРІАНТІВ СПОЛУЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ПЕРВИННИХ МАТЕРІАЛІВ ОДНАКОВОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ**

*Розглянуті можливості підвищення показників надійності одно каскадного термоелектричного охолоджуючого пристрою при використанні різних варіантів сполучень усереднених параметрів первинних матеріалів однакової ефективності, а саме, коефіцієнту термоЕДС і електропровідності. Показана можливість зменшення інтенсивності відмов за рахунок використання первинних матеріалів з більшою електропровідністю*

**Ключові слова:** Надійність – Термоелектричні пристрої – Матеріали – Інтенсивність відмов – Холодопродуктивність

DOI: 10.15673/0453-8307.3/2015.39279



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>**I. ВВЕДЕНИЕ**

Повышение надежности ТЭУ неразрывно связано с повышением качества исходных термоэлектрических материалов и, в первую очередь их эффективности [1]. Как показала мировая практика термоэлектрического приборостроения, существенно повысить уровень эффективности термоэлектрических материалов в настоящее время не представляется возможным.

В то же время, при одной и той же эффективности исходных материалов можно выбрать такие варианты сочетаний усредненных параметров, а именно: коэффициента термоЭДС  $\bar{\epsilon}$  и электропроводности  $\bar{\sigma}$ , которые позволяют повысить показатели надежности, т.е. уменьшить интенсивность отказов  $\lambda$  и увеличить вероятность безотказной работы  $P$  ТЭУ.

**II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Целью настоящей работы является анализ основных параметров и показателей надежности однокаскадных ТЭУ, собранных из различных исходных материалов, для определения возможности уменьшения интенсивность отказов  $\lambda$  и увеличения вероятность безотказной работы  $P$ .

Номинальный разброс параметров ветвей термоэлементов, предназначенный для изготовления термоэлектрических модулей, лежит в пределах следующих усредненных значений электропроводности  $\bar{\sigma}$  и коэффициента термоЭДС  $\bar{\epsilon}$  при нормальных температурах [2]:  $\bar{\epsilon} = 220 \pm 180$  мкВ/К;  $\bar{\sigma} = 800 \pm 1200$  См/см при эффективности исходных материалов  $\bar{z}_M$  на уровне  $2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К при  $T=300$ К.

В то же время возможный диапазон изменения параметров при изготовлении термоэлектрических материалов значительно шире и может находиться в следующих пределах при нормальной температуре:  $\bar{\epsilon} = 250 \div 165$  мкВ/К;  $\bar{\sigma} = 550 \div 1500$  См/см.

Материалы с такими граничными параметрами заведомо считались некондиционными и при

изготовлении модулей не использовались.

Рассмотрим возможные (полученные экспериментально) варианты сочетания параметров исходных термоэлектрических материалов в модуле при  $T = 300$  К,  $\bar{z}_M = 2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К,  $l/s = 10$  и  $\Delta T = 0$ , приведенные в таблице 1, с целью возможного их использования для построения ТЭУ повышенной надежности.

Таблица 1

Номер варианта сочетания	$\bar{\epsilon}$ , мкВ/К	$\bar{\sigma}$ , См/см	$\bar{x} \cdot 10^3$ , Вт/см	$\bar{\epsilon}^2 \bar{\sigma} \cdot 10^4$ , Вт/К <sup>2</sup> см	$\gamma = e^2 \sigma T_0^2 \frac{s}{l}$ , Вт
1	250	550	14,3	0,344	0,310
2	210	800	14,7	0,353	0,318
3	200	900	15,0	0,360	0,325
4	180	1200	16,0	0,390	0,351
5	165	1500	17,0	0,410	0,370

Использование в качестве основных значимых параметров термоэлектрических материалов  $\bar{\epsilon}$  и  $\bar{\sigma}$  дает достаточно полную информацию об охлаждающих возможностях собранных на их основе модулей.

Следует отметить, что приведенные в таблице 1 варианты сочетаний параметров термоэлектрических материалов имеют практически одну и ту же эффективность при нормальной температуре, которая составляет  $\bar{z}_M = 2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К от  $T = 300$ К (для условий серийного производства).

### III. МОДЕЛЬ ВЗАИМОСВЯЗИ

Рассмотрим модель взаимосвязи основных характеристик ТЭУ и показателей надежности с параметрами исходного материала  $\bar{\epsilon}$  и  $\bar{\sigma}$  и температурой теплопоглощающего спая  $T_0$

Холодопроизводительность ТЭУ  $Q_0$  можно записать в виде [3]:

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

где  $n$  – количество термоэлементов, шт.,

$I_{\max} = \frac{e T_0}{R} = e \sigma T_0 \frac{s}{l}$  – максимальный рабочий ток, А,

$R = \frac{l}{\sigma s}$  – электрическое сопротивление ветви

термоэлемента, Ом,

$\frac{l}{s}$  – отношение высоты к площади поперечного сечения ветви термоэлемента, см<sup>-1</sup>,

$B = \frac{I}{I_{\max}}$  – относительный рабочий ток,

$\Theta = \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}}$  – относительный перепад температуры,

$\Delta T_{\max} = 0,5 \bar{z} T_0^2$  – максимальный перепад температуры, К,

$\Delta T = T - T_0$  – рабочий перепад температуры, К,  
 $T$  – температура тепловыделяющего спая, К.

Выражение (1) можно записать в виде:

$$Q_0 = n \gamma (2B - B^2 - \Theta), \quad (2)$$

где  $\gamma = e^2 \sigma T_0^2 \frac{s}{l}$  – максимальная термоэлектрическая мощность охлаждающего термоэлемента, Вт.

Тогда, холодопроизводительность ТЭУ прямо пропорциональна количеству термоэлементов  $n$ , максимальной термоэлектрической мощности охлаждения  $\gamma$  и зависит от режима работы  $B$  (относительного рабочего тока) и относительного перепада температуры  $\Theta$ .

В режиме  $Q_{0\max}$ : при  $B = 1$ ,  $\Delta T \rightarrow 0$ ,  $\Theta \rightarrow 0$  выражение (2) можно представить в виде:

$$Q_{0\max} = n \gamma. \quad (3)$$

Мощность потребления ТЭУ можно записать в виде:

$$W = 2n \gamma B \left( B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right). \quad (4)$$

Таким образом, мощность потребления ТЭУ прямо пропорциональна величине  $\gamma$ .

Холодильный коэффициент определяется известным выражением [3]:

$$E = \frac{Q_0}{W} = \frac{2B - B^2 - \Theta}{2B \left( B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right)} \quad (5)$$

и не зависит от  $\gamma$ .

Относительную величину интенсивности отказов можно записать в виде [3]:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{nB^2(\Theta + C)(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\Theta)}{(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\Theta)} K_T, \quad (6)$$

где  $C = \frac{Q_0}{nI_{\max}^2 R} = \frac{Q_0}{n\gamma}$  – относительная величина

на тепловой нагрузке,

$\lambda_0$  – номинальная интенсивность отказов, 1/час,

$K_T$  – коэффициент значимости, зависящий от температуры.

Вероятность безотказной работы  $P$  можно определить по известной формуле:  $P = e^{-\lambda t}$ , (7)

где  $t$  – ресурс, час.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Данные расчетов основных параметров однокаскадного ТЭУ и показателей надежности для различных режимов работы:  $Q_{0\max}$

$\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\max}$ ;  $\left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{\max}$ ;  $\lambda_{\min}$  при следующих ис-

ходных данных:

- требуемая холодопроизводительность либо мощность теплонатеканий  $Q_0 = 2,0$  Вт,

- температура тепловыделяющего спая  $T = 300$ К,

- перепад температур  $\Delta T = 0$ К; 20К; 40К; 60К,

- усредненная термоэлектрическая эффективность  $\bar{z}_M = 2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К,

-  $1/s = 10$ ;  $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$  1/час,

сведены в таблицы 2-5.

Таблица 2

а) Режим  $Q_{0\max}$  ( $B = 1,0$ )

Сочетания	$\bar{e} \cdot 10^4$ , В/к	$\bar{\sigma}$ , См/см	$\bar{x} \cdot 10^3$ Вт/см К	$\gamma$ , Вт	$\frac{Q_0}{n}$	$I_{\max}$ , А	$I$ , А	$n$ , шт.	$\frac{\lambda}{\lambda_0}$	$\lambda_{\Sigma}$ , 1/час	$P$
$\Delta T=0$ ; $\Theta=0$ ; $\bar{z}_M = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\Delta T_{\max} = 108$ К; $W=4,0$ Вт; $E=0,5$ ; $K_T = 1,0$ ; $B=1,0$ .											
1	2,50	550	14,3	0,310	0,310	4,1	4,1	6,5	6,5	19,4	0,99806
2	2,10	800	14,7	0,318	0,318	5,0	5,0	6,3	6,3	18,9	0,99811
3	2,00	900	15,0	0,324	0,324	5,4	5,4	6,2	6,2	18,6	0,99814
4	1,80	1200	16,2	0,350	0,350	6,5	6,5	5,7	5,7	17,1	0,99830
5	1,65	1500	17,0	0,368	0,368	7,4	7,4	5,4	5,4	16,2	0,99840
$\Delta T=20$ К; $\bar{z}_M = 2,38 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\Theta=0,214$ ; $\Delta T_{\max} = 93,3$ К; $W=5,45$ Вт; $E=0,37$ ; $K_T = 1,011$ ; $B=1,0$ .											
1	2,45	570	14,4	0,268	0,21	3,9	3,9	9,5	9,6	28,8	0,99710
2	2,07	840	15,1	0,282	0,22	4,9	4,9	9,0	9,1	27,3	0,99727
3	1,97	940	15,3	0,286	0,225	5,2	5,2	8,9	9,0	27,0	0,99730
4	1,76	1250	16,3	0,304	0,24	6,2	6,2	8,4	8,5	25,5	0,99750
5	1,61	1570	17,1	0,319	0,25	7,1	7,1	8,0	8,1	24,3	0,99757
$\Delta T=40$ К; $\bar{z}_M = 2,37 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\Theta=0,5$ ; $\Delta T_{\max} = 79,8$ К; $W=9,2$ Вт; $E=0,22$ ; $K_T = 1,022$											
1	2,40	620	15,1	0,241	0,121	3,9	3,9	16,6	17,0	51,0	0,99491
2	2,05	860	15,3	0,244	0,122	4,6	4,6	16,4	16,8	50,4	0,99497
3	1,94	980	15,6	0,249	0,125	4,9	4,9	16,0	16,4	49,2	0,99510
4	1,75	1270	16,5	0,263	0,131	5,8	5,8	15,2	15,5	46,5	0,99536
5	1,58	1620	17,1	0,273	0,137	6,7	6,7	14,6	14,9	44,7	0,99554
$\Delta T=60$ К; $\bar{z}_M = 2,32 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\Theta=0,9$ ; $\Delta T_{\max} = 66,8$ К; $W=50$ Вт; $E=0,04$ ; $K_T = 1,035$											
1	2,35	640	15,2	0,204	0,020	3,6	3,6	98,2	101,6	304,8	0,97000
2	2,0	900	15,5	0,207	0,021	4,3	4,3	96,4	99,8	299,4	0,97050
3	1,89	1030	15,9	0,212	0,0212	4,7	4,7	94,4	97,7	293,1	0,97112
4	1,70	1300	16,2	0,216	0,0216	5,3	5,3	92,4	95,6	286,8	0,97173
5	1,54	1700	17,4	0,232	0,023	6,3	6,3	86,1	89,1	267,3	0,97362

**Таблиця 3** б) Режим  $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\max}$

Сочетания	$\bar{e} \cdot 10^4$ , В/к	$\bar{\sigma}$ , См/см	$\bar{\alpha} \cdot 10^3$ , Вт/смК	$\gamma$ , Вт	$\frac{Q_0}{n}$	$I_{\max}$ , А	$I$ , А	п, шт.	$\frac{\lambda}{\lambda_0}$	$\lambda_{\Sigma}$ , 1/час	P
$\Delta T=20$ К; $B=0,46$ ; $\bar{z}_M = 2,38 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\Theta=0,214$ ; $\Delta T_{\max} = 93,3$ К; $W=2,0$ Вт; $E=1$ ; $K_T = 1,011$											
1	2,45	570	14,4	0,268	0,133	3,9	1,80	15,1	0,562	1,69	0,99983
2	2,07	840	15,1	0,282	0,14	4,9	2,25	14,3	0,533	1,60	0,99984
3	1,97	940	15,3	0,286	0,142	5,2	2,4	14,1	0,526	1,58	0,99984
4	1,76	1250	16,3	0,304	0,151	6,2	2,8	13,3	0,496	1,49	0,99985
5	1,61	1570	17,1	0,319	0,159	7,1	3,3	12,7	0,474	1,42	0,99986
$\Delta T=40$ К; $B=0,71$ ; $\bar{z}_M = 2,37 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\Theta=0,5$ ; $\Delta T_{\max} = 79,8$ К; $W=5,9$ Вт; $E=0,34$ ; $K_T = 1,022$											
1	2,40	620	15,1	0,241	0,100	3,9	2,8	19,9	5,25	15,75	0,99843
2	2,05	860	15,3	0,244	0,1005	4,6	3,3	19,7	5,20	15,6	0,99844
3	1,94	980	15,6	0,249	0,1025	4,9	3,5	19,3	5,09	15,3	0,99847
4	1,75	1270	16,5	0,263	0,1083	5,8	4,1	18,3	4,83	14,5	0,99855
5	1,58	1620	17,1	0,273	0,112	6,7	4,7	17,6	4,64	13,9	0,99861
$\Delta T=60$ К; $B=0,95$ ; $\bar{z}_M = 2,32 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\Theta=0,9$ ; $\Delta T_{\max} = 66,8$ К; $W=46,9$ Вт; $E=0,043$ ; $K_T = 1,035$											
1	2,35	640	15,2	0,204	0,0194	3,6	3,4	100,6	86,4	259,2	0,97441
2	2,0	900	15,5	0,207	0,0197	4,3	4,1	99,1	85,1	255,3	0,97479
3	1,89	1030	15,9	0,212	0,0201	4,7	4,5	96,8	83,2	249,6	0,97535
4	1,70	1300	16,2	0,216	0,0205	5,3	5,0	95,0	81,6	244,8	0,97582
5	1,54	1700	17,4	0,232	0,0220	6,3	6,0	88,4	76,0	228,0	0,97746

**Таблиця 4** в) Режим  $\left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{\max}$

Сочетания	$\bar{e} \cdot 10^4$ , В/к	$\bar{\sigma}$ , См/см	$\bar{\alpha} \cdot 10^3$ , Вт/смК	$\gamma$ , Вт	$\frac{Q_0}{n}$	$I_{\max}$ , А	$I$ , А	п, шт.	$\frac{\lambda}{\lambda_0}$	$\lambda_{\Sigma}$ , 1/час	P
$\Delta T=20$ К; $B=0,214$ ; $\bar{z}_M = 2,38 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\Theta=0,214$ ; $\Delta T_{\max} = 93,3$ К; $W=1,45$ Вт; $E=1,38$ ; $K_T = 1,011$											
1	2,45	570	14,4	0,268	0,045	3,9	0,84	44,4	0,0555	0,166	0,99998
2	2,07	840	15,1	0,282	0,0474	4,9	1,00	42,2	0,53	0,159	0,99998
3	1,97	940	15,3	0,286	0,0481	5,2	1,10	41,6	0,052	0,156	0,99998
4	1,76	1250	16,3	0,304	0,0511	6,2	1,33	39,1	0,049	0,147	0,99998
5	1,61	1570	17,1	0,319	0,0536	7,1	1,52	37,3	0,0466	0,140	0,99998
$\Delta T=40$ К; $B=0,5$ ; $\bar{z}_M = 2,37 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\Theta=0,5$ ; $\Delta T_{\max} = 79,8$ К; $W=5,2$ Вт; $E=0,39$ ; $K_T = 1,022$											
1	2,4	620	15,1	0,241	0,060	3,9	1,95	33,1	2,03	6,09	0,99939
2	2,05	860	15,3	0,244	0,061	4,6	2,30	32,8	2,00	6,0	0,99940
3	1,94	980	15,6	0,249	0,062	4,9	2,45	32,1	1,965	5,895	0,99941
4	1,75	1270	16,5	0,263	0,065	5,8	2,9	30,4	1,86	5,58	0,99944
5	1,58	1620	17,1	0,273	0,068	6,7	3,35	29,3	1,79	5,37	0,99946
$\Delta T=60$ К; $B=0,9$ ; $\bar{z}_M = 2,32 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\Theta=0,9$ ; $\Delta T_{\max} = 66,8$ К; $W=46,1$ Вт; $E=0,043$ ; $K_T = 1,035$											
1	2,35	640	15,2	0,204	0,0184	3,6	3,2	108,9	76,5	229,6	0,97730
2	2,00	900	15,5	0,207	0,0186	4,3	3,9	107,4	75,5	226,5	0,97760
3	1,89	1030	15,9	0,212	0,0191	4,7	4,2	104,8	73,7	221,1	0,97813
4	1,70	1300	16,2	0,216	0,0194	5,3	4,8	102,9	72,3	216,9	0,97854
5	1,54	1700	17,4	0,232	0,0209	6,3	5,7	95,8	67,3	201,9	0,9800

Таблиця 5

г) Режим  $\lambda_{\min}$ 

Соче-та-ня	$\bar{e} \cdot 10^4$ , В/к	$\bar{\sigma}$ , См/см	$\bar{\alpha} \cdot 10^3$ , Вт/смК	$\gamma$ , Вт	$\frac{Q_0}{n}$	$I_{\max}$ , А	$I$ , А	$n$ , шт.	$\frac{\lambda}{\lambda_0}$	$\lambda_{\Sigma}$ , 1/час	$P$
$\Delta T=20$ К; $B=0,16$ ; $\bar{z}_M = 2,38 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\Theta=0,214$ ; $\Delta T_{\max} = 93,3$ К; $W=1,84$ Вт; $E=1,09$ ; $K_T = 1,011$											
1	2,45	570	14,4	0,268	0,0215	3,9	0,62	92,8	0,033	0,1	0,9999900
2	2,07	840	15,1	0,282	0,0227	4,9	0,78	88,2	0,0312	0,0936	0,9999906
3	1,97	940	15,3	0,286	0,023	5,2	0,83	87,0	0,0308	0,0923	0,9999908
4	1,76	1250	16,3	0,304	0,024	6,2	1,00	81,8	0,0289	0,0868	0,9999913
5	1,61	1570	17,1	0,319	0,0256	7,1	1,14	78,0	0,0276	0,0828	0,9999917
$\Delta T=40$ К; $B=0,41$ ; $\bar{z}_M = 2,37 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\Theta=0,5$ ; $\Delta T_{\max} = 79,8$ К; $W=6,0$ Вт; $E=0,33$ ; $K_T = 1,022$											
1	2,4	620,0	15,1	0,241	0,0366	3,9	1,60	54,6	1,45	4,35	0,999565
2	2,05	860,0	15,3	0,244	0,037	4,6	1,90	54,0	1,43	4,29	0,999571
3	1,94	980,0	15,6	0,249	0,0378	4,9	2,00	52,9	1,40	4,215	0,999578
4	1,75	1270	16,5	0,263	0,04	5,8	2,40	50,0	1,33	3,99	0,99960
5	1,58	1620	17,1	0,273	0,0415	6,7	2,75	48,2	1,28	3,84	0,999616
$\Delta T=60$ К; $B=0,84$ ; $\bar{z}_M = 2,32 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\Theta=0,9$ ; $\Delta T_{\max} = 66,8$ К; $W=49,3$ Вт; $E=0,041$ ; $K_T = 1,035$											
1	2,35	640,0	15,2	0,204	0,0152	3,6	3,0	131,8	71,3	213,9	0,978837
2	2,00	900,0	15,5	0,207	0,0154	4,3	3,6	130,0	70,3	210,9	0,979130
3	1,89	1030	15,9	0,212	0,0158	4,7	4,0	126,8	68,6	205,8	0,979630
4	1,70	1300	16,2	0,216	0,0161	5,3	4,4	124,5	67,4	202,2	0,979983
5	1,54	1700	17,4	0,232	0,0173	6,3	5,3	115,9	62,7	188,1	0,981366

## V. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Максимальная термоэлектрическая мощность охлаждения определяется параметрами исходных термоэлектрических материалов  $\bar{e}$  и  $\bar{\sigma}$  (варианты сочетаний (1 – 5)), температурой  $T_0$  и отношением  $l/s$  (геометрией ветви термоэлемента).

С ростом отношения  $l/s$  величина термоэлектрической мощности охлаждения уменьшается для любого варианта сочетания параметров (1 – 5) исходных материалов при заданном перепаде температур  $\Delta T$  с учетом температурной зависимости параметров (Рис. 1).

С ростом перепада температуры  $\Delta T$  величина  $\gamma$  уменьшается для различных сочетаний параметров исходных материалов (1 – 5) и  $l/s$  (Рис. 1).

С ростом величины  $\gamma$  холодопроизводительность в расчете на один термоэлемент  $\frac{Q_0}{n}$  увеличивается для любого перепада температуры  $\Delta T$  и режима работы. С ростом перепада температуры  $\Delta T$  величина холодопроизводительности на один термоэлемент  $\frac{Q_0}{n}$  уменьшается для любого варианта сочетания параметров исходных материалов (1 – 5) (Рис. 2а) в режиме  $Q_{0\max}$  при  $l/s = 10$  (Рис. 2а).

Наибольший прирост  $\frac{Q_0}{n}$  наблюдается при  $\Delta T \rightarrow 0$

и составляет 14% для варианта (5) по отношению к (3) в режиме  $Q_{0\max}$  при  $l/s = 10$  (Рис. 2а).

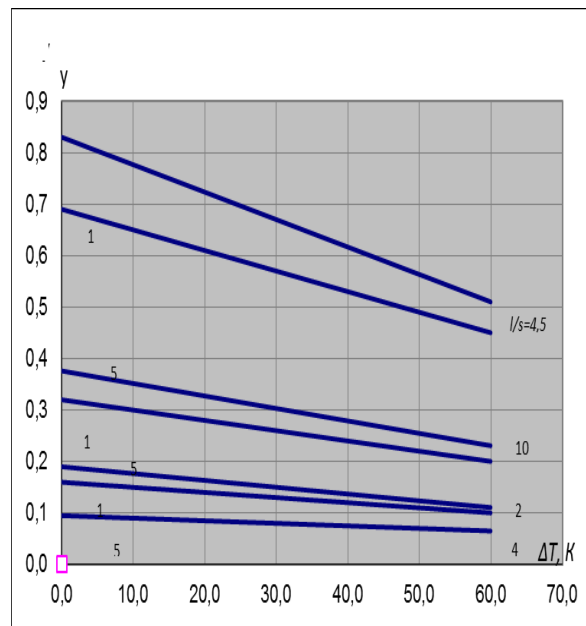
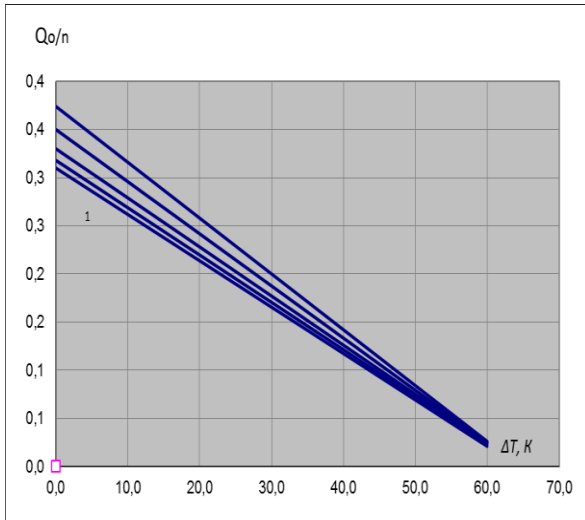


Рисунок 1 – Зависимость термоэлектрической мощности охлаждения  $\gamma$  от перепада температур  $\Delta T$  для различных вариантов сочетаний параметров исходных материалов (1 – 5) при  $T = 300$  К,  $\bar{z}_M = 2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К,  $Q_0 = 2,0$  Вт



**Рисунок 2а** – Зависимость величины  $\frac{Q_0}{n}$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  для различных вариантов сочетаний исходных материалов (1 – 5) при  $T = 300$  К,  $\bar{z}_M = 2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К,  $l/s = 10$  в режиме  $Q_{0\max}$ .

Функциональная зависимость величины холодопроизводительности на один термоэлемент  $\frac{Q_0}{n}$  от перепада температуры  $\Delta T$  имеет максимум в точке  $\Delta T = 20$  К для режима  $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\max}$  и в точке  $\Delta T = 40$  К для режима  $\left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{\max}$  (Рис. 2б).

Наибольший прирост холодопроизводительности  $\frac{Q_0}{n}$  имеет место для режима  $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\max}$  при  $\Delta T = 20$  К и составляет 12% для варианта (5) по сравнению с (3) – для режима  $\left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{\max}$  при  $\Delta T = 40$  К и составляет 9% для варианта (5) по сравнению с (3).

Набольшый прирост холодопроизводительности  $\frac{Q_0}{n}$  имеет место: при  $\Delta T = 40$  К и составляет 10% для варианта (5) по сравнению с (3).

Анализ результатов расчетов основных значимых параметров и показателей надежности ТЭУ при использовании различных исходных материалов показал, что с ростом перепада температуры  $\Delta T$ :

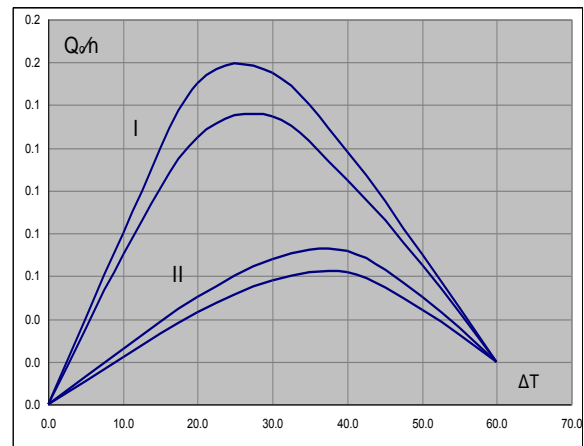
- величина максимального перепада температуры  $\Delta T_{\max}$  уменьшается для всех режимов работы и не зависит от варианта сочетания параметров исходного материала (1 – 5);
- величина относительного перепада температуры  $\Theta$  увеличивается для всех режимов работы и не

зависит от варианта сочетания параметров исходного материала (1 – 5);

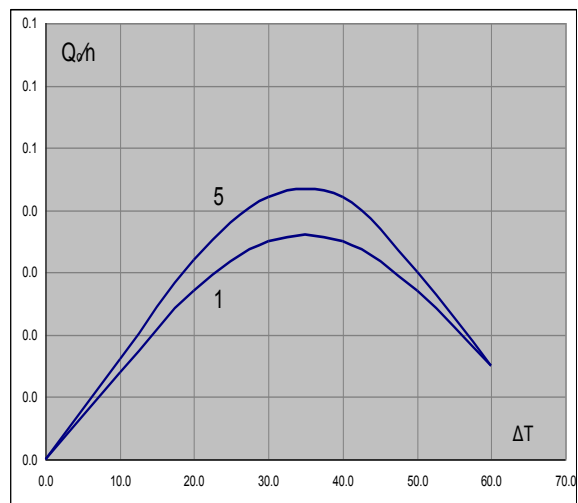
- величина максимального рабочего тока  $I_{\max}$  уменьшается для различных вариантов сочетаний (1 – 5).

Величина максимального рабочего тока  $I_{\max}$  не зависит от режима работы ТЭУ:

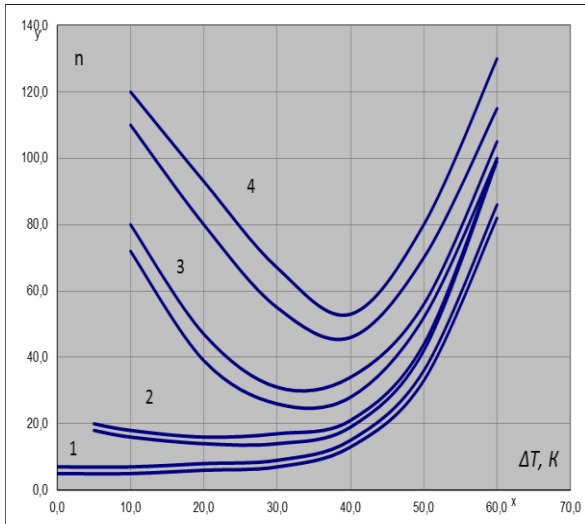
- величина рабочего тока  $I$  уменьшается для всех вариантов сочетаний параметров исходных материалов (1 – 5) для режима –  $Q_{0\max}$ , а для режима  $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\max}$  величина рабочего тока  $I$  увеличивается для всех вариантов (1 – 5);



**Рисунок 2б** – Зависимость величины  $\frac{Q_0}{n}$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  для различных вариантов сочетаний исходных материалов (1 – 5) при  $T = 300$  К,  $\bar{z}_M = 2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К,  $l/s = 10$  в режиме  $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\max}$

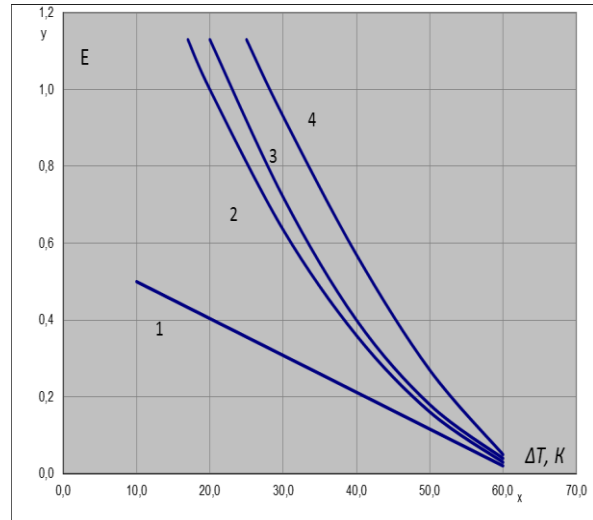


**Рисунок 2в** – Зависимость величины  $\frac{Q_0}{n}$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  для различных вариантов сочетаний исходных материалов (1 – 5) при  $T = 300$  К,  $\bar{z}_M = 2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К,  $l/s = 10$  в режиме  $\lambda_{\min}$

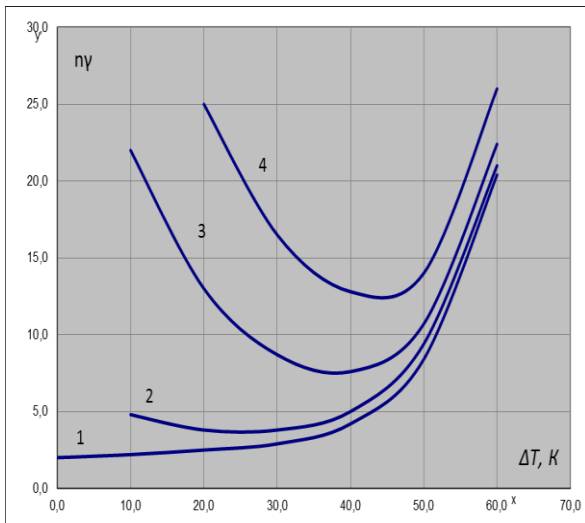


**Рисунок 3** – Зависимость количества термоэлементов  $n$  от перепада температуры  $\Delta T$  для различных вариантов сочетаний исходных материалов (1 – 5) при  $T = 300$  К,  $\bar{z}_M = 2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К,  $l/s = 10$  в режиме  $Q_{0\max}$ .

$$1 - Q_{0\max}; 2 - \left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\max}; 3 - \left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{\max}; 4 - \lambda_{\min}$$

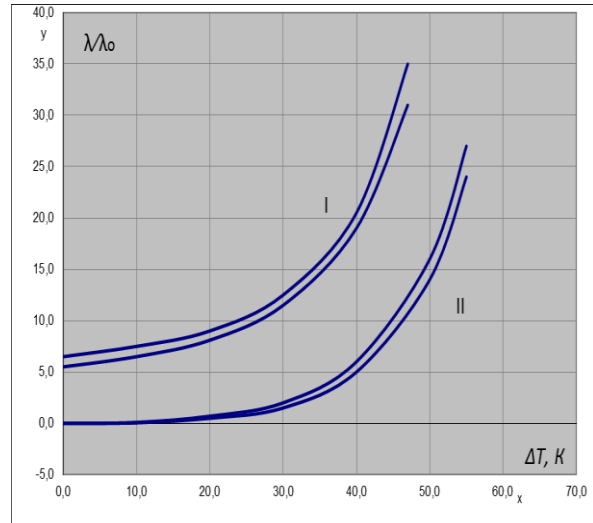


**Рисунок 5** – Зависимость холодильного коэффициента  $E$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1 – 5) при  $T = 300$  К,  $\bar{z}_M = 2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К,  $l/s = 10$   $Q_0 = 2,0$  Вт в режиме от  $Q_{0\max}$  до  $\lambda_{\min}$



**Рисунок 4** – Зависимость величины  $n\gamma$  перепада температуры  $\Delta T$  однокаскадного ТЭУ режимов работы охлаждающего термоэлемента от  $Q_{0\max}$  до  $\lambda_{\min}$  для различных вариантов сочетаний исходных материалов (1 – 5) при  $T = 300$  К,  $\bar{z}_M = 2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К,  $l/s = 10$ ,  $Q_0 = 2,0$  Вт

$$1 - Q_{0\max}; 2 - \left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\max}; 3 - \left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{\max}; 4 - \lambda_{\min}$$



**Рисунок 6** – Зависимость относительной величины интенсивности отказов  $\lambda\lambda_0$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  для режимов работы I -  $Q_{0\max}$ , II - режим  $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\max}$  для различных вариантов сочетаний параметров (1 – 5) при  $T = 300$  К,  $\bar{z}_M = 2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К,  $l/s = 10$   $Q_0 = 2,0$  Вт



- величина рабочего тока  $I$  увеличивается для всех вариантов (1 – 5) для режимов  $\left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{\max}$  и  $\lambda_{\min}$ .

Величина относительного рабочего тока  $B$ :  
- остается практически неизменной в режиме  $Q_{0\max}$  ( $B = 1$ ) и не зависит от варианта сочетания параметров исходного материала (1–5);

- увеличивается для режима  $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\max}$ ;  $\left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{\max}$ ;  $\lambda_{\min}$  и не зависит от варианта сочетания параметров исходного материала (1 – 5).

Функциональная зависимость количества термоэлементов  $n$  от перепада температуры  $\Delta T$  в ТЭУ увеличивается с ростом перепада температуры  $\Delta T$  в режиме  $Q_{0\max}$  (Рис. 3) и имеет максимум:

в точке  $\Delta T = 20$  К в режиме  $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\max}$ , в точке  $\Delta T$

$= 40$  К в режиме  $\left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{\max}$  и в точке  $\Delta T = 45$  К в

режиме  $\lambda_{\min}$  (Рис. 3).

Кроме того, используя принцип суперпозиции можно дополнительно уменьшить количество термоэлементов  $n_{\min}$  в ТЭУ, за счет использования варианта (5) сочетания параметров исходного материала, что позволяет дополнительно уменьшить количество термоэлементов в ТЭУ: для режима

$Q_{0\max}$  на 12%;  $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\max}$  – на 10%;  $\left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{\max}$  – на

12%;  $\lambda_{\min}$  – на 13%.

Функциональная зависимость  $n\gamma = f(\Delta T)$  (Рис. 4) имеет экстремум (минимум) для различных режимов работы ТЭУ при оптимальном перепаде температуры  $\Delta T_{\text{опт}}$ .

С ростом перепада температуры, особенно при  $\Delta T > 50$  К для всех режимов наблюдается резкий рост величины  $n\gamma$ .

Для режимов работы  $Q_{0\max}$  до  $\lambda_{\min}$  функция  $n\gamma = f(\Delta T)$  имеет минимумы для различных  $\Delta T$ .

Это легко показать из условия:  
$$\frac{d\left(\frac{n\gamma}{Q_0}\right)}{d\Theta} = 0$$
 для различных режимов работы охлаждающего термоэлемента.

Это позволяет определить оптимальный перепад температуры, позволяющей обеспечить минимальное количество термоэлементов при различных вариантах сочетаний для различных режимов работы ТЭУ.

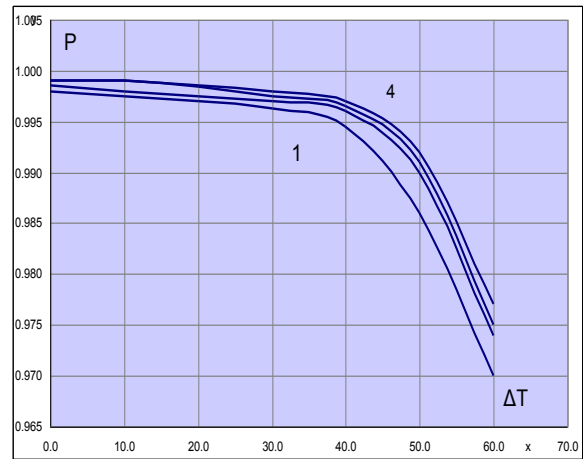
С ростом перепада температуры  $\Delta T$ :  
- величина холодильного коэффициента  $E$  ТЭУ уменьшается для режима  $Q_{0\max}$ ;  $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\max}$ ;

$\left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{\max}$ ;  $\lambda_{\min}$  и не зависит от варианта сочетания параметров исходного материала (1 – 5) (Рис. 5).

С ростом перепада температуры  $\Delta T$  интенсивность отказов  $\lambda$  увеличивается (Рис. 6) для всех режимов работы.

Следует отметить, что вероятность безотказной работы  $P$  увеличивается с ростом величины  $\gamma$  для различных вариантов сочетания параметров (1 – 5) при заданном перепаде температуры  $\Delta T$  для различных режимов работы ТЭУ.

С ростом перепада температуры  $\Delta T$  вероятность безотказной работы  $P$  уменьшается (Рис. 7) для всех режимов работы.



**Рисунок 7** – Зависимость величины безотказной работы  $P$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  для различных режимов работы от  $Q_{0\max}$  до  $\lambda_{\min}$  и различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1 – 5) при  $T = 300$  К,  $Q_0 = 2,0$  Вт,  $l/s = 10$ ,  $\bar{z}_M = 2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К,

1 –  $Q_{0\max}$ ; 2 –  $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\max}$ ; 3 –  $\left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{\max}$ ; 4 –  $\lambda_{\min}$

## VI. ВЫВОДЫ

1. Анализ результатов основных параметров показателей надежности однокаскадных ТЭУ, собранных из различных исходных материалов (варианты сочетаний параметров (1 – 5) в соответствии с таблицей 1 показал возможность уменьшения интенсивности отказов  $\lambda$  для сочетания (5) по сравнению с (3) на 10-11% и до 15% по сравнению с вариантом (1) при одной и той же эффективности исходных материалов в заданном интервале температур при заданном  $l/s$ .

2. Использование вариантов сочетаний (1, 2) нецелесообразно, так как увеличивается интенсивность отказов  $\lambda$  и уменьшается вероятность безотказной работы  $P$ .

3. С ростом термоэлектрической мощности охлаждения  $\gamma$  увеличивается холодопроизводительность при заданном количестве термоэлементов



тов либо уменьшается количество термоэлементов при заданной холодопроизводительности на 14 – 8% в зависимости от режима работы, что приводит к уменьшению интенсивности отказов и увеличению вероятности безотказной работы ТЭУ при одной и той же эффективности материалов и отношений  $l/s$ .

4. Полученные соотношения и данные расчетов позволяют выбрать вариант сочетания параметров исходного материала с повышенной электропроводностью для увеличения холодопроизводительности на один термоэлемент либо сокращения количества термоэлементов, уменьшения интенсивности отказов и увеличения вероятности безотказной работы.

5. Экономическая целесообразность использования исходных материалов с повышенной электропроводностью при построении ТЭУ заключается не только в повышении показателей надежности, но и в значительном снижении стоимости ТЭУ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Зайков, В.П.** Повышение показателей надежности однокаскадных термоэлектрических устройств в зависимости от эффективности используемых материалов [Текст] / В.П. Зайков, Мещеряков В.И., Гнатовская А.А., Журавлев Ю.И. // Технология конструирования электронной аппаратуры, 2015.
2. **Зайков, В.П.** Повышение экономичности каскадных термоэлектрических устройств при использовании исходных термоэлектрических материалов к каскадам с параметрами отличными от нормированных [Текст] / В.П. Зайков, Л.А. Киншова, // ТРИО. – 2001. – Вып. 1. – С. 51-56
3. **Зайков, В.П.** Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств [Текст] Книга 1. Однокаскадные устройства / В.П. Зайков, Л.А. Киншова, В.Ф. Моисеев – Одесса: Политехперіодика, 2009. – 118 с.

V.P. Zaykov<sup>1</sup>, V.I. Mescheryakov<sup>2</sup>, Yu.I. Zhuravlev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Research Institute SHTORM, 27 Tereshkova str., Odessa, 65012, Ukraine

<sup>2</sup> Odessa State Environmental University, 15 Lvovskaya str., Odessa, 65016, Ukraine

## IMPROVING THE RELIABILITY OF SINGLE-STAGE THERMOELECTRIC COOLING DEVICES BY THE USE OF VARIOUS COMBINATIONS OF ORIGINAL MATERIALS OF EQUAL EFFICIENCY

*The article represents possibilities of improving the reliability of single-stage thermoelectric cooling device by using different combinations of the original materials averaged parameters of the same efficiency, namely, thermoelectric power factor, electrical conductivity and the thermal conductivity for various changes in temperature and operating modes for a given height to the cross-sectional area branches of the thermocouple.*

*There were obtained simple analytical expressions that provide the interconnection of reliability, namely, failure rate, the number of thermocouples of thermoelectric cooling capacity single-stage thermoelectric cooling device for different combinations of parameters of the source material.*

*The calculations of single-stage thermoelectric devices basic parameters for different operating modes on the mode of maximum cooling capacity to minimum failure rates for different ranges of temperature changes from 0 to 60 K, and various combinations of options thermoelectric materials with differing efficiency parameters, electrical conductivity, thermoelectric power factors, the geometric parameters of thermocouples are presented.*

*It is shown the possibility of failure rate reducing and increasing of cooler failure-free operation probability through the use of original materials with the same efficiency for greater conductivity.*

**Keywords:** Reliability – Thermoelectric devices – Materials – Failure rate – Cooling capacity

## REFERENCES

1. **Zaikov V.P., Meshcheryakov V.I., Gnatovskaya A.A., Zhuravlev Yu.I. 2015.** Increase of reliability indicators of single-stage thermoelectric devices depending on the efficiency of the initial materials that were used. *Technology design of electronic equipment.*
2. **Zaikov V.P., Kinshova L.A. 2001.** Improving of the cascade thermoelectric devices efficiency using

the original thermoelectric materials to cascade with parameters which are different from the normalized the TRIO. Vol. 1, 51-56.

3. **Zaikov, V. P. Kinshova L.A., Moiseev C.F. 2009.** Prediction of thermoelectric cooling devices reliability Book 1. Single-stage devices. Odessa: Politehnica, 118 P.

Отримана в редакції 11.02.2015, прийнята до друку 23.04.2015