

УДК 621.362.192

**Зайков В.П.**

Научно-исследовательский институт «ШТОРМ»

**Мещеряков В.И.**

Одесский государственный экологический университет

**Журавлев Ю.И.**

Национальный университет «Одесская морская академия»

## ДИНАМИКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОДНОКАСКАДНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

*Рассмотрено влияние конструктивных и технологических элементов на основные параметры, показатели надежности и динамику функционирования термоэлектрических охлаждающих устройств в характерных токовых режимах в диапазоне рабочих перепадов температуры и тепловой нагрузки при заданной геометрии ветвей термоэлементов. Проведена оценка времени выхода на стационарный режим охладителя во взаимосвязи с основными параметрами и показателями надежности.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический охладитель, время выхода на стационарный режим, геометрия ветвей термоэлементов.

**Постановка проблемы.** Передаточные характеристики и показатели надежности полупроводниковых элементов существенно зависят от температурных условий их функционирования. Повышение температуры на  $10^{\circ}\text{C}$  практически удваивает интенсивность отказов. Теплонагруженные элементы современной радиоэлектронной аппаратуры (полупроводниковые лазеры, приемники интенсивного инфракрасного излучения, процессоры, выходные каскады силовых приборов и т.п.) работают в условиях, предполагающих необходимость отвода от них избыточной тепловой энергии. К системам обеспечения их тепловых режимов теплонагруженных элементов предъявляются требования по отводу необходимой энергии на заданном временном интервале, а также показателям надежности, поскольку при выходе из строя системы обеспечения теплового режима автоматически выходит из строя и сам теплонагруженный элемент. Если же речь идет о критической системе (бортовой информационной системе летательного аппарата, управляющей системе транспортного средства и т.п.), то нарушение ее нормального функционирования может привести к значительным не только материальным затратам, не соизмеримым со стоимостью теплонагруженного элемента. Проблема состоит в том, что условия эксплуатации таких элементов постоянно ужесточаются в направлении быстродействия и плотности мощности поглощения или выделения, что приводит к снижению их надежности, а требования к повышению надежности аппаратуры, в состав которой входят эти элементы, постоянно возрастают.

### **Анализ последних достижений и публикаций.**

Термоэлектрические охладители (ТЭУ) относятся к перспективным устройствам обеспечения тепловых режимов теплонагруженных элементов радиоэлектронной аппаратуры [1]. Этот выбор обусловлен малыми габаритами и массой, отсутствием подвижных частей [2], приводит к повышенным динамическим характеристикам [3] и показателям надежности [4] по сравнению с компрессионными системами. Вместе с тем повышение требований к надежности и быстродействию бортовых информационных систем, работающих в экстремальных режимах, требует повышения этих показателей и у систем обеспечения тепловых режимов теплонагруженных элементов, являющихся их необходимой составляющей [5]. Работы в этом направлении идут по пути учета влияния на показатели надежности конструктивных и технологических показателей [6], тепловой нагрузки [7], материала термоэлементов [8], технологии изготовления термоэлектрических охладителей [9].

В ряде случаев проектирования ТЭУ одним из основных требований является обеспечение заданного времени выхода на стационарный режим работы и возможность его сокращения без учета массы  $m_0$  и теплоемкости  $C_0$  объекта охлаждения. Для этого рассмотрим динамическую составляющую ТЭУ для случая, когда учитывается только масса и теплоемкость конструктивных и технологических элементов (КТЭ) на теплопоглощающем спае ТЭУ.

**Формулирование целей статьи.** Целью работы является определение динамических

параметров ТЭУ и возможность их минимизации для различных перепадов температуры, тепловой нагрузки и токовых режимов работы при заданной геометрии ветвей термоэлементов.

**Изложение основного материала.** В работе [10] получены соотношения для определения времени выхода на стационарный режим работы  $\tau$ , где достаточно полно описаны КТЭ и их методы расчета для геометрии ветвей термоэлементов  $l/S = 10 \text{ см}^{-1}$ . Поэтому не вызывает затруднений оценить массу и теплоемкость КТЭ при  $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$

Кроме того, воспользуемся соотношением для определения времени выхода на стационарный режим работы  $\tau$  во взаимосвязи с относительным рабочим током  $B$  и суммарной величиной произведения теплоемкости и массы составляющих КТЭ при заданной геометрии ветвей термоэлементов  $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$

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

где  $\gamma = \frac{I_{\max H}^2 R_H}{I_{\max K}^2 R_K}$ ,

•  $m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$  – суммарная величина произведения теплоемкости и массы составляющих КТЭ при заданной геометрии ветвей термоэлементов  $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$ ;

$I_{\max H}, R_H$  – соответственно, максимальный рабочий ток, А, и электрическое сопротивление ветви термоэлемента, Ом, в начале процесса охлаждения при  $\tau = 0$ ;

$I_{\max K}, R_K$  – соответственно, максимальный рабочий ток, А, и электрическое сопротивление ветви термоэлемента, Ом, в конце процесса охлаждения  $\tau$ ;

$B_H = I/I_{\max H}$  – относительный рабочий ток при  $\tau = 0$ ;

$B_K = I/I_{\max K}$  – относительный рабочий ток при  $\tau$ ;

$I$  – величина рабочего тока, А;

$I_{\max H} = e_H T/R_H$  – максимальный рабочий ток, А, при  $\tau = 0$ ;

$I_{\max K} = e_K T_0/R_K$  – максимальный рабочий ток, А, при  $\tau$ ;

$e_H, e_K$  – соответственно, коэффициент термоЭДС ветви термоэлемента в начале и в конце процесса охлаждения, В/К;

$T_0$  – температура теплопоглощающего спая в конце процесса охлаждения, К;

$T$  – температура теплопоглощающего спая в начале процесса охлаждения, К;

$\Theta = \Delta T/T_{\max}$  – относительный перепад температуры;

$\Delta T = T - T_0$  – перепад температуры ТЭУ, К;

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

$\bar{z}$  – усредненное значение эффективности термоэлектрического материала в модуле, 1/К;

$K_K = \bar{\alpha}_K / (l/S)$  – коэффициент теплопередачи, Вт/К;

$\bar{\alpha}_K$  – усредненный коэффициент теплопроводности, Вт/(см·К).

Количество термоэлементов  $n$  можно определить из соотношения

$$n = \frac{Q_0}{I_{\max K}^2 R_K (2B_K - B_K^2 - \Theta)}, \quad (2)$$

где  $Q_0$  – величина тепловой нагрузки, Вт.

Мощность потребления  $W_K$  ТЭУ можно определить из выражения:

$$W_K = 2n I_{\max K}^2 R_K B_K \left( B_K + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right). \quad (3)$$

Падение напряжения

$$U_K = W_K / I. \quad (4)$$

Холодильный коэффициент  $E$  можно вычислить по формуле

$$E = Q_0 / W_K. \quad (5)$$

Относительную величину интенсивности отказов  $\lambda/\lambda_0$  можно определить по формуле [11]

$$\lambda/\lambda_0 = n B_K^2 (\Theta + C_K) \frac{\left( B_K + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right)^2}{\left( 1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right)^2} K_{T_1}; \quad (6)$$

где  $C_K = \frac{Q_0}{n I_{\max K}^2 R_K}$  – относительная тепловая нагрузка;

$K_{T_1}$  – значимый коэффициент пониженной температуры [11].

Условия равенства токов можно записать в виде

$$I = B_H I_{\max H} = B_K I_{\max K}. \quad (7)$$

Вероятность безотказной работы  $P$  ТЭУ можно определить из выражения

$$P = \exp(-\lambda t). \quad (8)$$

**Режим  $Q_{0\max}$ .** Результаты расчетов основных параметров, показателей надежности и времени выхода на стационарный режим работы для различных перепадов температуры  $\Delta T$  в диапазоне от 5 до 60 К и тепловой нагрузки  $Q_0$  от 5 до 20 Вт для случая, когда  $m_0 C_0 \rightarrow 0$ , приведены в табл. 1, где

$$\beta = \frac{(\lambda/\lambda_0)_K}{(\lambda/\lambda_0)_H}.$$

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 1, показал, что с ростом перепада температуры  $\Delta T$  при  $m_0 C_0 \rightarrow 0$ :

– увеличивается время выхода на стационарный режим  $\tau$  (рис. 1, п. 1) и не зависит от тепловой нагрузки  $Q_0$ ;

– уменьшается рабочий ток  $I$  (рис. 2, п. 1) и не зависит от тепловой нагрузки  $Q_0$ ;

Таблица 1

$T = 300 \text{ K}$ ,  $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$ , режим  $Q_{0\text{max}}$ ,  $m_0 C_0 \rightarrow 0$ ,  $\bullet m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$

| $Q_0$ , Вт  | $n$ , шт. | $W$ , Вт | $U$ , В | $E$   | $I$ , А | $\beta$ | $(\lambda/\lambda_0)_H$ | $\gamma$ , отн. ед. | $\tau$ , с | $(\lambda/\lambda_0)_K$ | $\lambda_K \cdot 10^4$ , 1/ч | $P$     |
|---|-----------|----------|---------|-------|---------|---------|-------------------------|---------------------|------------|-------------------------|------------------------------|---------|
| 1   | 2         | 3        | 4       | 5     | 6       | 7       | 8                       | 9                   | 10         | 11                      | 12                           | 13      |
| $\Delta T = 5 \text{ K}$ ; $\Delta T_{\text{max}} = 104,4 \text{ K}$ ; $\Theta = 0,048$ ; $R_K = 44,0 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ ; $R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ ;<br>$I_{\text{maxK}} = 1,34 \text{ A}$ ; $I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ A}$ ; $B_K = 1,0$ ; $B_H = 0,9926$ |           |          |         |       |         |         |                         |                     |            |                         |                              |         |
| 0,5   | 6,6       | 1,045    | 0,79    | 0,478 | 1,34    | 1,06    | 6,0                     | 1,024               | 0,39       | 6,35                    | 19                           | 0,99810 |
| 1,0   | 13,2      | 2,10     | 1,58    |       |         |         | 12,0                    |                     |            | 12,7                    | 38,1                         | 0,99620 |
| 2,0   | 26,4      | 4,20     | 3,16    |       |         |         | 24,0                    |                     |            | 25,4                    | 76,2                         | 0,9924  |
| 5,0   | 66,0      | 10,5     | 7,90    |       |         |         | 60,0                    |                     |            | 63,5                    | 191                          | 0,9811  |
| 7,0   | 92,4      | 14,7     | 11,1    |       |         |         | 84,0                    |                     |            | 88,9                    | 266,7                        | 0,9737  |
| 10,0  | 132       | 21,0     | 15,8    |       |         |         | 120,0                   |                     |            | 127                     | 381                          | 0,9626  |
| 20,0  | 264       | 42,0     | 31,6    |       |         |         | 240                     |                     |            | 254                     | 726                          | 0,9266  |
| $\Delta T = 10 \text{ K}$ ; $\Delta T_{\text{max}} = 100,5 \text{ K}$ ; $\Theta = 0,10$ ; $R_K = 43,48 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ ; $R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ ;<br>$I_{\text{maxK}} = 1,33 \text{ A}$ ; $I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ A}$ ; $B_K = 1,0$ ; $B_H = 0,985$ |           |          |         |       |         |         |                         |                     |            |                         |                              |         |
| 0,5   | 7,2       | 1,113    | 0,85    | 0,450 | 1,33    | 1,17    | 5,8                     | 1,052               | 0,85       | 6,78                    | 20,4                         | 0,9980  |
| 1,0   | 14,4      | 2,23     | 1,70    |       |         |         | 11,6                    |                     |            | 13,6                    | 40,7                         | 0,9960  |
| 2,0   | 28,8      | 4,46     | 3,40    |       |         |         | 23,2                    |                     |            | 27,2                    | 81,6                         | 0,9919  |
| 5,0   | 72,0      | 11,15    | 8,50    |       |         |         | 58,0                    |                     |            | 68,0                    | 204,0                        | 0,97980 |
| 7,0   | 101       | 15,6     | 11,9    |       |         |         | 81,2                    |                     |            | 95,2                    | 286                          | 0,9718  |
| 10,0  | 144       | 22,3     | 17,0    |       |         |         | 116                     |                     |            | 136                     | 408                          | 0,9600  |
| 20,0  | 288       | 44,6     | 34,0    |       |         |         | 232                     |                     |            | 272                     | 816                          | 0,9216  |
| $\Delta T = 20 \text{ K}$ , $\Delta T_{\text{max}} = 93,7 \text{ K}$ ; $\Theta = 0,213$ ; $R_K = 42,55 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ ; $R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ ;<br>$I_{\text{maxK}} = 1,31 \text{ A}$ ; $I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ A}$ ; $B_K = 1,0$ ; $B_H = 0,970$ |           |          |         |       |         |         |                         |                     |            |                         |                              |         |
| 0,5   | 8,70      | 1,28     | 1,0     | 0,390 | 1,31    | 1,41    | 5,53                    | 1,11                | 1,91       | 7,82                    | 23,46                        | 0,99766 |
| 1,0   | 17,4      | 2,56     | 2,0     |       |         |         | 11,06                   |                     |            | 15,6                    | 46,8                         | 0,99533 |
| 2,0   | 34,8      | 5,10     | 4,0     |       |         |         | 22,1                    |                     |            | 31,2                    | 93,6                         | 0,9907  |
| 5,0   | 87,0      | 12,8     | 10,0    |       |         |         | 55,3                    |                     |            | 78,0                    | 234                          | 0,9769  |
| 7,0   | 122       | 17,9     | 14,0    |       |         |         | 77,4                    |                     |            | 109                     | 328                          | 0,9678  |
| 10,0  | 174       | 25,6     | 20,0    |       |         |         | 110,6                   |                     |            | 156                     | 468                          | 0,9543  |
| 20,0  | 348       | 51,2     | 40,0    |       |         |         | 221,2                   |                     |            | 312                     | 936                          | 0,9106  |
| $\Delta T = 30 \text{ K}$ , $\Delta T_{\text{max}} = 86,8 \text{ K}$ ; $\Theta = 0,346$ ; $R_K = 40,82 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ ; $R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ ;<br>$I_{\text{maxK}} = 1,30 \text{ A}$ ; $I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ A}$ ; $B_K = 1,0$ ; $B_H = 0,960$ |           |          |         |       |         |         |                         |                     |            |                         |                              |         |
| 0,5   | 11,1      | 1,57     | 1,27    | 0,320 | 1,30    | 1,81    | 5,34                    | 1,18                | 3,28       | 9,66                    | 29,0                         | 0,9971  |
| 1,0   | 22,2      | 3,14     | 2,54    |       |         |         | 10,7                    |                     |            | 19,3                    | 58,0                         | 0,9942  |
| 2,0   | 44,4      | 6,28     | 5,08    |       |         |         | 21,4                    |                     |            | 38,6                    | 116                          | 0,9885  |
| 5,0   | 111,0     | 15,7     | 12,7    |       |         |         | 53,5                    |                     |            | 96,5                    | 290                          | 0,9714  |
| 7,0   | 155,0     | 22,0     | 17,8    |       |         |         | 74,9                    |                     |            | 135                     | 405                          | 0,9603  |
| 10,0  | 222,0     | 31,4     | 25,4    |       |         |         | 107                     |                     |            | 193                     | 579                          | 0,9437  |
| 20,0  | 444,0     | 62,8     | 50,8    |       |         |         | 214                     |                     |            | 386                     | 1158                         | 0,8907  |
| $\Delta T = 40 \text{ K}$ ; $\Delta T_{\text{max}} = 78,9 \text{ K}$ ; $\Theta = 0,50$ ; $R_K = 40,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ ; $R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ ;<br>$I_{\text{maxK}} = 1,25 \text{ A}$ ; $I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ A}$ ; $B_K = 1,0$ ; $B_H = 0,926$   |           |          |         |       |         |         |                         |                     |            |                         |                              |         |
| 0,5   | 16,0      | 2,0      | 1,74    | 0,250 | 1,25    | 2,6     | 4,64                    | 1,28                | 5,20       | 12,2                    | 36,7                         | 0,9963  |
| 1,0   | 32,0      | 4,0      | 3,50    |       |         |         | 9,28                    |                     |            | 24,4                    | 73,2                         | 0,9927  |
| 2,0   | 64,0      | 8,0      | 7,0     |       |         |         | 18,6                    |                     |            | 48,8                    | 146                          | 0,9855  |
| 5,0   | 160       | 20,0     | 17,5    |       |         |         | 46,4                    |                     |            | 122,0                   | 366                          | 0,9640  |
| 7,0   | 224       | 28,0     | 24,5    |       |         |         | 65,0                    |                     |            | 171                     | 512                          | 0,9500  |
| 10,0  | 320       | 40,0     | 35,0    |       |         |         | 92,8                    |                     |            | 244                     | 732                          | 0,9294  |
| 20,0  | 640       | 80,0     | 70,0    |       |         |         | 185,6                   |                     |            | 488                     | 1464                         | 0,8638  |
| $\Delta T = 50 \text{ K}$ ; $\Delta T_{\text{max}} = 73,4 \text{ K}$ ; $\Theta = 0,68$ ; $R_K = 39,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ ; $R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ ;<br>$I_{\text{maxK}} = 1,22 \text{ A}$ ; $I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ A}$ ; $B_K = 1,0$ ; $B_H = 0,904$   |           |          |         |       |         |         |                         |                     |            |                         |                              |         |

|   |       |       |       |       |       |      |        |      |       |       |       |        |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|------|--------|------|-------|-------|-------|--------|
| 1   | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7    | 8      | 9    | 10    | 11    | 12    | 13     |
| 0,5   | 27,5  | 3,19  | 2,90  | 0,157 | 1,22  | 4,5  | 4,25   | 1,39 | 8,30  | 19,3  | 57,9  | 0,9942 |
| 1,0   | 55,0  | 6,38  | 5,80  |       |       |      | 8,5    |      |       | 38,6  | 116   | 0,9884 |
| 2,0   | 110   | 12,76 | 11,6  |       |       |      | 17,0   |      |       | 77,2  | 232   | 0,9771 |
| 5,0   | 275   | 31,9  | 29,0  |       |       |      | 42,5   |      |       | 193   | 579   | 0,9437 |
| 7,0   | 385   | 44,7  | 40,6  |       |       |      | 59,5   |      |       | 270   | 811   | 0,9221 |
| 10,0  | 550   | 63,8  | 58,0  |       |       |      | 85,0   |      |       | 386   | 1158  | 0,8907 |
| 20,0  | 1100  | 127,6 | 116   | 170,0 | 772   | 2316 | 0,7933 |      |       |       |       |        |
| $\Delta T = 60 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 66,8 \text{ K}; \Theta = 0,90; R_K = 38,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\max K} = 1,184 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 1,0; B_H = 0,8770$ |       |       |       |       |       |      |        |      |       |       |       |        |
| 0,5   | 109,9 | 11,6  | 11,2  | 0,043 | 1,184 | 18,3 | 3,80   | 1,50 | 15,30 | 69,5  | 208,5 | 0,9794 |
| 1,0   | 218   | 23,2  | 22,4  |       |       |      | 7,6    |      |       | 139,0 | 417,0 | 0,9592 |
| 2,0   | 436   | 46,4  | 44,8  |       |       |      | 15,2   |      |       | 278,0 | 834   | 0,9200 |
| 5,0   | 1090  | 116   | 112   |       |       |      | 38,0   |      |       | 695   | 2085  | 0,8118 |
| 7,0   | 1526  | 162   | 157,0 |       |       |      | 53,2   |      |       | 973   | 2919  | 0,7468 |
| 10,0  | 2180  | 232   | 224   |       |       |      | 76,0   |      |       | 1390  | 4170  | 0,6590 |
| 20,0  | 4360  | 464   | 448   | 152   | 2780  | 8340 | 0,4343 |      |       |       |       |        |

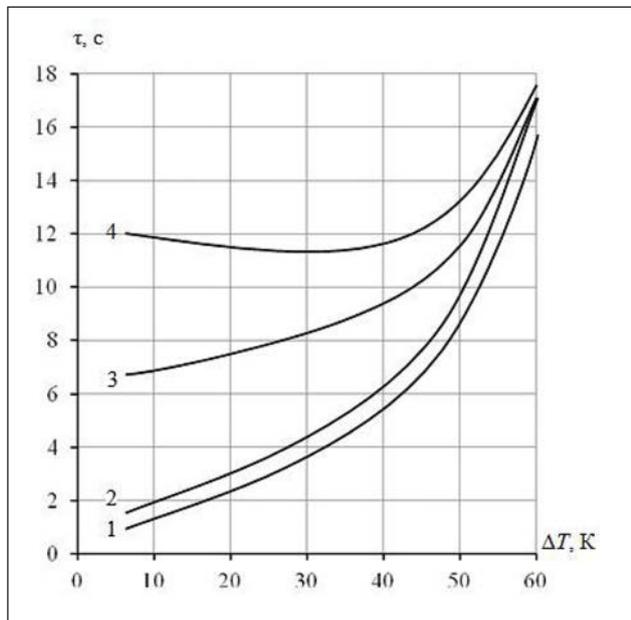


Рис. 1. Зависимость времени выхода  $\tau$  на стационарный режим работы однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300 \text{ K}, l/S = 40 \text{ см}^{-1}$ ;  $\bullet m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$  для различных режимов работы: 1 –  $Q_{0\max}$ ; 2 –  $(Q_0/I)_{\max}$ ; 3 –  $(Q_0/P)_{\max}$ ; 4 –  $\lambda_{\min}$

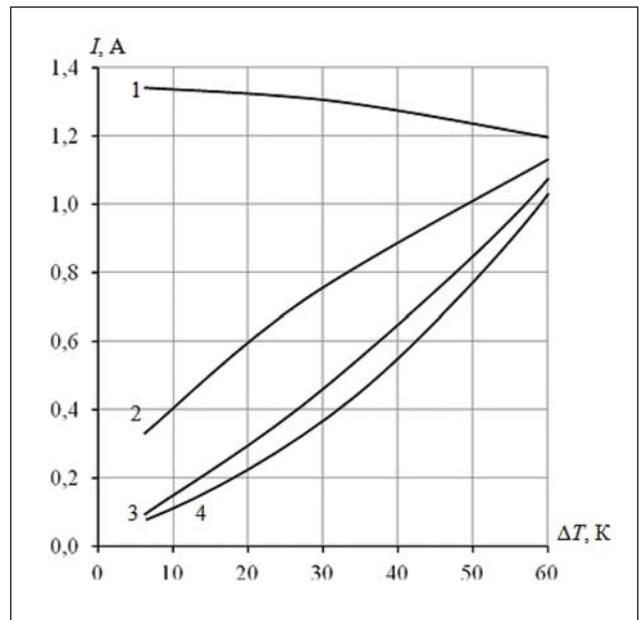


Рис. 2. Зависимость величины рабочего тока  $I$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300 \text{ K}, l/S = 40 \text{ см}^{-1}$  для различных режимов работы: 1 –  $Q_{0\max}$ ; 2 –  $(Q_0/I)_{\max}$ ; 3 –  $(Q_0/P)_{\max}$ ; 4 –  $\lambda_{\min}$

– уменьшается холодильный коэффициент  $E$  (рис. 3, п. 1) и не зависит от тепловой нагрузки  $Q_0$ ;

– увеличивается количество термоэлементов  $n$  для различной тепловой нагрузки  $Q_0$  (рис. 4); с ростом тепловой нагрузки количество термоэлементов увеличивается;

– увеличивается падение напряжения  $U$  для различной тепловой нагрузки  $Q_0$ ; с ростом тепловой нагрузки падение напряжение увеличивается;

– увеличивается относительная величина интенсивности отказов  $\lambda/\lambda_0$  для различной тепловой нагрузки  $Q_0$  (рис. 5); с ростом тепловой нагрузки интенсивность отказов увеличивается;

– уменьшается вероятность безотказной работы  $P$  (рис. 6) для различной тепловой нагрузки  $Q_0$ ; с ростом тепловой нагрузки вероятность безотказной работы уменьшается;

– увеличивается отношение  $\beta = \lambda_K/\lambda_H$  интенсивности отказов в начале  $\lambda_H$  и в конце  $\lambda_K$  процесса

Таблица 2

$T = 300 \text{ K}; l/S = 40 \text{ см}^{-1}; \text{режим } (Q_0/I)_{\max}; m_0 C_0 \rightarrow 0, \sum m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$

| $Q_0$ , Вт  | $n$ , шт. | $W$ , Вт | $U$ , В | $E$  | $I$ , А | $\beta$ | $(\lambda/\lambda_0)_H$ | $\gamma$ , отн.ед. | $i$ , с | $(\lambda/\lambda_0)_K$ | $\lambda_K \cdot 10^4$ , 1/ч | $P$       |
|---|-----------|----------|---------|------|---------|---------|-------------------------|--------------------|---------|-------------------------|------------------------------|-----------|
| 1   | 2         | 3        | 4       | 5    | 6       | 7       | 8                       | 9                  | 10      | 11                      | 12                           | 13        |
| $\Delta T = 5 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 104,4 \text{ K}; \Theta = 0,048; R_K = 44,0 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\max K} = 1,34 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,219; B_H = 0,217$  |           |          |         |      |         |         |                         |                    |         |                         |                              |           |
| 0,5   | 18,7      | 0,15     | 0,52    | 3,33 | 0,29    | 1,31    | 0,0137                  | 1,024              | 1,18    | 0,018                   | 0,054                        | 0,9999946 |
| 1,0   | 37,4      | 0,30     | 1,04    |      |         |         | 0,0274                  |                    |         | 0,036                   | 0,109                        | 0,999989  |
| 2,0   | 74,8      | 0,60     | 2,08    |      |         |         | 0,0548                  |                    |         | 0,072                   | 0,217                        | 0,999978  |
| 5,0   | 187       | 1,50     | 5,20    |      |         |         | 0,137                   |                    |         | 0,181                   | 0,543                        | 0,999946  |
| 7,0   | 262       | 2,10     | 7,30    |      |         |         | 0,1918                  |                    |         | 0,253                   | 0,760                        | 0,999924  |
| 10,0  | 374       | 3,0      | 10,4    |      |         |         | 0,274                   |                    |         | 0,362                   | 1,09                         | 0,99989   |
| 20,0  | 748       | 6,0      | 20,8    |      |         |         | 0,480                   |                    |         | 0,724                   | 2,17                         | 0,99978   |
| $\Delta T = 10 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 100,5 \text{ K}; \Theta = 0,10; R_K = 43,48 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\max K} = 1,33 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,316; B_H = 0,311$ |           |          |         |      |         |         |                         |                    |         |                         |                              |           |
| 0,5   | 15,3      | 0,253    | 0,61    | 2,00 | 0,42    | 1,52    | 0,0573                  | 1,052              | 1,86    | 0,087                   | 0,261                        | 0,999974  |
| 1,0   | 30,6      | 0,506    | 1,22    |      |         |         | 0,1146                  |                    |         | 0,174                   | 0,522                        | 0,999948  |
| 2,0   | 61,2      | 1,10     | 2,44    |      |         |         | 0,229                   |                    |         | 0,348                   | 1,04                         | 0,999896  |
| 5,0   | 153       | 2,53     | 6,10    |      |         |         | 0,573                   |                    |         | 0,87                    | 2,61                         | 0,99974   |
| 7,0   | 214       | 3,54     | 8,54    |      |         |         | 0,802                   |                    |         | 1,22                    | 3,65                         | 0,99963   |
| 10,0  | 306       | 5,06     | 12,2    |      |         |         | 1,146                   |                    |         | 1,74                    | 5,22                         | 0,99948   |
| 20,0  | 612       | 10,1     | 24,4    |      |         |         | 2,292                   |                    |         | 3,48                    | 7,0                          | 0,99930   |
| $\Delta T = 20 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 93,7 \text{ K}; \Theta = 0,213; R_K = 42,55 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\max K} = 1,31 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,462; B_H = 0,448$ |           |          |         |      |         |         |                         |                    |         |                         |                              |           |
| 0,5   | 14,2      | 0,482    | 0,82    | 1,04 | 0,60    | 1,88    | 0,2488                  | 1,11               | 3,10    | 0,469                   | 1,41                         | 0,99986   |
| 1,0   | 28,4      | 0,954    | 1,64    |      |         |         | 0,4976                  |                    |         | 0,938                   | 2,81                         | 0,99972   |
| 2,0   | 56,8      | 1,93     | 3,28    |      |         |         | 0,9952                  |                    |         | 1,88                    | 5,63                         | 0,99944   |
| 5,0   | 142       | 4,82     | 8,20    |      |         |         | 2,488                   |                    |         | 4,70                    | 14,1                         | 0,9986    |
| 7,0   | 199       | 6,75     | 11,5    |      |         |         | 3,483                   |                    |         | 6,57                    | 19,7                         | 0,9980    |
| 10,0  | 284       | 9,64     | 16,4    |      |         |         | 4,976                   |                    |         | 9,38                    | 28,1                         | 0,9972    |
| 20,0  | 568       | 19,3     | 32,8    |      |         |         | 9,952                   |                    |         | 18,8                    | 56,3                         | 0,9944    |
| $\Delta T = 30 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 86,8 \text{ K}; \Theta = 0,346; R_K = 40,82 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\max K} = 1,30 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,588; B_H = 0,565$ |           |          |         |      |         |         |                         |                    |         |                         |                              |           |
| 0,5   | 15,6      | 0,822    | 1,12    | 0,61 | 0,76    | 2,40    | 0,636                   | 1,18               | 4,50    | 1,52                    | 4,56                         | 0,99954   |
| 1,0   | 31,2      | 1,64     | 2,24    |      |         |         | 1,272                   |                    |         | 3,0                     | 9,0                          | 0,99910   |
| 2,0   | 62,4      | 3,28     | 4,48    |      |         |         | 2,544                   |                    |         | 6,0                     | 18,0                         | 0,9982    |
| 5,0   | 156       | 8,2      | 11,2    |      |         |         | 6,36                    |                    |         | 15,0                    | 45,0                         | 0,9955    |
| 7,0   | 218       | 11,5     | 15,7    |      |         |         | 8,904                   |                    |         | 21,0                    | 63,0                         | 0,9937    |
| 10,0  | 312       | 16,4     | 22,4    |      |         |         | 12,72                   |                    |         | 30,0                    | 90,0                         | 0,9910    |
| 20,0  | 624       | 32,8     | 44,8    |      |         |         | 25,44                   |                    |         | 60,0                    | 180,0                        | 0,9822    |
| $\Delta T = 40 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 78,9 \text{ K}; \Theta = 0,50; R_K = 40,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\max K} = 1,25 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,707; B_H = 0,655$   |           |          |         |      |         |         |                         |                    |         |                         |                              |           |
| 0,5   | 20,8      | 1,39     | 1,70    | 0,36 | 0,88    | 3,36    | 1,174                   | 1,28               | 6,30    | 3,95                    | 11,8                         | 0,99882   |
| 1,0   | 41,6      | 2,78     | 3,40    |      |         |         | 2,348                   |                    |         | 7,9                     | 23,7                         | 0,9976    |
| 2,0   | 83,2      | 5,60     | 6,80    |      |         |         | 4,70                    |                    |         | 15,8                    | 47,4                         | 0,9954    |
| 5,0   | 208       | 13,9     | 17,0    |      |         |         | 11,74                   |                    |         | 39,5                    | 118,5                        | 0,9882    |
| 7,0   | 291       | 19,5     | 23,8    |      |         |         | 16,44                   |                    |         | 55,3                    | 166                          | 0,935     |
| 10,0  | 416       | 27,8     | 34,0    |      |         |         | 23,48                   |                    |         | 79,0                    | 237                          | 0,9766    |
| 20,0  | 832       | 55,6     | 68,0    |      |         |         | 47,0                    |                    |         | 158                     | 474                          | 0,9537    |
| $\Delta T = 50 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 73,4 \text{ K}; \Theta = 0,68; R_K = 39,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\max K} = 1,22 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,825; B_H = 0,746$   |           |          |         |      |         |         |                         |                    |         |                         |                              |           |

| 1  | 2    | 3     | 4     | 5     | 6    | 7    | 8      | 9    | 10   | 11    | 12   | 13     |
|--|------|-------|-------|-------|------|------|--------|------|------|-------|------|--------|
| 0,5  | 33,5 | 2,75  | 3,0   | 0,18  | 1,0  | 5,66 | 1,96   | 1,39 | 9,20 | 11,1  | 33,3 | 0,9967 |
| 1,0  | 67,0 | 5,50  | 6,0   |       |      |      | 3,92   |      |      | 22,2  | 66,7 | 0,9934 |
| 2,0  | 134  | 11,0  | 12,0  |       |      |      | 7,84   |      |      | 44,4  | 133  | 0,9868 |
| 5,0  | 335  | 27,5  | 30,0  |       |      |      | 19,6   |      |      | 111,0 | 333  | 0,9672 |
| 7,0  | 469  | 38,5  | 42,0  |       |      |      | 27,44  |      |      | 155   | 466  | 0,9545 |
| 10,0   | 670  | 55,0  | 60,0  |       |      |      | 39,2   |      |      | 222   | 667  | 0,9355 |
| 20,0   | 1340 | 110,0 | 120,0 | 78,4  | 444  | 1332 | 0,8753 |      |      |       |      |        |
| $\Delta T = 60 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 66,8 \text{ K}; \Theta = 0,90; R_K = 38,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\max K} = 1,184 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,949; B_H = 0,832$ |      |       |       |       |      |      |        |      |      |       |      |        |
| 0,5  | 129  | 12,56 | 12,75 | 0,040 | 1,12 | 21,9 | 3,07   | 1,50 | 15,7 | 67,3  | 202  | 0,980  |
| 1,0  | 258  | 25,1  | 25,5  |       |      |      | 6,14   |      |      | 135   | 404  | 0,9604 |
| 2,0  | 516  | 50,2  | 51,0  |       |      |      | 12,28  |      |      | 270   | 810  | 0,9222 |
| 5,0  | 1290 | 125,5 | 127,5 |       |      |      | 30,7   |      |      | 675   | 2025 | 0,8167 |
| 7,0  | 1806 | 176   | 179   |       |      |      | 43,0   |      |      | 945   | 2835 | 0,7531 |
| 10,0   | 2580 | 251   | 255   |       |      |      | 61,4   |      |      | 1350  | 4050 | 0,6670 |
| 20,0   | 5160 | 502   | 510   | 122,8 | 2700 | 8100 | 0,4450 |      |      |       |      |        |

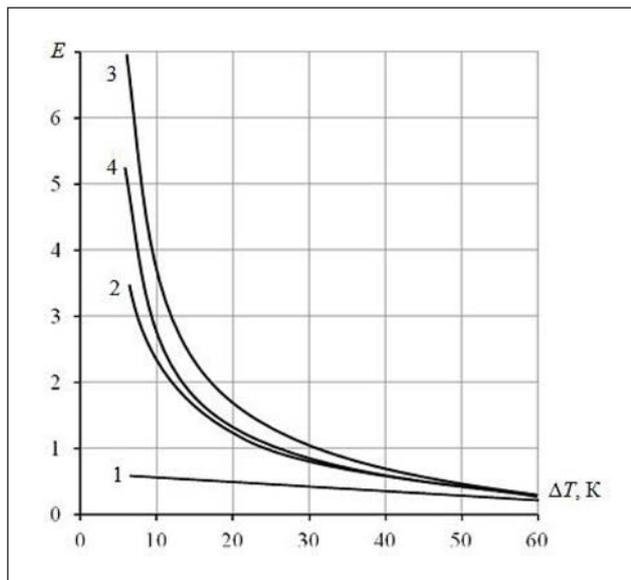


Рис. 3. Зависимость холодильного коэффициента  $E$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300 \text{ K}$ ,  $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$  для различных режимов работы: 1 –  $Q_{0\max}$ ; 2 –  $(Q_0/I)_{\max}$ ; 3 –  $(Q_0/I^2)_{\max}$ ; 4 –  $\lambda_{\min}$

охлаждения (рис. 7, п. 1) и не зависит от тепловой нагрузки  $Q_0$ .

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 1, показал, что с ростом перепада температуры  $\Delta T$  при  $m_0 C_0 \rightarrow 0$ :

- увеличивается время выхода на стационарный режим  $\tau$  (рис. 1, п. 2) и не зависит от тепловой нагрузки  $Q_0$ ;

- увеличивается величина рабочего тока  $I$  (рис. 2, п. 2) и не зависит от тепловой нагрузки  $Q_0$ ;

- уменьшается холодильный коэффициент  $E$  (рис. 3, п. 2) и не зависит от тепловой нагрузки  $Q_0$ ;

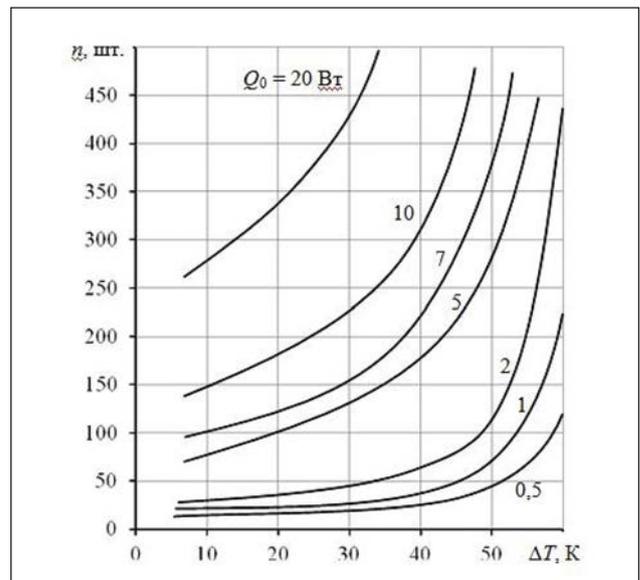


Рис. 4. Зависимость количества термоэлементов  $n$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300 \text{ K}$ ,  $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$  для различной тепловой нагрузки  $Q_0$  в режиме  $Q_{0\max}$

- функциональная зависимость количества термоэлементов  $n = f(\Delta T)$  имеет минимум при  $\Delta T = 20 \text{ K}$  (рис. 8); с ростом тепловой нагрузки  $Q_0$  количество термоэлементов  $n$  увеличивается;

- увеличивается падение напряжения  $U$  для различной тепловой нагрузки  $Q_0$ ; с ростом тепловой нагрузки падение напряжение увеличивается;

- увеличивается относительная величина интенсивности отказов  $\lambda/\lambda_0$  (рис. 9); с ростом тепловой нагрузки  $Q_0$  интенсивность отказов увеличивается;

- уменьшается вероятность безотказной работы  $P$  для различной тепловой нагрузки  $Q_0$

Таблица 3

$T = 300 \text{ K}; l/S = 40 \text{ см}^{-1}; \text{режим } (Q_0/P^2)_{\text{max}}; m_0 C_0 \rightarrow 0, \sum_i m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$

| $Q_0, \text{ Вт}$   | $n, \text{ шт.}$ | $W, \text{ Вт}$ | $U, \text{ В}$ | $E$  | $I, \text{ А}$ | $\beta$ | $(\lambda/\lambda_0)_H$ | $\gamma, \text{ отн.ед.}$ | $\tau, \text{ с}$ | $(\lambda/\lambda_0)_K$ | $\lambda_K \cdot 10^4, \text{ 1/ч}$ | $P$       |
|---|------------------|-----------------|----------------|------|----------------|---------|-------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------------------|-----------|
| 1   | 2                | 3               | 4              | 5    | 6              | 7       | 8                       | 9                         | 10                | 11                      | 12                                  | 13        |
| $\Delta T = 5 \text{ K}; \Delta T_{\text{max}} = 104,4 \text{ K}; \Theta = 0,048; R_K = 44,0 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\text{maxK}} = 1,34 \text{ А}; I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,048; B_H = 0,0476$ |                  |                 |                |      |                |         |                         |                           |                   |                         |                                     |           |
| 0,5   | 141              | 0,0683          | 1,07           | 7,32 | 0,064          | 3,79    | 0,0000317               | 1,024                     | 6,6               | 0,00012                 | 0,00036                             | →1,0      |
| 1,0   | 282              | 0,137           | 2,10           |      |                |         | 0,000063                |                           |                   | 0,00024                 | 0,00072                             | →1,0      |
| 2,0   | 564              | 0,274           | 4,28           |      |                |         | 0,000127                |                           |                   | 0,00048                 | 0,00144                             | 0,9999986 |
| 5,0   | 1410             | 0,685           | 10,5           |      |                |         | 0,000315                |                           |                   | 0,0012                  | 0,0036                              | 0,9999964 |
| 7,0   | 1974             | 0,959           | 14,7           |      |                |         | 0,000441                |                           |                   | 0,00168                 | 0,0050                              | 0,9999950 |
| 10,0  | 2820             | 1,37            | 21,0           |      |                |         | 0,00063                 |                           |                   | 0,0024                  | 0,0072                              | 0,9999928 |
| 20,0  | 5640             | 2,74            | 42,0           |      |                |         | 0,00126                 |                           |                   | 0,0048                  | 0,0144                              | 0,9999986 |
| $\Delta T = 10 \text{ K}; \Delta T_{\text{max}} = 100,5 \text{ K}; \Theta = 0,10; R_K = 43,48 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\text{maxK}} = 1,33 \text{ А}; I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,10; B_H = 0,0985$ |                  |                 |                |      |                |         |                         |                           |                   |                         |                                     |           |
| 0,5   | 74,5             | 0,151           | 1,15           | 3,31 | 0,133          | 3,87    | 0,000581                | 1,052                     | 6,8               | 0,00225                 | 0,00675                             | 0,9999933 |
| 1,0   | 149              | 0,30            | 2,30           |      |                |         | 0,001162                |                           |                   | 0,0045                  | 0,0135                              | 0,9999987 |
| 2,0   | 298              | 0,60            | 4,60           |      |                |         | 0,00232                 |                           |                   | 0,0090                  | 0,027                               | 0,9999973 |
| 5,0   | 745              | 1,50            | 11,5           |      |                |         | 0,00581                 |                           |                   | 0,0225                  | 0,0675                              | 0,9999933 |
| 7,0   | 1043             | 2,10            | 16,1           |      |                |         | 0,00813                 |                           |                   | 0,0315                  | 0,0945                              | 0,9999906 |
| 10,0  | 1490             | 3,0             | 23,0           |      |                |         | 0,01162                 |                           |                   | 0,045                   | 0,135                               | 0,9999987 |
| 20,0  | 2980             | 6,0             | 46,0           |      |                |         | 0,02324                 |                           |                   | 0,090                   | 0,270                               | 0,9999973 |
| $\Delta T = 20 \text{ K}; \Delta T_{\text{max}} = 93,7 \text{ K}; \Theta = 0,213; R_K = 42,55 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\text{maxK}} = 1,31 \text{ А}; I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,213; B_H = 0,207$ |                  |                 |                |      |                |         |                         |                           |                   |                         |                                     |           |
| 0,5   | 43,3             | 0,363           | 1,34           | 1,38 | 0,28           | 4,10    | 0,0115                  | 1,11                      | 7,3               | 0,047                   | 0,14                                | 0,9999986 |
| 1,0   | 86,6             | 0,726           | 2,68           |      |                |         | 0,023                   |                           |                   | 0,094                   | 0,281                               | 0,9999972 |
| 2,0   | 173              | 1,45            | 5,40           |      |                |         | 0,046                   |                           |                   | 0,187                   | 0,562                               | 0,9999944 |
| 5,0   | 433              | 3,63            | 13,4           |      |                |         | 0,115                   |                           |                   | 0,468                   | 1,40                                | 0,999986  |
| 7,0   | 606              | 5,0             | 18,8           |      |                |         | 0,161                   |                           |                   | 0,648                   | 1,94                                | 0,999981  |
| 10,0  | 866              | 7,26            | 26,8           |      |                |         | 0,23                    |                           |                   | 0,936                   | 2,81                                | 0,999972  |
| 20,0  | 1732             | 14,5            | 53,6           |      |                |         | 0,46                    |                           |                   | 1,87                    | 5,62                                | 0,999944  |
| $\Delta T = 30 \text{ K}; \Delta T_{\text{max}} = 86,8 \text{ K}; \Theta = 0,346; R_K = 40,82 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\text{maxK}} = 1,30 \text{ А}; I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,346; B_H = 0,333$ |                  |                 |                |      |                |         |                         |                           |                   |                         |                                     |           |
| 0,5   | 34,7             | 0,707           | 1,63           | 0,71 | 0,45           | 4,53    | 0,0772                  | 1,18                      | 7,9               | 0,35                    | 1,05                                | 0,9999895 |
| 1,0   | 69,4             | 1,414           | 3,26           |      |                |         | 0,1544                  |                           |                   | 0,70                    | 2,10                                | 0,999979  |
| 2,0   | 139              | 2,82            | 6,50           |      |                |         | 0,3088                  |                           |                   | 1,40                    | 4,20                                | 0,999958  |
| 5,0   | 347              | 7,07            | 16,3           |      |                |         | 0,772                   |                           |                   | 3,50                    | 10,5                                | 0,999895  |
| 7,0   | 486              | 9,87            | 22,8           |      |                |         | 1,081                   |                           |                   | 4,9                     | 14,7                                | 0,99985   |
| 10,0  | 694              | 14,1            | 32,6           |      |                |         | 1,544                   |                           |                   | 7,0                     | 21,0                                | 0,99979   |
| 20,0  | 1388             | 28,2            | 65,2           |      |                |         | 3,088                   |                           |                   | 14,0                    | 42,0                                | 0,99958   |
| $\Delta T = 40 \text{ K}; \Delta T_{\text{max}} = 78,9 \text{ K}; \Theta = 0,50; R_K = 40,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\text{maxK}} = 1,25 \text{ А}; I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,50; B_H = 0,463$    |                  |                 |                |      |                |         |                         |                           |                   |                         |                                     |           |
| 0,5   | 37,4             | 1,35            | 2,33           | 0,37 | 0,63           | 4,86    | 0,29                    | 1,28                      | 8,9               | 1,41                    | 4,24                                | 0,999958  |
| 1,0   | 74,8             | 2,70            | 4,66           |      |                |         | 0,58                    |                           |                   | 2,82                    | 8,46                                | 0,999915  |
| 2,0   | 150              | 5,40            | 9,32           |      |                |         | 1,16                    |                           |                   | 5,64                    | 16,9                                | 0,999831  |
| 5,0   | 374              | 13,5            | 23,3           |      |                |         | 2,90                    |                           |                   | 14,1                    | 42,3                                | 0,99958   |
| 7,0   | 524              | 18,9            | 32,6           |      |                |         | 4,06                    |                           |                   | 19,7                    | 59,2                                | 0,99941   |
| 10,0  | 748              | 27,0            | 46,6           |      |                |         | 5,80                    |                           |                   | 28,2                    | 84,6                                | 0,99916   |
| 20,0  | 1496             | 54,0            | 93,2           |      |                |         | 11,6                    |                           |                   | 56,4                    | 169                                 | 0,9832    |
| $\Delta T = 50 \text{ K}; \Delta T_{\text{max}} = 73,4 \text{ K}; \Theta = 0,68; R_K = 39,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\text{maxK}} = 1,22 \text{ А}; I_{\text{maxH}} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,68; B_H = 0,615$    |                  |                 |                |      |                |         |                         |                           |                   |                         |                                     |           |

| 1   | 2    | 3    | 4    | 5     | 6    | 7    | 8     | 9    | 10   | 11   | 12   | 13      |
|---|------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|---------|
| 0,5   | 49,8 | 2,90 | 3,87 | 0,17  | 0,83 | 8,35 | 0,908 | 1,39 | 10,9 | 7,58 | 22,7 | 0,9977  |
| 1,0   | 99,6 | 5,80 | 7,70 |       |      |      | 1,816 |      |      | 15,2 | 45,5 | 0,99546 |
| 2,0   | 199  | 11,6 | 15,4 |       |      |      | 3,63  |      |      | 30,4 | 60,8 | 0,9939  |
| 5,0   | 498  | 29,0 | 38,5 |       |      |      | 9,08  |      |      | 76,0 | 228  | 0,9775  |
| 7,0   | 697  | 40,6 | 53,9 |       |      |      | 12,71 |      |      | 106  | 319  | 0,9686  |
| 10,0  | 996  | 58,0 | 77,0 |       |      |      | 18,16 |      |      | 152  | 456  | 0,9554  |
| 20,0  | 1992 | 116  | 154  |       |      |      | 36,3  |      |      | 304  | 912  | 0,9128  |
| $\Delta T = 60 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 66,8 \text{ K}; \Theta = 0,90; R_K = 38,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\max K} = 1,184 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,90; B_H = 0,789$ |      |      |      |       |      |      |       |      |      |      |      |         |
| 0,5   | 168  | 14,9 | 16,0 | 0,034 | 1,07 | 28,9 | 2,48  | 1,50 | 16,4 | 71,7 | 215  | 0,9787  |
| 1,0   | 337  | 30,0 | 32,0 |       |      |      | 4,96  |      |      | 143  | 430  | 0,9579  |
| 2,0   | 674  | 60,0 | 64,0 |       |      |      | 9,92  |      |      | 287  | 860  | 0,9176  |
| 5,0   | 1685 | 150  | 160  |       |      |      | 24,8  |      |      | 717  | 2151 | 0,8065  |
| 7,0   | 2359 | 210  | 224  |       |      |      | 34,7  |      |      | 1004 | 3011 | 0,7400  |
| 10,0  | 3370 | 300  | 320  |       |      |      | 49,6  |      |      | 1434 | 4302 | 0,6504  |
| 20,0  | 7640 | 600  | 640  |       |      |      | 99,2  |      |      | 2868 | 8604 | 0,4230  |

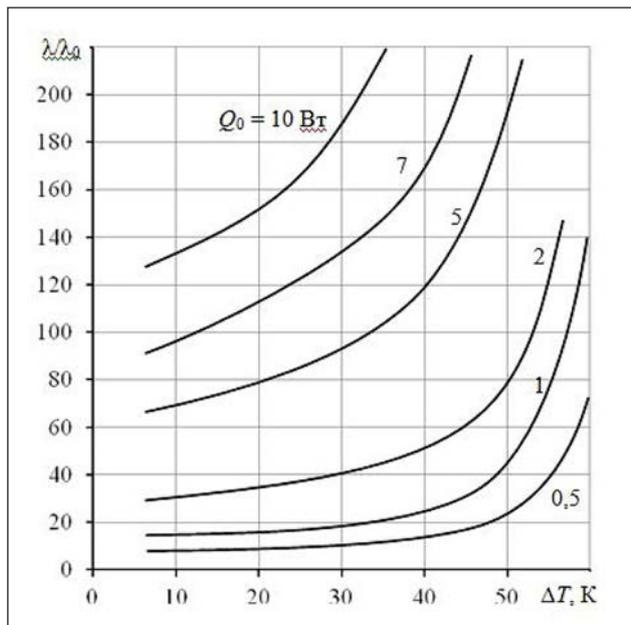


Рис. 5. Зависимость относительной величины интенсивности отказов  $\lambda/\lambda_0$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300 \text{ K}$ ,  $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$ ,  $\lambda_0 = 3 \text{ Ч}$

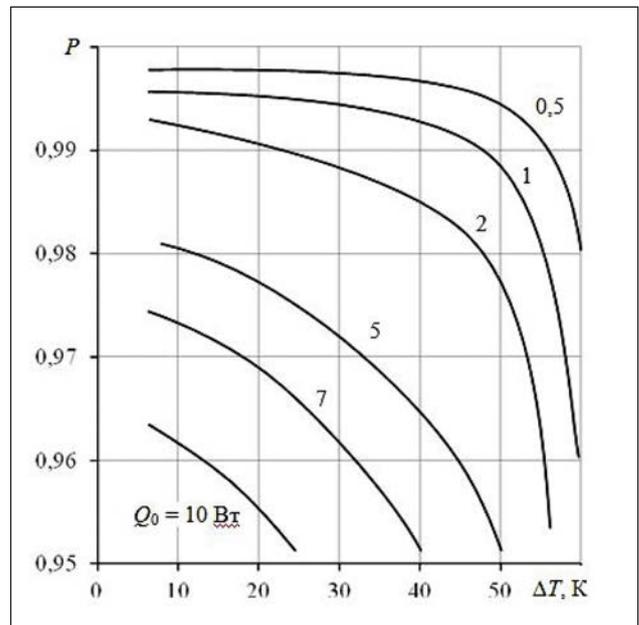


Рис. 6. Зависимость вероятности безотказной работы  $P$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300 \text{ K}$ ,  $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$ ,  $t = 10^4 \text{ ч}$  для различной тепловой нагрузки  $Q_0$  в режиме  $Q_{0\max}$

(рис. 10); с ростом тепловой нагрузки  $Q_0$  вероятность безотказной работы  $P$  уменьшается;

– увеличивается отношение  $\beta = \lambda_k/\lambda_n$  интенсивности отказов в начале  $\lambda_n$  и в конце  $\lambda_k$  процесса охлаждения (рис. 7, п. 2) и не зависит от тепловой нагрузки  $Q_0$ .

**Режим  $(Q_0/I^2)_{\max}$  ( $B = \Theta$ ).** Результаты расчетов основных параметров, показателей надежности и времени выхода на стационарный режим работы для различных перепадов температуры  $\Delta T$  в диапа-

зоне от 5 до 60 К и тепловой нагрузки  $Q_0$  от 5 до 20 Вт для случая, когда  $m_0 C_0 \rightarrow 0$ , приведены в табл. 3.

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 3, показал, что с ростом перепада температуры  $\Delta T$  при  $m_0 C_0 \rightarrow 0$ :

– увеличивается время выхода на стационарный режим  $\tau$  (рис. 1, п. 3) и не зависит от тепловой нагрузки  $Q_0$ ;

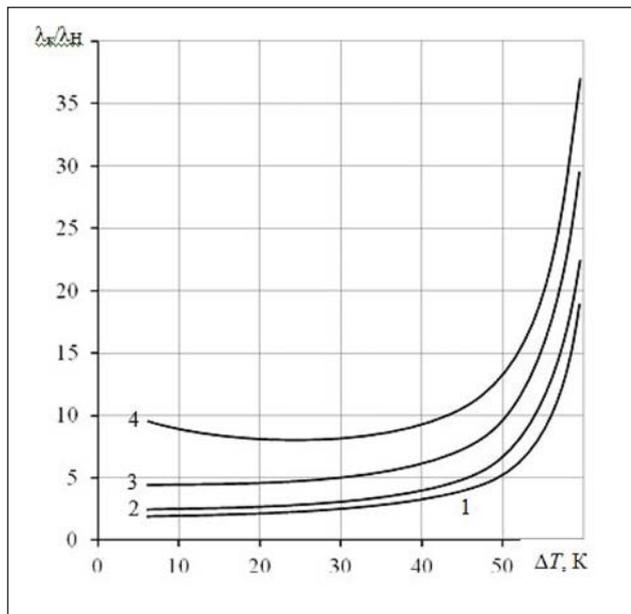
– увеличивается величина рабочего тока  $I$  (рис. 2, п. 3) и не зависит от тепловой нагрузки  $Q_0$ ;

Таблица 4

$T = 300 \text{ K}; l/S = 40 \text{ см}^{-1}; \text{режим } \lambda_{\min} (B = \eta\Theta); m_0 C_0 \rightarrow 0, \sum_i m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$

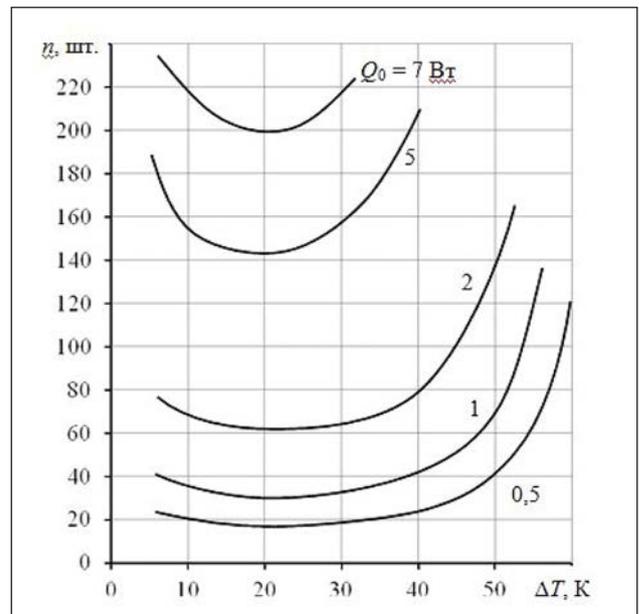
| $Q_0, \text{ Вт}$   | $n, \text{ шт.}$ | $W, \text{ Вт}$ | $U, \text{ В}$ | $E$  | $I, \text{ А}$ | $\beta$ | $(\lambda/\lambda_0)_H$ | $\gamma, \text{ отн.ед.}$ | $\tau, \text{ с}$ | $(\lambda/\lambda_0)_K$ | $\lambda_K \cdot 10^4, \text{ 1/ч}$ | $P$       |
|---|------------------|-----------------|----------------|------|----------------|---------|-------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------------------|-----------|
| 1   | 2                | 3               | 4              | 5    | 6              | 7       | 8                       | 9                         | 10                | 11                      | 12                                  | 13        |
| $\Delta T = 5 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 104,4 \text{ K}; \Theta = 0,048; R_K = 44,0 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\max K} = 1,34 \text{ А}; I_{\max H} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,0336; B_H = 0,03335$ |                  |                 |                |      |                |         |                         |                           |                   |                         |                                     |           |
| 0,5   | 360              | 0,095           | 2,13           | 5,26 | 0,045          | 8,36    | 0,0000766               | 1,024                     | 11,9              | 0,000064                | 0,00019                             | →1,0      |
| 1,0   | 720              | 0,19            | 4,26           |      |                |         | 0,000153                |                           |                   | 0,000127                | 0,00038                             | →1,0      |
| 2,0   | 1440             | 0,38            | 8,52           |      |                |         | 0,000306                |                           |                   | 0,00025                 | 0,00076                             | →1,0      |
| 5,0   | 3600             | 0,95            | 21,3           |      |                |         | 0,000765                |                           |                   | 0,00064                 | 0,0019                              | 0,9999981 |
| 7,0   | 5040             | 1,33            | 29,8           |      |                |         | 0,00107                 |                           |                   | 0,00089                 | 0,0027                              | 0,9999973 |
| 10,0  | 7200             | 1,90            | 42,6           |      |                |         | 0,00153                 |                           |                   | 0,00127                 | 0,0038                              | 0,9999962 |
| 20,0  | 14400            | 3,80            | 85,2           |      |                |         | 0,00031                 |                           |                   | 0,0025                  | 0,0076                              | 0,9999924 |
| $\Delta T = 10 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 100,5 \text{ K}; \Theta = 0,10; R_K = 43,48 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\max K} = 1,33 \text{ А}; I_{\max H} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,072; B_H = 0,071$   |                  |                 |                |      |                |         |                         |                           |                   |                         |                                     |           |
| 0,5   | 176              | 0,20            | 2,15           | 2,46 | 0,096          | 8,10    | 0,000157                | 1,052                     | 11,5              | 0,00127                 | 0,0038                              | 0,9999962 |
| 1,0   | 351              | 0,40            | 4,30           |      |                |         | 0,000314                |                           |                   | 0,0025                  | 0,0076                              | 0,9999924 |
| 2,0   | 700              | 0,80            | 8,60           |      |                |         | 0,00063                 |                           |                   | 0,0051                  | 0,0152                              | 0,9999985 |
| 5,0   | 1755             | 2,0             | 21,5           |      |                |         | 0,00157                 |                           |                   | 0,0127                  | 0,0381                              | 0,9999962 |
| 7,0   | 2457             | 2,80            | 30,1           |      |                |         | 0,0022                  |                           |                   | 0,0178                  | 0,0533                              | 0,9999947 |
| 10,0  | 3510             | 4,0             | 43,0           |      |                |         | 0,00314                 |                           |                   | 0,0254                  | 0,0762                              | 0,9999924 |
| 20,0  | 7020             | 8,0             | 86,0           |      |                |         | 0,0063                  |                           |                   | 0,0508                  | 0,152                               | 0,999985  |
| $\Delta T = 20 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 93,7 \text{ K}; \Theta = 0,213; R_K = 42,55 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\max K} = 1,31 \text{ А}; I_{\max H} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,16; B_H = 0,155$    |                  |                 |                |      |                |         |                         |                           |                   |                         |                                     |           |
| 0,5   | 93,8             | 0,478           | 2,39           | 1,05 | 0,210          | 6,65    | 0,00361                 | 1,11                      | 11,4              | 0,024                   | 0,072                               | 0,9999928 |
| 1,0   | 188              | 0,956           | 4,78           |      |                |         | 0,0072                  |                           |                   | 0,048                   | 0,144                               | 0,9999856 |
| 2,0   | 375              | 1,91            | 9,56           |      |                |         | 0,0144                  |                           |                   | 0,096                   | 0,288                               | 0,999971  |
| 5,0   | 938              | 4,78            | 23,9           |      |                |         | 0,036                   |                           |                   | 0,24                    | 0,72                                | 0,999928  |
| 7,0   | 1313             | 6,69            | 33,5           |      |                |         | 0,0504                  |                           |                   | 0,34                    | 1,0                                 | 0,999900  |
| 10,0  | 1876             | 9,56            | 47,8           |      |                |         | 0,072                   |                           |                   | 0,48                    | 1,44                                | 0,999856  |
| 20,0  | 3752             | 19,1            | 95,6           |      |                |         | 0,144                   |                           |                   | 0,96                    | 2,88                                | 0,99971   |
| $\Delta T = 30 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 86,8 \text{ K}; \Theta = 0,346; R_K = 40,82 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\max K} = 1,30 \text{ А}; I_{\max H} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,277; B_H = 0,267$   |                  |                 |                |      |                |         |                         |                           |                   |                         |                                     |           |
| 0,5   | 62,1             | 0,864           | 2,49           | 0,58 | 0,360          | 7,62    | 0,0319                  | 1,18                      | 11,0              | 0,243                   | 0,730                               | 0,999927  |
| 1,0   | 124              | 1,73            | 5,0            |      |                |         | 0,0638                  |                           |                   | 0,486                   | 1,46                                | 0,99985   |
| 2,0   | 248              | 3,46            | 10,0           |      |                |         | 0,1276                  |                           |                   | 0,972                   | 2,92                                | 0,99971   |
| 5,0   | 621              | 8,65            | 25,0           |      |                |         | 0,319                   |                           |                   | 2,43                    | 7,29                                | 0,99927   |
| 7,0   | 869              | 12,1            | 35,0           |      |                |         | 0,4466                  |                           |                   | 3,40                    | 10,2                                | 0,99898   |
| 10,0  | 1242             | 17,3            | 50,0           |      |                |         | 0,638                   |                           |                   | 4,86                    | 14,6                                | 0,9985    |
| 20,0  | 2484             | 34,6            | 100,0          |      |                |         | 1,276                   |                           |                   | 9,72                    | 29,2                                | 0,9971    |
| $\Delta T = 40 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 78,9 \text{ K}; \Theta = 0,50; R_K = 40,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\max K} = 1,25 \text{ А}; I_{\max H} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,425; B_H = 0,394$     |                  |                 |                |      |                |         |                         |                           |                   |                         |                                     |           |
| 0,5   | 59,6             | 1,63            | 3,32           | 0,31 | 0,530          | 8,87    | 0,1522                  | 1,28                      | 11,2              | 1,35                    | 4,05                                | 0,99960   |
| 1,0   | 119              | 3,26            | 6,64           |      |                |         | 0,3044                  |                           |                   | 2,70                    | 8,10                                | 0,99920   |
| 2,0   | 238              | 6,52            | 13,3           |      |                |         | 0,609                   |                           |                   | 5,40                    | 16,2                                | 0,9984    |
| 5,0   | 595              | 16,3            | 33,2           |      |                |         | 1,522                   |                           |                   | 13,5                    | 40,5                                | 0,9960    |
| 7,0   | 833              | 22,8            | 46,5           |      |                |         | 2,131                   |                           |                   | 18,9                    | 56,7                                | 0,9943    |
| 10,0  | 1190             | 32,6            | 66,4           |      |                |         | 3,044                   |                           |                   | 27,0                    | 81,0                                | 0,9919    |
| 20,0  | 2380             | 65,2            | 133            |      |                |         | 6,088                   |                           |                   | 54,0                    | 162                                 | 0,9839    |
| $\Delta T = 50 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 73,4 \text{ K}; \Theta = 0,68; R_K = 39,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\max K} = 1,22 \text{ А}; I_{\max H} = 1,35 \text{ А}; B_K = 0,612; B_H = 0,553$     |                  |                 |                |      |                |         |                         |                           |                   |                         |                                     |           |

| 1  | 2    | 3    | 4     | 5     | 6     | 7    | 8     | 9    | 10   | 11   | 12   | 13     |
|--|------|------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|--------|
| 0,5  | 71,4 | 3,46 | 5,12  | 0,145 | 0,750 | 11,8 | 0,594 | 1,39 | 12,6 | 7,0  | 21,0 | 0,9979 |
| 1,0  | 143  | 6,91 | 10,2  |       |       |      | 1,188 |      |      | 14,0 | 42,0 | 0,9958 |
| 2,0  | 286  | 13,8 | 20,4  |       |       |      | 2,376 |      |      | 28,0 | 84,0 | 0,9916 |
| 5,0  | 714  | 34,6 | 51,0  |       |       |      | 5,94  |      |      | 70,0 | 210  | 0,9792 |
| 7,0  | 1000 | 48,4 | 71,4  |       |       |      | 8,32  |      |      | 98,0 | 294  | 0,9710 |
| 10,0   | 1428 | 69,1 | 102,0 |       |       |      | 11,88 |      |      | 140  | 420  | 0,9589 |
| 20,0   | 2856 | 138  | 204,0 |       |       |      | 23,76 |      |      | 280  | 840  | 0,9194 |
| $\Delta T = 60 \text{ K}; \Delta T_{\max} = 66,8 \text{ K}; \Theta = 0,90; R_K = 38,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; R_H = 44,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$<br>$I_{\max K} = 1,184 \text{ A}; I_{\max H} = 1,35 \text{ A}; B_K = 0,873; B_H = 0,766$ |      |      |       |       |       |      |       |      |      |      |      |        |
| 0,5  | 215  | 18,1 | 20    | 0,028 | 1,00  | 36,7 | 2,2   | 1,50 | 17,0 | 80,8 | 242  | 0,9760 |
| 1,0  | 431  | 36,2 | 40    |       |       |      | 4,4   |      |      | 162  | 485  | 0,9527 |
| 2,0  | 862  | 72,4 | 80    |       |       |      | 8,8   |      |      | 323  | 969  | 0,9076 |
| 5,0  | 2155 | 181  | 200   |       |       |      | 22,0  |      |      | 808  | 2424 | 0,7847 |
| 7,0  | 3017 | 253  | 280   |       |       |      | 30,8  |      |      | 1131 | 3394 | 0,7122 |
| 10,0   | 4310 | 362  | 400   |       |       |      | 44,0  |      |      | 1616 | 4848 | 0,6158 |
| 20,0   | 8620 | 724  | 800   |       |       |      | 88,0  |      |      | 3232 | 9696 | 0,3792 |



**Рис. 7.** Зависимость отношения  $\lambda_k/\lambda_n$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300 \text{ K}, Q_0 = 0,5 \text{ Вт}, l/S = 40 \text{ см}^{-1}; \sum m_i C_i = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/К}$  для различных режимов работы: 1 –  $Q_{0\max}$ ; 2 –  $(Q_0/I)_{\max}$ ; 3 –  $(Q_0/P)_{\max}$ ; 4 –  $\lambda_{\min}$

- уменьшается холодильный коэффициент  $E$  (рис. 3, п. 3) и не зависит от тепловой нагрузки  $Q_0$ ;
- функциональная зависимость количества термоэлементов  $n = f(\Delta T)$  имеет минимум при  $\Delta T = 30 \text{ K}$  (рис. 11); с ростом тепловой нагрузки количество термоэлементов увеличивается;
- увеличивается падение напряжения  $U$  для различной тепловой нагрузки  $Q_0$ ; с ростом тепловой нагрузки падение напряжение увеличивается;
- увеличивается относительная величина



**Рис. 8.** Зависимость количества термоэлементов  $n$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300 \text{ K}, l/S = 40 \text{ см}^{-1}$  для различной тепловой нагрузки  $Q_0$  в режиме  $(Q_0/I)_{\max}$

- интенсивности отказов  $\lambda/\lambda_0$  (рис. 12) для различной тепловой нагрузки  $Q_0$ ; с ростом тепловой нагрузки интенсивность отказов увеличивается;
- уменьшается вероятность безотказной работы  $P$  для различной тепловой нагрузки  $Q_0$  (рис. 13); с ростом тепловой нагрузки вероятность безотказной работы уменьшается;
- увеличивается отношение  $\beta = \lambda_k/\lambda_n$  интенсивности отказов в начале  $\lambda_n$  и в конце  $\lambda_k$  процесса охлаждения (рис. 7, п. 3).

Таблица 5

| Режим работы    | $B_K$ | $B_H$ | $\tau, c$ | $I, A$ | $n, шт.$ | $U, B$ | $W, Вт$ | $E$  | $\lambda / \lambda_0$ | $\lambda \cdot 10^8, 1/ч$ | $P$     |
|-----------------|-------|-------|-----------|--------|----------|--------|---------|------|-----------------------|---------------------------|---------|
| $Q_{0max}$      | 1,0   | 0,93  | 5,4       | 1,2    | 32,0     | 3,50   | 4,0     | 0,25 | 24,4                  | 73,2                      | 0,9927  |
| $(Q_0/I)_{max}$ | 0,707 | 0,655 | 6,4       | 0,82   | 41,6     | 3,40   | 2,80    | 0,36 | 7,9                   | 23,7                      | 0,9976  |
| $(Q_0/P)_{max}$ | 0,50  | 0,46  | 9,0       | 0,58   | 74,8     | 4,7    | 2,70    | 0,37 | 2,80                  | 8,50                      | 0,99915 |
| $\lambda_{min}$ | 0,425 | 0,39  | 11,4      | 0,49   | 120      | 6,60   | 3,30    | 0,31 | 2,70                  | 8,10                      | 0,99920 |

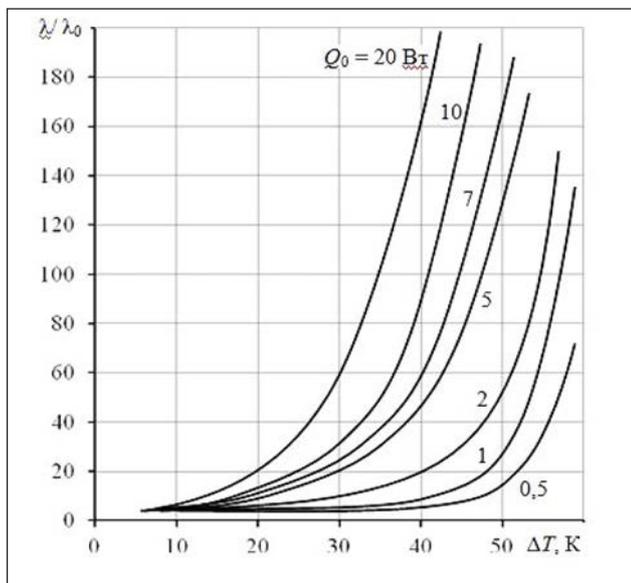


Рис. 9. Зависимость относительной величины интенсивности отказов  $\lambda/\lambda_0$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300 K, l/S = 40 \text{ см}^{-1}, \lambda_0 = 3Ч$

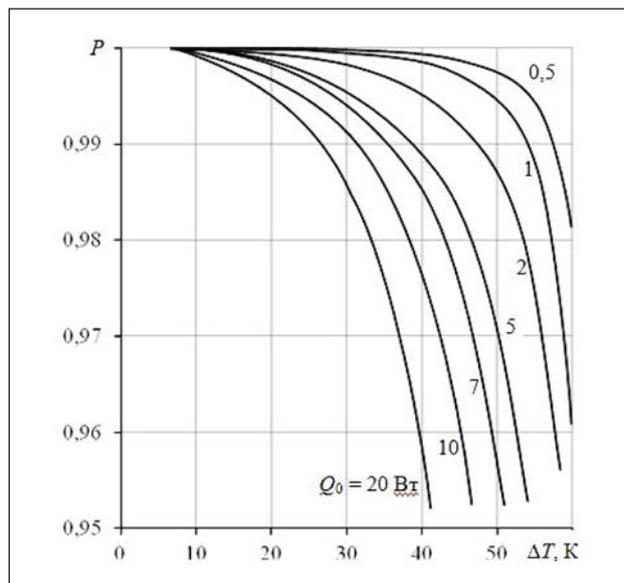


Рис. 10. Зависимость вероятности безотказной работы  $P$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300 K, l/S = 40 \text{ см}^{-1}, t = 10^4 \text{ ч}$  для различной тепловой нагрузки  $Q_0$  в режиме  $(Q_0/I)_{max}$

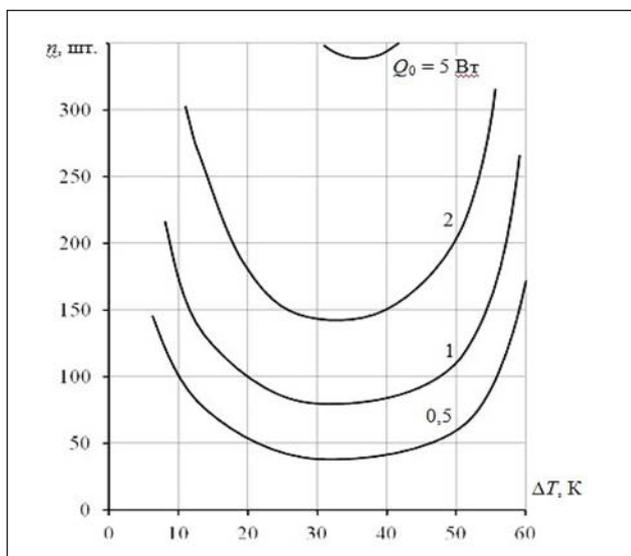


Рис. 11. Зависимость количества термоэлементов  $n$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300 K, l/S = 40 \text{ см}^{-1}$  для различной тепловой нагрузки  $Q_0$  в режиме  $(Q_0/P)_{max}$

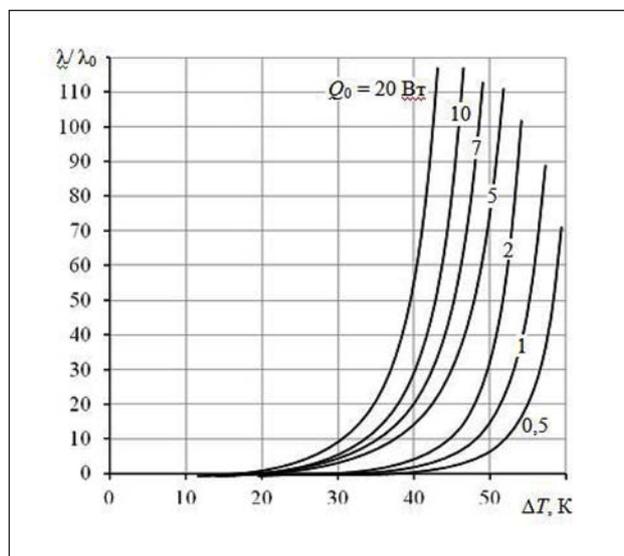


Рис. 12. Зависимость относительной величины интенсивности отказов  $\lambda/\lambda_0$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300 K, l/S = 40 \text{ см}^{-1}, \lambda_0 = 3Ч$

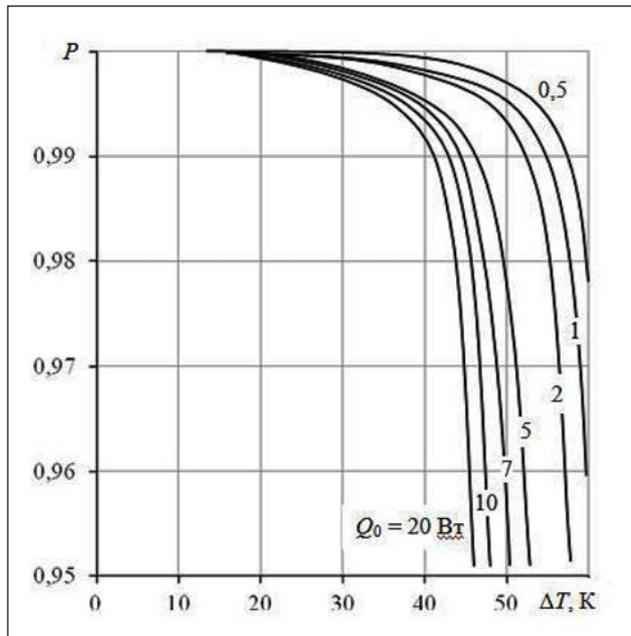


Рис. 13. Зависимость вероятности безотказной работы  $P$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300 \text{ К}$ ,  $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$ ,  $t = 10^4 \text{ ч}$  для различной тепловой нагрузки  $Q_0$  в режиме  $(Q_0/P)_{\max}$

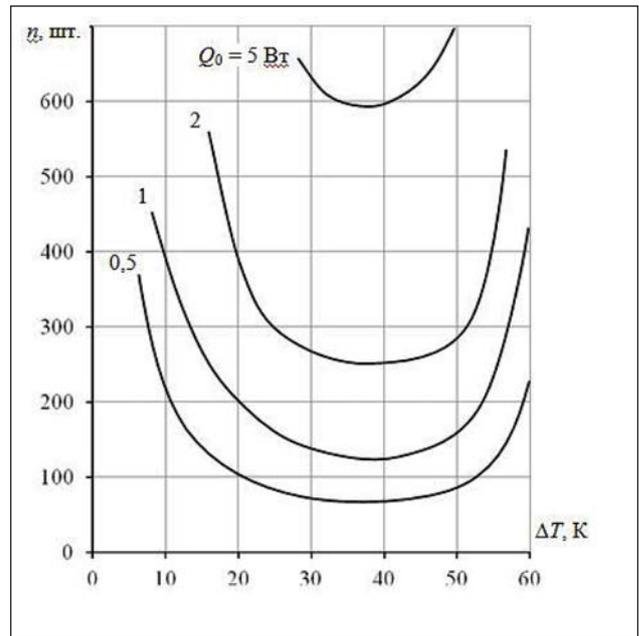


Рис. 14. Зависимость количества термоэлементов  $n$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300 \text{ К}$ ,  $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$  для различной тепловой нагрузки  $Q_0$  в режиме  $\lambda_{\min}$

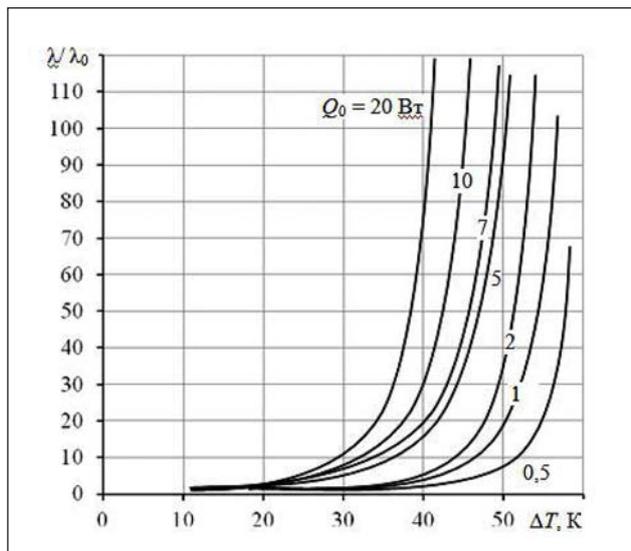


Рис. 15. Зависимость относительной величины отказов  $\lambda/\lambda_0$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300 \text{ К}$ ,  $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$ ,  $\lambda_0 = 3 \text{ Ч}$

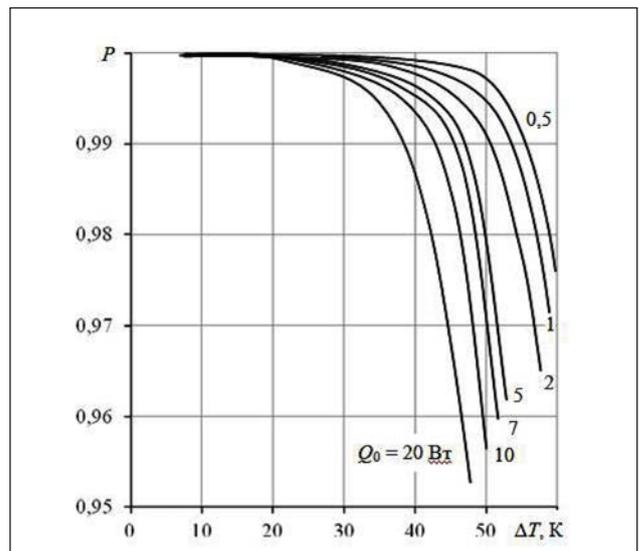


Рис. 16. Зависимость вероятности безотказной работы  $P$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  при  $T = 300 \text{ К}$ ,  $l/S = 40 \text{ см}^{-1}$ ,  $t = 10^4 \text{ ч}$  для различной тепловой нагрузки  $Q_0$  в режиме  $\lambda_{\min}$

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 4, показывает, что с ростом перепада температуры  $\Delta T$  при  $m_0 C_0 \rightarrow 0$ :

- увеличивается время выхода на стационарный режим работы  $\tau$  (рис. 1, п. 4) и не зависит от тепловой нагрузки  $Q_0$ ;

- увеличивается величина рабочего тока  $I$  (рис. 2, п. 4) и не зависит от тепловой нагрузки  $Q_0$ ;

- уменьшается холодильный коэффициент  $E$  (рис. 3, п. 4) и не зависит от тепловой нагрузки  $Q_0$ ;

- функциональная зависимость количества термоэлементов  $n = f(\Delta T)$  имеет минимум при  $\Delta T = 40 \text{ К}$  (рис. 14); с ростом тепловой нагрузки количество термоэлементов  $n$  увеличивается;

- увеличивается падение напряжения  $U$  для различной тепловой нагрузки  $Q_0$ ; с ростом тепловой нагрузки падение напряжения увеличивается;

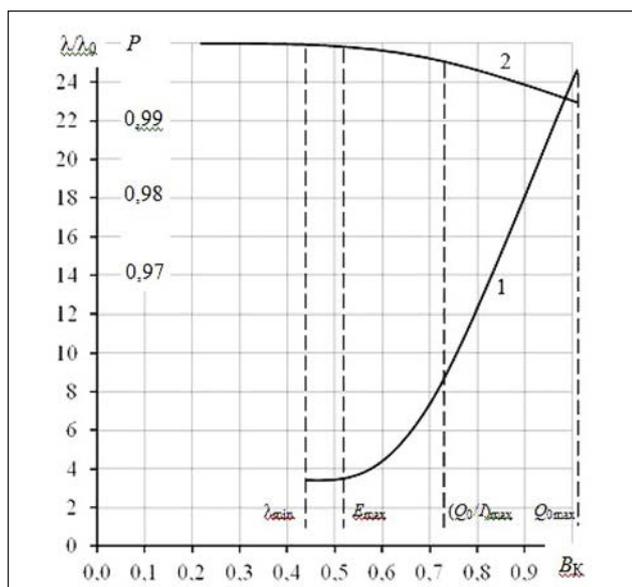


Рис. 17. Зависимость времени выхода на стационарный режим работы  $\tau$ , количества термоэлементов  $n$ , величины рабочего тока  $I$  и холодильного коэффициента  $E$  однокаскадного ТЭУ от относительного рабочего тока  $B_K$  при  $T = 300$  К,  $\Delta T = 40$  К;  $Q_0 = 1$  Вт;  $l/S = 40$  см<sup>-1</sup>: 1 –  $\tau = f(B_K)$ ; 2 –  $n = f(B_K)$ ; 3 –  $I = f(B_K)$ ; 4 –  $E = f(B_K)$

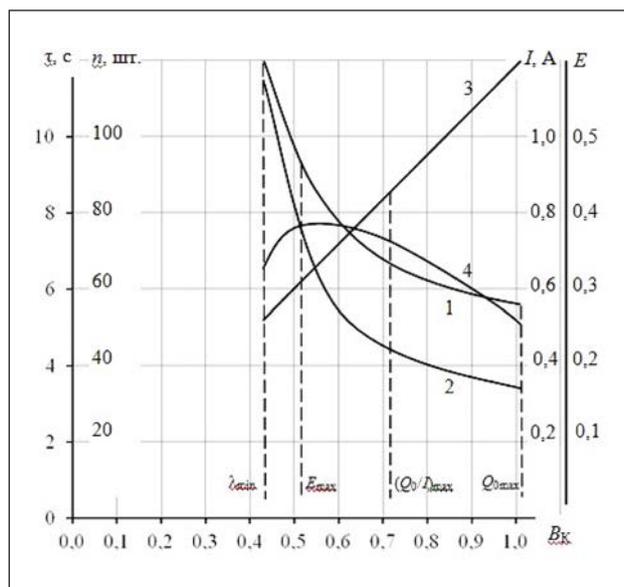


Рис. 18. Зависимость относительной величины отказов  $\lambda/\lambda_0$  и вероятности безотказной работы  $P$  однокаскадного ТЭУ от относительного рабочего тока  $B_K$  при  $T = 300$  К,  $\Delta T = 40$  К;  $Q_0 = 1$  Вт;  $l/S = 40$  см<sup>-1</sup>;  $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$  1/ч;  $t = 10^4$  ч: 1 –  $\lambda/\lambda_0 = f(B_K)$ ; 2 –  $P = f(B_K)$

- увеличивается относительная величина интенсивности отказов  $\lambda/\lambda_0$  (рис. 15); с ростом тепловой нагрузки интенсивность отказов увеличивается;
- уменьшается вероятность безотказной работы  $P$  (рис. 16); с ростом тепловой нагрузки вероятность безотказной работы уменьшается;
- функциональная зависимость  $\beta = f(\Delta T)$  имеет минимум при  $\Delta T = 20$  К (рис. 7, п. 4).

Для сравнительного анализа основных параметров, показателей надежности и времени выхода на стационарный режим работы для различных характерных токовых режимов воспользуемся данными расчетов, приведенных в табл. 5 при перепаде температуры  $\Delta T = 40$  К, тепловой нагрузке  $Q_0 = 1,0$  Вт и геометрии ветвей термоэлементов  $l/S = 40$  см<sup>-1</sup>.

Анализ результатов расчетов показывает, что с ростом относительного рабочего тока  $B_K$ :

- уменьшается время выхода на стационарный режим от  $\tau = 11,4$  с в режиме  $\lambda_{\min}$  до  $\tau = 5,4$  с в режиме  $Q_{0\max}$  (рис. 17, п. 1);
- уменьшается количество термоэлементов  $n$  от  $n = 120$  шт. в режиме  $\lambda_{\min}$  до  $n = 32$  шт. в режиме  $Q_{0\max}$  (рис. 17, п. 2);
- увеличивается величина рабочего тока  $I$  от  $I = 0,49$  А в режиме  $\lambda_{\min}$  до  $I = 1,2$  А в режиме  $Q_{0\max}$  (рис. 17, п. 3);
- функциональная зависимость холодильного коэффициента  $E = f(B)$  имеет максимум при  $B = 0,5$  (рис. 17, п. 4);

- уменьшается падение напряжения  $U$  от  $U = 6,6$  В в режиме  $\lambda_{\min}$  до  $U = 3,5$  В в режиме  $Q_{0\max}$ ;
- увеличивается относительная величина интенсивности отказов  $\lambda/\lambda_0$  от  $\lambda/\lambda_0 = 2,7$  в режиме  $\lambda_{\min}$  до  $\lambda/\lambda_0 = 24,4$  в режиме  $Q_{0\max}$  (рис. 18);
- уменьшается вероятность безотказной работы  $P$  от  $P = 0,99920$  в режиме  $\lambda_{\min}$  до  $P = 0,9927$  в режиме  $Q_{0\max}$  (рис. 18).

**Выводы**

1. Время выхода на стационарный режим работы собственно однокаскадного ТЭУ для различных токовых режимов работы и различной тепловой нагрузки  $Q_0$  увеличивается с ростом температуры  $\Delta T$  при заданной геометрии ветвей термоэлементов  $l/S = 40$  см<sup>-1</sup> и составляет:

- от  $\tau = 0,4$  с при  $\Delta T = 5$  К до  $\tau = 15,3$  с при  $\Delta T = 60$  К в режиме  $Q_{0\max}$ ;
- от  $\tau = 1,2$  с при  $\Delta T = 5$  К до  $\tau = 15,7$  с при  $\Delta T = 60$  К в режиме  $(Q_0/I)_{\max}$ ;
- от  $\tau = 6,6$  с при  $\Delta T = 5$  К до  $\tau = 16,4$  с при  $\Delta T = 60$  К в режиме  $(Q_0/P)_{\max}$ ;
- от  $\tau = 11,9$  с при  $\Delta T = 5$  К до  $\tau = 17,0$  с при  $\Delta T = 60$  К в режиме  $\lambda_{\min}$ .

2. Время выхода на стационарный режим работы не зависит от количества термоэлементов в ТЭУ при заданной геометрии ветвей термоэлементов.

3. Минимальное время выхода на стационарный режим работы обеспечивается при токе режима  $Q_{0\max}$  в заданном диапазоне перепадов температуры.

4. При перепаде температуры, близком к максимальному ( $\Delta T \rightarrow \Delta T_{\max}$ ), время выхода на стационарный режим работы отличается незначительно для всех режимов работы.
5. Сравнительный анализ основных параметров, показателей надежности и динамических характеристик дает возможность выбора компромиссных решений при проектировании ТЭУ с учетом весомости каждого из ограничительных факторов.

#### Список литературы:

1. Zebajadi M., Esfarjani K., Dresselhaus M. S., Ren Z. F., Chen G. Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device Applications. *Energy & Environmental Science*. 2012. Vol. 5. № 1. P. 5147–5162.
2. Kajikawa T. Successes in the field of thermoelectric technology of electricity generation in Japan. *Thermoelectricity*. 2011. № 3. P. 5–19.
3. Ordin S.V, Experimental and Theoretical Expansion of the Phenomenology of Thermoelectricity. *Global Journal of Science Frontier Research- Physics & Space Science (GJSFR-A)*. 2018. Volume 18, Issue 1. P. 1–8.
4. Hyoung–Seuk Choi. Prediction of reliability on thermoelectric module through accelerated life test and Physics –of –failure. *Electronic Materials Letter*. 2011. № 7. P. 271.
5. 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.
6. Jurgensmeyer A. L. High Efficiency Thermoelectric Devices Fabricated Using Quantum Well Confinement Techniques. *Colorado State University*. 2011. 54.
7. Singh, R. Experimental Characterization of Thin Film Thermoelectric Materials and Film Deposition VIA Molecular Beam Epitaxy. *University of California*. 2008. 54.
8. Нестеров С.Б., Холопкин А.И. Оценка возможности увеличения термоэлектрической добротности наноструктурированных полупроводниковых материалов для холодильной техники. *Холодильная техника*. № 5. 2014. С. 40–43.
9. Громов Г. Объемные или тонкопленочные термоэлектрические модули. *Компоненты и технологии*. № 9. 2014. С. 38.
10. Зайков В.П., Мещеряков В.И., Журавлев Ю.И. Определение времени выхода на стационарный режим работы с учетом теплоемкости и массы конструктивных и технологических элементов однокаскадного ТЭУ. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2018. № 1. С. 12–24.
11. Зайков В.П., Киншова Л.А., Моисеев В.Ф. Прогнозирование показателей надежности, термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 1. Однокаскадные устройства. Одесса : Политехприодика. 2009. 120 с.

#### ДИНАМІКА ФУНКЦІОНУВАННЯ ОДНОКАСКАДНОГО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ОХОЛОДЖУЮЧОГО ПРИСТРОЮ

Розглянуто вплив конструктивних і технологічних елементів на основні параметри, показники надійності і динаміку функціонування термоелектричних охолоджуючих пристроїв у характерних струмових режимах у діапазоні робочих перепадів температури і теплового навантаження при заданій геометрії гілок термоелементів. Проведено оцінку часу виходу на стаціонарний режим охолоджувача у взаємозв'язку з основними параметрами і показниками надійності.

**Ключові слова:** термоелектричний охолоджувач, час виходу на стаціонарний режим, геометрія гілок термоелементів.

#### FUNCTIONING DYNAMICS OF A SINGLE-STAGE THERMOELECTRIC COOLING DEVICE

It was considered the influence of structural and technological elements on the basic parameters, indicators of reliability and on the functioning dynamics of thermoelectric cooling devices in the characteristic current modes in the range of operating temperature differences and thermal load in a given geometry of thermoelement branches. The estimation of the time to reach the stationary mode of the cooler in relation to the main parameters and reliability indicators has been made.

**Key words:** thermoelectric cooler, time to reach stationary mode, geometry of thermoelement branches.