

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАИМЕНЬШЕЙ ВЕЛИЧИНЫ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ДВУХКАСКАДНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Проанализирована математическая модель зависимости показателей надежности от отношения количества термоэлементов в каскадах термоэлектрического устройства. Определена зависимость относительной величины интенсивности отказов от соотношения термоэлементов в каскадах для различных перепадов температур, которая позволяет проектировать двухкаскадные термоэлектрические устройства по условию, обеспечивающему наименьшую интенсивность отказа.

Ключевые слова: моделирование, надежность, термоэлектрические устройства, проектирование, теплонагруженные элементы.

Введение

Критические системы составляют класс информационных систем, выход из строя или некорректное функционирование которых приводит к техническим, экологическим последствиям, связанных с пожарами, взрывами, распространением химических веществ в воздухе и воде, человеческими жертвами. Надежность таких систем является их важной интегративной характеристикой, а проектирование предусматривает надежность-ориентированный подход. Постоянное усложнение таких систем и увеличение количества составляющих элементов приводит к уменьшению надежности, поскольку вероятность выхода из строя каждого элемента меньше единицы. Это противоречие является фундаментальным, поскольку проектируется надежная система из компонентов с ограниченным уровнем надежности [1]. Распределение надежности подсистем в информационной системе неоднородно. Некоторые подсистемы находятся в более критических условиях и существенно влияют на надежность всей системы, поэтому при проектировании требуют особого внимания [2].

Постановка задачи

Разработка и применение математических моделей проектирования каскадных термоэлектрических устройств с приоритетом по надежности является одним из важнейших направлений, позволяющих проектировать теплонагруженные электронные компоненты систем.

Параметрические методы повышения надежности являются определяющими при проектировании теплонагруженных элементов критических систем [3]. Термоэлектрические устройства представляют наиболее надежный тип охладителей, выполняются по полупроводниковой технологии, не имеют движущихся частей. Но интенсивность выхода из строя таких теплонагруженных компонентов значительно превышает интенсивность отказов при паспортных условиях эксплуатации за счет зависимости отказов от тепловой нагрузки [4]. Каскадные термоэлектрические устройства более эффективны, чем однокаскадные, а их использование для критических режимов работы требуют тщательного анализа с позиций надежности [5].

Задачей является разработка математической модели взаимосвязи показателей надежности и основных параметров каскадных термоэлектрических устройств, ее надежность-ориентированный анализ в системах автоматизированного проектирования критических систем.

Основная часть

Применение каскадных термоэлектрических устройств (КТЭУ) в радиоэлектронной аппаратуре обусловлено не только обеспечением более глубокого охлаждения по сравнению с однокаскадными ТЭУ, но и повышением энергетической эффективности охлаждения. При проведении проектирования каскадного ТЭУ производится выбор стандартных модулей и компоновка элементов каскадного ТЭУ, которая удовлетворяет массогабаритным характеристикам в соответствии с техническим заданием. При этом необходимо на стадии проектирования количественно оценить показатели надежности.

Для решения поставленной задачи использовалась математическая модель взаимосвязи показателей надежности и основных параметров проектируемого каскадного ТЭУ, которая позволяет получать количественные оценки [6]. Используемая модель позволяет осуществлять выбор режимов работы КТЭУ, которые соответствуют наименьшей величине интенсивности отказов и наибольшей вероятности безотказной работы. При этом необходимо в заданном интервале температур и тепловой нагрузке произвести выбор конструкции каскадного ТЭУ с прогнозируемыми показателями надежности для различных условий эксплуатации и определить режим работы каскадного ТЭУ, соответствующий наименьшей величине интенсивности отказов. Следующие соотношения использованы для определения основных параметров КТЭУ [6]:

Общий перепад температур на двухкаскадном ТЭУ:

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 = \Delta T_{\max 1} \Theta_1 + \Delta T_{\max 2} \Theta_2,$$

где ΔT_1 , ΔT_2 – перепад температур соответственно в «холодном» и «горячем» каскадах (далее первом и втором каскадах), К;

$\Delta T_{\max 1}$, $\Delta T_{\max 2}$ – максимальный перепад температур соответственно в первом и втором каскадах, К;

Относительные перепады температур в каскадах определяются зависимостью:

$$\Theta_1 = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_{\max 1}}, \quad \Theta_2 = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_{\max 2}}$$

Холодопроизводительность Q_0 двухкаскадного ТЭУ определяется соотношением:

$$Q_0 = n_1 I_{\max 1}^2 R_1 (2B_1 - B_1^2 - \Theta_1),$$

где n_1 – количество термоэлементов, шт.;

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

R_1 – электрическое сопротивление ветви термоэлемента, Ом;

$$B_1 = \frac{I}{I_{\max 1}} \text{ – относительный рабочий ток, отн. ед.}$$

При последовательном электрическом соединении каскадов должно соблюдаться условие равенства рабочих токов в каскадах $I_{\max 1} B_1 = I_{\max 2} B_2$,

где $B_2 = \frac{I}{I_{\max 2}}$ – относительный рабочий ток, *отн. ед.*;

$I_{\max 2} = \frac{e_2 T_1}{R_2}$ – максимальный рабочий ток, *A*.

Из условия теплового сопряжения каскадов отношение количества термоэлементов в смежных каскадах можно записать в виде:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{I_{\max 1}^2 R_1}{I_{\max 2}^2 R_2} \frac{\left[2B_1 \left(1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \Theta_1 \right) + B_1^2 - \Theta_1 \right]}{\left(2B_2 - B_2^2 - \Theta_2 \right)}$$

Относительную величину интенсивности отказов каскадного ТЭУ можно представить в виде суммы интенсивностей отказов каждого каскада

$$\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_0} = \frac{n_1 B_1^2 K_{T_1} \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_{\max 1}} + C_1 \right) \left(\frac{\Delta T_1}{T_0} + B_1 \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_1}{T_0} \right)^2} + \frac{n_2 B_2^2 K_{T_2} \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_{\max 2}} + C_2 \right) \left(\frac{\Delta T_2}{T_1} + B_2 \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_2}{T_1} \right)^2}, \quad (1)$$

где λ_0 – номинальная интенсивность отказов, *1/ч*; $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ *1/час*; n_1, n_2 – количество термоэлементов в каскадах, *шт*; (индексы *1* и *2* соответствуют “холодному” и “горячему” каскадам); B_1 и B_2 – относительный рабочий ток в каждом каскаде, *отн. ед.*

В результате проведенных расчетов по предложенной модели исследованы зависимости относительных рабочих токов B_1 и B_2 от отношения количества термоэлементов в каскадах n_1/n_2 . (рис.1).

Выявлено, что с уменьшением количества термоэлементов в каскадах величины относительных рабочих токов уменьшаются при исследованных перепадах температур. С ростом перепадов температур величина относительного рабочего тока в каскадах увеличивается при заданном отношении количества термоэлементов в каскадах (рис. 1).

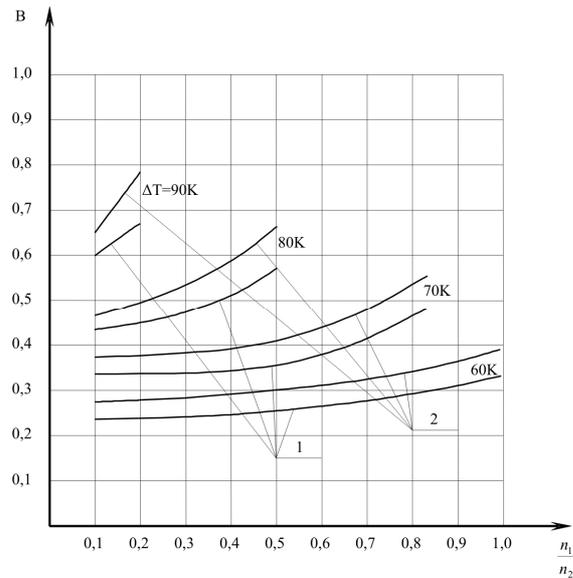


Рис. 1. Зависимость относительного рабочего тока в каскадах B_1 и B_2 двух-каскадного ТЭУ от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах n_1/n_2 при $T = 300\text{ K}$, $Q_0 = 0,1\text{ Вт}$ и перепадах температур $\Delta T = 60\text{ K}$; 70 K ; 80 K ; 90 K , где 1 – B_1 ; 2 – B_2

Исследованы зависимости относительного перепада температур Θ_1 и Θ_2 от отношения количества термоэлементов в каскадах (рис.2)

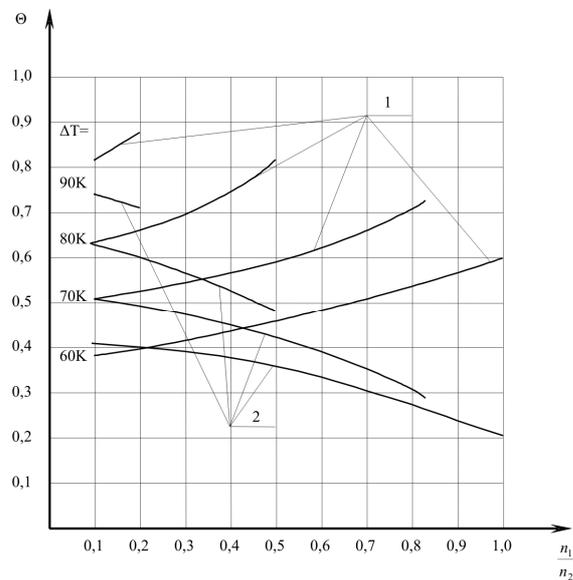


Рис.2. Зависимость относительного перепада температур Θ_1 и Θ_2 двухкаскадного ТЭУ от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах n_1/n_2 при $T = 300\text{ K}$, $Q_0 = 0,1\text{ Вт}$ и перепадах температур $\Delta T = 60\text{ K}$; 70 K ; 80 K ; 90 K , где 1 – Θ_1 ; 2 – Θ_2

В результате выявлено, что с ростом общего перепада температур ΔT величина относительных перепадов температур увеличивается при заданных значениях

отношения количества термоэлементов в каскадах двухкаскадного термоэлектрического устройства (рис. 2).

Исследована зависимость относительной величины интенсивности отказов двухкаскадного термоэлектрического устройства от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах (рис. 3). Произведена оценка влияния распределения количества термоэлементов в каскадах ТЭУ на показатели надежности в широком диапазоне температур с учетом тепловой нагрузки.

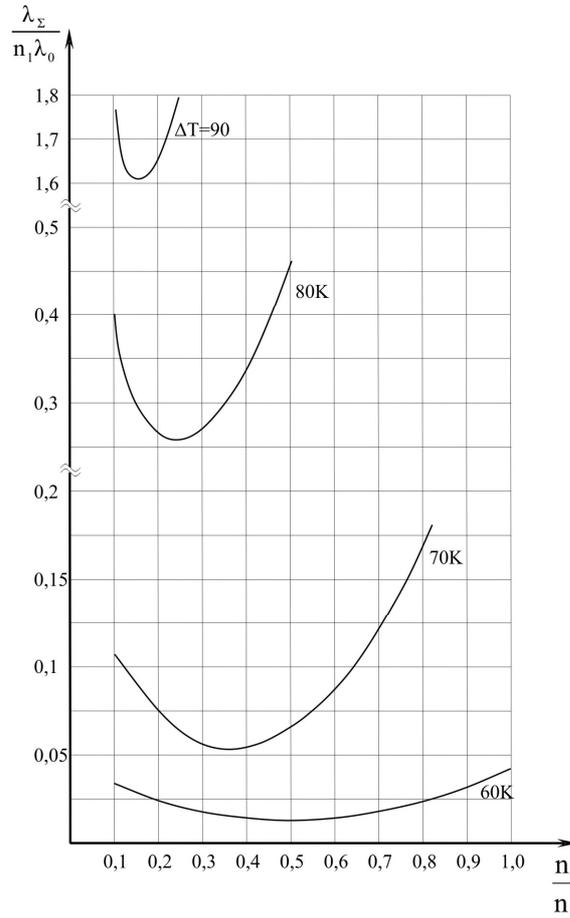


Рис.3. Зависимости относительной величины интенсивности отказов $\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}$ двухкаскадного ТЭУ от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах n_1/n_2 при $T = 300\text{ K}$, $Q_0 = 0,1\text{ Вт}$ и перепадах температур $\Delta T = 60\text{ K}$; 70 K ; 80 K ; 90 K

Анализ зависимости позволил утверждать, что характерной особенностью зависимости $\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0} = f\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$ (рис. 3) является наличие минимума функции $\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}$ при соответствующих значениях n_1/n_2 для различных перепадов температур ΔT .

С ростом перепада температур ΔT величина $\left(\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}\right)_{\min}$ увеличивается и смещается в сторону меньших значений n_1/n_2 . Соотношение $\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}$ носит обобщенный характер и может использоваться для расчетов при любом значении величины n_1 .

Обработка информации, представленной на рисунке 3, направлена на получение зависимости минимальных значений относительной величины интенсивности отказов $\left(\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}\right)_{\min}$ от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах n_1/n_2 и от перепадов температур ΔT (рис. 4).

Для вычисления значений функции вне области, ограниченной заданными точками, использованы методы экстраполяции.

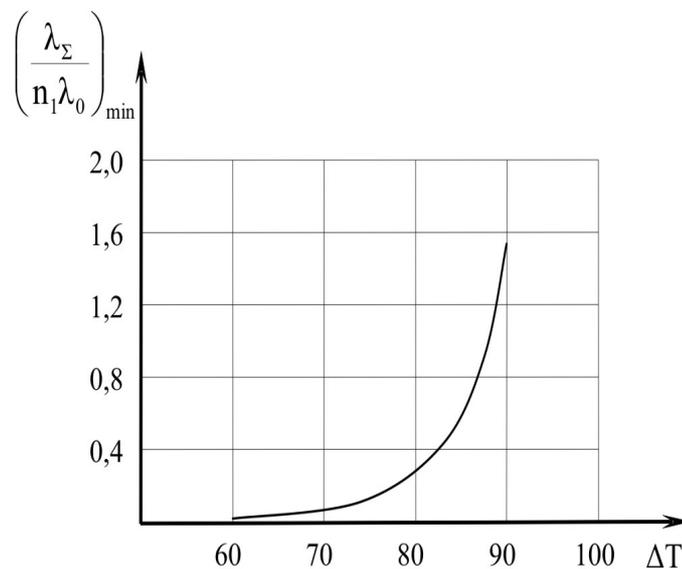


Рис. 4. Зависимость минимальной величины относительной интенсивности

отказов $\left(\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}\right)_{\min}$ двухкаскадного ТЭУ от перепада температур

При нахождении зависимости минимальной величины относительной интенсивности отказов $\left(\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}\right)_{\min}$ двухкаскадного ТЭУ от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах n_1/n_2 принято $T = 300 K$, $Q_0 = 0,1 Вт$ и перепады температур $\Delta T = 60 K$; $70 K$; $80 K$; $90 K$ (рис. 5).

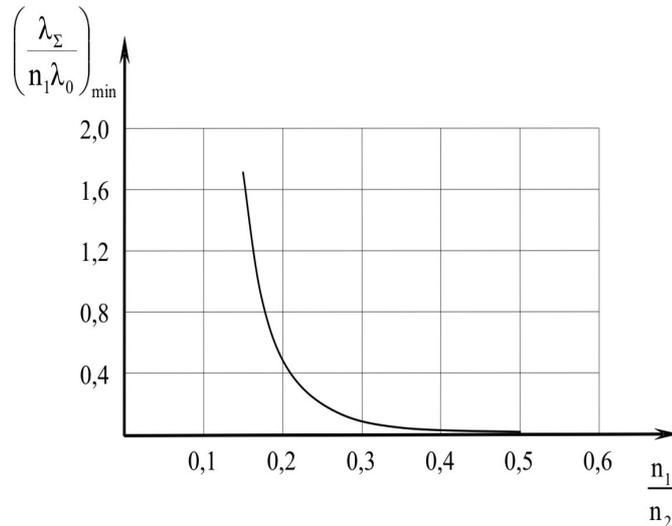


Рис. 5. Зависимость минимальной величины относительной интенсивности отказов

$\left(\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}\right)_{\min}$ двухкаскадного ТЭУ от отношения элементов в каскадах n_1/n_2

Определена зависимость минимальной величины относительной интенсивности отказов $\left(\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}\right)_{\min}$ двухкаскадного термоэлектрического устройства как от отношения термоэлементов в каскадах n_1/n_2 , так и от перепада температур ΔT (рис. 6).

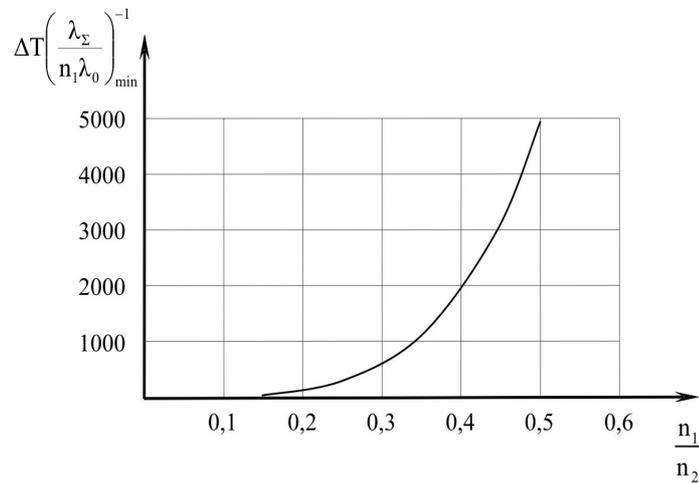


Рис. 6. Зависимость минимальной величины относительной интенсивности отказов

$\left(\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}\right)_{\min}$ двухкаскадного ТЭУ от отношения термоэлементов в каскадах $(n_1/n_2)_{\min}$ и перепада температур ΔT .

В результате проведенных исследований математической модели взаимосвязи основных параметров каскадных термоэлектрических устройств, выявлена связь между

минимальными значениями относительной интенсивности отказов $\left(\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}\right)_{\min}$ и отношениями термоэлементов в каскадах $(n_1/n_2)_{\min}$ при соответствующих им перепадами температур ΔT , которая описывается аналитической зависимостью:

$$\Delta T \left(\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0}\right)_{\min}^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2}\right)_{\min}^{-3,755} = 6,56 \cdot 10^4, \quad (2)$$

где $(n_1/n_2)_{\min} = 5,61e^{-0,04\Delta T}$ – отношение термоэлементов в каскадах, соответствующее минимуму относительной интенсивности отказов при заданном перепаде температур ΔT .

Экстремумы полученной зависимости интенсивности отказов от распределения термоэлементов в каскадах для различных значений температурного перепада, описываются аналитической зависимостью, что позволяет проектировать каскадные термоэлектрические устройства по условию минимума интенсивности отказов.

Выводы

Проведен анализ зависимости относительной интенсивности отказов от соотношения термоэлементов в каскадах для различных перепадов температур.

Показано что минимумы зависимости $\frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \lambda_0} = f\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$ интенсивности отказов от соотношения распределения элементов в каскадах при различных значениях перепада температур, описываются аналитической зависимостью, которая позволяет проектировать двухкаскадные термоэлектрические устройства по условию, обеспечивающему наименьшую интенсивность отказа.

При выборе соотношения термоэлементов двухкаскадного ТЭУ целесообразно ориентироваться на ту конструкцию, которая бы обеспечивала минимальную интенсивность отказов при заданном перепаде температур и тепловой нагрузке.

Стаття надійшла 21 . 10 . 2014
 Прийнято до друку 04 . 11 . 2014

Литература

1. Соммервилл, И. Инженерия программного обеспечения [Текст] / И. Соммервилл. – М.: Вильямс, 2002. – 624 с.
2. Воскобоев, В.Ф. Надежность технических систем и техногенный риск. Часть 1. Надежность технических систем (учебное пособие). [Текст] / М. : ООО ИД «Альянс», ООО изд-во «Путь», 2008. – 204 с.
3. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники [Текст] / А. А. Чернышёв, В. И. Иванов, А. И. Аксенов, Д. Н. Глушакова. – М.: Энергия, 1980. – 216 с.
4. Система отвода теплоты от теплонагруженных элементов РЭА на основе пульсационной тепловой трубы / Е.С. Алексеик, В.Ю. Кравец // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2013. — № 1. — С. 19-24.
5. Зайков, В. П. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств [Текст]. Книга 1. Однокаскадные устройства / В. П. Зайков, Л. А. Киншова, В. Ф. Моисеев – Одесса : "Политехперіодика", 2009. – 120 с.

6. Гнатовская, А.А. Обеспечение наименьшей интенсивности отказов термоэлектрического устройства заданной конструкции / А.А. Гнатовская, В.П. Зайков, В.И. Мещеряков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», – 2011. – № 23. – С. 76 – 86.

Анотація

Г.А. Гнатовська

Математична модель найменшої величини інтенсивності відмов двокаскадних термоелектричних пристроїв

Для отримання моделі найменшої величини інтенсивності відмов двокаскадних термоелектричних пристроїв досліджена поведінка залежності відносної величини інтенсивності відмов від відношення кількості термоелементів у каскадах. Проведені дослідження виявило наявність мінімуму функції відносної величини інтенсивності відмов при відповідних значеннях відношення термоелементів у каскадах для різних перепадів температур, яка описується отриманою аналітичною залежністю. Залежність дозволяє здійснювати проектування двокаскадних термоелектричних пристроїв за умовою, що забезпечує найменшу інтенсивність відмов.

Ключові слова: моделювання, надійність, термоелектричні пристрої, проектування, теплонавантажені елементи

Summary

A.A. Gnatovskaya

Mathematical model of the smallest value of the failure rate of two-stage thermoelectric devices

For the model the smallest value of the failure rate of two-stage thermoelectric devices studied the behavior of the relative magnitude of the failure rate of the ratio of the number of thermocouples in the cascades. Studies have revealed the presence of minimum of the relative magnitude of the failure rate for the corresponding values of thermocouples in relation to different stages of changes in temperature, which describes the preparation of analytical dependence. Dependence allows to design two-stage thermoelectric devices for conditions that ensure the lowest failure rate.

Key words: modeling, reliability, thermoelectric devices, design, heat-loaded elements