

*Запропоновано модель взаємозв'язку показників надійності та основних значущих параметрів двокаскадного термоелектричного охолоджувального пристрою з послідовним електричним з'єднанням каскадів. Отримано співвідношення для визначення показників надійності двокаскадного ТЕП*

*Ключові слова: надійність, двокаскадні термоелектричні охолоджувальні пристрої*

*Предложена модель взаимосвязи показателей надежности и основных значимых параметров двухкаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства с последовательным электрическим соединением каскадов. Получены соотношения для определения показателей надежности двухкаскадных ТЭУ*

*Ключевые слова: надежность, двухкаскадные термоэлектрические охлаждающие устройства*

*The model of interrelation of indicators of reliability and the basic significant parameters of the two-cascade thermoelectric cooling device with consecutive electric connection of cascades is offered. Parities for definition of indicators of reliability two-cascade thermoelectric device*

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

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ УСТРОЙСТВАМИ

**В. П. Зайков**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник сектора

Государственное предприятие «Научно-исследовательский институт «Шторм»  
ул. Терешковой, 27, г. Одесса, Украина, 65078  
Контактный тел.: (044) 45-49-17

E-mail: aninfo@fromru.com

**В. И. Мещеряков**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой\*

Контактный тел.: 050-336-32-78

E-mail: gradan@ua.fm

**А. А. Гнатовская**

Аспирант, старший преподаватель\*  
Контактный тел.: (044) 44-88-53, 067-769-00-87

E-mail: aninfo@fromru.com

\*Кафедра информатики

Одесский государственный экологический университет

## 1. Введение

Повышение надежности функционирования информационных систем неразрывно связано с обеспечением теплового режима элементов электроники. Одним из наиболее приемлемых способов обеспечения тепловых режимов элементов и составных частей радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), в том числе различных информационных систем, является термоэлектрический. К числу основных преимуществ термоэлектрического охлаждения, как способа получения искусственного холода, следует отнести примерное соответствие показателей надежности и массогабаритных характеристик термоэлектрических устройств (ТЭУ) и элементов электроники простоте управления и быстрдействию. Эти преимущества по своей сути являются следствием твердотельной природы охладителей, т.е. отсутствием движущихся частей, перекачиваемых жидкостей или газов. Кроме того при эксплуатации ТЭУ обеспечивается высокая степень экологической чистоты окружающей среды.

## 2. Основная часть

В последнее время в термоэлектрическом приборостроении все более широкое применение нашли унифицированные ряды модулей и собранные на их основе каскадные термоэлектрические охлаждающие устройства (КТЭУ) различных конструкций.

Применение КТЭУ обусловлено не только необходимостью достижения максимально возможного уровня охлаждения, но и повышением экономичности. В ряде случаев при проектировании в распоряжении разработчика имеется ряд выбранных конструкций КТЭУ, построенных на основе унифицированных модулей, и необходимо определить их максимально возможную энергетическую эффективность при заданном перепаде температур и тепловой нагрузке, т.е. выбрать такой токовый режим работы КТЭУ, который соответствовал бы максимуму энергетической эффективности КТЭУ заданной конструкции. Для этой цели необходимо при заданном перепаде температур и тепловой нагрузке определить основные значимые параметры, а именно относительные рабочие токи  $V_1$

и  $B_2$ , относительные перепады температур  $\theta_1$  и  $\theta_2$  в каскадах и затем оценить показатели надежности энергетически эффективного КТЭУ, чему и посвящена настоящая статья.

В настоящей работе рассмотрены двухкаскадные КТЭУ с последовательным соединением энергетических каскадов, которые, как правило, собираются на базе унифицированных и одинаковых ветвей термоэлементов или стандартных модулей с такими ветвями. При определении показателей надежности каскадного ТЭУ, а именно интенсивности отказов  $\lambda$  и вероятности безотказной работы  $P$  полагаем, что все ветви термоэлементов ТЭУ, в том числе и каскады, соединены электрически последовательно. При этом выход из строя любого термоэлемента (ветви) приводит к выходу из строя модуля, каскада и устройства в целом. События, заключающиеся в выходе термоэлементов из строя, принимаются независимыми [1]. Кроме того, каждый каскад работает в различных температурных условиях и это необходимо учитывать при оценке показателей надежности КТЭУ.

Для решения поставленной задачи воспользуемся известными соотношениями. Холодопроизводительность  $Q_0$  двухкаскадного ТЭУ можно записать в виде:

$$Q_0 = n_1 I_{\max 1}^2 R_1 (2B_1 - B_1^2 - \theta_1) \tag{1}$$

где  $I_{\max 1} = \frac{e_1 T_0}{R_1}$  – максимальный рабочий ток, А;

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

$T_0$  – температура теплопоглощающего спая первого каскада, К;

$e_1$  – коэффициент термоэдс ветви термоэлемента первого каскада, В/К;

$R_1$  – электрическое сопротивление ветви термоэлемента первого каскада, Ом;

$B_1 = I/I_{\max 1}$  – относительный рабочий ток первого каскада, отн. ед.;

$\theta_1 = \frac{T_1 - T_0}{\Delta T_{\max 1}}$  – относительный перепад температур

первого каскада, отн. ед.;

$T_1$  – промежуточная температура, К;

$\Delta T_{\max 1}$  – максимальный перепад температур в первом каскаде, К.

$$\Delta T_{\max 1} = 0,5 \bar{Z}_1 T_0^2$$

$\bar{Z}_1$  – усредненное значение термоэлектрической эффективности термоэлементов первого каскада, 1/К.

Последовательное электрическое соединение каскадов определяет равенство рабочих токов в каскадах, которое можно записать в виде:

$$I_{\max 1} B_1 = I_{\max 2} B_2 \tag{2}$$

где  $B_2 = I/I_{\max 2}$ ;  $I_{\max 2} = \frac{e_2 T_1}{R_2}$ ;

$e_2$  – коэффициент термоэдс ветви термоэлемента второго каскада, В/К;

$R_2$  – электрическое сопротивление ветви термоэлемента второго каскада, Ом.

Общий перепад температур на двухкаскадном ТЭУ можно записать в виде:

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 = \Delta T_{\max 1} \theta_1 + \Delta T_{\max 2} \theta_2 \tag{3}$$

где  $\Delta T_1 = T_1 - T_0$  – перепад температур в первом каскаде, К;

$\Delta T_2 = T - T_1$  – перепад температур во втором каскаде, К;

$T$  – температура тепловыделяющего спая второго каскада, К;

$\theta_2 = \frac{T - T_1}{\Delta T_{\max 2}}$  – относительный перепад температур

во втором каскаде, отн. ед.;

$\Delta T_{\max 2}$  – максимальный перепад температур во втором каскаде, К.

$$\Delta T_{\max 2} = 0,5 \bar{Z}_2 T_1^2$$

$\bar{Z}_2$  – усредненное значение термоэлектрической эффективности термоэлементов второго каскада, 1/К

Условие теплового сопряжения каскадов можно записать в виде:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{I_{\max 1}^2 R_1 \left[ 2B_1 \left( 1 + \frac{\Delta T_{\max 1} \theta_1}{T_0} \right) + B_1^2 - \theta_1 \right]}{I_{\max 2}^2 R_2 (2B_2 - B_2^2 - \theta_2)} \tag{4}$$

где  $n_2$  – количество термоэлементов во втором каскаде, шт.

Холодильный коэффициент двухкаскадного ТЭУ можно записать в виде:

$$E^{N-2} = \frac{Q_0}{W_1 + W_2} \tag{5}$$

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

$$W_1 = 2n_1 I_{\max 1}^2 R_1 B_1 \left( B_1 + \frac{\Delta T_{\max 1} \theta_1}{T_0} \right); \tag{6}$$

$W_2$  – мощность потребления второго каскада, Вт.

$$W_2 = 2n_2 I_{\max 2}^2 R_2 B_2 \left( B_2 + \frac{\Delta T_{\max 2} \theta_2}{T_1} \right). \tag{7}$$

Используя соотношения (1...7) холодильный коэффициент можно записать в виде:

$$E^N = \frac{C_1}{2B_1} \frac{2B_1 B - B_1^2 C - D}{B_1^2 M - B_1^3 N + B_1^4 F - 2B_1^5 L - B_1 m + A} \tag{8}$$

где  $B = \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} + \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}}$ ;

$$C = \frac{I_{\max 1}^2}{I_{\max 2}^2} + \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}};$$

$$D = \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max 2}} + \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} C_1; C_1 = \frac{Q_0}{n_1 I_{\max 1}^2 R_1};$$

$$M = 2 \left( 1 + 2 \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \right) \left\{ \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} + \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} \left[ 1 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \left( \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max 2}} + \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} C_1 \right) \right] \right\} + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \times \left( \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max 2}} - \frac{I_{\max 1}^2}{I_{\max 2}^2} C_1 \right) + \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} C_1 \left[ \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} + 2 \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \left( 1 + 2 C_1 \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \right) \right];$$

$$N = 2 \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \left[ 1 + C_1 \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \left( \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max 2}} + \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} C_1 \right) \right] + \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} \left( 1 + 4 \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \right) - \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} \left( 1 + 2 \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \right) \left( \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} - 4 \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \right);$$

$$F = 2 \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} \left( 1 + 4 \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \right) - \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \left( \frac{I_{\max 1}^2}{I_{\max 2}^2} - \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} \right);$$

$$L = \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_{10}} \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}};$$

$$m = 2 C_1 \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} \left( \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} + \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \right) + \frac{\Delta T}{T_{\max 2}} \left( 1 + 2 \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \right) + C_1 \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} \times \left( 1 + 4 \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \right) - C_1 \frac{I_{\max 1}^2}{I_{\max 2}^2} + 2 C_1 \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \left( \frac{\Delta T}{T_{\max 2}} + \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} C_1 \right);$$

$$A = C_1 \left( \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max 2}} + C_1 \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} \right) \left( \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} + \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \right).$$

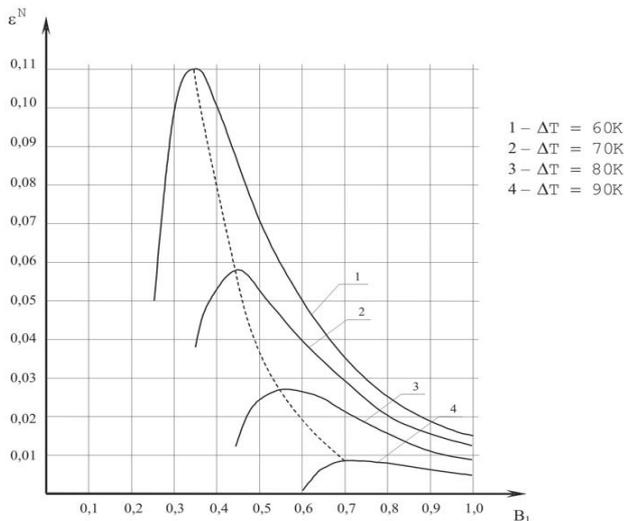


Рис. 1. Зависимость холодильного коэффициента  $\epsilon^N$  двухкаскадного ТЭУ от относительного рабочего тока  $B_1$  при  $T=300\text{K}$ ,  $C_1=0,1$ ,  $\Delta T=60\text{K}; 70\text{K}; 80\text{K}; 90\text{K}$

Функциональная зависимость  $E^N = f(B_1)$  имеет максимум (рис. 1) при  $C_1 = 0,1$  и  $T = 300\text{K}$  для различных значений перепада температур  $\Delta T = 60\text{K}$ ,

70 K, 80 K, 90 K. С ростом перепада температур  $\Delta T$ : оптимальная величина относительного рабочего тока  $B_1$  смещается в сторону больших значений (показана пунктирной линией), уменьшается холодильный коэффициент.

Из условия  $(dE^N/dB) = 0$  получим соотношение для определения оптимальной величины относительного рабочего тока  $B_1$ , соответствующего максимуму холодильного коэффициента  $E^N$  при заданной величине относительной тепловой нагрузки  $C_1$  и перепада температур  $\Delta T$ .

$$6B_1^6 LC - 2B_1^5 (8LB + FC) + B_1^4 (NC + 6FB + 10LD) - 4B_1^3 (NB + FD) + B_1^2 (2MB + 3ND - Cm) - 2B_1 (MD - CA) + mD - 2BA = 0 \quad (9)$$

Величина относительного рабочего тока  $B_1$  увеличивается с ростом тепловой нагрузки при заданном перепаде температур и с ростом перепада температур при заданной тепловой нагрузке (рис. 2). Представленные зависимости позволяют определить величину оптимального рабочего тока  $B_1$  при заданной величине тепловой нагрузки  $C_1$  и перепаде температур  $\Delta T$ .

Используя метод последовательных приближений определяем основные значимые параметры  $B_1, B_2, \theta_1, \theta_2$  с учетом температурной зависимости параметров. Достаточно одного или двух приближений.

В соответствии с [2] для двухкаскадного ТЭУ относительную величину интенсивности отказов можно записать в виде:

$$\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_0} = \frac{n_1 B_1^2 (\theta_1 + C_1) \left( B_1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \theta_1 \right)^2}{\left( 1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \theta_1 \right)^2} K_{T1} + \frac{n_2 B_2^2 (\theta_2 + C_2) \left( B_2 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \theta_2 \right)^2}{\left( 1 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \theta_2 \right)^2} K_{T2} \quad (10)$$

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

$$C_2 = \frac{Q_0 + W_1}{n_2 I_{\max 2}^2 R_2} \text{ – относительная тепловая нагрузка}$$

второго каскада, отн. ед.;

$K_{T1}, K_{T2}$  – коэффициент значимости с учетом влияния пониженных температур [1].

Данные расчетов основных значимых параметров сведены в таблицы (1 - 4) для  $l/s = 10$ ,  $T = 300\text{K}$ ,  $\Delta T = 60\text{K}, 70\text{K}, 80\text{K}, 90\text{K}$ ,  $C_1 = (0 \dots 1,0)$ ,  $n_1 = 9$  и усредненном значении эффективности термоэлектрических модулей  $\bar{z}_M = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$  и  $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ 1/G}$ .

Анализ расчетных данных показал, что в режиме наибольшего холодильного коэффициента существует тепловая нагрузка  $C_1$ , соответствующая максимуму

холодильного коэффициента  $\epsilon^N$  при заданном перепаде температур  $\Delta T$  (рис. 3).

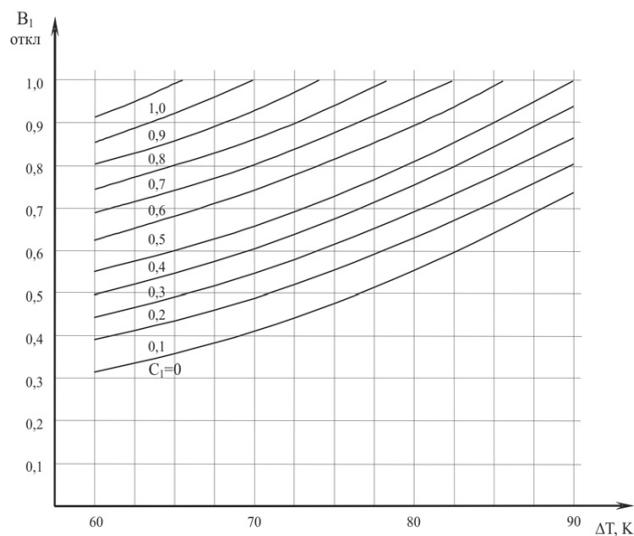


Рис. 2. Зависимость оптимального относительного рабочего тока  $V_1$  двухкаскадного ТЭУ в режиме  $\epsilon_{max}$  от перепада температур  $\Delta T$  при  $T=300K$ ,  $C_1 = 0 \div 1,0$

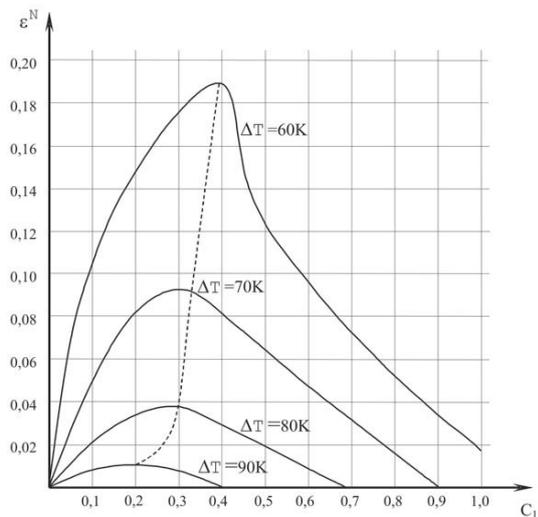


Рис. 3. Зависимость холодильного коэффициента  $\epsilon^N$  двухкаскадного ТЭУ в режиме  $\epsilon_{max}$  от относительной тепловой нагрузки  $C_1$  при  $T=300K$ ,  $\Delta T=60K; 70K; 80K; 90K$

Следует отметить, что в точке максимума холодильного коэффициента наблюдается равенство относительных перепадов температур и холодильных коэффициентов в каскадах:  $\theta_1 = \theta_2$  и  $E_1 = E_2$ .

Так при

$\Delta T = 60 K$	$\theta_1 = \theta_2 = 0,40$	$E_1 = E_2 = 0,52$	$C_1 = 0,40$
$\Delta T = 70 K$	$\theta_1 = \theta_2 = 0,50$	$E_1 = E_2 = 0,35$	$C_1 = 0,36$
$\Delta T = 80 K$	$\theta_1 = \theta_2 = 0,64$	$E_1 = E_2 = 0,22$	$C_1 = 0,31$
$\Delta T = 90 K$	$\theta_1 = \theta_2 = 0,78$	$E_1 = E_2 = 0,11$	$C_1 = 0,20$

Величина промежуточной температуры  $T_1$  уменьшается соответственно с ростом тепловой нагрузки при заданном перепаде температур и с ростом перепада температур при заданной тепловой нагрузке.

Величина оптимального отношения количества термоэлементов в смежных каскадах  $\frac{n_1}{n_2}$  в режиме наибольшего холодильного коэффициента уменьшается соответственно с ростом величины относительной тепловой нагрузки при заданном перепаде температур либо с ростом перепада температур при заданном значении относительной тепловой нагрузки.

Относительная величина интенсивности отказов  $\lambda_{\Sigma}$  увеличивается с ростом тепловой нагрузки и перепада температур  $\Delta T$  (рис. 4).

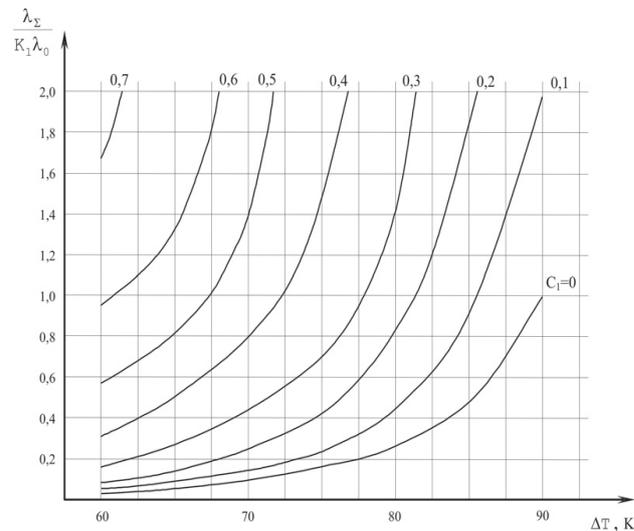


Рис. 4. Зависимость относительной величины интенсивности отказов  $\frac{\lambda_{\Sigma}}{K_1 \lambda_0}$  двухкаскадного ТЭУ в режиме  $\epsilon_{max}$  от перепада температур  $\Delta T$  при  $T=300K$ ,  $C_1 = 0 \div 0,7$

Ход зависимости величины интенсивности отказов от относительной тепловой нагрузки  $C_1$  и перепада температур (рис. 5) идентичны.

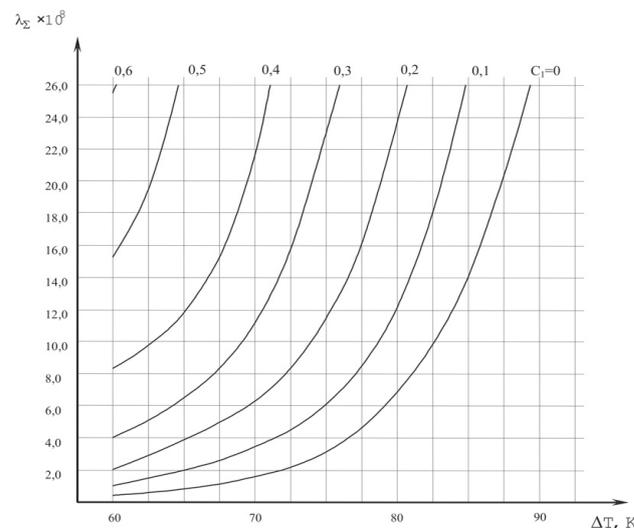


Рис. 5. Зависимость интенсивности отказов  $\lambda_{\Sigma}$  двухкаскадного ТЭУ в режиме  $\epsilon_{max}$  от перепада температур  $\Delta T$  при  $T=300K$ ,  $C_1 = 0 \div 0,6$ ,  $K_1=9$

Приведенные графические зависимости позволяют определить относительную величину интенсивности отказов  $\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1\lambda_0}$  в широком диапазоне изменения значений тепловой нагрузки и перепада температуры.

Для определения вероятности безотказной работы воспользуемся известным соотношением, связывающим величину интенсивности отказов  $\lambda_{\Sigma}$  и ресурс  $t = 10^4$  час.

$$P = e^{-\lambda_{\Sigma}t}$$

Величина вероятности безотказной работы уменьшается с ростом тепловой нагрузки и перепада температур (рис. 6).

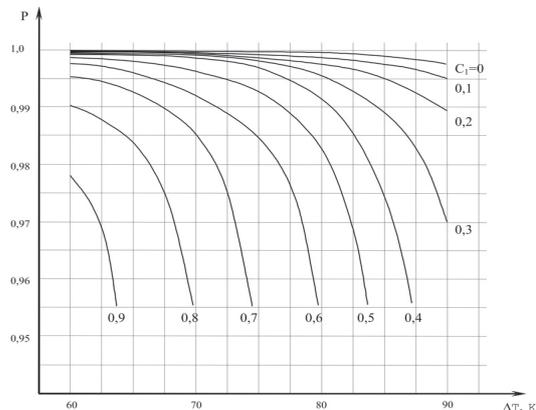


Рис. 6. Зависимость вероятности безотказной работы Р двухкаскадного ТЭУ в режиме  $\epsilon_{max}$  от перепада температур  $\Delta T$  при  $T=300K$ ,  $C_1=0 \div 0,9$ ,  $K1=9$

Таблица 1

$\Delta T = 60 K$

$Q_0$	$C_1$	$B_1$	$B_2$	I, A	$\Theta_1$	$\Theta_2$	$T_1, K$	$\frac{n_1}{n_2}$	EN	$\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1\lambda_0}$	$\lambda_{\Sigma} \cdot 10^8$ 1/ч	P
0,0	0,0	0,310	0,28	1,40	0,52	0,29	274,2	0,91	0,0	0,013	0,35	0,999965
0,19	0,10	0,385	0,35	1,75	0,52	0,29	274,0	0,75	0,110	0,036	0,98	0,999990
0,38	0,2	0,435	0,416	2,00	0,48	0,33	271,0	0,61	0,1472	0,075	2,00	0,999980
0,54	0,3	0,490	0,47	2,30	0,43	0,37	268,0	0,50	0,1475	0,144	3,90	0,99961
0,74	0,4	0,550	0,55	2,50	0,40	0,41	265,6	0,41	0,1900	0,307	8,26	0,99917
0,92	0,5	0,620	0,61	2,90	0,35	0,46	262,3	0,33	0,1220	0,564	15,2	0,99850
1,08	0,6	0,680	0,66	3,10	0,29	0,52	258,8	0,27	0,1020	0,940	25,4	0,99750
1,21	0,7	0,740	0,72	3,40	0,23	0,60	254,4	0,20	0,0800	1,670	45,0	0,99550
1,44	0,8	0,795	0,81	3,80	0,16	0,69	249,8	0,145	0,0570	3,560	96,1	0,99040
1,60	0,9	0,852	0,895	4,00	0,08	0,79	244,7	0,09	0,0350	8,160	220,2	0,97820
1,73	1,0	0,910	0,97	4,20	0,00	0,90	240,0	0,04	0,0150	24,60	663,5	0,93580

Таблица 2

$\Delta T = 70 K$

$Q_0$	$C_1$	$B_1$	$B_2$	I, A	$\Theta_1$	$\Theta_2$	$T_1, K$	$\frac{n_1}{n_2}$	EN	$\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1\lambda_0}$	$\lambda_{\Sigma} \cdot 10^8$ 1/ч	P
0,0	0,0	0,410	0,39	1,90	0,65	0,38	268,0	0,69	0,0	0,057	1,54	0,99985
0,17	0,1	0,480	0,46	2,20	0,62	0,40	266,2	0,56	0,0550	0,126	3,40	0,99966
0,346	0,2	0,540	0,520	2,50	0,58	0,44	263,6	0,45	0,0750	0,238	6,40	0,99935
0,49	0,3	0,610	0,57	2,75	0,55	0,48	261,5	0,37	0,0934	0,427	11,5	0,99880
0,66	0,4	0,670	0,64	3,00	0,49	0,53	258,2	0,30	0,0730	0,794	21,4	0,99786
0,81	0,5	0,730	0,72	3,30	0,43	0,60	254,3	0,23	0,0620	1,507	40,7	0,99590
0,96	0,6	0,795	0,78	3,60	0,36	0,68	250,2	0,17	0,0470	2,770	74,8	0,99255
1,12	0,7	0,860	0,86	3,90	0,28	0,77	245,8	0,11	0,0320	5,795	156,5	0,98450
1,13	0,8	0,910	0,94	4,20	0,19	0,88	240,6	0,052	0,0160	16,70	451,1	0,95590
1,45 max	0,9 max	0,980	1,02	4,55	0,10	1,00	235,7	0,0	0,0	$\infty$	$\infty$	0,0

Таблица 3

 $\Delta T = 80 \text{ K}$ 

$Q_0$	$C_1$	$B_1$	$B_2$	I, A	$\Theta_1$	$\Theta_2$	$T_1, \text{K}$	$\frac{n_1}{n_2}$	EN	$\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}$	$\lambda_{\Sigma} \cdot 10^8$ 1/ч	P
0,0	0,0	0,57	0,51	2,45	0,81	0,48	261,5	0,48	0,0	0,250	6,75	0,99932
0,15	0,1	0,62	0,58	2,70	0,76	0,52	259,0	0,40	0,025	0,450	12,1	0,99880
0,29	0,2	0,70	0,64	3,00	0,71	0,58	256,1	0,30	0,032	0,841	22,7	0,99770
0,44	0,33	0,75	0,70	3,25	0,64	0,63	252,9	0,24	0,0345	1,433	38,7	0,99610
0,60	0,4	0,80	0,77	3,55	0,56	0,72	248,5	0,16	0,0284	2,855	77,1	0,99230
0,70	0,5	0,88	0,85	3,80	0,49	0,81	244,0	0,10	0,0190	6,270	169,2	0,98320
0,89	0,6	0,94	0,94	4,24	0,40	0,90	239,9	0,05	0,010	17,90	484,5	0,95270
1,00 max	0,7 max	1,15	1,15	5,00	0,28	1,00	235,4	0,0	0,0	$\infty$	$\infty$	0,0

Таблица 4

 $\Delta T = 90 \text{ K}$ 

$Q_0$	$C_1$	$B_1$	$B_2$	I, A	$\Theta_1$	$\Theta_2$	$T_1, \text{K}$	$\frac{n_1}{n_2}$	EN	$\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}$	$\lambda_{\Sigma} \cdot 10^8$ 1/ч	P
0,0	0,0	0,730	0,66	3,10	0,93	0,64	252,2	0,28	0,0	1,030	6,75	0,99720
0,13	0,1	0,805	0,73	3,36	0,86	0,70	249,0	0,20	0,0086	1,960	12,1	0,99470
0,26	0,2	0,87	0,81	3,70	0,78	0,79	245,0	0,13	0,0097	4,130	22,7	0,98890
0,38	0,3	0,945	0,90	4,00	0,70	0,88	240,9	0,066	0,0064	11,45	38,7	0,96955
0,51 max	0,4 max	1,01	0,97	4,30	0,60	0,99	236,1	0,004 $\rightarrow 0$	0,0004 $\rightarrow 0$	251,4 $\rightarrow \infty$	77,1 $\rightarrow \infty$	0,50720 $\rightarrow 0$

### 3. Выводы

Предложена и рассмотрена модель взаимосвязи показателей надежности двухкаскадного ТЭУ с основными значимыми параметрами в режиме наибольшего холодильного коэффициента при последовательном соединении каскадов.

Полученные соотношения позволяют оценить показатели надежности, а именно, интенсивность отказов и вероятность безотказной работы выбранного варианта конструкции двухкаскадного ТЭУ в режиме

наибольшего холодильного коэффициента при изменении относительной тепловой нагрузки от  $C_1 = 0$  до  $C_2 = 1,0$  и перепадах температур от  $\Delta T = 60 \text{ K}$  до  $\Delta T = 90 \text{ K}$ .

Приведенные данные позволяют оценить экономичность функционирования и прогнозировать показатели надежности двухкаскадного ТЭУ выбранной конструкции в режиме наибольшего холодильного коэффициента в различных условиях эксплуатации, а также вести оптимизированное проектирование РЭА с использованием ТЭУ.

### Литература

1. 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. – 118с.
2. Зайков, В.П. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрического охлаждающего устройства в режиме  $\Delta T_{\max}$  [Текст] / В.П.Зайков, Л.А. Киншова, В.Ф. Моисеев, Казанжи Л.Д., Ключников Д.А. // Журнал ТКЭА. – 2009. – Т 82, №4. – С. 45–47.