

К. т. н. В. П. ЗАЙКОВ, д. т. н. В. И. МЕЩЕРЯКОВ¹, к. т. н. Ю. И. ЖУРАВЛЁВ²

Украина, ¹Одесский государственный экологический университет,

²Национальный университет «Одесская морская академия»

E-mail: gradan@ua.fm

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ДВУХКАСКАДНЫХ ТЭУ С РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ВЕТВЕЙ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Проведен сравнительный анализ основных параметров и показателей надежности двухкаскадных ТЭУ при вариации геометрии ветвей термоэлементов в каскадах и перепадах температуры для характерных токовых режимов работы при условии одинаковой конфигурации ветвей в каскадах. Предложены критерии, позволяющие вести построение двухкаскадных ТЭУ повышенной надежности, выбирая токовый режим работы при заданной геометрии ветвей термоэлементов в каскадах с учетом весомости каждого из ограничительных факторов.

Ключевые слова: термоэлектрическое охлаждающее устройство, термоэлемент, геометрия ветви, токовый режим работы, показатели надежности.

В настоящее время для обеспечения тепловых режимов (ОТР) элементов и составных частей радиоэлектронной аппаратуры широкое применение нашли термоэлектрические устройства (ТЭУ), обладающие такими достоинствами, как высокая надежность, отсутствие шума и вибраций, компактность, экологичность и др. [1–3]. Поскольку показатели надежности применяемых систем ОТР должны соответствовать предъявляемым к аппаратуре требованиям, оценивать их необходимо вместе с охлаждающими возможностями уже на этапе проектирования.

В термоэлектрическом приборостроении для конструирования одно- и многокаскадных ТЭУ используются термоэлектрические модули различных типоразмеров и электрической мощности. В этом случае перед разработчиком стоит проблема выбора рационального варианта геометрии ветвей термоэлементов и токового режима работы ТЭУ для оптимального решения поставленной задачи с учетом заданных ограничений (энергопотребление, величина рабочего тока и напряжения, количество термоэлементов, масса и габаритные размеры, уровень надежности и т. д.).

Целью настоящей работы является установление влияния конфигурации ветвей термоэлементов на основные параметры и показатели надежности двухкаскадных ТЭУ и проведение сравнительного анализа их характеристик в различных режимах работы.

Основные параметры и показатели надежности двухкаскадного ТЭУ были рассчитаны для четырех токовых режимов работы: максимальной холодопроизводительности (Q_{omax}) и минимальной интенсивности отказов (λ_{min}), а также промежуточных режимов (Q_0/I) $_{\text{max}}$ и (Q_0/I^2) $_{\text{max}}$.

Расчеты проводились для различных значений отношения высоты ветви каскада l к площади ее поперечного сечения S при условии, что геометрия ветвей в каскадах одинакова, т. е. $(l/S)_1 = (l/S)_2 = l/S$, при следующих исходных данных:

- холодопроизводительность $Q_0 = 2$ Вт;
- температура тепловыделяющего спая $T = 300$ К;
- диапазон изменения общего перепада температуры $\Delta T = 60–90$ К;
- диапазон изменения геометрии ветвей $l/S = 2–20$ см⁻¹;
- номинальная интенсивность отказов $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч;
- назначенный ресурс $t = 10^4$ ч.

Вычисления проводились по соотношениям, приведенным в [4, 5], для следующих величин (i в обозначениях означает принадлежность параметра к соответствующему каскаду):

- I – рабочий ток ТЭУ;
- B_i – относительный рабочий ток;
- $I_{\text{max}i}$ – максимальный рабочий ток;
- n_i – количество термоэлементов;
- T_0 – температура теплопоглощающего спая, К;
- T_1 – промежуточная температура;
- Θ_i – относительный перепад температуры;
- W_{Σ} – мощность потребления ТЭУ;
- E – холодильный коэффициент;
- U_{Σ} – падение напряжения на ТЭУ;
- λ – интенсивность отказов ТЭУ;
- λ/λ_0 – относительная величина интенсивности отказов ТЭУ;
- P – вероятность безотказной работы ТЭУ.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

Результаты расчетов приведены в **табл. 1—4**.

Анализ расчетных данных показал, что для всех исследованных режимов работы двухкаскадных ТЭУ при заданной тепловой нагрузке Q_0 с уменьшением отношения l/S для различных значений перепада температуры ΔT :

- увеличивается рабочий ток I ;
- увеличивается максимальный рабочий ток $I_{\max i}$ в каскадах;
- уменьшается общее падение напряжения U_{Σ} ;
- уменьшается суммарное количество термоэлементов $n_1 + n_2$;
- уменьшается интенсивность отказов λ ;
- увеличивается вероятность безотказной работы P .

При этом следует отметить, что от геометрии ветвей термоэлементов не зависят такие величины, как промежуточная температура T_1 , относительный рабочий ток каскада B_i , относительный перепад температуры в каскадах Θ_i , суммарная

мощность потребления W_{Σ} , холодильный коэффициент E , отношение количества термоэлементов в каскадах n_1/n_2 .

Для всех исследованных токовых режимов работы двухкаскадного ТЭУ при заданной тепловой нагрузке Q_0 с ростом перепада температуры ΔT для различных значений отношения l/S :

- уменьшается промежуточная температура T_1 (**рис. 1**), которая не зависит от режима работы;
- относительный рабочий ток в каскадах увеличивается во всех рассмотренных режимах, кроме режима $Q_{0\max}$, где B_1 остается постоянным, а B_2 уменьшается (**рис. 2**);
- величина рабочего тока I увеличивается во всех рассмотренных режимах, кроме режима $Q_{0\max}$, где I уменьшается;
- максимальный рабочий ток в каскадах незначительно уменьшается;
- суммарное количество термоэлементов увеличивается (см. **рис. 3**, где представлены дан-

Таблица 1

Основные параметры и показатели надежности двухкаскадного ТЭУ, полученные для различных режимов работы при $T = 300$ К; $\Delta T = 60$ К; $Q_0 = 2$ Вт; $T_1 = 267$ К; $\Theta_1 = 0,426$; $\Theta_2 = 0,39$

| $l/S, \text{ см}^{-1}$ | Режим работы | B_1 | B_2 | $I, \text{ А}$ | $n_1, \text{ шт.}$ | $n_2, \text{ шт.}$ | n_1/n_2 | $n_1+n_2, \text{ шт.}$ | $W_{\Sigma}, \text{ Вт}$ | $U_{\Sigma}, \text{ В}$ | E | λ/λ_0 | P |
|------------------------|--------------------|-------|-------|----------------|--------------------|--------------------|-----------|------------------------|--------------------------|-------------------------|-------|---------------------|---------|
| 40 | $Q_{0\max}$ | 1,0 | 0,97 | 1,20 | 68,2 | 249,0 | 0,27 | 317,2 | 41,4 | 34,8 | 0,048 | 292,0 | 0,9162 |
| | $(Q_0/I)_{\max}$ | 0,65 | 0,63 | 0,81 | 81,8 | 199,5 | 0,41 | 281,3 | 17,1 | 21,2 | 0,117 | 45,7 | 0,9864 |
| | $(Q_0/I^2)_{\max}$ | 0,43 | 0,41 | 0,50 | 160 | 339,2 | 0,47 | 500 | 13,4 | 26,7 | 0,150 | 13,3 | 0,9960 |
| | λ_{\min} | 0,33 | 0,32 | 0,39 | 320 | 730 | 0,44 | 1050 | 17,9 | 45,8 | 0,112 | 9,2 | 0,9972 |
| 20 | $Q_{0\max}$ | 1,0 | 0,97 | 2,40 | 34,1 | 124,4 | 0,27 | 158,5 | 41,4 | 17,5 | 0,048 | 146 | 0,9572 |
| | $(Q_0/I)_{\max}$ | 0,65 | 0,63 | 1,61 | 40,8 | 100,0 | 0,41 | 140,8 | 17,1 | 10,6 | 0,117 | 22,8 | 0,9932 |
| | $(Q_0/I^2)_{\max}$ | 0,43 | 0,41 | 1,0 | 80,0 | 170 | 0,47 | 250 | 13,4 | 13,4 | 0,150 | 6,65 | 0,9980 |
| | λ_{\min} | 0,33 | 0,32 | 0,78 | 160,4 | 366,5 | 0,44 | 527 | 17,9 | 22,9 | 0,112 | 4,6 | 0,9986 |
| 10 | $Q_{0\max}$ | 1,0 | 0,97 | 4,75 | 17,0 | 62,0 | 0,27 | 79,0 | 41,4 | 8,7 | 0,048 | 72,7 | 0,9784 |
| | $(Q_0/I)_{\max}$ | 0,65 | 0,63 | 3,20 | 20,4 | 50,0 | 0,41 | 70,4 | 17,1 | 5,3 | 0,117 | 11,4 | 0,9966 |
| | $(Q_0/I^2)_{\max}$ | 0,43 | 0,41 | 2,0 | 40,0 | 84,6 | 0,47 | 125 | 13,4 | 6,61 | 0,150 | 3,33 | 0,9990 |
| | λ_{\min} | 0,33 | 0,32 | 1,56 | 80,0 | 181 | 0,44 | 261 | 17,9 | 11,4 | 0,112 | 2,3 | 0,99931 |
| 4,5 | $Q_{0\max}$ | 1,0 | 0,97 | 10,6 | 7,6 | 27,9 | 0,27 | 35,5 | 41,4 | 3,9 | 0,048 | 32,8 | 0,9902 |
| | $(Q_0/I)_{\max}$ | 0,65 | 0,63 | 7,2 | 9,2 | 22,5 | 0,41 | 31,7 | 17,1 | 2,4 | 0,117 | 5,1 | 0,0085 |
| | $(Q_0/I^2)_{\max}$ | 0,43 | 0,41 | 4,5 | 17,9 | 38,0 | 0,47 | 55,9 | 13,4 | 3,0 | 0,150 | 1,5 | 0,99955 |
| | λ_{\min} | 0,33 | 0,32 | 3,5 | 35,9 | 81,6 | 0,44 | 117,6 | 17,9 | 5,2 | 0,112 | 1,0 | 0,99969 |
| 2,0 | $Q_{0\max}$ | 1,0 | 0,97 | 23,7 | 3,4 | 12,4 | 0,27 | 15,8 | 41,4 | 1,74 | 0,048 | 14,0 | 0,9958 |
| | $(Q_0/I)_{\max}$ | 0,65 | 0,63 | 16,1 | 4,0 | 9,8 | 0,41 | 13,8 | 17,1 | 1,06 | 0,117 | 2,3 | 0,99932 |
| | $(Q_0/I^2)_{\max}$ | 0,43 | 0,41 | 10,1 | 8,0 | 17,0 | 0,47 | 25,0 | 13,4 | 1,32 | 0,150 | 0,67 | 0,99980 |
| | λ_{\min} | 0,33 | 0,32 | 7,8 | 16,0 | 36,5 | 0,44 | 52,5 | 17,9 | 2,30 | 0,112 | 0,56 | 0,99986 |

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

Таблица 2

Основные параметры и показатели надежности двухкаскадного ТЭУ, полученные для различных режимов работы при $T = 300\text{ K}$; $\Delta T = 70\text{ K}$; $Q_0 = 2\text{ Вт}$; $T_1 = 262\text{ K}$; $\Theta_1 = 0,56$; $\Theta_2 = 0,47$

| $l/S, \text{ см}^{-1}$ | Режим работы | B_1 | B_2 | $I, \text{ А}$ | $n_1, \text{ шт.}$ | $n_2, \text{ шт.}$ | n_1/n_2 | $n_1+n_2, \text{ шт.}$ | $W_{\Sigma}, \text{ Вт}$ | $U_{\Sigma}, \text{ В}$ | E | λ/λ_0 | P |
|------------------------|--------------------------|-------|-------|----------------|--------------------|--------------------|-----------|------------------------|--------------------------|-------------------------|--------|---------------------|---------|
| 40 | $Q_{0\text{max}}$ | 1,0 | 0,96 | 1,17 | 96,6 | 376,8 | 0,256 | 473,4 | 60,0 | 51,3 | 0,033 | 427,8 | 0,8796 |
| | $(Q_0/I)_{\text{max}}$ | 0,65 | 0,63 | 0,90 | 110,4 | 314,6 | 0,351 | 425 | 31,5 | 35,0 | 0,0635 | 116,0 | 0,9656 |
| | $(Q_0/I^2)_{\text{max}}$ | 0,56 | 0,54 | 0,65 | 172,6 | 424,6 | 0,40 | 587,2 | 25,8 | 39,7 | 0,0775 | 52,9 | 0,99842 |
| | λ_{min} | 0,46 | 0,44 | 0,53 | 300,4 | 733 | 0,41 | 1033 | 30,7 | 57,9 | 0,0652 | 37,4 | 0,9886 |
| 20 | $Q_{0\text{max}}$ | 1,0 | 0,96 | 2,33 | 48,3 | 188,4 | 0,256 | 236,7 | 60,0 | 25,7 | 0,033 | 213,9 | 0,9379 |
| | $(Q_0/I)_{\text{max}}$ | 0,65 | 0,63 | 1,80 | 55,2 | 157,3 | 0,351 | 212,5 | 31,5 | 17,6 | 0,0635 | 58,2 | 0,9828 |
| | $(Q_0/I^2)_{\text{max}}$ | 0,56 | 0,54 | 1,31 | 86,3 | 212,6 | 0,40 | 299,0 | 25,8 | 19,7 | 0,0775 | 26,47 | 0,9921 |
| | λ_{min} | 0,46 | 0,44 | 1,06 | 150,2 | 366 | 0,41 | 516,3 | 30,7 | 28,9 | 0,0652 | 18,7 | 0,9944 |
| 10 | $Q_{0\text{max}}$ | 1,0 | 0,96 | 4,65 | 24,3 | 94,7 | 0,256 | 119,0 | 60,0 | 12,9 | 0,033 | 107,7 | 0,9682 |
| | $(Q_0/I)_{\text{max}}$ | 0,65 | 0,63 | 3,60 | 27,6 | 78,7 | 0,351 | 106,3 | 31,5 | 8,76 | 0,0635 | 29,1 | 0,9914 |
| | $(Q_0/I^2)_{\text{max}}$ | 0,56 | 0,54 | 2,61 | 43,2 | 106,4 | 0,40 | 149,6 | 25,8 | 9,90 | 0,0775 | 13,25 | 0,9960 |
| | λ_{min} | 0,46 | 0,44 | 2,12 | 75,4 | 183 | 0,41 | 258,5 | 30,7 | 14,5 | 0,0652 | 9,4 | 0,9972 |
| 4,5 | $Q_{0\text{max}}$ | 1,0 | 0,96 | 10,35 | 10,9 | 42,5 | 0,256 | 53,4 | 60,0 | 5,8 | 0,033 | 48,4 | 0,9856 |
| | $(Q_0/I)_{\text{max}}$ | 0,65 | 0,63 | 8,0 | 12,4 | 35,3 | 0,351 | 47,7 | 31,5 | 3,94 | 0,0635 | 13,1 | 0,9963 |
| | $(Q_0/I^2)_{\text{max}}$ | 0,56 | 0,54 | 5,81 | 19,4 | 47,7 | 0,40 | 67,1 | 25,8 | 4,45 | 0,0775 | 5,94 | 0,9982 |
| | λ_{min} | 0,46 | 0,44 | 4,71 | 33,9 | 82,0 | 0,41 | 115,9 | 30,7 | 6,5 | 0,0652 | 4,23 | 0,9987 |
| 2,0 | $Q_{0\text{max}}$ | 1,0 | 0,96 | 23,3 | 4,8 | 18,8 | 0,256 | 23,6 | 60,0 | 2,56 | 0,033 | 21,5 | 0,9936 |
| | $(Q_0/I)_{\text{max}}$ | 0,65 | 0,63 | 18,0 | 5,6 | 16,0 | 0,351 | 21,6 | 31,5 | 1,76 | 0,0635 | 5,9 | 0,9982 |
| | $(Q_0/I^2)_{\text{max}}$ | 0,56 | 0,54 | 13,1 | 8,6 | 21,2 | 0,40 | 29,8 | 25,8 | 1,97 | 0,0775 | 2,64 | 0,99921 |
| | λ_{min} | 0,46 | 0,44 | 10,6 | 15,0 | 36,6 | 0,41 | 51,6 | 30,7 | 2,9 | 0,0652 | 1,87 | 0,99944 |

ные для режима $Q_{0\text{max}}$, для остальных режимов характер зависимостей аналогичный);

– увеличивается относительный перепад температуры в каскадах (рис. 4);

– уменьшается холодильный коэффициент (рис. 5);

– уменьшается отношение количества термоэлементов в каскадах n_1/n_2 (рис. 6).

Приведенные расчетные данные указывают на то, что на параметры ТЭУ достаточно сильно влияет как геометрия ветвей термоэлементов, так и режим работы. Таким образом, очевидно, что разработчикам каскадных ТЭУ приходится решать многокритериальную задачу, поскольку обычно при их проектировании стремятся к:

- снижению рабочего тока I ;
- повышению падения напряжения U ;
- увеличению холодильного коэффициента E ;
- уменьшению суммарного количества термоэлементов n_1+n_2 ;

– уменьшению интенсивности отказов λ , а следовательно к увеличению вероятности безотказной работы P .

При рациональном построении ТЭУ геометрию термоэлементов и токовый режим следует выбирать с учетом весомости каждого из перечисленных параметров, и для возможности проведения сравнительного анализа предлагается использовать следующие критерии:

$$K_I = \frac{I_{\lambda_{\text{min}}}}{I_j}; \quad K_U = \frac{U_j}{U_{\lambda_{\text{min}}}}$$

$$K_n = \frac{(n_1 + n_2)_j}{(n_1 + n_2)_{\lambda_{\text{min}}}}; \quad K_\lambda = \frac{(\lambda/\lambda_0)_{\lambda_{\text{min}}}}{(\lambda/\lambda_0)_j}$$

где индекс λ_{min} означает, что рассматриваемый параметр был получен в режиме минимальной интенсивности отказов, а индекс j – в любом другом режиме.

Эти критерии представляют собой относительные величины, составленные с учетом того, что в режиме λ_{min} обеспечиваются наибольшие по сравнению с другими режимами значения падения напряжения и суммарного количества термоэлементов и наименьшие значения рабочего

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

Таблица 3

Основные параметры и показатели надежности двухкаскадного ТЭУ, полученные для различных режимов работы при $T = 300 \text{ K}$; $\Delta T = 80 \text{ K}$; $Q_0 = 2 \text{ Вт}$; $T_1 = 256 \text{ K}$; $\Theta_1 = 0,716$; $\Theta_2 = 0,57$

| $l/S, \text{ см}^{-1}$ | Режим работы | B_1 | B_2 | $I, \text{ А}$ | $n_1, \text{ шт.}$ | $n_2, \text{ шт.}$ | n_1/n_2 | $n_1+n_2, \text{ шт.}$ | $W_{\Sigma}, \text{ Вт}$ | $U_{\Sigma}, \text{ В}$ | E | λ/λ_0 | P |
|------------------------|--------------------------|-------|-------|----------------|--------------------|--------------------|-----------|------------------------|--------------------------|-------------------------|--------|---------------------|--------|
| 40 | Q_{max} | 1,0 | 0,94 | 1,12 | 169,2 | 734 | 0,23 | 903,2 | 107,5 | 96,0 | 0,0186 | 776 | 0,7923 |
| | $(Q_0/I)_{\text{max}}$ | 0,83 | 0,78 | 0,98 | 165,4 | 612 | 0,27 | 777,4 | 68,4 | 70,1 | 0,0292 | 322,4 | 0,9078 |
| | $(Q_0/I^2)_{\text{max}}$ | 0,72 | 0,67 | 0,80 | 234,4 | 752,4 | 0,31 | 986,6 | 63,2 | 79,0 | 0,0316 | 229,4 | 0,9335 |
| | λ_{min} | 0,63 | 0,59 | 0,71 | 325 | 1008 | 0,32 | 1333 | 67,4 | 95,0 | 0,0297 | 183 | 0,9466 |
| 20 | Q_{max} | 1,0 | 0,94 | 2,24 | 84,6 | 376,0 | 0,23 | 451,4 | 107,5 | 48,0 | 0,0186 | 388 | 0,8900 |
| | $(Q_0/I)_{\text{max}}$ | 0,83 | 0,78 | 1,95 | 82,6 | 305,6 | 0,27 | 388,1 | 68,4 | 35,1 | 0,0292 | 161,4 | 0,9528 |
| | $(Q_0/I^2)_{\text{max}}$ | 0,72 | 0,67 | 1,61 | 117,2 | 376,2 | 0,31 | 493,4 | 63,2 | 39,3 | 0,0316 | 114,7 | 0,9662 |
| | λ_{min} | 0,63 | 0,59 | 1,41 | 162,5 | 502,2 | 0,32 | 664,7 | 67,4 | 47,8 | 0,0297 | 91,5 | 0,9729 |
| 10 | Q_{max} | 1,0 | 0,94 | 4,49 | 41,9 | 182,0 | 0,23 | 223,9 | 107,5 | 23,9 | 0,0186 | 193 | 0,9438 |
| | $(Q_0/I)_{\text{max}}$ | 0,83 | 0,78 | 3,90 | 41,4 | 153,2 | 0,27 | 194,6 | 68,4 | 17,6 | 0,0292 | 81,0 | 0,9760 |
| | $(Q_0/I^2)_{\text{max}}$ | 0,72 | 0,67 | 3,21 | 58,6 | 188,1 | 0,31 | 246,7 | 63,2 | 19,7 | 0,0316 | 57,4 | 0,9829 |
| | λ_{min} | 0,63 | 0,59 | 2,83 | 81,0 | 250,1 | 0,32 | 331,1 | 67,4 | 23,8 | 0,0297 | 45,6 | 0,9864 |
| 4,5 | Q_{max} | 1,0 | 0,94 | 9,97 | 18,9 | 81,9 | 0,23 | 100,8 | 107,5 | 10,8 | 0,0186 | 86,8 | 0,9743 |
| | $(Q_0/I)_{\text{max}}$ | 0,83 | 0,78 | 8,67 | 18,6 | 68,4 | 0,27 | 87,0 | 68,4 | 7,89 | 0,0292 | 36,4 | 0,9891 |
| | $(Q_0/I^2)_{\text{max}}$ | 0,72 | 0,67 | 7,14 | 26,4 | 84,7 | 0,31 | 111,0 | 63,2 | 8,9 | 0,0316 | 25,8 | 0,9923 |
| | λ_{min} | 0,63 | 0,59 | 6,28 | 40,5 | 125,5 | 0,32 | 166,0 | 67,4 | 10,7 | 0,0297 | 22,8 | 0,9932 |
| 2,0 | Q_{max} | 1,0 | 0,94 | 22,4 | 8,4 | 36,5 | 0,23 | 44,9 | 107,5 | 4,8 | 0,0186 | 39,7 | 0,9882 |
| | $(Q_0/I)_{\text{max}}$ | 0,83 | 0,78 | 19,5 | 8,2 | 30,3 | 0,27 | 38,5 | 68,4 | 3,5 | 0,0292 | 16,2 | 0,9952 |
| | $(Q_0/I^2)_{\text{max}}$ | 0,72 | 0,67 | 16,0 | 9,1 | 29,3 | 0,31 | 38,4 | 63,2 | 3,96 | 0,0316 | 9,8 | 0,9971 |
| | λ_{min} | 0,63 | 0,59 | 14,1 | 16,2 | 50,3 | 0,32 | 66,5 | 67,4 | 4,8 | 0,0297 | 9,0 | 0,9973 |

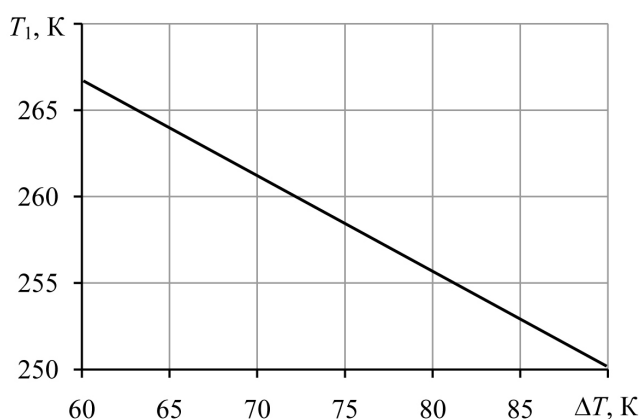


Рис. 1. Зависимость промежуточной температуры T_1 двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}$; $Q_0 = 2 \text{ Вт}$

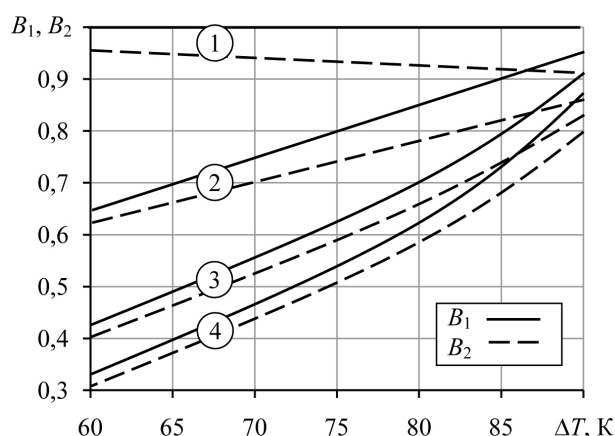


Рис. 2. Зависимость относительного рабочего тока первого (B_1) и второго (B_2) каскадов двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}$; $Q_0 = 2 \text{ Вт}$ для различных режимов работы: 1 – Q_{max} ; 2 – $(Q_0/I)_{\text{max}}$; 3 – $(Q_0/I^2)_{\text{max}}$; 4 – λ_{min}

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

Таблица 4

Основные параметры и показатели надежности двухкаскадного ТЭУ, полученные для различных режимов работы при $T = 300 \text{ K}$; $T = 90 \text{ K}$; $Q_0 = 2 \text{ Вт}$; $T_1 = 250 \text{ K}$; $\Theta_1 = 0,91$; $\Theta_2 = 0,68$

| $l/S, \text{ см}^{-1}$ | Режим работы | B_1 | B_2 | $I, \text{ А}$ | $n_1, \text{ шт.}$ | $n_2, \text{ шт.}$ | n_1/n_2 | $n_1+n_2, \text{ шт.}$ | $W_{\Sigma}, \text{ Вт}$ | $U_{\Sigma}, \text{ В}$ | E | λ/λ_0 | P |
|------------------------|--------------------------|-------|-------|----------------|--------------------|--------------------|-----------|------------------------|--------------------------|-------------------------|---------|---------------------|--------|
| 40 | $Q_{\text{оmax}}$ | 1,0 | 0,91 | 1,1 | 582 | 3054 | 0,19 | 3636 | 402,0 | 373,6 | 0,0050 | 2862 | 0,4238 |
| | $(Q_0/I)_{\text{max}}$ | 0,95 | 0,87 | 1,07 | 572 | 2860 | 0,20 | 3432 | 359,0 | 335,6 | 0,00557 | 2236 | 0,5113 |
| | $(Q_0/I^2)_{\text{max}}$ | 0,91 | 0,83 | 0,98 | 643,8 | 3019 | 0,21 | 3663 | 338,6 | 347,3 | 0,00591 | 2000 | 0,5488 |
| | λ_{min} | 0,87 | 0,80 | 0,94 | 701,4 | 3226 | 0,22 | 3928 | 339,0 | 361,0 | 0,0059 | 1849 | 0,5742 |
| 20 | $Q_{\text{оmax}}$ | 1,0 | 0,91 | 2,15 | 291 | 1527 | 0,19 | 1818 | 402,0 | 186,8 | 0,0050 | 1431 | 0,6510 |
| | $(Q_0/I)_{\text{max}}$ | 0,95 | 0,87 | 2,13 | 286 | 1430 | 0,20 | 1716 | 359,0 | 168,5 | 0,00557 | 1118 | 0,7150 |
| | $(Q_0/I^2)_{\text{max}}$ | 0,91 | 0,83 | 1,95 | 321,9 | 1510 | 0,21 | 1832 | 338,6 | 173,6 | 0,00591 | 988,9 | 0,7410 |
| | λ_{min} | 0,87 | 0,80 | 1,88 | 350,7 | 1613 | 0,22 | 1964 | 339,0 | 180,3 | 0,0059 | 924,6 | 0,7578 |
| 10 | $Q_{\text{оmax}}$ | 1,0 | 0,91 | 4,31 | 145,0 | 763 | 0,19 | 908,7 | 402,0 | 93,4 | 0,0050 | 715 | 0,8069 |
| | $(Q_0/I)_{\text{max}}$ | 0,95 | 0,87 | 4,26 | 143,0 | 715 | 0,20 | 858 | 359,0 | 84,3 | 0,00557 | 558 | 0,8459 |
| | $(Q_0/I^2)_{\text{max}}$ | 0,91 | 0,83 | 3,90 | 160,6 | 753,7 | 0,21 | 914,3 | 338,6 | 86,8 | 0,00591 | 500 | 0,8607 |
| | λ_{min} | 0,87 | 0,80 | 3,76 | 175,4 | 808 | 0,22 | 983,0 | 339,0 | 90,1 | 0,0059 | 463 | 0,8704 |
| 4,5 | $Q_{\text{оmax}}$ | 1,0 | 0,91 | 9,57 | 65,2 | 342 | 0,19 | 407,0 | 402,0 | 42,0 | 0,0050 | 320,9 | 0,9082 |
| | $(Q_0/I)_{\text{max}}$ | 0,95 | 0,87 | 9,47 | 64,4 | 322 | 0,20 | 386,4 | 359,0 | 37,9 | 0,00557 | 251,4 | 0,9274 |
| | $(Q_0/I^2)_{\text{max}}$ | 0,91 | 0,83 | 8,86 | 72,2 | 338,7 | 0,21 | 410,9 | 338,6 | 39,0 | 0,00591 | 224,7 | 0,9348 |
| | λ_{min} | 0,87 | 0,80 | 8,40 | 78,9 | 363 | 0,22 | 441,8 | 339,0 | 40,6 | 0,0059 | 208,0 | 0,9395 |
| 2,0 | $Q_{\text{оmax}}$ | 1,0 | 0,91 | 21,5 | 29,1 | 152,7 | 0,19 | 181,8 | 402,0 | 18,7 | 0,0050 | 144 | 0,9577 |
| | $(Q_0/I)_{\text{max}}$ | 0,95 | 0,87 | 21,3 | 38,6 | 143,0 | 0,20 | 171,6 | 359,0 | 16,9 | 0,00557 | 112 | 0,9670 |
| | $(Q_0/I^2)_{\text{max}}$ | 0,91 | 0,83 | 19,5 | 32,0 | 150,0 | 0,21 | 182,0 | 338,6 | 17,4 | 0,00591 | 97,6 | 0,9711 |
| | λ_{min} | 0,87 | 0,80 | 18,8 | 35,1 | 161,5 | 0,22 | 196,6 | 339,0 | 18,0 | 0,0059 | 92,6 | 0,9725 |

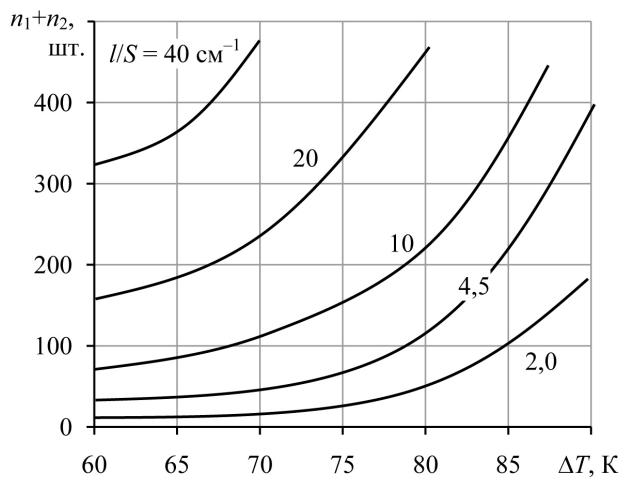


Рис. 3. Зависимость суммарного количества термоэлементов двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных значений отношения l/S при $T = 300 \text{ K}$; $Q_0 = 2 \text{ Вт}$ в режиме $Q_{\text{оmax}}$

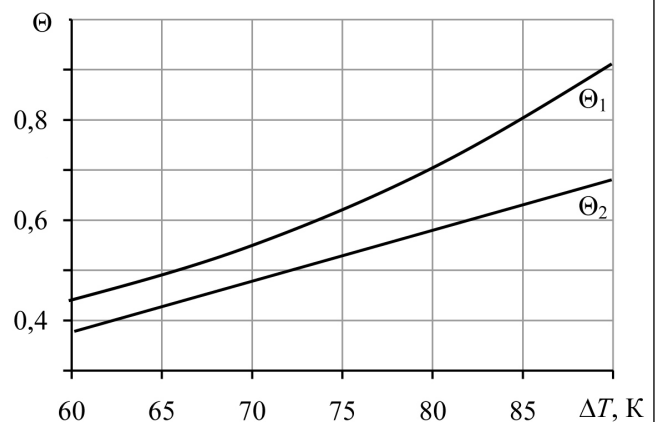


Рис. 4. Зависимость относительного перепада температуры в каскадах двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT при $T = 300 \text{ K}$; $Q_0 = 2 \text{ Вт}$

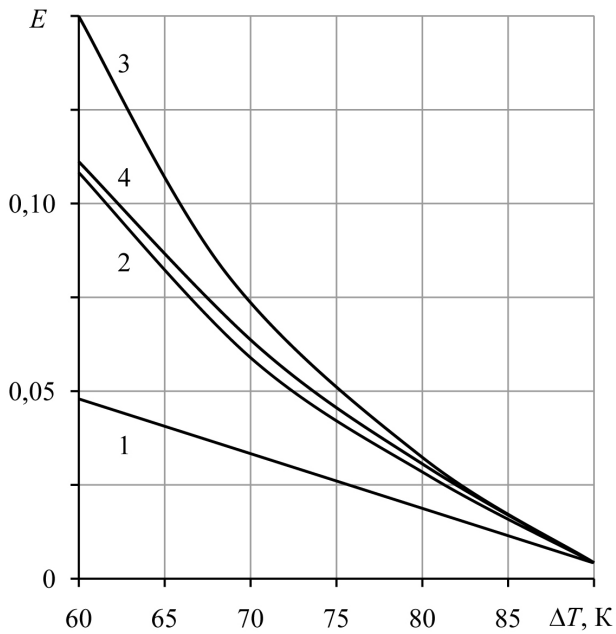


Рис. 5. Зависимость холодильного коэффициента E двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных режимов работы и конфигурации ветвей термоэлементов при $T = 300$ К; $Q_0 = 2$ Вт: 1 – $Q_{0\max}$; 2 – $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – $(Q_0/I^2)_{\max}$; 4 – λ_{\min}

тока и интенсивности отказов. Удобство оперирования такими критериями обусловлено тем, что они не зависят от геометрии ветвей термоэлементов и позволяют оценить изменения весомых параметров при переходе от режима λ_{\min} к какому-либо другому.

Из представленных на рис. 7–10 зависимостей можно увидеть, насколько при фиксирован-

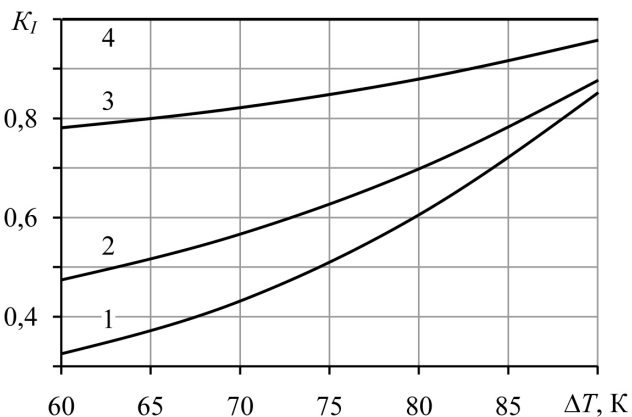


Рис. 7. Зависимость критерия K_I от общего перепада температуры ΔT при $T = 300$ К; $Q_0 = 2$ Вт:

$$1 - K_I = \frac{I_{\lambda_{\min}}}{I_{Q_{0\max}}}; \quad 2 - K_I = \frac{I_{\lambda_{\min}}}{I_{(Q_0/I)_{\max}}};$$

$$3 - K_I = \frac{I_{\lambda_{\min}}}{I_{(Q_0/I^2)_{\max}}}; \quad 4 - K_I = \frac{I_{\lambda_{\min}}}{I_{\lambda_{\min}}}$$

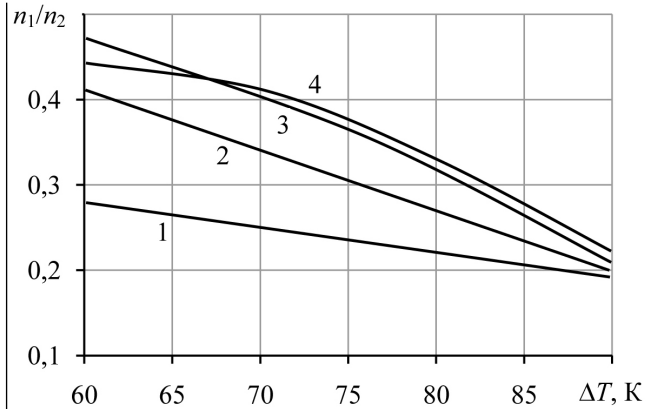


Рис. 6. Зависимость отношения количества термоэлементов в смежных каскадах n_1/n_2 двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных режимов работы и геометрии ветвей термоэлементов при $T = 300$ К; $Q_0 = 2$ Вт:

1 – $Q_{0\max}$; 2 – $(Q_0/I)_{\max}$; 3 – $(Q_0/I^2)_{\max}$; 4 – λ_{\min}

ном перепаде температуры ΔT и прочих равных условиях значения I , n_1+n_2 , U , λ/λ_0 в выбранном режиме отличаются от этих значений в режиме λ_{\min} . Например, при $\Delta T = 70$ К по сравнению с режимом λ_{\min} :

- рабочий ток в режиме $Q_{0\max}$ увеличивается в 2,2 раза, в режиме $(Q_0/I)_{\max}$ – в 1,7 раз, в режиме $(Q_0/I^2)_{\max}$ – в 1,23 раза (рис. 7);
- суммарное количество термоэлементов в режиме $Q_{0\max}$ увеличивается в 2,2 раза, в режиме $(Q_0/I)_{\max}$ – в 2,4 раза, в режиме $(Q_0/I^2)_{\max}$ – в 1,7 раз (рис. 8);
- падение напряжения на ТЭУ в режиме $Q_{0\max}$ уменьшается в 1,2 раза, в режиме $(Q_0/I)_{\max}$ – в 2,9 раз, в режиме $(Q_0/I^2)_{\max}$ – в 1,9 раз (рис. 9);

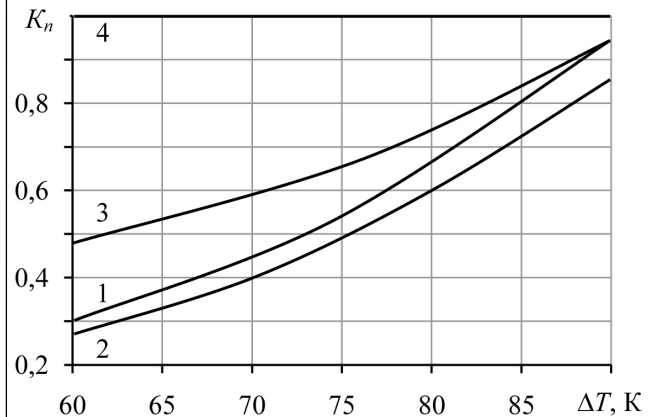


Рис. 8. Зависимость критерия K_n от общего перепада температуры ΔT при $T = 300$ К; $Q_0 = 2$ Вт:

$$1 - K_n = \frac{(n_1 + n_2)_{Q_{0\max}}}{(n_1 + n_2)_{\lambda_{\min}}}; \quad 2 - K_n = \frac{(n_1 + n_2)_{(Q_0/I)_{\max}}}{(n_1 + n_2)_{\lambda_{\min}}};$$

$$3 - K_n = \frac{(n_1 + n_2)_{(Q_0/I^2)_{\max}}}{(n_1 + n_2)_{\lambda_{\min}}}; \quad 4 - K_n = \frac{(n_1 + n_2)_{\lambda_{\min}}}{(n_1 + n_2)_{\lambda_{\min}}}$$

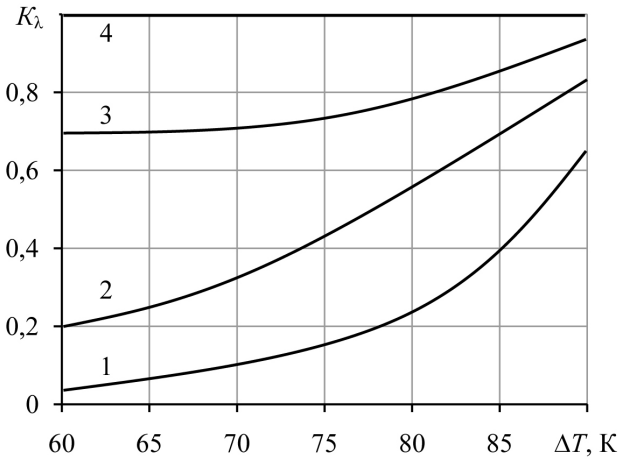


Рис. 9. Зависимость критерия K_U от общего перепада температуры ΔT при $T = 300$ К; $Q_0 = 2$ Вт:

$$1 - K_U = \frac{U_{Q_{0max}}}{U_{\lambda_{min}}}; 2 - K_U = \frac{U_{(Q_0/I)_{max}}}{U_{\lambda_{min}}};$$

$$3 - K_U = \frac{U_{(Q_0/I^2)_{max}}}{U_{\lambda_{min}}}; 4 - K_U = \frac{U_{\lambda_{min}}}{U_{\lambda_{min}}}$$

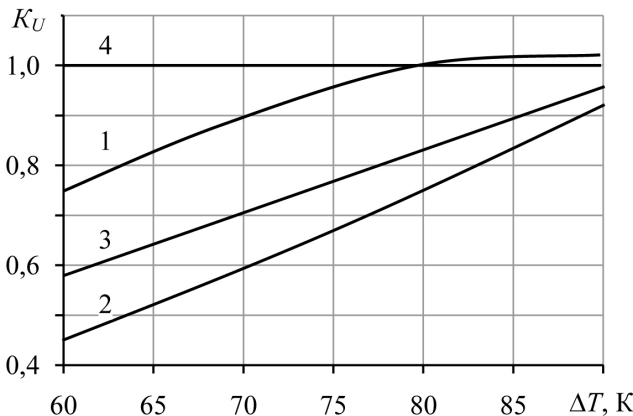


Рис. 10. Зависимость критерия K_Σ от общего перепада температуры ΔT при $T = 300$ К; $Q_0 = 2$ Вт:

$$1 - K_\lambda = \frac{(\lambda/\lambda_0)_{\lambda_{min}}}{(\lambda/\lambda_0)_{Q_{0max}}}; 2 - K_\lambda = \frac{(\lambda/\lambda_0)_{\lambda_{min}}}{(\lambda/\lambda_0)_{(Q_0/I)_{max}}};$$

$$3 - K_\lambda = \frac{(\lambda/\lambda_0)_{\lambda_{min}}}{(\lambda/\lambda_0)_{(Q_0/I^2)_{max}}}; 4 - K_\lambda = \frac{(\lambda/\lambda_0)_{\lambda_{min}}}{(\lambda/\lambda_0)_{\lambda_{min}}}$$

– интенсивность отказов в режиме Q_{0max} увеличивается в 11 раз, в режиме $(Q_0/I)_{max}$ – в 3,1 раза, в режиме $(Q_0/I^2)_{max}$ – в 1,7 раза (рис. 10).

Таким образом, проведенный анализ показал зависимость основных параметров и показателей надежности двухкаскадного ТЭУ и от геометрии ветвей термоэлементов, и от токового режима работы. Предложенные критерии оценки весомых характеристик ТЭУ помогут разработчикам проводить рациональное построение термоэлектрических охлаждающих двухкаскадных устройств, обеспечивающих высокую надежность при приемлемом энергопотреблении и малых габаритных размерах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Diana Enescu, Elena Otilia Virjoghe. A review on thermoelectric cooling parameters and performance // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 38. – P. 903–916. – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.045>
2. Zheng X.F., Liu C.X., Yan Y.Y., Wang Q. A review of thermoelectrics research – Recent developments and potentials for sustainable and renewable energy applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 32. – P. 486–503. – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.053>
3. S.B Riffat, Xiaoli Ma. Thermoelectrics: a review of present and potential applications // Applied Thermal Engineering. – 2003. – Vol. 23, iss. 8. – P. 913–935. – [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00012-7)
4. Зайков В. П., Киншова Л. А., Моисеев В. Ф. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 1. Однокаскадные устройства. – Одесса: Политехперіодика, 2009.
5. Зайков В. П., Мещеряков В. И., Журавлев Ю. И. Влияние эффективности исходных материалов на показатели надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Часть 2: Двухкаскадные ТЭУ // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2015. – № 2-3. – С. 34–38. – <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.2-3.34>

Дата поступления рукописи
в редакцию 15.07 2017 г.

В. П. ЗАЙКОВ, В. И. МЕЩЕРЯКОВ¹, Ю. И. ЖУРАВЛЬОВ²

Україна, ¹Одеський державний екологічний університет,
²Національний університет «Одеська морська академія»

E-mail: gradan@ua.fm

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ І ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ДВОКАСКАДНИХ ТЕУ З РІЗНОЮ ГЕОМЕТРІЄЮ ГІЛОК ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ В РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

Проведено порівняльний аналіз основних параметрів і показників надійності двокаскадних ТЕУ при варіації геометрії гілок термоелементів в каскадах і перепадів температури для характерних струмо-

вих режимів роботи за умови однакової конфігурації гілок в каскадах. Запропоновано критерії, що дозволяють вести побудову двокаскадних ТЕУ підвищеної надійності, вибираючи струмовий режим роботи при заданій геометрії гілок термоелементів в каскадах з урахуванням вагомості кожного з обмежувальних чинників.

Ключові слова: термоелектричний охолоджувальний пристрій, термоелемент, геометрія гілки, струмовий режим роботи, показники надійності.

DOI: 10.15222/TKEA2017.4-5.32
UDC 621.362–192

V. P. ZAIKOV, V. I. MESHCHERYAKOV¹,
Yu. I. ZHURAVLYOV²

Ukraine, ¹Odessa State Environmental University,
²National University «Odessa Maritime Academy»
E-mail: gradan@ua.fm

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE MAIN RELIABILITY INDICES AND PARAMETERS OF TWO-STAGE THERMOELECTRIC DEVICES WITH DIFFERENT GEOMETRY OF THE BRANCHES OF THERMOELEMENTS IN VARIOUS OPERATING MODES

The paper presents a comparative analysis of the main parameters and reliability indices of two-stage thermoelectric devices with a variation in the geometry of the branches of thermoelements in cascades and temperature drops for characteristic current operating modes under the condition of identical configuration of branches in cascades. The authors propose criteria that allow building two-stage high-reliability thermoelectric devices choosing the current operation mode for a given geometry of the branches of thermoelements in cascades, considering the significance of each of the limiting factors.

Key words: thermoelectric cooling device, thermoelement, branch geometry, current operation mode, reliability indicators.

REFERENCES

1. Diana Enescu, Elena Otilia Virjoghe. A review on thermoelectric cooling parameters and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 38, pp. 903–916. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.045>
2. Zheng X.F., Liu C.X., Yan Y.Y., Wang Q. A review of thermoelectrics research – Recent developments and potentials for sustainable and renewable energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 32, pp. 486-503. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.053>
3. S.B Riffat, Xiaoli Ma. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*, 2003, vol. 23, iss. 8, pp. 913-935. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00012-7)
4. Zaikov V. P., Kinshova L. A., Moiseev V. F. *Prognozirovanie pokazatelei nadezhnosti termoelektricheskikh okhlazhdayushchikh ustroystv. Kniga 1. Odnokaskadnye ustroystva* [Predicting reliability indicators of thermoelectric cooling devices. Book 1. Single-stage devices], Odessa, Politekhpriodika, 2009. (Rus)
5. Zaikov V. P., Meshcheryakov V. I., Zhuravlev Yu. I. [Influence of the effectiveness of raw materials on the reliability of thermoelectric cooling devices. Part 2: Two-stage thermoelectric devices]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2015, no 2–3, pp. 34-38. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.2-3.34> (Rus)

ГОТОВИТСЯ К ПЕЧАТИ

НОВЫЕ КНИГИ



Зайков В. П., Мещеряков В. И., Журавлёв Ю. И. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 3. Методы повышения надежности термоэлектрических охлаждающих устройств.— Одесса: Политехпериодика, 2017.