

або реалізацією замовлення. Нотація BPMN розширена і дозволяє використовувати асоціації і анотації для позначення взаємин з іншими об'єктами усередині або зовні СУБП. Наприклад, можна співвіднести бізнес-процеси з даними, які вони використовують, з системами, на яких вони розгорнуті, і так далі. Іншою важливою перевагою BPMN перед UML є те, що схеми процесів даного стандарту можуть бути переведені в описи на формальних мовах опису процесу. Підтримуються такі мови, як XPDL, BPEL4WS і BPML.

### **Висновки**

Показані переваги реалізації СУБП з використанням концепції орієнтованої для сервісу архітектури, яка дозволяє розширювати можливості СУБП по роботі з даними без залучення істотних витрат. При аналізі стандартизації в сфері технологій СУБП, виявлено, що найбільшими можливостями серед мов формального опису процесів володіє мова BPEL4WS, підтримувана багатьма крупними виробниками ПЗ. Визначено, що серед стандартів для графічного опису БП в СУБП найбільш відповідним є стандарт BPMN, який володіє найбільш виразною потужністю в порівнянні з конкуруючими стандартами.

**Список літератури:** 1. *Баронов В.В.* Автоматизация управления предприятием / Баронов В.В. – М.: «Инфра – М», 2000. 2. *Еймор Д.* Електроний бізнес / Еймор Д. – К.: «Аконіт», 2009. 3. *Морозов М. А.* Информационные технологии в социально-культурном сервисе и туризме / М. А. Морозов, Н. С. Морозова. Оргтехника. – М.: АСАДЕМІА, 2004. - 240 с. 4. *Шверин, Р.* Императив интеграции. [Електронний ресурс] / Р. Шверин // Електронні, текстові дані. – Режим доступу: <http://www.bpmi.org/bpml-spec.esp>. 5. BPMN. Web Services for Business Process Design. [Електронний ресурс] // Електронні, текстові дані. – Режим доступу: <http://xml.coverpages.org>. 7. Business Process Management Initiative. BPML language specification [Електронний ресурс] / <http://www.bpmi.org>. – Режим доступу: <http://www.bpmi.org/bpml-spec.esp>.

*Поступила в редколлегию 10.05.2011*

### **УДК 621.362–192**

**В.П. ЗАЙКОВ**, канд. техн. наук, снс, ГП «НИИ «Шторм», Одесса

**В.И. МЕЩЕРЯКОВ**, док. техн. наук, проф., зав.каф., Одесский

государственный экологический университет

**А.А. ГНАТОВСКАЯ**, ст. преп., Одесский государственный экологический университет

### **ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАИМЕНЬШЕЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ЗАДАНОЙ КОНСТРУКЦИИ**

Отримані співвідношення для оцінки показників надійності, проведений порівняльний аналіз основних параметрів двокаскадних термоелектричних охолоджувальних пристроїв (ТЕП). Приведені дані розрахунків основних параметрів та показана можливість вибору режиму роботи двокаскадних ТЕП заданої конструкції.

Ключові слова: надійність, двокаскадні термоелектричні охолоджувальні пристрої.

Получены соотношения для оценки показателей надежности и проведен сравнительный анализ основных параметров двухкаскадных термоэлектрических охлаждающих устройств (ТЭУ).

Приведены данные расчетов основных параметров и показана возможность выбора режима работы двухкаскадных ТЭУ заданной конструкции.

Ключевые слова: надежность, двухкаскадные термоэлектрические охлаждающие устройства.

Relations are obtained to assess the reliability and comparative analysis of key parameters of two-cascade thermoelectric device. Data of calculations of key parameters is cited and possibility of a choice of an operating mode two-cascade thermoelectric cooling device is shown the set design.

Key words: reliability, two-cascade thermoelectric cooling device.

## Введение

В последнее время в термоэлектрическом приборостроении все более широкое применение находят унифицированные ряды модулей и собранные на их основе каскадные термоэлектрические охлаждающие устройства (ТЭУ) различных конструкций. Применение каскадных ТЭУ в РЭА обусловлено не только обеспечением более глубокого охлаждения по сравнению с однокаскадными ТЭУ. необходимостью достижения максимально возможного уровня охлаждения, но и повышением энергетической эффективности охлаждения.

В ряде случаев проектирования каскадного ТЭУ в распоряжении разработчика имеется ряд унифицированных (стандартных) модулей, отличающихся количеством термоэлементов заданной геометрии, из которых компонуется каскадное ТЭУ. При этом необходимо при заданном перепаде температур и тепловой нагрузке определить возможность рационального использования выбранной конструкции ТЭУ с прогнозируемыми показателями надежности для различных условий эксплуатации.

Для этой цели необходимо определить основные значимые параметры и оценить показатели надежности ТЭУ, чему и посвящена настоящая работа.

## Основная часть

В настоящей работе рассмотрены двухкаскадные ТЭУ с последовательным электрическим соединением каскадов, которые, как правило, собираются на базе унифицированных и одинаковых ветвей термоэлементов или стандартных модулей с такими ветвями.

Для решения поставленной задачи воспользуемся следующими соотношениями:

Общий перепад температур двухкаскадного ТЭУ  $\Delta T$ ,  $K$

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 = \Delta T_{\max 1} \Theta_1 + \Delta T_{\max 2} \Theta_2 \quad (1)$$

где  $\Delta T_1, \Delta T_2$  – перепад температур соответственно в «горячем» и «холодном» каскадах; в дальнейшем первом и втором каскадах.

$\Delta T_{\max 1}, \Delta T_{\max 2}$  – максимальный перепад температур соответственно в первом и втором каскадах,  $K$ ;

$\Theta_1 = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_{\max 1}}, \Theta_2 = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_{\max 2}}$  – относительный перепад температур в каскадах.

Холодопроизводительность  $Q_0$  двухкаскадного ТЭУ можно записать в виде:

$$Q_0 = n_1 I_{\max 1}^2 R_1 (2V_1 - V_1^2 - \Theta_1) \quad (2)$$

где  $n_1$  – количество термоэлементов в первом каскаде, *шт*;

$$I_{\max 1} = \frac{e_1 T_0}{R_1} - \text{максимальный рабочий ток, } A;$$

$T_0$  – температура теплопоглощающего сая,  $K$ ;

$e_1$  – коэффициент термоэдс ветви термоэлемента первого каскада,  $V/K$ ;

$R_1$  – электрическое сопротивление ветви термоэлемента,  $\Omega$ ;

$$B_1 = \frac{I}{I_{\max 1}} - \text{относительный рабочий ток, } \text{отн. ед.}$$

При последовательном электрическом соединении каскадов должно соблюдаться условие:

$$I_{\max 1} B_1 = I_{\max 2} B_2 \quad (3)$$

где  $B_2 = \frac{I}{I_{\max 2}}$  – относительный рабочий ток, *отн. ед.*;

$$I_{\max 2} = \frac{e_2 T_1}{R_2} - \text{максимальный рабочий ток, } A;$$

$e_2, R_2$  – соответственно коэффициент термоэдс и электрическое сопротивление ветви термоэлемента второго каскада,  $V/K, \Omega$ .

$T_1$  – промежуточная температура,  $K$ .

Из условия теплового сопряжения каскадов отношение количества термоэлементов в смежных каскадах можно записать в виде:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{I_{\max 1}^2 R_1}{I_{\max 2}^2 R_2} \frac{\left[ 2B_1 \left( 1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \Theta_1 \right) + B_1^2 - \Theta_1 \right]}{\left( 2B_2 - B_2^2 - \Theta_2 \right)}, \quad (4)$$

Подставив выражения для  $\Theta_1$  из (2),  $\Theta_2$  из (1) и  $B_2$  из (3) в выражение (4) получим соотношение для определения  $B_1$  в виде уравнения третьей степени относительно  $B_1$

$$B_1^3 a - B_1^2 b + B_1 c - d = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{где } a &= 2 \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \gamma; & b &= \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} + \frac{I_{\max 1}^2}{I_{\max 2}^2} + 2\gamma \left( 1 + 2 \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \right); \\ c &= 2 \left( \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} + \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} + C_1 \gamma \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \right); & d &= C_1 \left( \gamma + \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} \right) + \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max 2}}; \\ \gamma &= \frac{n_1}{n_2} \frac{I_{\max 1}^2 R_1}{I_{\max 2}^2 R_2}; & C_1 &= \frac{Q_0}{n_1 I_{\max 1}^2 R_1}. \end{aligned}$$

Решив уравнение (5) численными методами, получим значение  $B_1$  при заданных величинах  $n_1, n_2, Q_0, \Delta T$ .

Выражение (5) можно упростить с погрешностью менее 1% и записать в виде

$$B_1^2 - B_1 c + d = 0 \quad (6)$$

Используя соотношения (1...4) получим выражения для определения  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$

$$\Theta_1 = \frac{\frac{\Delta T}{\Delta T_{\max 2}} - 2B_1 \left( \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} - \gamma \right) + B_1^2 \left( \frac{I_{\max 1}^2}{I_{\max 2}^2} + \gamma \right)}{\frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} + \gamma \left( 1 - 2B_1 \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \right)} \quad (7)$$

$$\Theta_2 = 2B_1 \left( \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} - \gamma \right) + \gamma \Theta_1 \left( 1 - 2B_1 \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \right) - B_1^2 \left( \frac{I_{\max 1}^2}{I_{\max 2}^2} + \gamma \right) \quad (8)$$

Используя метод последовательных приближений, определяем последовательность температур. Затем уточняем величины  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  и т.д. с учетом температурной зависимости параметров. Достаточно двух-трех приближений.

При оценке показателей надежности двухкаскадного ТЭУ, а именно, интенсивности отказов  $\lambda$ , либо вероятности безотказной работы  $P$  полагаем, что все термоэлементы ТЭУ, в том числе и каскады, соединены последовательно.

При этом выход из строя любого термоэлемента (ветви) приводит к выходу из строя модуля, каскада и устройства в целом.

В соответствии с [1, 2] относительную величину интенсивности отказов ТЭУ можно представить в виде суммы интенсивностей отказов каждого каскада записать в виде:

$$\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_0} = \frac{n_1 B_1^2 (\Theta_1 + C_1) \left( B_1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \Theta_1 \right)^2}{\left( 1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \Theta_1 \right)^2} K_{T1} + \frac{n_2 B_2^2 (\Theta_2 + C_2) \left( B_2 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \Theta_2 \right)^2}{\left( 1 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \Theta_2 \right)^2} K_{T2}, \quad (9)$$

где  $\lambda_0$  – номинальная интенсивность отказов,  $1/\text{ч}$ ;

$$C_2 = \frac{Q_0 + W_1}{n_2 I_{\max 2}^2 R_2};$$

$W_1$  – мощность потребления первого каскада,  $Вт$ .

$K_{T1}$ ,  $K_{T2}$  [3] – коэффициенты, учитывающие влияние низких температур.

В таблицах 1, 2, 3, 4 приведены результаты расчетов основных параметров двухкаскадного ТЭУ заданной конструкции ( $n_1 = 9$  при вариации величины  $n_1/n_2 = 1,0; 0,83; 0,67; 0,5; 0,33; 0,2; 0,1$ ) при перепадах температур  $\Delta T = 60 \text{ К}; 70 \text{ К}; 80 \text{ К}; 90 \text{ К}$  и тепловой нагрузке  $Q_0 = 0,1 \text{ Вт}; 1/s = 10; T = 300 \text{ К}$ .

Таблица 1. Результаты расчетов при  $\Delta T = 60 \text{ К}$

№ п/п	$B_1$	$B_2$	$I_1, A$	$T_1, K$	$\Theta_1$ , отн. ед.	$\Theta_2$ , отн. ед.	$\frac{n_1}{n_2}$	$\varepsilon^N$ отн. ед.	$\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}$	$\lambda_{\Sigma} \cdot 10^8$ 1/ч	$P$
1	0,41	0,37	1,90	279,0	0,60	0,22	1,00	0,058	0,042	1,14	0,99989
2	0,35	0,32	1,59	274,0	0,52	0,29	0,83	0,072	0,024	0,63	0,99994
3	0,32	0,29	1,44	272,0	0,48	0,32	0,67	0,075	0,017	0,47	0,99994
4	0,30	0,27	1,38	269,2	0,46	0,36	0,50	0,067	0,015	0,41	0,99995
5	0,28	0,27	1,29	267,2	0,42	0,39	0,33	0,055	0,017	0,45	0,99996
6	0,27	0,26	1,22	266,0	0,40	0,40	0,20	0,039	0,021	0,56	0,99994
7	0,26	0,25	1,18	265,0	0,39	0,42	0,10	0,022	0,034	0,91	0,99991

Таблица 2. Результаты расчетов при  $\Delta T = 70$  К

№ п/п	$B_1$	$B_2$	$I_1, A$	$T_1, K$	$\Theta_1,$ отн. ед.	$\Theta_2,$ отн. ед.	$\frac{n_1}{n_2}$	$\varepsilon^N$ отн. ед.	$\frac{\lambda_\Sigma}{n_1\lambda_0}$	$\lambda_\Sigma \cdot 10^8$ 1/ч	P
1	0,55	0,48	2,40	274,0	0,74	0,29	0,83	0,034	0,158	4,25	0,99957
2	0,47	0,43	2,14	269,0	0,66	0,36	0,67	0,037	0,095	2,56	0,99974
3	0,41	0,38	1,90	264,0	0,59	0,43	0,50	0,038	0,064	1,73	0,99983
4	0,37	0,35	1,69	261,0	0,54	0,47	0,33	0,034	0,057	1,55	0,99985
5	0,36	0,34	1,63	260,0	0,53	0,50	0,20	0,024	0,073	1,96	0,99980
6	0,35	0,33	1,57	259,0	0,51	0,51	0,10	0,014	0,110	2,98	0,99970

Таблица 3. Результаты расчетов при  $\Delta T = 80$  К

№ п/п	$B_1$	$B_2$	$I_1, A$	$T_1, K$	$\Theta_1,$ отн. ед.	$\Theta_2,$ отн. ед.	$\frac{n_1}{n_2}$	$\varepsilon^N$ отн. ед.	$\frac{\lambda_\Sigma}{n_1\lambda_0}$	$\lambda_\Sigma \cdot 10^8$ 1/ч	P
1	0,65	0,60	2,83	262,0	0,81	0,47	0,50	0,018	0,463	12,51	0,99875
2	0,53	0,51	2,38	256,0	0,71	0,56	0,33	0,019	0,280	7,57	0,99924
3	0,48	0,46	2,13	254,0	0,66	0,61	0,20	0,015	0,270	7,33	0,99927
4	0,46	0,43	2,00	252,0	0,63	0,64	0,10	0,009	0,400	10,79	0,99892

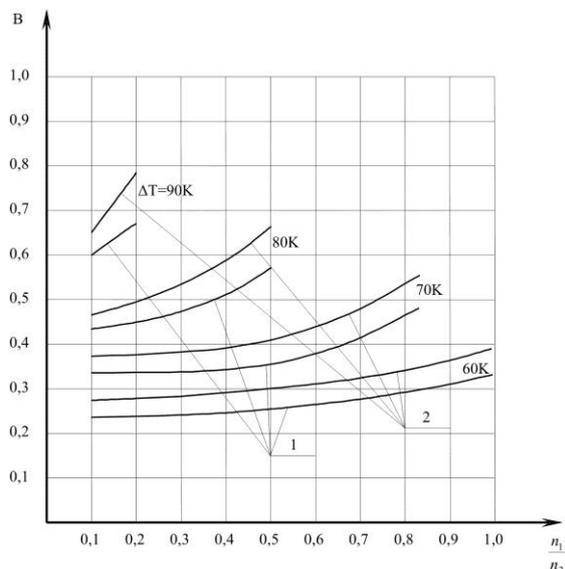
Таблица 4. Результаты расчетов при  $\Delta T = 90$  К

№ п/п	$B_1$	$B_2$	$I_1, A$	$T_1, K$	$\Theta_1,$ отн. ед.	$\Theta_2,$ отн. ед.	$\frac{n_1}{n_2}$	$\varepsilon^N$ отн. ед.	$\frac{\lambda_\Sigma}{n_1\lambda_0}$	$\lambda_\Sigma \cdot 10^8$ /ч	P
1	0,79	0,71	3,24	249,0	0,88	0,71	0,20	0,006	1,653	49,22	0,99509
2	0,67	0,61	2,75	246,0	0,81	0,75	0,10	0,005	1,822	44,64	0,99554

На рис. 1 представлена зависимость относительного рабочего тока  $B_1$  и  $B_2$  в каскадах от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $n_1/n_2$  при температуре  $T = 300$  К,  $Q_0 = 0,1$  Вт при общем перепаде температур на двухкаскадном ТЭУ  $\Delta T = 60$  К; 70 К; 80 К; 90 К. С уменьшением отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $n_1/n_2$  величина относительного рабочего тока  $B_1$  и  $B_2$  уменьшается при заданном перепаде температур. С ростом перепада температур  $\Delta T$  величина относительного рабочего тока в каскадах  $B_1$  и  $B_2$  увеличивается при заданном отношении  $n_1/n_2$ .

На рис. 2 представлена зависимость относительного перепада температур в каскадах  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  двухкаскадного ТЭУ от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $n_1/n_2$  при  $T = 300$  К,  $Q_0 = 0,1$  Вт и перепадах температур  $\Delta T = 60$  К; 70 К; 80 К; 90 К.

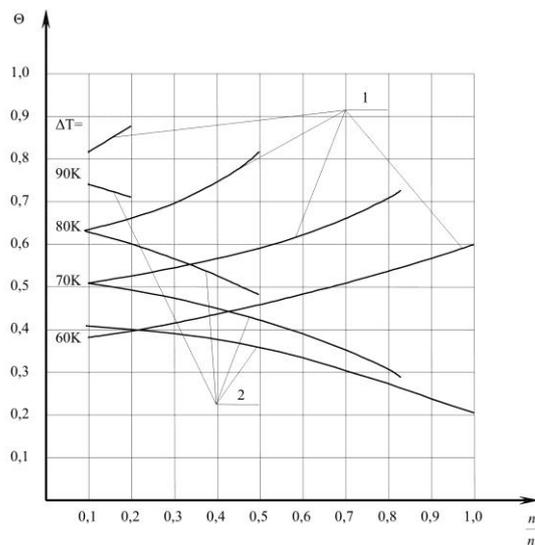
С уменьшением отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $n_1/n_2$  относительный перепад  $\Theta_1$  в первом каскаде уменьшается, а во втором каскаде  $\Theta_2$  увеличивается.



где 1 –  $B_1$ ; 2 –  $B_2$

Рис.1 Зависимость относительного рабочего тока в каскадах  $B_1$  и  $B_2$  двухкаскадного ТЭУ от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $\frac{n_1}{n_2}$  при  $T = 300 \text{ K}$ ,  $Q_0 = 0,1 \text{ Вт}$  и перепадах температур  $\Delta T = 60 \text{ K}$ ;  $70 \text{ K}$ ;  $80 \text{ K}$ ;  $90 \text{ K}$

где 1 –  $\Theta_1$ ; 2 –  $\Theta_2$



где 1 –  $\Theta_1$ ; 2 –  $\Theta_2$

Рис.2 Зависимость относительного перепада температур  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  двухкаскадного ТЭУ от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $\frac{n_1}{n_2}$  при  $T = 300 \text{ K}$ ,  $Q_0 = 0,1 \text{ Вт}$  и перепадах температур  $\Delta T = 60 \text{ K}$ ;  $70 \text{ K}$ ;  $80 \text{ K}$ ;  $90 \text{ K}$ .

При этом для каждого значения перепада температур  $\Delta T$  можно подобрать такое отношение  $n_1/n_2$ , когда  $\Theta_1 = \Theta_2$ , т.е. относительные перепады равны. Так для  $\Delta T = 60 \text{ K}$   $T = 300 \text{ K}$ ,  $Q_0 = 0,1 \text{ Вт}$  при  $n_1/n_2 = 0,2$   $\Theta_1 = \Theta_2 = 0,4$ . С ростом общего перепада температур  $\Delta T$  величина относительных перепадов температур  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  увеличивается при заданном значении  $n_1/n_2$ .

На рис. 3 представлена зависимость промежуточной температуры  $T_1$  двухкаскадного ТЭУ от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $n_1/n_2$  при  $T = 300 \text{ K}$ ,  $Q_0 = 0,1 \text{ Вт}$  и перепадах температур  $\Delta T = 60 \text{ K}$ ;  $70 \text{ K}$ ;  $80 \text{ K}$ ;  $90 \text{ K}$ . С уменьшением отношения  $n_1/n_2$  величина промежуточной температуры уменьшается. С ростом общего перепада температур величина промежуточной температуры уменьшается.

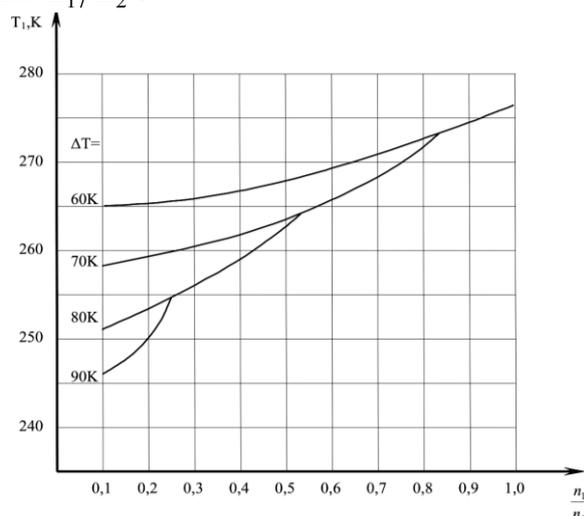


Рис.3. Зависимость промежуточной температуры  $T_1$  двухкаскадного ТЭУ от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $\frac{n_1}{n_2}$  при  $T = 300 \text{ K}$ ,  $Q_0 = 0,1 \text{ Вт}$  и перепадах температур  $\Delta T = 60 \text{ K}$ ;  $70 \text{ K}$ ;  $80 \text{ K}$ ;  $90 \text{ K}$ .

где 1 –  $\Theta_1$ ; 2 –  $\Theta_2$

величины интенсивностей отказов  $\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_0 n_1}$  от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $n_1/n_2$  при  $T = 300\text{ К}$ ,  $Q_0 = 0,1\text{ Вт}$  и перепадах температур  $\Delta T = 60\text{ К}$ ;  $70\text{ К}$ ;  $80\text{ К}$ ;  $90\text{ К}$ .

Характерной особенностью кривых является наличие минимума функции  $\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}$  при соответствующих значениях  $n_1/n_2$  для различных перепадов температур  $\Delta T$ . С ростом перепада температур  $\Delta T$  величина  $\left(\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}\right)_{\min}$  увеличивается и смещается в сторону меньших значений  $n_1/n_2$ .

Соотношение  $\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}$  носит обобщенный характер и может использоваться для расчетов при любом значении величины  $n_1$ .

На рис. 5, 6 представлена зависимость интенсивности отказов  $\lambda_{\Sigma}$  двухкаскадного ТЭУ от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $n_1/n_2$  при  $n_1 = 9$ ,  $T = 300\text{ К}$ ,  $Q_0 = 0,1\text{ Вт}$  для различных перепадов температур  $\Delta T$ . Характер зависимости идентичен рис. 4.

На рис. 7 представлена зависимость вероятности безотказной работы  $P$  двухкаскадного ТЭУ от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $n_1/n_2$  при  $T = 300\text{ К}$ ,  $Q_0 = 0,1\text{ Вт}$  для различных перепадов температур  $\Delta T$ . Характерной особенностью кривых является наличие максимума при соответствующих значениях  $n_1/n_2$  для различных перепадов температур  $\Delta T$ .

С ростом перепада температур вероятность безотказной работы уменьшается и максимум сдвигается в сторону меньших значений отношения  $n_1/n_2$ , а рисунке 8 представлена зависимость холодильного коэффициента  $\varepsilon^N$  двухкаскадного ТЭУ от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $n_1/n_2$  при  $n_1 = 9$ ,  $T = 300\text{ К}$ ,  $Q_0 = 0,1\text{ Вт}$  для различных перепадов температур  $\Delta T$ . Характерной особенностью кривых является наличие максимума  $\varepsilon^N$  при соответствующих значениях  $n_1/n_2$  для различных перепадов температуры. С ростом перепада температур холодильный коэффициент уменьшается и его максимум смещается в сторону меньших значений отношения  $n_1/n_2$ . Таким образом, при выборе конструкции двухкаскадного ТЭУ целесообразно ориентироваться на ту конструкцию, которая бы обеспечивала минимальную интенсивность отказов при заданном перепаде температур и тепловой нагрузке. При этом величина холодильного коэффициента должна быть близка к максимальным значениям.

На рисунке 9 представлена зависимость величины  $\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}$  от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $n_1/n_2$  и перепада температур  $\Delta T$  двухкаскадного ТЭУ при  $T = 300\text{ К}$ ,  $Q_0 = 0,1\text{ Вт}$ . С ростом перепада температур  $\Delta T$  величина  $\left(\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}\right)_{\min}$  увеличивается.

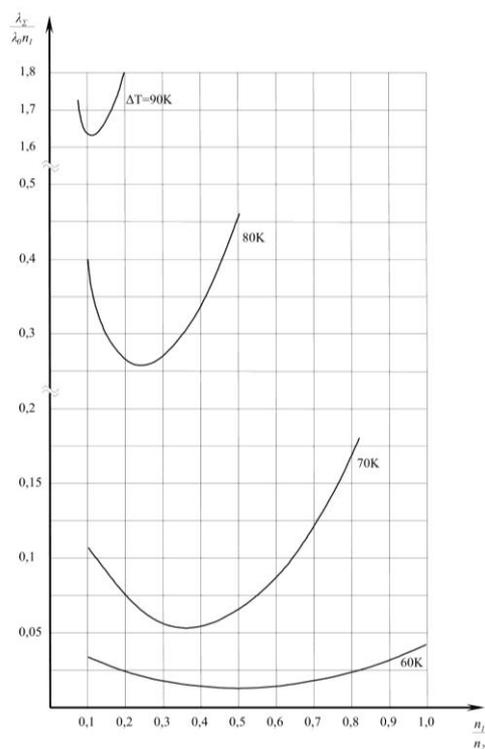


Рис. 4. Зависимость относительной величины интенсивности отказов  $\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}$  двухкаскадного ТЭУ от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $\frac{n_1}{n_2}$  при  $T = 300 \text{ K}$ ,  $Q_0 = 0,1 \text{ Вт}$  и перепадах температур  $\Delta T = 60 \text{ K}$ ;  $70 \text{ K}$ ;  $80 \text{ K}$ ;  $90 \text{ K}$ .

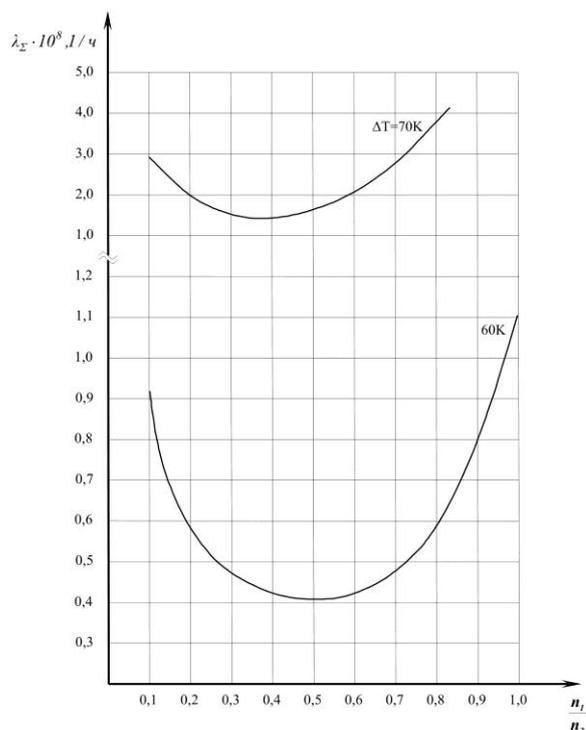


Рис. 5. Зависимость интенсивности отказов  $\lambda_{\Sigma}$  двухкаскадного ТЭУ от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $\frac{n_1}{n_2}$  при  $n_1 = 9$ ,  $T = 300 \text{ K}$ ,  $Q_0 = 0,1 \text{ Вт}$  и перепадах температур  $\Delta T = 60 \text{ K}$ ;  $70 \text{ K}$ .

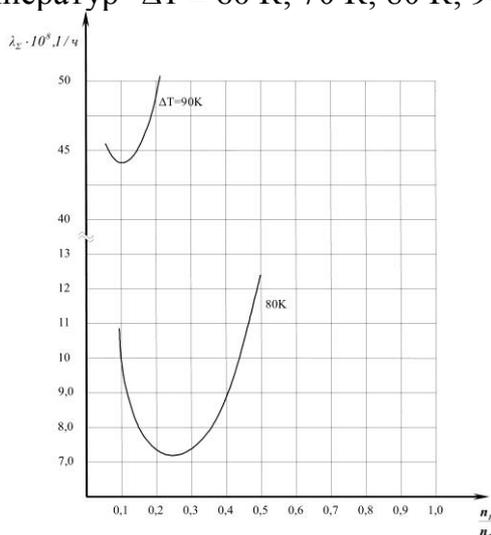


Рис. 6. Зависимость интенсивности отказов  $\lambda_{\Sigma}$  двухкаскадного ТЭУ от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $\frac{n_1}{n_2}$  при  $n_1 = 9$ ,  $T = 300 \text{ K}$ ,  $Q_0 = 0,1 \text{ Вт}$  и перепадах температур  $\Delta T = 80 \text{ K}$ ;  $90 \text{ K}$ .

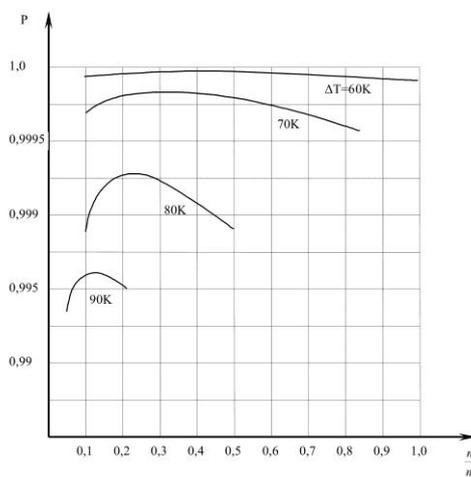


Рис. 7. Зависимость вероятности безотказной работы  $P$  двухкаскадного ТЭУ от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $\frac{n_1}{n_2}$  при  $n_1 = 9$ ,  $T = 300 \text{ K}$ ,  $Q_0 = 0,1 \text{ Вт}$  и перепадах температур  $\Delta T = 60 \text{ K}$ ;  $70 \text{ K}$ ;  $80 \text{ K}$ ;  $90 \text{ K}$ .

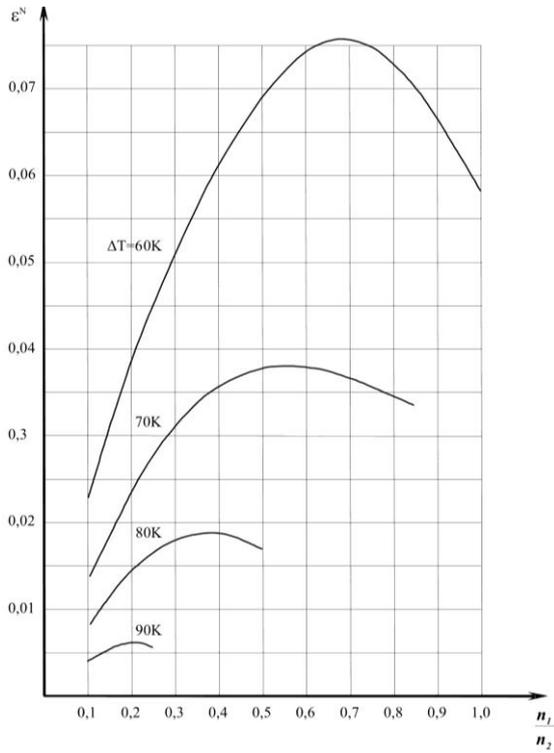
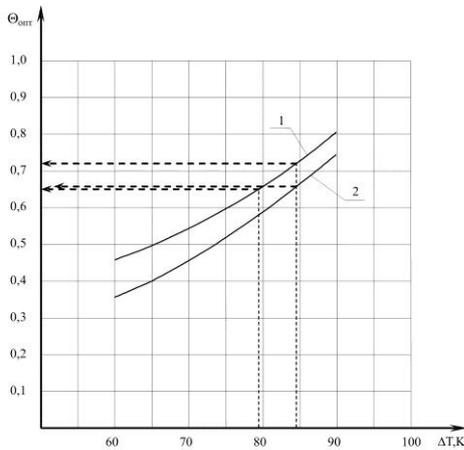
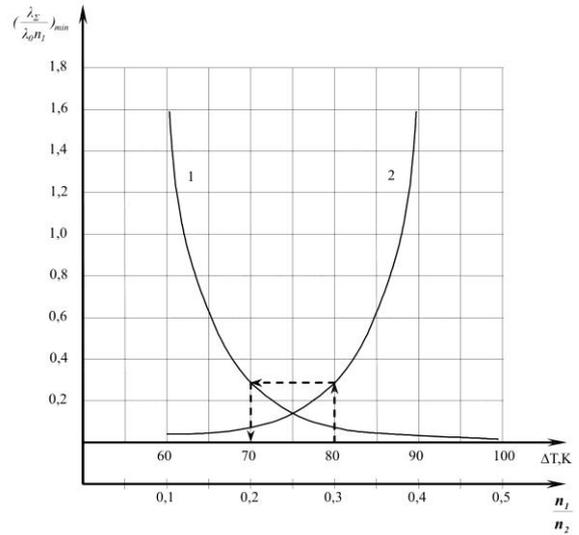


Рис. 8. Зависимость холодильного коэффициента  $\varepsilon^N$  двухкаскадного ТЭУ от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $\frac{n_1}{n_2}$  при  $T = 300\text{ K}$ ,  $Q_0 = 0,1\text{ Вт}$  и перепадах температур  $\Delta T = 60\text{ K}; 70\text{ K}; 80\text{ K}; 90\text{ K}$



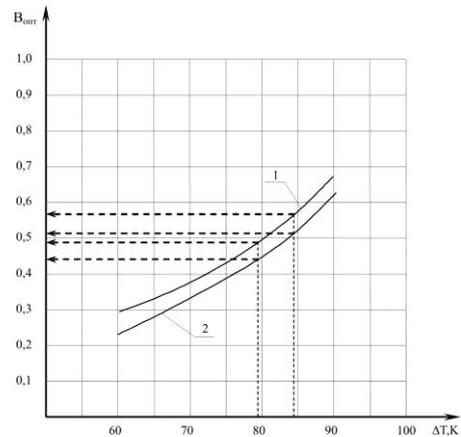
где 1 –  $\Theta_{\text{опт1}}$ ; 2 –  $\Theta_{\text{опт2}}$

Рис.10. Зависимость оптимальных относительных перепадов температур  $\Theta_{\text{опт1}}$  и  $\Theta_{\text{опт2}}$  в каскадах, соответствующих наименьшей интенсивности отказов от общего перепада температур  $\Delta T$  двухкаскадного ТЭУ при  $T = 300\text{ K}$ ,  $Q_0 = 0,1\text{ Вт}$



где 1 –  $\left(\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1\lambda_0}\right)_{\min} = f\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$ ; 2 –  $\left(\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1\lambda_0}\right)_{\min} = f(\Delta T)$

Рис. 9. Зависимость величины  $\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1\lambda_0}$  двухкаскадного ТЭУ от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $\frac{n_1}{n_2}$  и от перепада температур  $\Delta T$  при  $T = 300\text{ K}$ ,  $Q_0 = 0,1\text{ Вт}$



где 1 –  $V_1$ ; 2 –  $V_2$

Рис. 11. Зависимость величины относительного рабочего тока  $V_{\text{опт}}$ , соответствующей наименьшей интенсивности отказов, от общего перепада температур  $\Delta T$  при  $T = 300\text{ K}$ ,  $Q_0 = 0,1\text{ Вт}$

С уменьшением отношения термоэлементов в смежных каскадах  $n_1/n_2$  интенсивность отказов также увеличивается. Так при  $\Delta T = 80\text{ К}$  минимальная интенсивность отказов составляет  $\left(\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1\lambda_0}\right)_{\min} = 0,27$  при соотношении количества термоэлементов в смежных каскадах  $n_1/n_2 = 0,2$ .

Остальные основные параметры  $\Theta_1, \Theta_2, V_1, V_2, T_1$  легко определить с помощью графических зависимостей, представленных на рис. 10, 11, 12.

Так как при  $\Delta T = 80\text{ К}$

$\Theta_1 = 0,66; \Theta_2 = 0,6; V_1 = 0,48; V_2 = 0,45$  и промежуточная температура  $T_1 = 254\text{ К}$ .

Для  $\Delta T = 85\text{ К}$   $\Theta_1 = 0,72; \Theta_2 = 0,67; V_1 = 0,56; V_2 = 0,52$  и промежуточная температура  $T_1 = 249\text{ К}$ .

### Выводы

Представлена и рассмотрена модель взаимосвязи показателей надежности двухкаскадных ТЭУ различных конструкций с основными значимыми параметрами при последовательном электрическом соединении каскадов.

Получены соотношения для оценки показателей надежности двухкаскадных ТЭУ различных конструкций, работающих в широком диапазоне перепадов температуры с учетом тепловой нагрузки.

Приведенные данные позволяют выбрать конструкцию двухкаскадного ТЭУ, обеспечивающего наименьшую интенсивность отказов.

Проведенный сравнительный анализ расчетных данных основных параметров показал возможность прогнозирования показателей надежности двухкаскадных ТЭУ различных конструкций и вести оптимизированное проектирование РЭА с использованием каскадных ТЭУ.

**Список літератури:** 1. *Моисеев, В.Ф.* Влияние режима работы охлаждающего термоэлемента на показатели надежности термоэлектрического устройства [Текст] / В.Ф.Моисеев, В.П. Зайков // Журнал ТКЭА. – 2001. – №4–5. – С. 30–32. 2. *Зайков, В.П.* Влияние тепловой нагрузки на показатели надежности термоэлектрического устройства [Текст] / В.П. Зайков, Л.А. Киншова, В.И. Марченко // Научно-технический сборник ТРиО. – 2003. – №1. – С. 52–62. 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: Политехпериодика, 2009. – 118с.

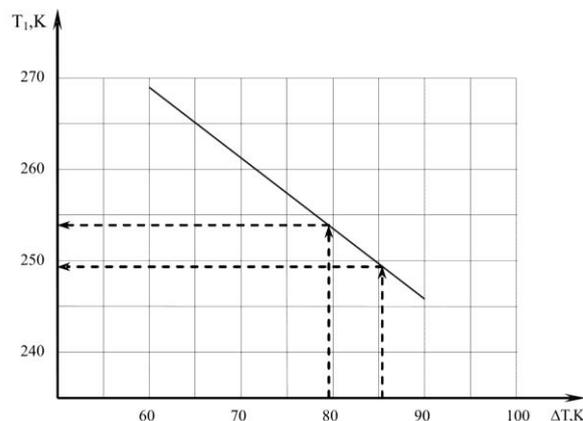


Рис. 12. Зависимость промежуточной температуры  $T_1$ , обеспечивающей наименьшую интенсивность отказов двухкаскадного ТЭУ, от перепада температур  $\Delta T$  при  $T = 300\text{ К}$ ,  $Q_0 = 0,1\text{ Вт}$

Поступила в редколлегию 15.05.2011