

*Розглянуті методи підвищення надійності одно- та багатокаскадних термоелектричних охолоджуючих пристроїв. Проаналізовано вплив геометрії гілки охолоджуючого термоелементу на показники надійності. Показана можливість вибору оптимальних струмових режимів роботи охолоджуючого термоелементу для різних умов функціонування. Визначені можливості параметричного методу при використанні різних варіантів сполучень первинних термоелектричних матеріалів при однакової та різної їх ефективності*

*Ключеві слова: надійність, термоелектричні пристрої, ефективність, температура, інтенсивність відмов*

*Рассмотрены методы повышения надежности одно- и многокаскадных термоэлектрических охлаждающих устройств. Проанализировано влияние геометрии ветви охлаждающего термоэлемента на показатели надежности. Показана возможность выбора оптимальных токовых режимов работы охлаждающего термоэлемента для различных условий функционирования. Определены возможности параметрического метода при использовании различных вариантов сочетаний исходных термоэлектрических материалов при одинаковой и различной их эффективности*

*Ключевые слова: надежность, термоэлектрические устройства, эффективность, температура, интенсивность отказов*

# АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

**В. П. Зайков**

Кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник, начальник сектора  
Научно-исследовательский институт ШТОРМ  
ул. Терешковой, 27, г. Одесса, Украина, 65076  
E-mail: gradan@i.ua

**В. И. Мещеряков**

Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой  
E-mail: gradan@ua.fm

**Ю. И. Журавлев**

Аспирант  
E-mail: zhuravlov.y@ya.ru  
\*Кафедра информатики  
Одесский государственный  
экологический университет  
ул. Львовская, 15, г. Одесса, Украина, 65016

## 1. Введение

В настоящее время термоэлектрический способ охлаждения широко применяется в различных отраслях современной техники. Область его использования распространяется на радиоэлектронику, квантовую оптику, СВЧ-технику, автономные и возобновляемые источники энергии, измерительную технику, метрологию, медицинскую аппаратуру, устройства кондиционирования и многочисленные приборы бытовой техники.

Основное его преимущество перед другими способами охлаждения заключается в высокой надежности, малых габаритных размерах, простоте управления и быстродействии. Эти преимущества по своей сути являются следствием твердотельной природы таких охладителей, т. е. отсутствия движущихся частей, перекачиваемых жидкостей или газов.

Вместе с тем, ужесточение требований к условиям эксплуатации термоэлектрических охладителей в критических системах (тепловой нагрузки, работе в широком диапазоне температур, уменьшение массогабаритных показателей для бортовой аппаратуры) приводит к ухудшению показателей надежности изделий.

Создание надежных систем из компонентов с конечной надежностью является фундаментальной проблемой проектирования [1] и подходы, направленные на решение этой задачи, в частности повышение показателей надежности термоэлектрических устройств обеспечения тепловых режимов теплонагруженной радиоэлектронной аппаратуры [2], являются актуальными.

## 2. Анализ литературных источников и постановка проблемы

Оценке надежности термоэлектрических охладителей всегда уделялось серьезное внимание [3], как и технологии изготовления [4], защите от механических [5] и климатических воздействий [6] окружающей среды, влияния температуры [7] и нагрузки [8], так и прогнозу показателей надежности на стадии проектирования [9].

К числу основных методов повышения показателей надежности [10] при проектировании ТЭУ относятся: конструктивный, параметрический, структурный и совмещенный (комбинированный).

Конструктивный метод заключается [7]:

- 1) в выборе геометрии ветвей термоэлемента;
- 2) в выборе и определении режима работы охлаждаемого термоэлемента при заданной геометрии ветвей термоэлемента, обеспечивающих заданные условия функционирования с учетом ограничительных требований, т. е. необходимо выбрать такую конструкцию ТЭУ, которая удовлетворяла бы требованиям по габаритам, массе, энергопотреблению, величина рабочего тока, показателям надежности и т. д.

Параметрический метод заключается в улучшении качества исходных термоэлектрических материалов [11–13], и в первую очередь повышении эффективности [14, 15], а также в применении различных вариантов сочетаний параметров исходных материалов, а именно, коэффициента термоЭДС  $\bar{\epsilon}$  и электропроводности  $\bar{\sigma}$  [16].

Структурный метод или метод резервирования [10] основан на принципе избыточности и заключается в том, что в системе наряду с основными элементами и устройствами (ТЭУ) предусмотрены такие же резервные элементы и устройства, которые не являются функционально необходимыми, а предназначены для замены соответствующих основных элементов и устройств в случае их отказа.

Совмещенный (комбинированный) метод заключается в использовании суммарного эффекта, создаваемого воздействием двух или нескольких процессов на рассматриваемый объект. Этот суммарный эффект соответствует принципу суперпозиции в случае, если интегральный эффект соответствует суммарному результату воздействия каждого процесса в отдельности.

При построении ТЭУ повышенной надежности можно воспользоваться одновременно конструктивным и параметрическим методами, совместив их в одном процессе проектирования. Такое совмещение позволит дополнительно улучшить показатели надежности устройства в целом, т. е. уменьшить интенсивность отказов  $\lambda$  и увеличить вероятность безотказной работы  $P$ .

Применение комбинированного метода для процесса проектирования, т. е. совмещение конструктивного, параметрического и структурного методов, может найти широкое использование при построении ТЭУ повышенной надежности, что способствует решению фундаментальной проблемы повышения надежности современных критических систем.

При этом в рамках принятой модели появляется возможность обозначить подходы и методы для решения практических задач по обеспечению заданного уровня надежности при построении ТЭУ и наметить пути его повышения.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью работы является повышение показателей надежности термоэлектрических устройств путем разработки и анализа надежно-ориентированных моделей, связывающих конструктивные и параметрические методы, использующие различные варианты сочетаний параметров исходных термоэлектрических материалов с показателями надежности ТЭУ.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- анализ влияния геометрии ветвей термоэлемента на показатели надежности изделия;

- анализ влияния режимов эксплуатации термоэлектрического устройства на показатели надежности;
- исследование влияния эффективности термоэлектрических материалов и их сочетаний на показатели надежности ТЭУ.

### 4. Анализ методов повышения надежности термоэлектрических охлаждающих устройств

При проектировании термоэлектрических охлаждающих устройств обычно задаются:

- тепловая нагрузка на объект охлаждения (требуемая холодопроизводительность)  $Q_0$ , Вт;
- температура теплопоглощающего спая  $T_0$ , К (в зависимости от уровня охлаждения могут использоваться как одно, так и многокаскадные устройства);
- температура тепловыделяющего спая  $T_1$ , К (либо температура среды  $T_c$ , К с учетом условий теплообмена со средой и теплоотводящей способности радиатора).

Необходимо выбрать такую конструкцию ТЭУ, определить токовый режим работы, который удовлетворял бы требованиям по габаритам и массе, энергопотреблению, величине рабочего тока, показателям надежности и т. д.

#### 4. 1. Влияние геометрии ветви охлаждающего термоэлемента на надежность

При построении ТЭУ повышенной надежности существует несколько подходов для решения этой задачи.

Задана геометрия ветви термоэлемента  $l/S = \text{Const}$ , где  $l$  – высота ветви термоэлемента, мм и  $S$  – площадь поперечного сечения ветви термоэлемента, мм<sup>2</sup>. Варьируя величиной рабочего тока, можно обеспечить работу ТЭУ в различных режимах от  $Q_{0\text{max}}$  до  $\lambda_{\text{min}}$  и повысить надежность.

В термоэлектрическом приборостроении часто используются унифицированные модули с различной геометрией ветвей термоэлементов  $l/S = \text{Var}$ , и перед разработчиком возникает вопрос о выборе геометрии ветвей термоэлементов в ТЭУ для обеспечения различных условий функционирования и требований по надежности.

Анализ расчетных данных показал, что с уменьшением отношения  $l/S$  охлаждающего термоэлемента интенсивность отказов  $\lambda$  уменьшается для любого режима работы и перепада температуры  $\Delta T$  (рис. 1).

При уменьшении отношения  $l/S$  охлаждающего термоэлемента увеличивается термоэлектрическая мощность охлаждения  $\gamma$ , а, следовательно, и холодопроизводительность  $Q_0$ , что позволяет уменьшить количество термоэлементов  $n$  для обеспечения заданной величины тепловой нагрузки при заданном перепаде температуры  $\Delta T$ . Уменьшение количества термоэлементов  $n$  в ТЭУ приводит к уменьшению интенсивности отказов  $\lambda$  и, как следствие, к увеличению вероятности безотказной работы  $P$ .

Величина рабочего тока  $I$  зависит от отношения  $l/S$ . С уменьшением отношения  $l/S$  величина рабочего тока  $I$  возрастает.

Так, например, для режима  $\lambda_{\text{min}}$ : при  $\Delta T = 40$  К,  $Q_0 = 2,0$  Вт, уменьшение отношения  $l/S$  от  $l/S = 20$  до  $l/S = 10$  позволяет снизить интенсивность отказов  $\lambda$  на 50 %, а, следовательно, увеличить вероятность без-

отказной работы Р. При этом величина рабочего тока увеличивается в 2 раза от  $I=1,0$  А до  $I=2,0$  А при неизменном холодильном коэффициенте. Количество термоэлементов в ТЭУ уменьшается в 2 раза.

Поэтому целесообразно при построении ТЭУ следует ограничить величину рабочего тока  $I < 10$  А, что позволит уменьшить габариты и массу вспомогательных устройств (источник питания постоянного тока и т. п.).

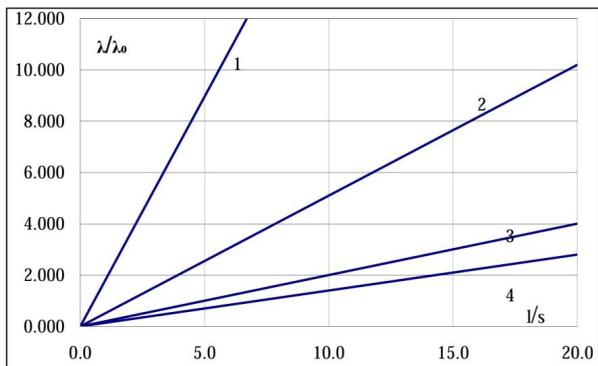


Рис. 1. Зависимость относительной величины интенсивности отказов  $\lambda/\lambda_0$  однокаскадного ТЭУ от отношения  $1/S$  для различных режимов работы при  $T=300$  К;  $\Delta T=40$  К;  $Q_0=2,0$  Вт. 1 – режим  $Q_{0max}$ ; 2 – режим  $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{max}$ ; 3 – режим  $\left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{max}$ ; 4 – режим  $\lambda_{min}$

#### 4. 2. Выбор оптимальных токовых режимов работы охлаждающего термоэлемента для различных условий функционирования

В литературе по термоэлектрическому охлаждению [7] описаны характерные режимы работы охлаждающего термоэлемента:  $Q_{0max}$ ,  $E_{max}$ ,  $Q_0=0$ .

Проектирование ТЭУ в режиме  $Q_{0max}$  (режим максимальной холодопроизводительности), хотя и обеспечивает минимальное количество термоэлементов  $n$  при заданном  $1/S$ , однако его использование связано с большими энергозатратами. Это приводит к возрастанию тепловых потоков на тепловыделяющих спаях ТЭУ, росту площади теплоотводящей поверхности радиатора, т. е. увеличению габаритов и массы устройства в целом, росту величины рабочего тока  $I$ , уменьшению холодильного коэффициента  $E$  и росту интенсивности отказов  $\lambda$ .

Проектирование ТЭУ в режиме  $E_{max}$  (максимального холодильного коэффициента) позволяет свести энергозатраты к минимуму, однако приводит к росту количества термоэлементов  $n$  и, следовательно, увеличению интенсивности отказов  $\lambda$ .

Следует отметить, что при токе режима тепловой изоляции  $Q_0=0$  достигается только необходимый перепад температуры  $\Delta T$ , что заметно сужает область его рационального использования.

Проектирование ТЭУ в режиме  $\lambda_{min}$  [7] позволяет обеспечить минимальную величину интенсивности отказов  $\lambda$ , но, в то же время, приводит к увеличению количества термоэлементов  $n$ , т. е. массы и стоимости ТЭУ, а также к незначительному росту энергозатрат.

Данная противоречивость указывает на то, что существуют промежуточные, компромиссные режимы работы охлаждающего термоэлемента, отличные от характерных. В этих режимах возможно учитывать

взаимное влияние и весомость каждого из ограничительных факторов.

В этом случае появляется необходимость применения критериального подхода. Критерий выбора режима работы ТЭУ может быть как одно-, так и многофакторным, так как условия проектирования могут быть весьма разнообразными, варьируя одновременно несколькими ограничительными факторами ( $Q_0$ ,  $W$ ,  $U$ ,  $I$ ,  $\lambda$  и др.) можно выбрать компромиссные режимы работы [16]. Кроме того, многофакторный критериальный подход к определению режимов работы охлаждающего термоэлемента является методом поиска компромиссных режимов и обеспечивает возможность рационального проектирования ТЭУ.

#### 4. 3. Влияние эффективности исходных материалов на показатели надежности ТЭУ

Одним из возможных направлений параметрического метода повышения надежности ТЭУ является улучшение качества исходных термоэлектрических материалов и в первую очередь их эффективности.

Современные возможные усредненные значения термоэлектрической эффективности  $Z_M$  исходных материалов в модуле при  $T=300$  К составляют:

$Z_M = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$ ;  $\Delta T_{max} = 65$  К – для условий серийного производства;

$Z_M = 2.6 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$ ;  $\Delta T_{max} = 68$  К – для лабораторных условий;

$Z_M = 2.75 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$ ;  $\Delta T_{max} = 72$  К – максимальное значение.

В работе [16] рассмотрено влияние термоэлектрической эффективности исходных материалов в ТЭУ на показатели надежности для различных перепадов температуры  $\Delta T$  и условий функционирования. С ростом термоэлектрической эффективности  $Z_M$  исходных материалов увеличивается максимальный перепад температуры  $\Delta T_{max}$ , а, следовательно, уменьшается относительный перепад температуры  $\Theta$ , увеличивается величина холодопроизводительности на один термоэлемент, что позволяет уменьшить количество термоэлементов  $n$ . Все это приводит к уменьшению интенсивности отказов  $\lambda$  и увеличению вероятности безотказной работы Р.

На рис. 2 представлена зависимость величины  $K = \frac{\Delta\lambda/\lambda}{\Delta Z/Z}$  от общего перепада температуры  $\Delta T$  однокаскадного ТЭУ для режимов  $Q_{0max}$  – 1 и  $\lambda_{min}$  – 2 при  $T=300$  К,  $1/S=10$ . Область между характерными режимами  $Q_{0max}$  и  $\lambda_{min}$  являются зоной расположения промежуточных режимов.

Увеличение термоэлектрической эффективности исходных материалов в модуле на один процент позволяет уменьшить интенсивность отказов в режиме  $Q_{0max}$ : при  $\Delta T=40$  К на 2,6 %; при  $\Delta T=50$  К на 2,9 %; при  $\Delta T=60$  К на 4,3 %; в режиме  $\lambda_{min}$ : при  $\Delta T=40$  К на 4,2 %; при  $\Delta T=50$  К на 4,3 %, при  $\Delta T=60$  К на 5,0 %.

На рис. 3 представлена зависимость величины  $K = \frac{\Delta\lambda/\lambda}{\Delta Z/Z}$  от общего перепада температуры  $\Delta T$  двухкаскадного ТЭУ для различных режимов работы при  $T=300$  К;  $1/S=10$ ;  $Q_0=2,0$  Вт [16]. Область между характерными режимами  $Q_{0max}$  и  $\lambda_{min}$  является зоной расположения промежуточных режимов.

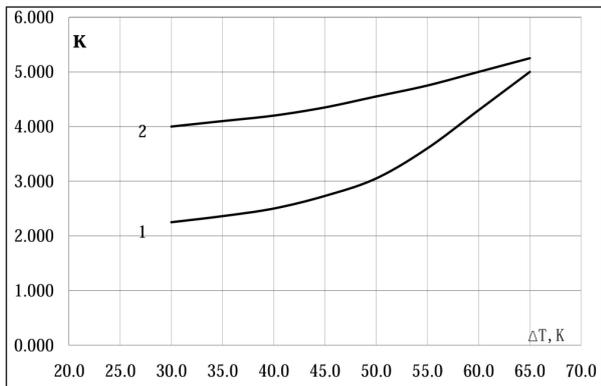


Рис. 2. Зависимость величины  $K = \frac{\Delta\lambda/\lambda}{\Delta Z/Z}$  от общего перепада температуры  $\Delta T$  для режимов  $Q_{0max}$  – 1 и  $\lambda_{min}$  – 2 при  $T=300$  К;  $Q_0=2,0$  Вт;  $1/S=10$

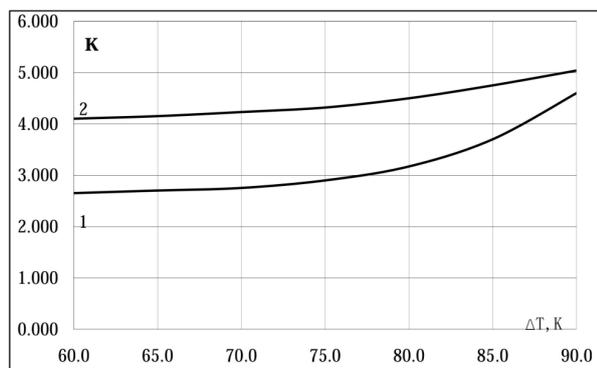


Рис. 3. Зависимость величины  $K = \frac{\Delta\lambda/\lambda}{\Delta Z/Z}$  от общего перепада температуры  $\Delta T$  двухкаскадного ТЭУ для режимов  $Q_{0max}$  – 1 и  $\lambda_{min}$  – 2 при  $T=300$  К;  $Q_0=2,0$  Вт;  $1/S=10$

Рост термоэлектрической эффективности исходных материалов в двухкаскадном ТЭУ на один процент позволяет уменьшить эффективность отказов:

- в режиме  $Q_{0max}$ : при  $T=60$  К на 2,7 %; при  $\Delta T=70$  К на 2,7 %; при  $\Delta T=80$  К на 3,2 %; при  $\Delta T=90$  К на 4,5 %;
- в режиме  $\lambda_{min}$ : при  $\Delta T=60$  К на 4,1 %; при  $\Delta T=70$  К на 4,3 %; при  $\Delta T=80$  К на 4,5 %; при  $\Delta T=90$  К на 5,2 %.

При этом в каждом каскаде используются термоэлектрические материалы с одной и той же эффективностью. Величина  $K$  не зависит от величины тепловой нагрузки  $Q_0$ , т. е. относительные изменения величины интенсивности отказов  $\Delta\lambda/\lambda$  на один процент роста эффективности остается неизменной величиной для различных значений тепловой нагрузки  $Q_0$  при заданном перепаде температуры  $\Delta T$ .

#### 4. 4. Влияние различных сочетаний исходных материалов на показатели надежности однокаскадного ТЭУ

Повышение надежности ТЭУ неразрывно связано с повышением качества исходных термоэлектрических материалов и, в первую очередь, их эффективностью. Как показала мировая практика, существенно по-

высить уровень эффективности термоэлектрических материалов в настоящее время не представляется возможным.

В то же время, для одной и той же эффективности исходных материалов можно выбрать такие варианты сочетаний усредненных параметров, а именно: коэффициента термоЭДС  $\bar{e}$  и электропроводности  $\bar{\sigma}$ , которые позволяют повысить показатели надежности [16].

Рассмотрим возможные (полученные экспериментально) варианты сочетания параметров исходных термоэлектрических материалов в модуле при  $T=300$  К;  $Z_M=2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К;  $1/S=10$ ;  $\Delta T=0$ , приведенные в табл. 1 с целью возможного их использования для построения ТЭУ повышенной надежности.

Таблица 1

Варианты сочетаний исходных термоэлектрических материалов

Номер варианта сочетания	$\bar{e}$ , мкВ/К	$\bar{\sigma}$ , См/см	$\kappa \cdot 10^3$ , Вт/см·К	$\bar{e}^2 \bar{\sigma} \cdot 10^4$ , Вт/К <sup>2</sup> ·см	$\gamma = \bar{e}^2 \bar{\sigma} T_0^2 S / I$ , Вт
1	250	550	14,3	0,344	0,310
2	210	800	14,7	0,353	0,318
3	200	900	15,0	0,360	0,325
4	180	1200	16,2	0,390	0,351
5	165	1500	17,0	0,410	0,370

Использование в качестве основных значимых параметров термоэлектрических материалов  $\bar{e}$  и  $\bar{\sigma}$  дает достаточно полную информацию об охлаждающих возможностях, собранных на их основе модулей. Предложена и рассмотрена модель взаимосвязи основных характеристик ТЭУ и показателей надежности с параметрами исходного материала  $\bar{e}$  и  $\bar{\sigma}$  и температурой термопоглощающего спая  $T_0$ .

Рассмотрим данные расчетов основных параметров однокаскадного ТЭУ и показателей надежности для различных режимов работы

$Q_{0max}$ ;  $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{max}$ ;  $\left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{max}$ ;  $\lambda_{min}$  при следующих исходных данных:

- тепловая нагрузка  $Q_0=2,0$  Вт;
- температура тепловыделяющего спая  $T=300$  К;
- перепад температур  $\Delta T=0$  К; 20 К; 40 К; 60 К;
- усредненная термоэлектрическая эффективность  $Z_M=2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К;  $1/S=10$ ;  $\lambda_0=3 \cdot 10^{-8}$  1/час и собранных из различных исходных материалов (варианты сочетаний параметров (1)–(5) в соответствии с таблицей).

Анализ результатов расчетов показал возможность уменьшения интенсивности отказов  $\lambda$  для сочетания (5) по сравнению с традиционным (3) на 10–11 % и до 15 % по сравнению с вариантом (1) при одной и той же эффективности исходных материалов в заданном интервале температур при заданном  $1/S$  (рис. 4, 5). Использование вариантов сочетаний (1), (2) нецелесообразно, так как при этом увеличивается интенсивность отказов  $\lambda$  и уменьшается вероятность безотказной работы  $P$ .

Полученные соотношения и данные расчетов позволяют выбрать вариант сочетаний параметров исходного материала с повышенной электропроводностью для увеличения холодопроизводительности на один термоэлемент, либо сокращения количества термоэлементов, уменьшения интенсивности отказов и

увеличения вероятности безотказной работы. Экономическая целесообразность использования исходных материалов с повышенной электропроводностью при построении ТЭУ заключается не только в повышении показателей надежности, но и в значительном снижении стоимости ТЭУ.

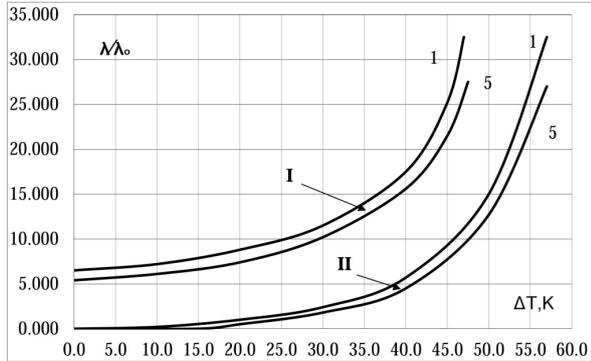


Рис. 4. Зависимость относительной величины интенсивности отказов  $\lambda/\lambda_0$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  для режимов работы I – режим  $Q_{0max}$  и II – режим  $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{max}$  для различных вариантов сочетаний параметров (1–5) при  $T=300$  К;  $Z_M=2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К;  $Q_0=2,0$  Вт;  $1/S=10$

Проведен сравнительный анализ основных параметров и показателей надежности однокаскадного ТЭУ для различных вариантов сочетаний параметров исходных материалов (1)–(5) в зависимости от  $\gamma$  [10].

Для определения количества термоэлементов  $n$  в ТЭУ можно воспользоваться известным выражением для холодопроизводительности. Если принять условие постоянства тепловой нагрузки  $Q_0=Const$ , а так же, что перепады температур одинаковы  $\Theta=Const$  и режимы работы  $B=Const$ , тогда получим:

$$n_i \gamma_i = Const, \tag{1}$$

т. е. величина  $n_i \gamma_i = Const$  неизменна для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1)–(5) при одном и том же режиме работы и перепаде температуры  $\Delta T$  для заданной величины холодопроизводительности  $Q_0$ , геометрии ветвей термоэлементов  $1/S$  в ТЭУ.

Таким образом, определив величину  $n_3 \gamma_3$  для традиционного варианта сочетания параметров исходного материала можно определить количество термоэлементов для любого варианта сочетания параметров  $\gamma_i$ .

Мощность потребления:

$$W_i = W_3 = Const \tag{2}$$

величина постоянная для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1)–(5) при одном и том же режиме работы  $B$  и перепаде температур  $\Delta T$ .

Легко показать, что при одинаковой тепловой нагрузке  $Q_{01} = Q_{03} = Q_0$

$$E_1 = E_3 = Const, \tag{3}$$

т. е. холодильный коэффициент  $E$  есть величина постоянная для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1)–(5) при одном и том же режиме работы и перепаде температур  $\Delta T$ .

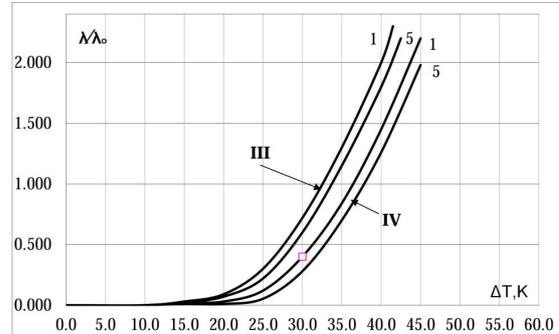


Рис. 5. Зависимость относительной величины интенсивности отказов  $\lambda/\lambda_0$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  для режимов работы III – режим  $\left(\frac{Q_0}{I^2}\right)$  и IV – режим  $\lambda_{min}$  для различных вариантов сочетаний параметров (1–5) при  $T=300$  К;  $Z_M=2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К;  $Q_0=2,0$  Вт;  $1/S=10$

Рассмотрим функциональную зависимость отношений интенсивности отказов различных вариантов сочетаний параметров исходных материалов к интенсивности отказов традиционного сочетания (3)  $\lambda_i/\lambda_3$ , широко используемого для изготовления модулей, от перепада температуры  $\Delta T$ .

Можно записать:

$$\lambda_i \gamma_i = \lambda_3 \gamma_3 = Const. \tag{4}$$

Таким образом, произведение интенсивности отказов  $\lambda$  на максимальную термоэлектрическую мощность охлаждения  $\gamma$  является постоянной величиной для любого варианта сочетаний параметров исходного материала, любого режима работы и перепада температуры. По результатам сравнительного анализа основных параметров и показателей надежности ( $n, \gamma, \lambda$ ) получены простые аналитические зависимости, позволяющие определить ряд закономерностей при построении однокаскадных ТЭУ повышенной надежности.

На рис. 6 представлена зависимость относительной величины интенсивности отказов  $\frac{\lambda_3 - \lambda_5}{\lambda_3} \%$  от варианта сочетания параметров исходного материала (1)–(5) для различных перепадов температуры  $\Delta T$  и режима работы.

Внутренняя область, ограниченная кривыми  $\Delta T=0$  К и  $\Delta T=60$  К (рис. 6) дает возможность уменьшения интенсивности отказов для вариантов сочетаний (4), (5) по сравнению с традиционным (3) для любого режима и перепада температуры внутри диапазона.

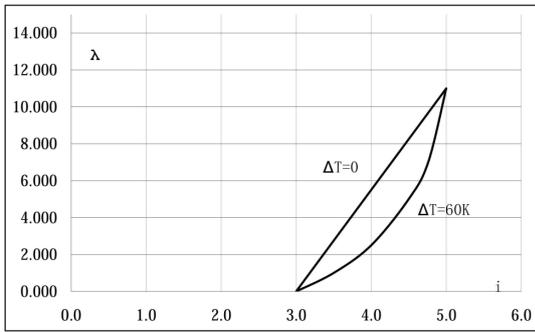


Рис. 6. Зависимость относительной величины  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\%$  однокаскадного ТЭУ от варианта сочетания исходного материала  $i=4-5$  при  $T=300\text{ К}$ ;  $Q_0=2,0\text{ Вт}$ ;  $1/S=10$  для различных перепадов температуры  $\Delta T$  и режимов работы

**4. 5. Повышение надежности двухкаскадных ТЭУ за счет использования различных сочетаний параметров исходных материалов**

Рассмотрим возможности построения двухкаскадных ТЭУ повышенной надежности при использовании одних и тех же вариантов сочетаний параметров исходных материалов (1)–(5) в каскадах при последовательном электрическом соединении каскадов для перепадов температуры от  $\Delta T=60\text{ К}$  до  $\Delta T=90\text{ К}$  и режимов работы от  $Q_{0\text{max}}$  до  $\lambda_{\text{min}}$ .

С ростом перепада температуры  $\Delta T$  суммарная интенсивность отказов  $\lambda_{\Sigma}$  увеличивается для любого режима работы и для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1)–(5) (рис. 7).

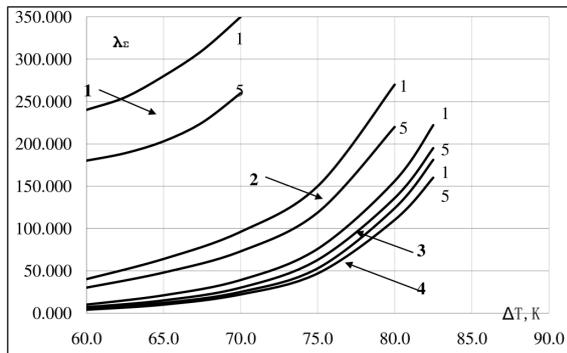


Рис. 7. Зависимость суммарной интенсивности отказов  $\lambda_{\Sigma} \cdot 10^8$ , 1/час двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры  $\Delta T$  для различных режимов работы (1–4) и вариантов сочетаний параметров материалов (1–5) при

$$\Delta T=300\text{ К}; Q_0=2,0\text{ Вт}; 1/S=10. 1 - Q_{0\text{max}}; 2 - \left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\text{max}}; 3 - \left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{\text{max}}; 4 - \lambda_{\text{min}}$$

При заданном перепаде температуры  $\Delta T$  суммарная интенсивность отказов  $\lambda_{\Sigma}$  уменьшается от варианта (1) до (5) (рис. 7):

– в режиме  $Q_{0\text{max}}$  – уменьшается суммарная интенсивность отказов  $\lambda_{\Sigma}$  вариант (5) по сравнению с (3) на 15 %;

– в режиме  $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\text{max}}$  – уменьшается суммарная ин-

тенсивность отказов  $\lambda_{\Sigma}$  вариант (5) по сравнению с (3) на 13 %;

– в режиме  $\left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{\text{max}}$  – уменьшается суммарная ин-

тенсивность отказов  $\lambda_{\Sigma}$ ;

– вариант (5) по сравнению с (3) в среднем на 12 %;

– в режиме  $\lambda_{\text{min}}$  – уменьшается суммарная интенсивность отказов  $\lambda_{\Sigma}$  вариант (5) по сравнению с (3) в среднем на 11 %.

Использование вариантов сочетаний (1), (2) по сравнению с (3) является нерациональным, так как при этом увеличивается интенсивность отказов  $\lambda_{\Sigma}$ .

Проведен сравнительный анализ основных параметров и показателей надежности двухкаскадных ТЭУ при использовании различных вариантов сочетаний параметров исходных материалов для перепадов температуры от  $\Delta T=60\text{ К}$  до  $\Delta T=90\text{ К}$  и режимов работы от  $Q_{0\text{max}}$  до  $\lambda_{\text{min}}$  [16].

При условии равенства тепловой нагрузки  $Q_{0i}=Q_{03}=Q_0$ , одинакового режима работы  $V_{1i}=V_{13}=V_1$  и относительного перепада температуры  $\Theta_{1i}=\Theta_{13}=\Theta_1$ :

$$n_{1i}\gamma_{1i} = n_{13}\gamma_{13} = \text{Const}; \tag{5}$$

– получено соотношение (5), позволяющее определить количество термоэлементов в первом каскаде ТЭУ для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1)–(5) по сравнению с традиционным (3);

– получено соотношение для определения количества термоэлементов в смежных каскадах  $\frac{n_2}{n_1}$  для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1)–(5) при условии:  $V_{1i}=V_{13}=V_1$ ;  $\Theta_{1i}=\Theta_{13}=\Theta_1$ ;  $V_{21}=V_{23}=V_2$ ;  $\Theta_{21}=\Theta_{23}=\Theta_2$

$$\left(\frac{n_2}{n_1}\right)_i = \frac{\gamma_{1i}\gamma_{23}}{\gamma_{2i}\gamma_{13}}; \tag{6}$$

– получено соотношение для определения интенсивности отказов  $\lambda_1/\lambda_0$  первого каскада КТЭУ для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1)–(5)

$$\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)_i = \frac{n_{1i}}{n_{13}}; \text{ либо } \frac{\lambda_{1i}}{\lambda_{13}} = \frac{n_{1i}}{n_{13}}; \tag{7}$$

используя соотношение (1) получим

$$\frac{\lambda_{1i}}{\lambda_{13}} = \frac{\gamma_{13}}{\gamma_{1i}}; \tag{8}$$

– получено соотношение для определения интенсивности отказов  $\lambda_2/\lambda_0$  второго каскада КТЭУ для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1)–(5):

$$\frac{\lambda_{2i}}{\lambda_{23}} = \frac{n_{2i}}{n_{23}} = \frac{\gamma_{23}}{\gamma_{2i}}; \tag{9}$$

– получено соотношение для определения мощности потребления первого каскада  $W_{1i}$   $i$ -го сочетания к традиционному  $W_{13}$ :

$$\frac{W_{1i}}{W_{13}} = \frac{n_{1i} \gamma_{1i}}{n_{13} \gamma_{13}}; \text{ с учетом (1) } \frac{W_{1i}}{W_{13}} = \frac{\gamma_{13} \gamma_{1i}}{\gamma_{1i} \gamma_{13}} = 1, \quad (10)$$

т. е. мощность потребления первого каскада  $W_{1i} = W_{13} = \text{Const}$  – величина постоянная для разных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1)–(5) при одном и том же режиме работы и перепаде температур;

– получено соотношение для определения мощности потребления второго каскада  $W_{2i}$   $i$ -го сочетания

по сравнению с (3)  $\frac{W_{2i}}{W_{23}} = \frac{n_{2i} \gamma_{2i}}{n_{23} \gamma_{23}}$ ; с учетом (1) можно принять

$$\frac{W_{2i}}{W_{23}} = 1, \text{ т. е. } W_{2i} = W_{23} = \text{Const} \quad (11)$$

с погрешностью не более 1–2 %;

– холодильный коэффициент  $E$  двухкаскадного ТЭУ не зависит от варианта сочетания параметров исходного материала (1)–(5), а зависит от режима работы  $V$  и перепада температуры  $\Delta T$ .

Суммарную интенсивность отказов  $\lambda_{\Sigma}$  двухкаскадного ТЭУ можно представить в виде:

$$\lambda_{\Sigma i} = \lambda_{1i} + \lambda_{2i} = \lambda_{13} \frac{\gamma_{13}}{\gamma_{1i}} + \lambda_{23} \frac{\gamma_{23}}{\gamma_{2i}} = \lambda_{13} \frac{\gamma_{13}}{\gamma_{1i}} \left[ 1 + \frac{\lambda_{23} \gamma_{23} \gamma_{1i}}{\lambda_{13} \gamma_{13} \gamma_{2i}} \right]. \quad (12)$$

На рис. 8 представлена зависимость относительной величины интенсивности отказов  $A = \frac{\lambda_3 - \lambda_5}{\lambda_3} \cdot 100\%$

двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры  $\Delta T$  для различных режимов работы при  $T=300 \text{ K}$ ;  $Q_0=2,0 \text{ Вт}$ ;  $(\frac{1}{S})_1 = (\frac{1}{S})_2 = 10$ .

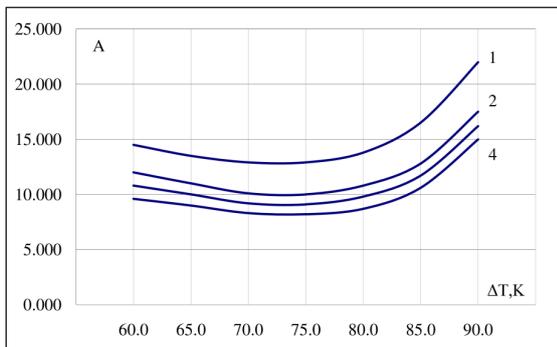


Рис. 8. Зависимость относительной величины

интенсивности отказов  $A = \frac{\lambda_3 - \lambda_5}{\lambda_3} \cdot 100\%$  двухкаскадного

ТЭУ от общего перепада температуры  $\Delta T$  для различных режимов работы при  $T=300 \text{ K}$ ;  $Q_0=2,0 \text{ Вт}$ ;

$(\frac{1}{S})_1 = (\frac{1}{S})_2 = 10$ . 1 – режим  $Q_{0\text{max}}$ ; 2 – режим  $(\frac{Q}{I})_{\text{max}}$ ; 3 – режим  $(\frac{Q_0}{I^2})_{\text{max}}$ ; 4 – режим  $\min$

По результатам сравнительного анализа основных параметров и показателей надежности получены простые аналитические зависимости, позволяющие найти ряд закономерностей при построении двухкаскадных ТЭУ повышенной надежности.

#### 4. 6. Структурный метод повышения надежности ТЭУ (метод резервирования)

Простейшими универсальными системами являются последовательное и параллельное соединение независимых элементов в системе.

Проведенные исследования показали, что применение последовательного соединения резервных элементов нецелесообразно, т. к. понижается надежность системы. В классическом понимании резервирование – это параллельное соединение независимых элементов, в котором только отказ всех элементов приводит к отказу системы в целом [10].

Вероятность безотказной работы параллельного соединения равна:

$$P_{\Sigma}(t) = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_i(t)]. \quad (13)$$

При условии использования элементов одинаковой надежности  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_m = \lambda$ :

$$P_{\Sigma}(t) = 1 - [1 - P(t)]^m, \quad (14)$$

где  $P(t) = \exp(-\lambda t)$ .

При параллельном соединении резервных элементов: – с ростом величины  $\lambda t$ , т. е. интенсивности отказов  $\lambda$  при заданном ресурсе  $t$  вероятность безотказной работы  $P$  уменьшается для различных  $m$ ;

– с ростом количества резервных элементов  $m$  вероятность безотказной работы  $P$  увеличивается при заданном значении величины  $\lambda t$  (рис. 9).

Таким образом, при параллельном соединении резервных элементов с увеличением их количества надежность системы возрастает.

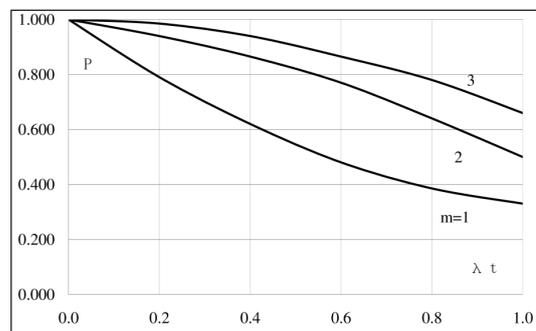


Рис. 9. Зависимость вероятности безотказной работы  $P$  от величины  $\lambda t$  для различного количества резервных элементов  $m$  при параллельном соединении резервных элементов в системе

#### 4. 7. Возможности применения совмещенного метода повышения надежности ТЭУ

Рассмотрим некоторые возможности совмещения конструктивного и параметрического методов для однокаскадных ТЭУ. Проведем расчет основных параметров и показателей надежности для режимов работы

$E_{max}$  и  $\lambda_{max}$  и перепадов температуры  $\Delta T=10$  К, 20 К, 40 К, 60 К при следующих исходных данных:  $T=300$  К;  $Q_0=2,0$  Вт;  $1/S=10$ ;  $\lambda_0=3 \cdot 10^{-8}$  1/час;  $t=10^4$  час.

Сравнительный анализ основных параметров и показателей надежности показал, что при применении:

а) конструктивного метода (выбор токового режима работы ТЭУ) использование режима  $\lambda_{min}$  по сравнению с  $E_{max}$  при традиционном варианте сочетания параметров (3) возможно уменьшить интенсивность отказов на (8–47) % в зависимости от перепада температуры  $\Delta T$ ,

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{E_{max}} - \lambda_{min}}{\lambda_{E_{max}}} 100\% \text{ (рис. 10, поз. 1);}$$

б) параметрического метода (выбор варианта сочетания параметров исходного материала (5) по сравнению с (3) позволяет уменьшить интенсивность отказов  $\lambda$  на (8–17) % в зависимости от перепада температуры  $\Delta T$ ,

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{(3)} - \lambda_{(5)}}{\lambda_{(3)}} 100\% = \left( \frac{\lambda_{(3)} - \lambda_{(5)}}{\lambda_{(3)}} \right)_{\lambda_{min}} \cdot 100\% \text{ (рис. 10, поз. 2);}$$

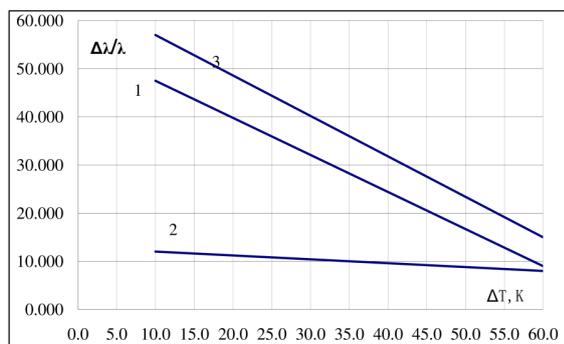


Рис. 10. Зависимость относительной величины интенсивности отказов  $\Delta\lambda/\lambda$  однокаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  для конструктивного – 1, параметрического – 2 и совмещенного – 3 методов при  $T=300$  К;  $Z_M=2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К;  $Q_0=2,0$  Вт;  $1/S=10$  при сравнении режимов  $E_{max}$  и  $\lambda_{min}$

в) совмещенного метода (конструктивный и параметрический методы) позволяет уменьшить интенсивность отказов  $\lambda$  при варианте сочетания параметров исходного материала (5) на (15–55) % в зависимости от перепада температуры  $\Delta T$ ,

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{E_{max}} - \lambda_{min}}{\lambda_{E_{max}}} 100\% \text{ (рис. 10, поз. 3).}$$

С ростом перепада температуры  $\Delta T$  в однокаскадном ТЭУ:

– относительная величина интенсивности отказов  $\Delta\lambda/\lambda$  уменьшается для всех методов повышения надежности (рис. 10);

– абсолютная величина интенсивности отказов  $\lambda$  для режима  $E_{max}$  и  $\lambda_{min}$  как для сочетания (3), так и для сочетания (5) увеличивается;

– величина интенсивности отказов  $\lambda$  варианта (5) по сравнению с (3) уменьшается для любого режима работы при заданном перепаде температуры  $\Delta T$ .

Сравнительный анализ основных параметров и показателей надежности для режима  $E_{max}$ , традиционно используемого при построении КТЭУ, и режима  $\lambda_{min}$ , обеспечивающего минимальную интенсивность отказов, показал, что при применении:

а) конструктивного метода (выбор токового режима работы КТЭУ) при традиционном варианте сочетания параметров исходного материала (3) возможно уменьшить интенсивность отказов на (12–27) % в зависимости от перепада температуры  $\Delta T$  (рис. 11, поз. 1);

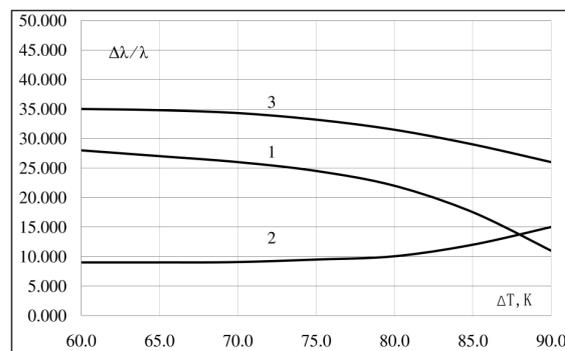


Рис. 11. Зависимость относительной величины  $\Delta\lambda/\lambda \cdot 100\%$  интенсивности отказов двухкаскадного ТЭУ от перепада температуры  $\Delta T$  для конструктивного – 1, параметрического – 2 и совмещенного – 3 методов при  $T=300$  К;  $Z_M=2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К;  $Q_0=2,0$  Вт;  $(1/S)_1 = (1/S)_2 = 10$  при сравнении режимов  $E_{max}$  и  $\lambda_{min}$

б) параметрического метода (выбор варианта сочетания параметра исходного материала (5) по сравнению с (3) возможно уменьшить интенсивность отказов  $\lambda$  на (10–16) % в зависимости от перепада температуры  $\Delta T$  (рис. 11, поз. 2);

в) совмещенного метода (суперпозиция конструктивного и параметрического методов) возможно уменьшить интенсивность отказов  $\lambda$  при использовании варианта сочетания параметров исходных материалов (5) по сравнению с (3) на (25–35) % в зависимости от перепада температуры  $\Delta T$  (рис. 11 поз. 3).

Применение совмещенного метода позволяет значительно повысить надежность устройства в целом. Рассмотренные методы повышения надежности КТЭУ являются инструментом при проектировании высоконадежной РЭА с использованием термоэлектрического охлаждения.

## 5. Выводы

1. Определены инварианты сочетаний параметров термоэлектрических элементов, позволяющие получать аналитические надежно ориентированные модели для автоматизированного проектирования термоэлектрических охладителей повышенной надежности.

2. Совмещение конструктивного и параметрического методов при надежно ориентированном проектировании обеспечивает уменьшение интенсивности отказов каскадных термоэлектрических охладителей на 25–35 % при использовании существующих исходных материалов.

## Литература

1. Острейковский, В. А. Теория надежности [Текст] / В. А. Острейковский. – М.: Высшая школа, 2003. – 463 с.
2. Жаднов, В. В. Управление качеством при проектировании теплонагруженных радиоэлектронных средств [Текст] / В. В. Жаднов, А. В. Сарафанов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 464 с.
3. Лау, П. С. Оценка надежности термоэлектрических холодильников [Текст] / П. С. Лау, М. Дж. Нэйджи // Термическое оборудование. Технология. – 2004. – Вып. 1. – С. 43–46.
4. Прошкин, Н. Н. Технологические методы повышения надежности термоэлектрических модулей [Текст] / Н. Н. Прошкин // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2000. – № 2–3. – С. 48–51.
5. Wereszczak, A. A. Thermoelectric Mechanical Reliability [Text] / A. A. Wereszczak, H. Wang // Vehicle Technologies Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. – Arlington, 2011. – P. 18.
6. Ланцев, А. Н. Повышение надежности полупроводниковых охладителей микросхем вакуумными полимерными покрытиями [Текст]: матер. междунауч.-техн. конф. / А. Н. Ланцев, П. А. Лучников, А. А. Назаренко // INTERMATIC, 2012. – С. 159–164.
7. Зайков, В. П. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Кн. 1 Однокаскадные устройства [Текст] / В. П. Зайков, Л. А. Киншова, В. Ф. Моисеев. – Одесса: Политехпериодика, 2009. – 118 с.
8. Зайков, В. П. Влияние тепловой нагрузки на показатели надежности двухкаскадных термоэлектрических охлаждающих устройств [Текст] / В. П. Зайков, В. И. Мещеряков, А. А. Гнатовская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 4, № 9 (52). – С. 34–38. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/1477/1375>
9. Зайков, В. П. Прогнозирование показателей надежности информационных систем с термоэлектрическими устройствами [Текст] / В. П. Зайков, В. И. Мещеряков, А. А. Гнатовская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Прикладные информационные технологии. – 2011. – Т. 2, № 10 (50). – С. 37–43. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/1867/1762>
10. Половко, А. М., Основы теории надежности [Текст]: практикум / А. М. Половко, С. В. Гуров. – СПб: БХВ-Петербург, 2006. – 560 с.
11. Sootsman, J. R. New and Old Concepts in Thermoelectric Materials [Text] / J. R. Sootsman, D. Y. Chung, M. G. Kanatzidis // Angewandte Chemie International Edition. – 2009. – Vol. 48, Issue 46. – P. 8616–8639. doi: 10.1002/anie.200900598
12. Шевелев, А. В. Наноструктурированные термоэлектрические материалы [Текст] / А. В. Шевелев. – М.: Научно-образовательный центр по нанотехнологиям МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. – 58 с.
13. Кожемякин, Г. Н. Наноструктурированные теллуриды висмута и сурьмы для термоэлектрического теплового насоса [Текст] / Г. Н. Кожемякин, С. Я. Скипидаров, Ю. М. Крутов, А. Н. Паращенко, О. Н. Иванов, О. Н. Соклакова // Термоэлектричество. – 2014. – № 1. – С. 37–47.
14. Brown, S. R. Yb<sub>14</sub>MnSb<sub>11</sub>: New High Efficiency Thermoelectric Material for Power Generation [Text] / S. R. Brown, S. M. Kauzlarich, F. Gascoin, G. J. Snyder // Chemistry of Materials. – 2006. – Vol. 18, Issue 7. – P. 1873–1877. doi: 10.1021/cm060261t
15. Нестеров, С. Б. Оценка возможности увеличения термоэлектрической добротности наноструктурированных полупроводниковых материалов для холодильной техники [Текст] / С. Б. Нестеров, А. И. Холонкин // Холодильная техника. – 2014. – № 5. – С. 40–43.
16. Зайков, В. П. Влияние термоэлектрической эффективности исходных материалов на показатели надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Часть 1: Однокаскадные ТЭУ [Текст] / В. П. Зайков, В. И. Мещеряков, А. А. Гнатовская, Ю. И. Журавлев // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2015. – № 1. – С. 44–48.