

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАСКАДНОГО ТЕРМО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА В САПР КРИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Предложен алгоритм расчета основных показателей каскадного термоэлектрического устройства в САПР критических систем на основании математической модели взаимосвязи основных теплофизических параметров с параметрами надежности. Применение разработанного алгоритма позволяет производить проектирование теплонагруженных средств с приоритетом по надежности.

Ключевые слова: проектирование, термоэлектрические устройства, надежность.

Введение

В современных условиях развития общества, когда информационные системы в значительной степени несут ответственность за предупреждение техногенных аварий и катастроф, надежность становится их основным показателем. Потребность в постоянном расширении функциональных возможностей, и связанное с этим усложнение аппаратной и программной частей, приводит к снижению показателей надежности систем.

Особенно остро проблема стоит в критических системах с теплонагруженными элементами, режим которых обеспечивается термоэлектрическими устройствами (ТЭУ), так как интенсивность отказов зависит от нагрузки и существенно превышает аналогичные параметры для нормальных условий эксплуатации. Без проведения надежно-ориентированного математического моделирования и анализа каскадных термоэлектрических устройств как таких, которые обеспечивают высокие показатели надежности, создание современных информационных теплонагруженных систем для сложных условий эксплуатации оказывается невозможным.

Решение этой проблемы лежит в области параметрического моделирования, моделирования управлением надежностью за счет аппаратной и информационной избыточности, реализация которых возможна только за счет применения систем автоматизированного проектирования.

Существующие исследования ограничиваются, в основном, характеристиками надежности в стандартных (паспортных) условиях эксплуатации, или представлены в литературных источниках методами совершенствования отдельных конструктивных параметров [1].

Анализ проведенных ранее исследований показал, что для теплонагруженных каскадных термоэлектрических устройств не существует четких моделей, позволяющих получать оптимизированные режимы при проектировании с точки зрения надежности их функционирования [2]. Все это делает процесс создания подсистем автоматизированного проектирования математического моделирования и анализа термоэлектрических устройств, работающих в теплонагруженных устройствах критических систем, достаточно актуальными.

Постановка задачи

Разработка подсистемы САПР теплонагруженных средств с каскадными термоэлектрическими охлаждающими устройствами (КТЭУ) связана с тем, что проектирование каскадных ТЭУ, как правило, ограничивается выбором

параметрических характеристик унифицированных модулей без учета связанных с параметрами надежности эксплуатационных характеристик, которые для теплонагруженных режимов становятся определяющими [3]. Проектирование каскадных ТЭУ, как правило, ограничивается выбором параметрических характеристик унифицированных модулей без учета связанных с параметрами надежности эксплуатационных характеристик, которые для теплонагруженных режимов становятся определяющими[4].

Ключевой проблемой является необходимость количественной оценки показателей надежности, поскольку только при выполнении этого условия возможно надежность-ориентированное проектирование.

Целью работы является разработка алгоритма расчета основных показателей каскадного ТЭУ на основе надежность-ориентированных математических моделей взаимосвязи основных показателей каскадных ТЭУ с показателями надежности, что обеспечит проектирование теплонагруженных электронных средств в подсистеме САПР с приоритетом по надежности.

Основная часть

В основу алгоритма расчета основных показателей каскадного ТЭУ в САПР критических систем, взята математическая модель взаимосвязи основных показателей надежности, которыми выбраны интенсивность отказов и вероятность безотказной работы, с основными параметрами двухкаскадного ТЭУ [5]. Применение такой математической модели в системе САПР критических систем позволяет получать количественные оценки параметров надежности двухкаскадных термоэлектрических устройств на стадии проектирования.

Основными параметрами двухкаскадного ТЭУ являются: относительные рабочие токи, перепад температур в каскадах, количество термоэлементов в каскадах, относительная тепловая нагрузка.

В модели приняты следующие ограничения, предполагалось: последовательное соединение термоэлементов в каскадах и самих каскадов; выход из строя любого термоэлемента приводит к выходу каскадного ТЭУ в целом; события выхода из строя элементов и интенсивность отказов одинаковые и независимые, не учитывается тепловое сопротивление сочленения каскадов и тепловая связь между термоэлементами; перепад температур двухкаскадного ТЭУ рассматривался в диапазоне от 60К до 90К.

Использованная математическая модель наибольшей энергетической эффективности, связывает основные параметры надежности двухкаскадного ТЭУ с относительными токами и перепадами температур и тепловой нагрузкой в режиме максимального холодильного коэффициента. Модель позволяет количественно оценивать показатели надежности двухкаскадного ТЭУ выбранной конструкции в режиме E_{\max} в различных условиях эксплуатации при изменении относительных рабочих токов и тепловой нагрузки при заданном перепаде температур, а также проводить надежность-ориентированное проектирование теплонагруженных средств в режиме максимального холодильного коэффициента E_{\max} . Использование в алгоритме модели наименьшей величины интенсивности отказов двухкаскадных ТЭУ позволяет при выборе соотношения термоэлементов двухкаскадного ТЭУ ориентироваться на ту конструкцию, которая бы обеспечивала минимальную интенсивность отказов при заданных перепадах температур и тепловой нагрузке. При этом величина холодильного коэффициента стремилась к максимальному значению. Проведенный анализ

зависимости относительной интенсивности отказов от соотношения термоэлементов в каскадах для различных перепадов температур, описываемый аналитической зависимостью, позволяет проектировать двухкаскадные термоэлектрические устройства по условию, обеспечивающему наименьшую интенсивность отказа [6].

Разработанный алгоритм позволяет количественно оценивать также влияние величины тепловой нагрузки на основные показатели надежности при проектировании каскадных ТЭУ. Предложенная модель взаимосвязи основных показателей и показателей надежности двухкаскадных ТЭУ различных конструкций с величиной тепловой нагрузки. С ростом тепловой нагрузки C_1 величина относительной интенсивности отказов увеличивается при различных значениях отношения термоэлементов в каскадах и перепада температур ΔT . С ростом перепада температур ΔT величина относительной интенсивности отказов увеличивается при заданной тепловой нагрузке C_1 .

Применение надежно-ориентированных математических моделей взаимосвязи основных показателей каскадных ТЭУ с показателями надежности для различных режимов эксплуатации в алгоритме расчета показателей каскадных ТЭУ обеспечивает проектирование теплонагруженных электронных средств в подсистеме САПР с приоритетом по надежности (рис.1).

Для определения показателей надежности двухкаскадного ТЭУ необходимо определить следующие исходные данные, которые, как правило, оговорены техническим заданием:

Q_0 – требуемая холодопроизводительность, Вт;

T_0 – температура теплопоглощающего спая, К;

T_c – температура среды, К.

При определении требований возможны ограничения: по мощности потребления; по массогабаритным характеристикам; по величине интенсивности отказов; по величине рабочего тока и напряжения и т.д.

При выборе температуры на теплоотводящем спае (T) необходимо учитывать следующие условия теплообмена теплоотводящего радиатора ТЭУ со средой:

– при использовании принудительного воздушного конвективного теплообмена (использование вентилятора):

$$T = T_c + (3^0 \dots 5^0) K \quad (1)$$

– при использовании естественной конвекции:

$$T = T_c + (10^0 \dots 15^0) K \quad (2)$$

– при принудительном жидкостном конвективном теплообмене:

$$T = T_c + (1^0 \dots 2^0) K \quad (3)$$

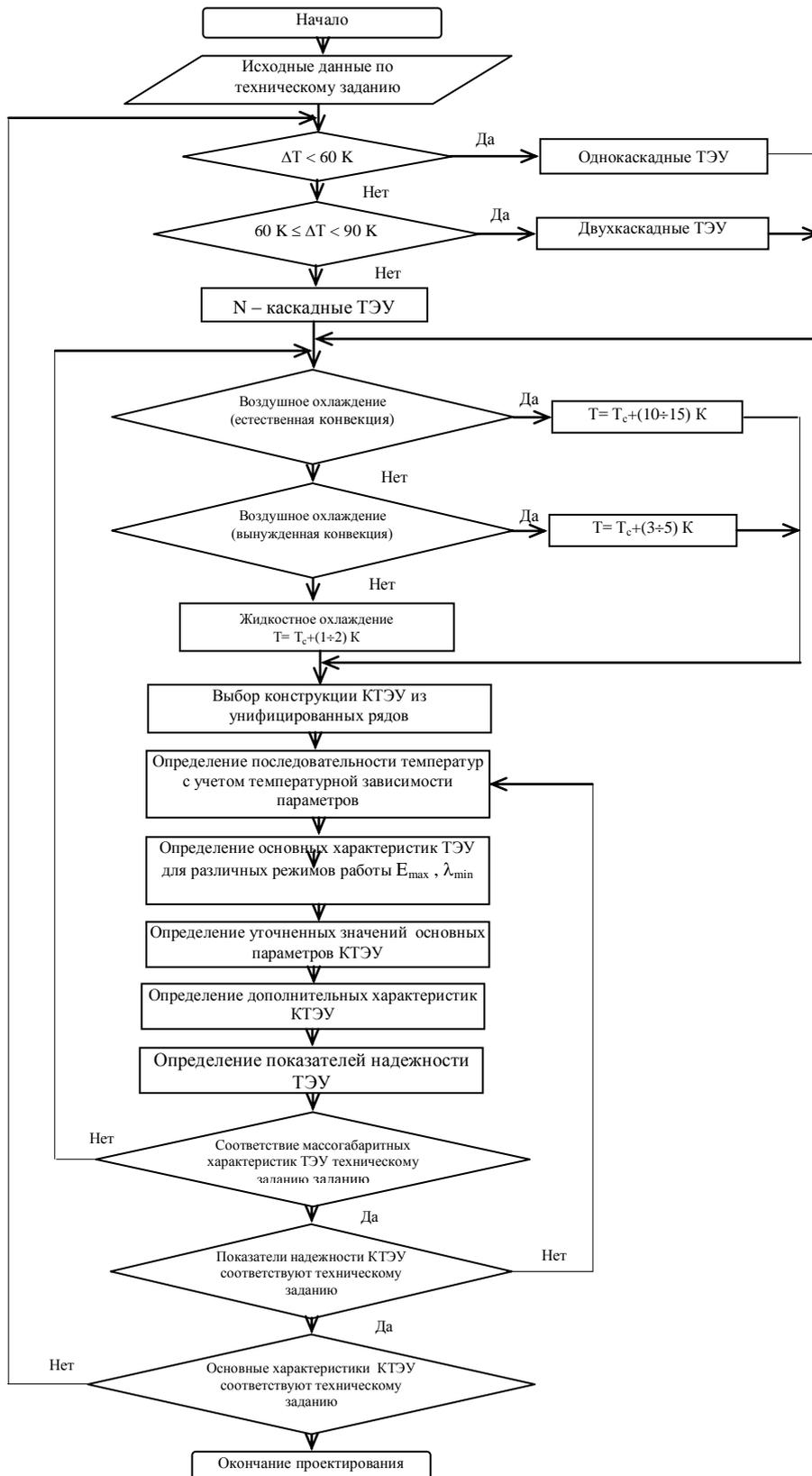


Рис. 1. Схема алгоритма расчета основных параметров каскадного ТЭУ.

Принимая во внимание выбранные исходные данные и условия теплообмена, осуществляем выбор из унифицированных рядов нескольких модулей ТЭУ. При перепаде температуры на ТЭУ $\Delta T = T - T_0$, если:

$\Delta T < 60K$ – используются однокаскадные ТЭУ;

$60K \leq \Delta T \leq 90K$ – используются двухкаскадные ТЭУ;

$90K < \Delta T < 100K$ – используются трехкаскадные ТЭУ, и т.д.

Максимальные охлаждающие возможности ТЭУ заданной конструкции можно оценить, определив максимальный перепад температуры (ΔT_{\max}) и максимальную холодопроизводительность ($Q_{0\max}$) для различных соотношений количества термоэлементов в смежных каскадах $\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$ и геометрии ветвей термоэлементов в каскадах $\frac{l}{s}$. При выполнении условий $\Delta T < \Delta T_{\max}$ и $Q_0 < Q_{0\max}$, выбраны несколько унифицированных конструкций ТЭУ.

На следующем этапе расчета оценим последовательность температур в каскадном ТЭУ с учетом температурной зависимости параметров: $e_i, \sigma_i, R_i, I_{\max_i}, \Delta T_{\max_i}$ в каскадах.

$$I_{\max_i} = \frac{e_i T_{i-1}}{R_i} \quad (4)$$

$$\Delta T_{\max_i} = 0,5 z_i T_{i-1}^2 \quad (5)$$

$$R_i = \frac{l}{\sigma_i s} \quad (6)$$

Определяем основные характеристики ТЭУ B_i и Q_i для различных режимов работы при последовательном электрическом соединении каскадов при заданных значениях $n_1, n_2, Q_0, \Delta T$:

– относительных рабочих токов B_1 и B_2 , путем решения полученных соотношений для каждого режима работы:

$$B = f\left(\frac{n_1}{n_2}; \Delta T; Q_{0\max}\right) \quad (7)$$

– относительных перепадов температур Θ_1 и Θ_2 в каскадах.

Используя метод последовательных приближений, уточняем последовательность температур, следовательно, и параметры $R_i, I_{\max_i}, \Delta T_{\max_i}$ с учетом температурной зависимости параметров и величины $B_1, B_2, \Theta_1, \Theta_2$ для каждого токового режима работы ТЭУ, где

$$Q_i = \frac{\Delta T_i}{\Delta T_{\max_i}} \quad (8)$$

Используя полученные уточненные значения основных параметров $B_1, B_2, \Theta_1, \Theta_2$ определяем режимы питания ТЭУ для расчета и конструирования блока питания и

теплоотводящего радиатора, которые позволяют определить массогабаритные размеры ТЭУ:

– рабочий ток:

$$I = B_1 I_{\max_1}; \quad (8)$$

– мощность потребления W_1 и W_2 в каскадах, где

$$W_i = 2n_i I_{\max_i}^2 l_i B_i \left(B_i + \frac{\Delta T_{\max_i}}{T_c} \Theta_i \right); \quad (9)$$

– суммарную мощность потребления:

$$W_{\Sigma} = W_1 + W_2; \quad (10)$$

– холодильный коэффициент термоэлектрического устройства:

$$E = \frac{Q_0}{W_{\Sigma}}; \quad (11)$$

– суммарное падение напряжения термоэлектрического устройства:

$$U_{\Sigma} = U_1 + U_2, \text{ где } U_i = \frac{W_i}{I}; \quad (12)$$

– количество тепла, которое необходимо отвести радиатором:

$$Q = Q_0 + W_{\Sigma}. \quad (13)$$

Определяем основные показатели надежности термоэлектрического устройства – интенсивность отказов λ (14) и вероятность безотказной работы P (15):

$$\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_0} = \frac{n_1 B_1^2 K_{T_1} \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_{\max_1}} + C_1 \right) \left(\frac{\Delta T_1}{T_0} + B_1 \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_1}{T_0} \right)^2} + \frac{n_2 B_2^2 K_{T_2} \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_{\max_2}} + C_2 \right) \left(\frac{\Delta T_2}{T_1} + B_2 \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_2}{T_1} \right)^2} \quad (14)$$

$$P = e^{-\lambda_{\Sigma} t} \quad (15)$$

Производим анализ полученных основных параметров термоэлектрического устройства с ограничительными требованиями технического задания на проектирование. В случае не соответствия хотя бы одной из основных характеристик устройства с ограничениями, указанными в техническом задании следует откорректировать расчет с учетом возможности выполнения всех требований технического задания в их совокупности.

Выводы

На основании математических моделей взаимосвязи основных теплофизических параметров термоэлектрического устройства с показателями надежности – интенсивностью отказов и вероятностью безотказной работы, разработан алгоритм расчета, позволяющий производить надежно-ориентированное проектирование теплонагруженных средств в САПР критических систем. Предложенный алгоритм расчета реализует параметрическую модель в подсистеме САПР, которая обеспечивает получение количественных оценок показателей надежности в соответствии с техническим заданием на проектирование.

Литература

1. Шишмарев, В. Ю. Надежность технических систем [Текст] / В. Ю. Шишмарев. – М. : Академия, 2010. – 304 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. Зайков, В. П. Возможности единого подхода к режимам работы охлаждающего термоэлемента [Текст] / В. П. Зайков, М. Н. Сомкин, А. А. Вайнер // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, – 1984. – Вып. 1. – С. 95–106.
4. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р. Комп'ютерне моделювання показів термоелектричного тепломіра в умовах реальної експлуатації // Термоелектрика. – № 1. – 2013. – с. 53-60.
5. 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. 2/10 (50) – Харьков : Технологический центр, 2011. – С.37 – 43.
6. Зайков, В. П. Обеспечение наименьшей интенсивности отказов термоэлектрического устройства заданной конструкции [Текст] / В. П. Зайков, В. И. Мещеряков, А. А. Гнатовская // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» – 2011. – № 23. – С. 76 –86.

Стаття надійшла 11.04.2014
 Прийнято до друку 06.05.2014

Анотація

Г.А. Гнатовська

Алгоритм розрахунку показників каскадного термоелектричного пристрою у САПР критичних системах

Запропоновано алгоритм розрахунку основних показників каскадного термоелектричного пристрою в САПР критичних систем на основі математичної моделі взаємозв'язку основних теплофізичних параметрів з параметрами надійності. Основними показниками надійності каскадного термоелектричного пристрою обрані інтенсивність відмов і ймовірність безвідмовної роботи. Основними теплофізичними параметрами каскадного термоелектричного пристрою прийняті: відносні робочі струми, перепад температур, кількість термоелементів в каскадах, відносне теплове навантаження. Математична модель дозволяє кількісно оцінювати показники надійності каскадного термоелектричного пристрою, обраної конструкції в різних режимах експлуатації, з урахуванням впливу теплового навантаження. Необхідність кількісної оцінки показників надійності каскадного термоелектричного пристрою є ключовим завданням. Тільки при виконанні цього завдання можливе проведення надійнісно-орієнтованого проектування.

Застосування розробленого алгоритму дозволяє здійснювати проектування теплонавантажених засобів з пріоритетом по надійності.

Ключові слова: проектування, термоелектричні пристрої, надійність.

Summary

A.A. Gnatovskaya

The algorithm of calculating the cascade thermoelectric device in cad systems critical

The algorithm for the calculation of the main indicators of cascade thermoelectric device in CAD systems critical on the basis of a mathematical model of the relationship with the main thermal parameters of reliability parameters.

The main indicators of reliability cascade thermoelectric device selected failure rate and the probability of failure-free operation. The main thermal parameters of cascade thermoelectric device adopted: the relative operating currents, temperature and number of thermocouples in the Cascades, the relative heat load. Mathematical model to quantify the reliability of cascade thermoelectric device, the selected design in various modes of operation, taking into account the effect of the thermal load. The need for quantitative assessment of the reliability of cascade thermoelectric device is a key task. Only under this condition may conduct of reliability-oriented design.

The application of this algorithm allows for the design of thermally loaded funds with a priority on safety.

Key words: design, thermoelectric device, reliability.