

К. т. н. В. П. ЗАЙКОВ, к. т. н. Л. А. КИНШОВА,
В. В. БЫКАДОРОВ, Л. Ф. ХРАМОВА

Украина, г. Одесса, НИИ «Шторм»

Дата поступления в редакцию
27.12 2002 г. — 02.06 2003 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Л. Н. ВИХОП
(Ин-т термоэлектричества, г. Черновцы)

КРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ РЕЖИМА РАБОТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Описаны возможности критериального подхода как метода поиска промежуточных (компромиссных) режимов работы при проектировании термоэлектрических охлаждающих устройств.

При проектировании термоэлектрических охлаждающих устройств (ТЭУ) обычно задаются холодопроизводительностью (Q_0), температурой теплопоглощающего спая (T_0) и температурой тепловыделяющего спая (T). В процессе проектирования ТЭУ накладываются различные ограничения — по холодопроизводительности, потребляемой мощности (W), падению напряжения (U), величине рабочего тока (I) и т. д., и необходимо выбрать режим работы охлаждающего элемента с учетом перечисленных ограничений.

В литературе по термоэлектрическому охлаждению описаны характерные режимы работы охлаждающего устройства, а именно, режим максимальной холодопроизводительности $Q_{0\max}$ и максимального холодильного коэффициента E_{\max} [1], режим тепловой изоляции (нулевой холодопроизводительности — $Q_0=0$) [2]. Проектирование ТЭУ в характерном режиме $Q_{0\max}$ хотя и обеспечивает минимальное количество термоэлементов, однако связано с большими энергозатратами, что приводит к возрастанию тепловых потоков на тепловыделяющих спаях ТЭУ, росту теплоотводящей поверхности радиатора, а следовательно, габаритов и массы устройства в целом. Проектирование же ТЭУ в характерном режиме E_{\max} позволяет свести энергозатраты к минимуму, но, в то же время, приводит к увеличению количества термоэлементов n , т. е. массы и стоимости ТЭУ.

Эта противопоставленность указывает на то, что существуют промежуточные, компромиссные режимы работы охлаждающего термоэлемента, отличные от характерных.

Следует отметить, что в режиме нулевой холодопроизводительности достигается только необходимый перепад температур — ΔT при ($Q_0=0$), что заметно сужает область его рационального использования.

К числу известных промежуточных режимов следует отнести:

- режим минимального тока при заданной холодопроизводительности [2, с. 152] либо максимальной холодопроизводительности при заданном токе [3, с. 87] — I_{\min} ;
- режим U_{\min} — максимального отношения холодопроизводительности к напряжению U [4];
- режим q_{\min} , обеспечивающий минимальную величину десорбции (остаточного газовыделения) ТЭУ [5].

В большинстве случаев при выборе режима работы ТЭУ необходимо учитывать взаимное влияние и весомость каждого из ограничительных факторов. В этом случае появляется необходимость использования критериального подхода при проектировании ТЭУ с учетом основных значимых факторов. Так как условия проектирования могут быть весьма разнообразными, то варьируя одновременно ряд ограничительных факторов (Q_0 , W , U , I , n и т. д.), можно выбрать компромиссный режим работы охлаждающего термоэлемента. Так, режим $K_{\text{опт}}$ [6] лежит в области возможных режимов между $Q_{0\max}$ и E_{\max} и обеспечивает, по сравнению с режимом E_{\max} , большую холодопроизводительность, меньшее количество термоэлементов при незначительном увеличении энергозатрат. Режим $P_{\text{опт}}$ [7] лежит в области возможных режимов между q_{\min} и U_{\min} и обеспечивает одновременно повышение холодопроизводительности, уменьшение теплоотводящей способности радиатора и уменьшение количества термоэлементов по сравнению с режимом U_{\min} .

Целью настоящей работы является поиск промежуточных режимов работы охлаждающего термоэлемента, лежащих в интервале между известными.

Определим режим работы охлаждающего термоэлемента, обеспечивающий одновременно наибольшие значения холодопроизводительности, холодильного коэффициента и напряжения.

Указанные выше требования можно записать в виде критерия:

$$A = Q_0 E U = Q_0 \frac{Q_0}{W} U = Q_0 \frac{Q_0}{I} = \frac{Q_0^2}{I}. \quad (1)$$

Учитывая взаимозависимость требований, можно показать, анализируя (1), что искомый режим лежит в интервале между известными режимами — режимом максимальной холодопроизводительности $Q_{0\max}$ и режимом максимального отношения Q_0/I .

Используем известные соотношения:

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

$$I = I_{\max} B; \quad (3)$$

$$U = I_{\max} R \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right), \quad (4)$$

где $I_{\max} = \frac{eT_0}{R}$ — максимальный рабочий ток, А;
 e — коэффициент термо-эдс ветви термоэлемента, В/К;
 T_0 — температура теплопоглощающего спая, К;
 R — электрическое сопротивление ветви термоэлемента, Ом;
 B — относительный рабочий ток, $B = I/I_{\max}$;
 I — рабочий ток, А;
 Θ — относительный перепад температур.

Подставив (2) и (3) в (1), получим:

$$A = \frac{1}{4} I_{\max}^3 R^2 \frac{(2B - B^2 - \Theta)^2}{B}. \quad (5)$$

На рис. 1 приведена зависимость критериального соотношения $4A/(I_{\max}^3 R^2)$ от относительного рабочего тока B при заданных значениях Θ . Характерной особенностью кривых является наличие максимума (штриховая линия — геометрическое место точек, соответствующих максимальным значениям критериального соотношения).

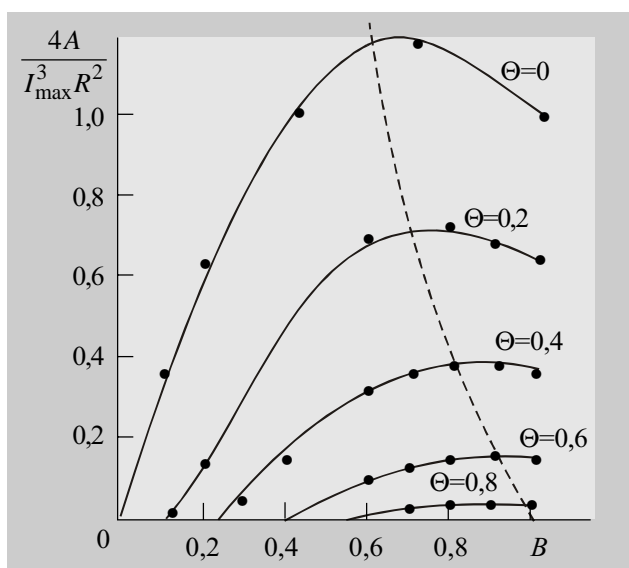


Рис. 1. Зависимость критериального соотношения $4A/(I_{\max}^3 R^2)$ от относительного рабочего тока при заданных значениях Θ

Из условия $\frac{dA}{dB} = 0$ определим соотношение для оптимального относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$, соответствующего максимуму величины критериального соотношения:

$$B_{\text{опт}} = \frac{1}{3} [1 + \sqrt{1 + 3\Theta}]. \quad (6)$$

На рис. 2 представлена зависимость оптимального относительного рабочего тока B от относительного перепада температуры Θ (кривая 11, режим

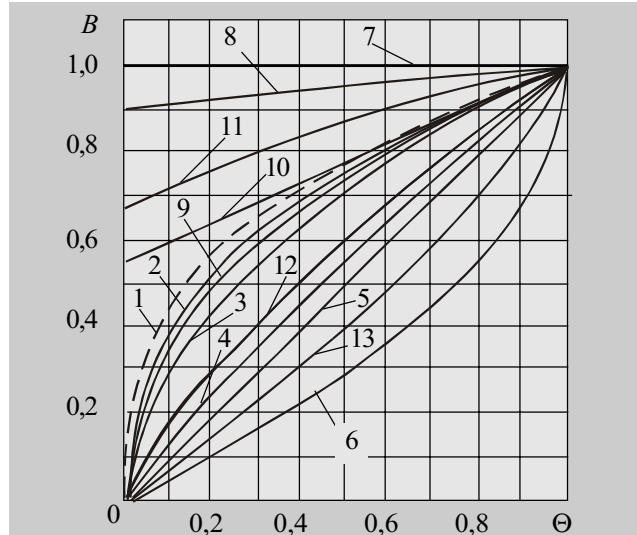


Рис. 2. Зависимость относительного рабочего тока B от относительного перепада температуры Θ для различных режимов работы охлаждающего термоэлемента: 1 — режим U_{\min} (приближенный); 2 — режим U_{\min} ; 3 — режим I_{\min} ; 4 — режим E_{\max} ; 5 — режим Q_0/I^2 ; 6 — режим $Q_0=0$; 7 — режим $Q_{0\max}$; 8 — режим q_{\min} ; 9 — режим $K_{\text{опт}}$; 10 — режим $\Pi_{\text{опт}}$; 11 — режим $A_{\text{опт}}$; 12 — режим $D_{\text{опт}}$; 13 — режим $B_{\text{опт}}$

$A_{\text{опт}}$), а также кривые 1—10 для известных режимов работы при заданной геометрии ветви термоэлемента $l/s = \text{const}$ (l — высота, s — площадь поперечного сечения).

Режим $A_{\text{опт}}$ лежит в области возможных режимов между режимами q_{\min} и $\Pi_{\text{опт}}$ и по сравнению с характерным режимом q_{\min} для $\Theta = 0,5$ обеспечивает уменьшение рабочего тока на 10%, увеличение холодильного коэффициента на 20% при увеличении количества термоэлементов не более чем на 4%. Режим $A_{\text{опт}}$ может быть использован, когда преобладающим требованием является обеспечение минимального количества термоэлементов (минимальная масса ТЭУ) при приемлемом энергопотреблении.

В некоторых случаях проектирования ТЭУ, когда преобладающим требованием является обеспечение энергетической эффективности, близкой к режиму E_{\max} , при одновременном обеспечении большей холодопроизводительности, можно использовать область режимов между E_{\max} и I_{\min} .

Указанные выше требования можно записать в виде критерия

$$D = \left(\frac{Q_0}{W} \frac{Q_0}{I} \right) = \frac{Q_0^2}{I^2 U}. \quad (7)$$

Подставив (2), (3), (4) в (7), получим:

$$D = \frac{1}{4} I_{\max} R \frac{(2B - B^2 - \Theta)^2}{B^2 \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right)}, \quad (8)$$

или

$$\frac{4D}{I_{\max} R} = \frac{(2B - B^2 - \Theta)^2}{B^2 \left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right)}. \quad (9)$$

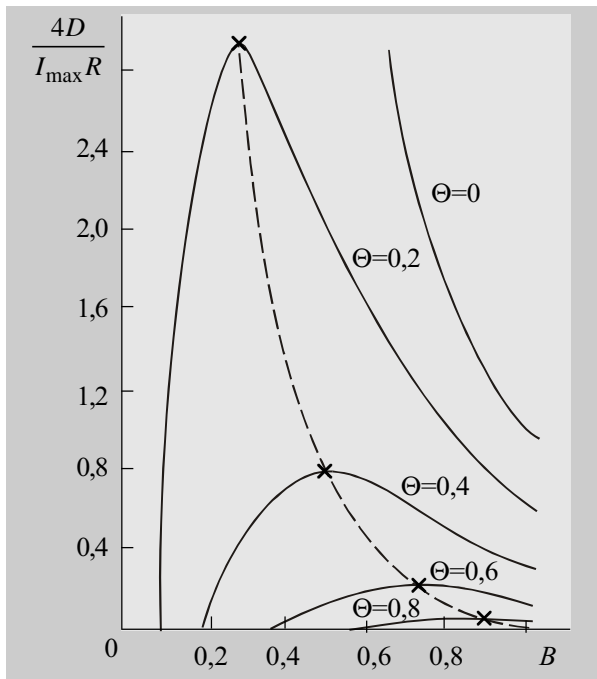


Рис. 3. Зависимость критериального соотношения $4D/(I_{\max}R)$ от относительного рабочего тока при заданных значениях Θ

На рис. 3 представлена зависимость величины $4D/(I_{\max}R)$ от B при заданных Θ . Характерной особенностью кривых является наличие максимума (см. штриховую кривую).

Из условия $\frac{dD}{dB} = 0$ получим соотношение для определения оптимального относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$, соответствующее максимуму величины критериального отношения:

$$B^3 + 2B^2 \left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right) - 3B\Theta - 2\Theta^2 \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} = 0. \quad (10)$$

Режим $D_{\text{опт}}$ (см. рис. 2, кр. 12) лежит в области между режимами E_{\max} и I_{\min} , и по сравнению с характерным режимом E_{\max} для $\Theta=0,5$ здесь при увеличении рабочего тока на 13% количество термоэлементов уменьшается на 18% при уменьшении холодильного коэффициента не более чем на 2,5%. Режим $D_{\text{опт}}$ может быть использован, когда превалирующим требованием является экономичность при приемлемом количестве термоэлементов.

В случае, когда превалирующим требованием является обеспечение минимального тока при максимальной величине рабочего напряжения, можно, кроме конструктивных факторов (геометрии ветви термоэлемента), использовать область токовых режимов охлаждающего термоэлемента, лежащих между характерными E_{\max} и $Q_0=0$.

Эта область режимов при $B < \Theta$ считалась нерациональной, т. к. наряду с уменьшением холодильного коэффициента уменьшается холодопроизводительность, что приводит к росту количества термоэлементов. Однако в некоторых случаях, когда основным из ограничительных факторов является уменьшение величины рабочего тока при повышенном напряжении питания и незначительном увеличении энергозатрат, этот режим является предпочтительным. Тогда ука-

занные выше требования в окончательном виде можно записать в виде критерия

$$B = \frac{Q_0}{I^3}. \quad (11)$$

Подставив (2), (3) в (11), получим:

$$\frac{2I_{\max}}{R} B = \frac{2B - B^2 - \Theta}{B^3}. \quad (12)$$

На рис. 4 представлена зависимость величины $(2I_{\max}/R)B$ от относительного рабочего тока при заданных Θ . Характерной особенностью кривых является наличие максимума (см. штриховую кривую).

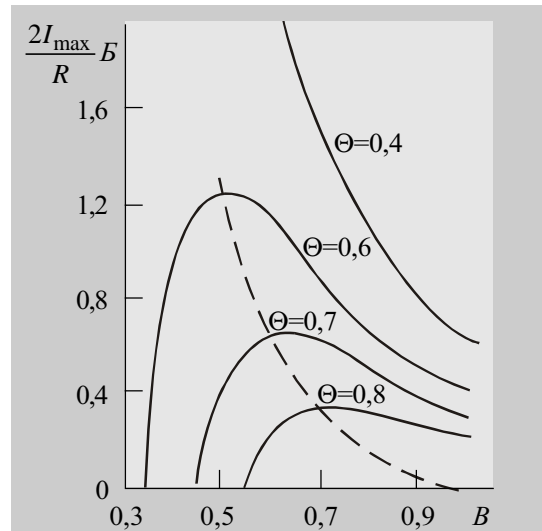


Рис. 4. Зависимость критериального соотношения $(2I_{\max}/R)B$ от относительного рабочего тока при заданных значениях Θ

Из условия $\frac{dB}{dB} = 0$ получим соотношение для определения оптимального относительного рабочего тока $B_{\text{опт}}$, соответствующее максимуму величины критериального соотношения.

$$B = 2 - \sqrt{4 - 3\Theta}. \quad (13)$$

Режим $B_{\text{опт}}$ (см. рис. 2, кр. 13) лежит в области между режимами E_{\max} и $Q_0=0$ и по сравнению с характерным режимом E_{\max} , например, для $\Theta=0,5$ обеспечивает уменьшение рабочего тока на 25%, увеличение напряжения питания на 60% при уменьшении холодильного коэффициента до 15%.

При выборе режима работы охлаждающего термоэлемента необходимо проводить комплексную оценку основных характеристик ТЭУ, таких как холодильный коэффициент E , холодопроизводительность Q_0 и количество пар термоэлементов n .

Удобно представить эти характеристики через относительные величины $E/E_{\max}, Q_0/Q_{0\max}, n/n_{\max}$ в зависимости от относительного перепада температур Θ , что позволяет вести экспрессную сравнительную оценку основных характеристик ТЭУ для различных токовых режимов. (Здесь $n_{\max} = n$ в режиме $B_{\text{опт}}$.)

На рис. 5 представлена зависимость отношения режимов E/E_{\max} от Θ для известных (рис. 2, 1—10) и рассматриваемых (11—13) режимов. Если превалирующим требованием является экономичность ТЭУ,

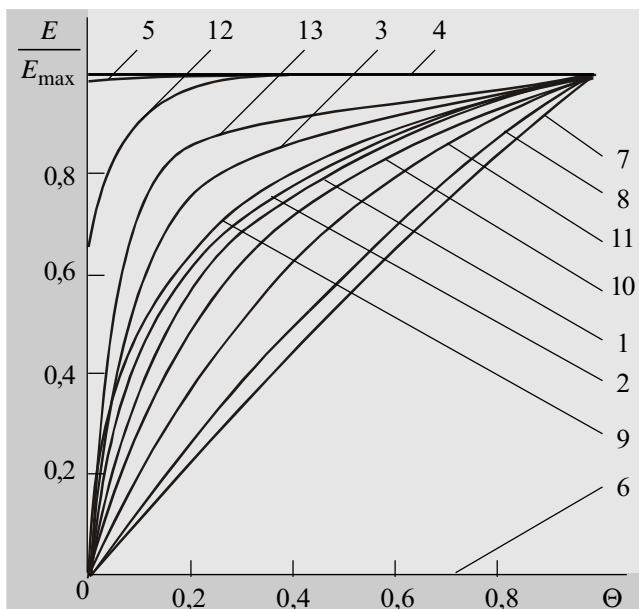


Рис. 5. Зависимость отношения E/E_{\max} от относительного перепада температуры Θ для различных режимов:

1 — U_{\min} (~); 2 — U_{\min} ; 3 — I_{\min} ; 4 — E_{\max} ; 5 — Q_0/I^2 ; 6 — $Q_0=0$; 7 — $Q_{0\max}$; 8 — q_{\min} ; 9 — $K_{\text{опт}}$; 10 — $\Pi_{\text{опт}}$; 11 — $A_{\text{опт}}$; 12 — $D_{\text{опт}}$; 13 — $B_{\text{опт}}$

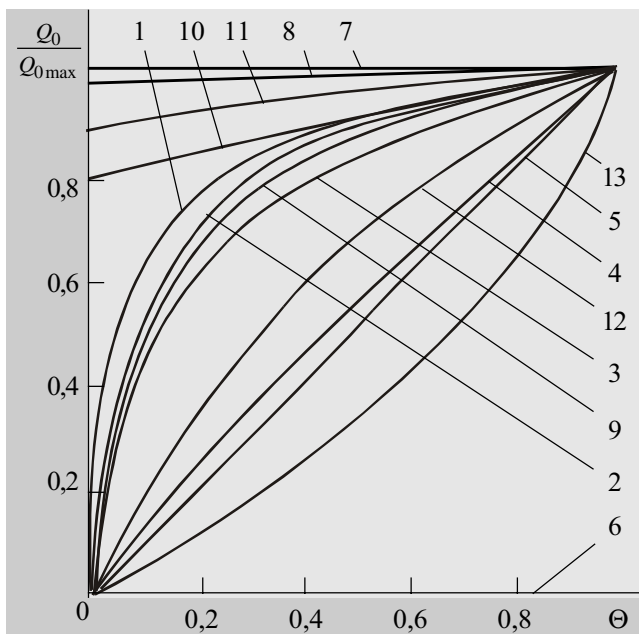


Рис. 6. Зависимость отношения $Q_0/Q_{0\max}$ от Θ для различных режимов (обозначения как в рис. 5)

то необходимо выбирать токовые режимы работы, близкие к режиму E_{\max} (4), например, 5, 12, 13.

На рис. 6 представлена зависимость отношения $Q_0/Q_{0\max}$ от Θ для тех же режимов. В этом случае если превалярующим требованием является обеспечение наибольшей холодопроизводительности ТЭУ, то необходимо выбирать токовые режимы, близкие к режиму $Q_{0\max}$ (7), например, 10, 11, 8.

На рис. 7 для этих же режимов представлена зависимость отношения n/n_{\max} от Θ . Если превалярующим требованием является уменьшение количества термоэлементов в ТЭУ, то необходимо выбирать токовые режимы, близкие к режиму $Q_{0\max}$.

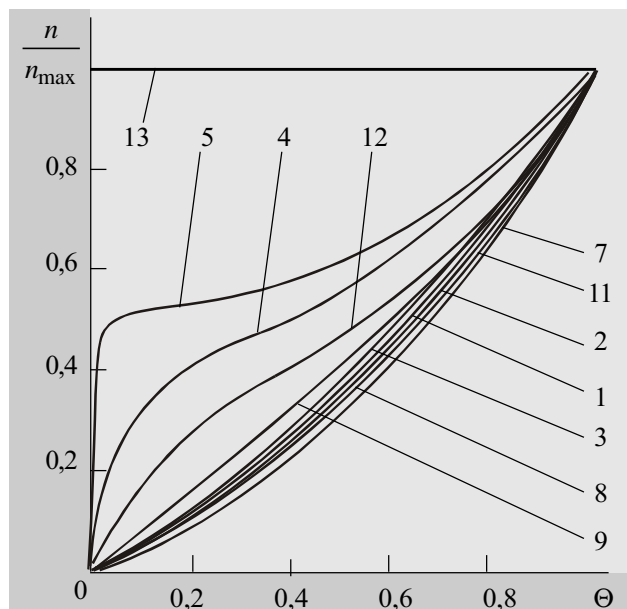


Рис. 7. Зависимость отношения n/n_{\max} от Θ для различных режимов (обозначения как в рис. 5)

Нумерация режимов в соответствии с рис. 2	Условное обозначение режима	Основные характеристики					
		B , отн. ед.	I , А	U , В	E , отн. ед.	W , Вт	n , пар
1	U_{\min} (~) (приближенный)	0,76	1,88	1,65	0,32	3,125	17,6
2	U_{\min}	0,78	1,93	1,66	0,31	3,22	17,2
3	I_{\min}	0,71	1,76	1,67	0,34	2,94	18,7
4	E_{\max}	0,53	1,31	1,97	0,39	2,56	27,8
5	Q_0/I^2	0,50	1,24	2,10	0,38	2,63	31,1
6	$Q_0=0$	0,29	0,72	—	—	—	—
7	$Q_{0\max}$	1,00	2,47	1,85	0,22	4,54	15,5
8	q_{\min}	0,96	2,38	1,79	0,23	4,35	15,6
9	$K_{\text{опт}}$	0,73	1,81	1,68	0,33	3,00	18,2
10	$\Pi_{\text{опт}}$	0,77	1,91	1,665	0,315	3,17	17,4
11	$A_{\text{опт}}$	0,86	2,13	1,70	0,28	3,57	16,2
12	$D_{\text{опт}}$	0,60	1,48	1,78	0,38	2,63	22,8
13	$B_{\text{опт}}$	0,40	1,00	3,18	0,33	3,125	55,6

Для наглядности сравнительного анализа технических характеристик ТЭУ приведем данные расчета для различных токовых режимов при следующих исходных данных:

- требуемая холодопроизводительность $Q_0=1,0$ Вт;
- температура теплопоглощающего спая $T_0=260$ К;
- температура тепловыделяющего спая $T=300$ К.

При этом $\Delta T_{\max}=80$ К; $\Theta=0,5$; $\Delta T_{\max}/T_0=0,3$; $l/s=20$; $I_{\max}=2,47$ А; $R=2,1 \cdot 10^{-2}$ Ом; $e=2 \cdot 10^{-4}$ В/К; электропроводность ветви термоэлемента 950 См/см.

Данные расчетов сведены в таблицу.

Таким образом, многофакторный критериальный подход к определению режимов работы охлаждающего термоэлемента является методом поиска промышленных режимов и обеспечивает возможность рационального проектирования термоэлектрических охлаждающих устройств.

Приведенные соотношения позволяют при заданном относительном перепаде температур Θ определить величину относительного рабочего тока V для режимов с различными превалирующими критериями и тем самым оценить основные технические характеристики ТЭУ для соответствующих режимов.

Рекомендации по определению рациональной области использования различных режимов работы ТЭУ позволяют вести оптимизированное проектирование ТЭУ для охлаждения РЭА.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Стилбанс Л. С. Полупроводниковые термоэлектродоильники.— Л.: Изд-во АН СССР, 1957.
2. Покорный Е. Г., Щербина А. Г. Расчет полупроводниковых охлаждающих устройств — Л.: Наука, 1969.

3. Каганов М. А., Привин М. Р. Термоэлектрические тепловые насосы.— Л.: Энергия, 1970.
4. Сомкин М. Н., Зайков В. П., Вайнер А. Л. Возможности единого подхода к режимам работы охлаждающего термоэлемента // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО.— 1984.— Вып. 1.— С. 95—106.
5. Зайков В. П., Дейнега В. Т., Коноплев И. Д., Водолагин В. Ю. Режим работы термоэлектрического устройства, обеспечивающий минимальное остаточное газовыделение // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОВР (ТРТО).— 1989.— Вып. 4.— С. 91—95.
6. Зайков В. П., Киншова Л. А. Комплексный подход при выборе режима работы термоэлектрического охлаждающего устройства // Тепловые режимы и охлаждение РЭА (ТРИО).— 1999.— Вып. 1.— С. 47—49.
7. Зайков В. П., Ефремов В. И. Критериальный подход к выбору режима работы термоэлектрического устройства для систем термостабилизации // Там же.— 2001.— Вып. 1.— С. 47—50.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

**Третья ежегодная выставка
оборудования и технологий
для АСУ ТП и встраиваемых систем**



- ✓ Промышленные компьютеры и системы, измерительные приборы
- ✓ Электронные компоненты для жестких условий эксплуатации
- ✓ Оборудование для промышленных сетей, Web-технологий в АСУ ТП
- ✓ SCADA-системы и системы реального времени
- ✓ Услуги по системной интеграции в области АСУ ТП
- ✓ Оборудование для встраиваемых и бортовых систем сбора данных и управления

9–11 декабря 2003 г.

Центр международной торговли

Москва, Краснопресненская набережная, 12. Метро «Улица 1905 года».

Телефон: (095) 234–2210
Факс: (095) 234-2226
E-mail: info@pta-expo.ru
www.pta-expo.ru

Во время работы выставки состоится
Всероссийская конференция
по АСУ ТП и встраиваемым системам

в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Исследование кинетики десорбционной очистки поверхности кремниевых пластин в перекисно-аммиачных растворах. *Ю. Г. Полтавцев, П. Т. Вирченко, В. В. Костюк* (Украина, г. Киев)
- Коррекция "силового" размещения компонентов. *П. И. Дмитриев, С. В. Зудин, М. С. Лузин, О. Б. Полубасов* (Россия, г. Санкт-Петербург)
- Портативный плазменно-ионизационный газоанализатор. *В. Ф. Рыжков* (Украина, г. Киев)
- Получение электрокоммутационных слоев керамических теплопереходов методом детонационного напыления. *А. А. Ащеулов, А. Х. Дунаенко, В. И. Пундик, И. С. Романюк, В. Д. Фотий* (Украина, г. Черновцы)
- Конструкторская реализация непроволочных переменных резисторов с заданными функциональными свойствами. *В. М. Николаенко, А. В. Задерейко, О. В. Николаенко* (Украина, г. Одесса)
- Выбор цифровой камеры для оптического микроскопа. *В. Н. Боровицкий* (Украина, г. Киев)
- Радиофизические аспекты генерирующих структур с элементами микромеханики. *В. И. Юрченко, С. Д. Воторотин* (Россия, г. Томск)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции