УДК 51-74:510.22:519.6:536.2

Учет разброса параметров в тепловой модели стержневых элементов радиаторов систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры: метод нечетких множеств

В. Н. Павлыш[1], С. В. Сторожев[2], С. Б. Номбре[2]
[1]ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк)
[2]ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (г. Макеевка)

Аннотация

Рассматриваются вопросы применения аппарата теории нечетких вычислений при решении проблемы учета разбросов исходных геометрических и физических параметров в аналитической расчетной модели теплового отвода от корпуса радиоэлектронного устройства с применением конструкций ребристых либо игольчато-штыревых радиаторов. Задачей исследования является получение уточненных проектных данных о характеристиках стержневых конструктивных элементов радиаторов, обеспечивающих задаваемые уровни теплоотдачи и температуры перегрева устройства в зоне крепления радиатора. В качестве метода исследования рассматриваемой задачи предложено введение нечетко-множественных представлений для неопределенных исходных расчетных параметров, являющихся аргументами в функциональных соотношениях детерминистического варианта анализируемой модели, и получение соответствующих выходных параметров в нечетко-множественной форме на основе применения $\alpha-$*уровневой модифицированной версии эвристического принципа обобщения.*

Введение

Математическое моделирование процессов обеспечения температурных режимов функционирования радиоэлектронных устройств относится, наряду с требованиями по их монтажно-коммуникационной структуре, помехоустойчивости и механической вибрационной надежности, к ключевым заданиям конструкторского проектирования [1–6]. В его рамках подлежат опрелению условия поддержания в заданных пределах температур элементов радиоэлектронных устройств, при которых, с учетом температурно-зависимых свойств, обеспечивается их надежное функционирование с номинальными параметрами на основе применения систем охлаждения либо термостабилизации. Функционирование систем обоих типов связано с отводом тепловых потоков рассеиваемых элементами мощностей путем использования систем активного и пассивного охлаждения, и их конструирование связано с анализом моделей теплообмена в элементах устройств охлаждения, конструктивные и технологические эксплуатационных параметры которых преимущественно имеют высокую степень неопределенности в виде разбросов экспериментальных и вводимых с допусками проектных значений [7]. Применяемые при этом способы учета неопределенности исходных параметров для моделей данного типа в доминирующей степени опираются на методы теории вероятностей, математической статистики и случайных процессов, в частности на применение метода статистических испытаний [8]. Вместе с тем, для учета неконтрастности параметров в моделях обеспечения температурных режимов функционирования радиоэлектронных устройств целесообразным является применение параллельных подходов с менее строгими требованиями к характеру исходной неопределенной информации, возможностями использования данных субъективных экспертных оценок, отсутствием априорных гипотез о формах частотных распределений для выходных параметров, Таким подходом может служить, в частности, использование концепции нечетких множеств [9–14], в связи с чем конкретной целью данного исследования является разработка нечетко-множественного метода учета разбросов в значениях геометрических и физических параметров в математических тепловых расчетных моделях стержневых элементов радиаторов для систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры. Представляемый метод основывается на фаззификации неконтрастной исходной информации о входных параметрах с разбросами и применении $\alpha-$уровневой модифицированной версии эвристического принципа обобщения при переходе к нечетко-множественным аргументам в функциональных расчетных аналитических соотношениях детерминистической версии модели расчета стержневых элементов теплоотводящих радиаторов, а результатами его числовой реализации являются описания функций принадлежности для нечетких выходных параметров рассматриваемой модели.

Базовые соотношения детерминистической версии расчетной тепловой модели стержневых элементов радиаторов.

Расчетные математические модели конструкций ребристых и игольчато-штыревых радиаторов в системах отвода и рассеивания тепловой энергии для радиоэлектронной аппаратуры базируются на описании процессов теплообмена в тонких стержневых элементах, интерпретирующих соответствующие компоненты радиатора в виде ребер или штырей, при гипотезах о равномерном распределении тепловых потоков от корпуса радиоэлектронного устройства к радиатору по площади их контакта и о пренебрежении внешней теплоотдачей на удаленной торцевой поверхности стержня. При этом искомое распределение относительных температур $\vartheta(x) = t(x) - t_o$ вдоль оси x $(0 \le x \le h)$ стрежневого элемента, описывается начальной задачей [1–3]

$$d^2\vartheta(x)/dx^2 - k^2\vartheta(x) = 0,$$
$$k = (\alpha l S^{-1}\lambda^{-1})^{1/2},$$
$$(d\vartheta(x)/dx)_{x=0} = -PS^{-1}\lambda^{-1}, \qquad (1)$$

где P – тепловой поток, подводимый к основанию стержневого элемента радиатора и полностью переходящий в него; l – периметр сечения стержня; λ и α – соответственно параметры теплопроводности для материала стержневого элемента и теплоотдачи во внешнюю среду с температурой ϑ_V по его боковой поверхности.

Определяемое из (1) при вышеприведенных гипотезах представление $\vartheta(x)$ может быть записано [1] в форме

$$\vartheta(x) = P(kS\lambda)^{-1} ch(k(h-x))/sh(kh). \qquad (2)$$

Для $\vartheta(x)$ также используется [1] иное представление, получаемое в рамках предположения о малом ненулевом показателе теплоотдачи с удаленного торца и имеющее вид

$$\vartheta(x) = \vartheta_0 ch(k(h^* - x))/ch(kh^*),$$
$$\vartheta_0 = P(kS\lambda)^{-1} cth(kh^*), \qquad (3)$$

где $h^* = h + S/l$; ϑ_0 – параметр перегрева торца в основании стержневого элемента радиатора.

С использованием представлений (3) записываются выражения для определяющих характеристик теплообменных свойств радиаторов – эффективного коэффициента теплоотдачи α_e, тепловой проводимости σ_s и теплового сопротивления $R_s = \sigma_s^{-1}$, имеющих исходную форму

$$\alpha_e = P(\vartheta_s S)^{-1},\ \sigma_s = P\vartheta_s^{-1}, \qquad (4)$$

где $S = L_1 \cdot L_2$ $l = 2(L_1 + L_2)$ для прямоугольного радиатора с размерами основания L_1, L_2 и $S = \pi D^2/4$, $l = \pi D$ для радиатора с круговым основанием диаметра D; ϑ_s – средний показатель перегрева основания радиатора.

При допущении о том, что параметр ϑ_s равен величине ϑ_0, на основании выражения для тепловой проводимости единичного стержня $\sigma_s = kS\lambda \cdot th(kh^*)$ в случае радиаторов с N одинаковыми стержневыми элементами их общая проводимость σ_R описывается выражением

$$\sigma_R = \sigma_P + NkS\lambda \cdot th(kh^*), \qquad (5)$$

в котором σ_P – тепловая проводимость не содержащей стержневых элементов части радиатора, а входящий в представление k параметр α теплоотдачи во внешнюю среду по боковой поверхности стержневых элементов в случае вынужденной конвекции внешней воздушной среды рассчитывается по формуле

$$\alpha = 0.21\,(v_p/v_n)^{0.8}\lambda_n L^{-0.2}, \qquad (6)$$

содержащей параметры v_p – расчетной скорости движения воздуха и L – характерного размера для радиатора рассматриваемого типа; ν_n и λ_n – соответственно кинематической вязкости и теплопроводности воздушной среды.

Получаемое с учетом (4) и (5) для радиаторной конструкции с N однотипными стержневыми элементами соотношение

$$P = (\sigma_P + NkS\lambda \cdot th(kh^*))\vartheta_0, \qquad (7)$$

при задаваемых параметрах подводимого теплового потока P и требуемого предельного значения температуры перегрева ϑ_0 в случае выбора характеристик стержневых элементов S и h позволяет получить оценку для необходимого числа N таких элементов в конструкции радиатора

$$N = [(P - \sigma_P\vartheta_0)(kS\lambda \cdot th(kh^*)\vartheta_0)^{-1}], \qquad (8)$$

либо при задании S и N найти требуемое значение параметра h высоты стержневых элементов

$$\begin{aligned} h = k^{-1} \cdot arcth((P - \sigma_P\vartheta_0) \times \\ \times(NkS\lambda\vartheta_0)^{-1}) - S/l \end{aligned} \qquad (9)$$

Таким образом, представленные выше соотношения (1) – (9) и описывают различные аспекты анализа исследуемой расчетной модели с высокой степенью разбросов значений исход-ных параметров.

Нечетко-множественный учет ошибок разброса параметров в исследуемой модели.

Предлагаемый подход к анализу влияния разбросов в значениях исходных параметров рассматриваемой модели на основные расчетные характеристики стержневых элементов радиаторной конструкции и на параметры конструкции в целом базируется на введении с использованием экспериментальных и проектных технологических данных для неконтрастных параметров h, P, λ, L_1, L_2, D, σ_P, ν_p, L, ν_n, λ_n описаний в виде гауссовых [11] нечетких чисел $\tilde{h}$, $\tilde{P}$, $\tilde{\lambda}$, …, $\tilde{\nu}_n$, $\tilde{\lambda}_n$ с соответствующими функциями принадлежности и разложениями по множествам $\alpha-$ уровня

$$\begin{aligned} &\tilde{h} = (h_m, h_{\sigma l}, h_{\sigma r}) = \bigcup_{\alpha\in[0,1]}[\underline{h}_\alpha, \overline{h}_\alpha], \\ &\underline{h}_\alpha = h_m - h_{\sigma l}(\ln\alpha^{-2})^{1/2}, \\ &\overline{h}_\alpha = h_m + h_{\sigma r}(\ln\alpha^{-2})^{1/2}; \\ &\tilde{P} = (P_m, P_{\sigma l}, P_{\sigma r}) = \bigcup_{\alpha\in[0,1]}[\underline{P}_\alpha, \overline{P}_\alpha], \\ &\underline{P}_\alpha = P_m - P_{\sigma l}(\ln\alpha^{-2})^{1/2}, \\ &P_\alpha = P_m + P_{\sigma r}(\ln\alpha^{-2})^{1/2}; \\ &\tilde{\lambda} = (\lambda_m, \lambda_{\sigma l}, \lambda_{\sigma r}) = \bigcup_{\alpha\in[0,1]}[\underline{\lambda}_\alpha, \overline{\lambda}_\alpha], \\ &\underline{\lambda}_\alpha = \lambda_m - \lambda_{\sigma l}(\ln\alpha^{-2})^{1/2}, \\ &\overline{\lambda}_\alpha = \lambda_m + \lambda_{\sigma r}(\ln\alpha^{-2})^{1/2}; \ldots; \\ &\tilde{\lambda}_n = (\lambda_{nm}, \lambda_{n\sigma l}, \lambda_{n\sigma r}) = \bigcup_{\alpha\in[0,1]}[\underline{\lambda}_{n\alpha}, \overline{\lambda}_{n\alpha}], \\ &\underline{\lambda}_{n\alpha} = \lambda_{nm} - \lambda_{n\sigma l}(\ln\alpha^{-2})^{1/2}, \\ &\overline{\lambda}_{n\alpha} = \lambda_{nm} + \lambda_{n\sigma r}(\ln\alpha^{-2})^{1/2}. \end{aligned} \qquad (10)$$

Получение учитывающих разбросы исходных параметров нечетко-множественных представлений для расчетных характеристик стержневых элементов радиаторов поэтапно реализуется на базе применения $\alpha-$уровневой модифицированной версии эвристического принципа обобщения к функциональным соотношениям детерминистической версии рассматриваемой модели с учетом оценок знакоопределенности частных производных соответствующих функций по их аргументам в областях определения [11–14]. В рамках данного подхода поэтапно формируются следующие представления:

– с учетом $\partial S/\partial L_1 > 0$, $\partial S/\partial L_2 > 0$, $\partial S/\partial D > 0$, $\partial l/\partial L_1 > 0$, $\partial l/\partial L_2 > 0$, $\partial l/\partial D > 0$ величины $\tilde{S}$ и $\tilde{l}$ имеют представления

$$\begin{aligned} &\tilde{S} = \bigcup_{\alpha\in[0,1]}[\underline{S}_\alpha, \overline{S}_\alpha], \ \underline{S}_\alpha = \underline{L}_{1\alpha} \cdot \underline{L}_{2\alpha}, \\ &\overline{S}_\alpha = \overline{L}_{1\alpha} \cdot \overline{L}_{2\alpha}, \ \underline{S}_\alpha = \pi\underline{D}_\alpha^2/4, \\ &\overline{S}_\alpha = \pi\overline{D}_\alpha^2/4, \\ &\tilde{l} = \bigcup_{\alpha\in[0,1]}[\underline{l}_\alpha, \overline{l}_\alpha], \ \underline{l}_\alpha = 2(\underline{L}_{1\alpha} + \underline{L}_{2\alpha}), \\ &\overline{l}_\alpha = 2(\overline{L}_{1\alpha} + \overline{L}_{2\alpha}), \ \underline{l}_\alpha = \pi\underline{D}_\alpha, \ \overline{l}_\alpha = \pi\overline{D}_\alpha; \end{aligned} \qquad (11)$$

– с учетом $\partial\alpha/\partial v_p > 0$, $\partial\alpha/\partial\lambda_n > 0$, $\partial\alpha/\partial v_n < 0$, $\partial\alpha/\partial L < 0$ величина $\widetilde{\alpha}$ имеет представление

$$\widetilde{\alpha} = \bigcup_{\alpha\in[0,1]} [\underline{\alpha}_\alpha, \overline{\alpha}_\alpha],$$

$$\underline{\alpha}_\alpha = 0.21\,(\underline{v}_{p\alpha}/\overline{v}_{n\alpha})^{0.8}\,\underline{\lambda}_{n\alpha}\,\overline{L}_\alpha^{-0.2},$$

$$\overline{\alpha}_\alpha = 0.21\,(\overline{v}_{p\alpha}/\underline{v}_{n\alpha})^{0.8}\,\overline{\lambda}_{n\alpha}\,\underline{L}_\alpha^{-0.2}; \qquad (12)$$

– с учетом $\partial h^*/\partial h > 0$, $\partial h^*/\partial S > 0$, $\partial h^*/\partial l < 0$ величина $\widetilde{h}^*$ имеет представление

$$\widetilde{h}^* = \bigcup_{\alpha\in[0,1]} [\underline{h}^*_\alpha, \overline{h}^*_\alpha],$$

$$\underline{h}^*_\alpha = \underline{h}_\alpha + \underline{S}_\alpha/\overline{l}_\alpha,\ \overline{h}^*_\alpha = \overline{h}_\alpha + \overline{S}_\alpha/\underline{l}_\alpha; \qquad (13)$$

– с учетом $\partial k/\partial\alpha > 0$, $\partial k/\partial l > 0$, $\partial k/\partial S < 0$, $\partial k/\partial\lambda < 0$ величина $\widetilde{k}$ имеет представление

$$\widetilde{k} = \bigcup_{\alpha\in[0,1]} [\underline{k}_\alpha, \overline{k}_\alpha], \underline{k}_\alpha = (\underline{\alpha}_\alpha\,\underline{l}_\alpha\,\overline{S}_\alpha^{-1}\,\overline{\lambda}_\alpha^{-1})^{1/2},$$

$$\overline{k}_\alpha = (\overline{\alpha}_\alpha\,\overline{l}_\alpha\,\underline{S}_\alpha^{-1}\,\underline{\lambda}_\alpha^{-1})^{1/2}. \qquad (14)$$

С учетом полученных представлений (11) – (14) далее определяется нечетко-множественная характеристика

$$\widetilde{N} = \bigcup_{\alpha\in[0,1]} [\underline{N}_\alpha, \overline{N}_\alpha], \qquad (15)$$

$$\underline{N}_\alpha = \inf_{l\in[\underline{l}_\alpha, \overline{l}_\alpha]} (\underline{P}_\alpha - \overline{\sigma}_{P\alpha}\overline{\vartheta}_{0\alpha})((\overline{\alpha}_\alpha l \overline{S}_\alpha \overline{\lambda}_\alpha)^{1/2} \times$$

$$\times th((\overline{\alpha}_\alpha l \overline{S}_\alpha^{-1} \overline{\lambda}_\alpha^{-1})^{1/2}(\overline{h}_\alpha + \overline{S}_\alpha/l))\overline{\vartheta}_{0\alpha})^{-1}$$

$$\overline{N}_\alpha = \sup_{l\in[\underline{l}_\alpha, \overline{l}_\alpha]} (\overline{P}_\alpha - \underline{\sigma}_{P\alpha}\underline{\vartheta}_{0\alpha})((\underline{\alpha}_\alpha l \underline{S}_\alpha \underline{\lambda}_\alpha)^{1/2} \times$$

$$\times th((\underline{\alpha}_\alpha l \underline{S}_\alpha^{-1} \underline{\lambda}_\alpha^{-1})^{1/2}(\underline{h}_\alpha + \underline{S}_\alpha/l))\underline{\vartheta}_{0\alpha})^{-1}$$

в результате чего для N следует оценка $[\underline{N}_\alpha] \le N \le [\overline{N}_\alpha]$, либо, при задании $\widetilde{S}$ и N, может быть определено требуемое значение нечеткого параметра $\widetilde{h}$ высоты стержневых элементов

$$\widetilde{h} = \bigcup_{\alpha\in[0,1]} [\underline{h}_\alpha, \overline{h}_\alpha], \qquad (16)$$

$$\underline{h}_\alpha = \inf_{\substack{S\in[\underline{S}_\alpha, \overline{S}_\alpha]\\ l\in[\underline{l}_\alpha, \overline{l}_\alpha]\\ \lambda\in[\underline{\lambda}_\alpha, \overline{\lambda}_\alpha]\\ \alpha\in[\underline{\alpha}_\alpha, \overline{\alpha}_\alpha]\\ P\in[\underline{P}_\alpha, \overline{P}_\alpha]\\ \sigma_P\in[\underline{\sigma}_{P\alpha}, \overline{\sigma}_{P\alpha}]\\ \vartheta_0\in[\underline{\vartheta}_{0\alpha}, \overline{\vartheta}_{0\alpha}]}} (\alpha l S^{-1}\lambda^{-1})^{-1/2} \times$$

$$\times arcth((P - \sigma_P\vartheta_0)(N(\alpha l S\lambda)^{1/2}\vartheta_0)^{-1}) - S/l$$

$$\overline{h}_\alpha = \sup_{\substack{S\in[\underline{S}_\alpha, \overline{S}_\alpha]\\ l\in[\underline{l}_\alpha, \overline{l}_\alpha]\\ \lambda\in[\underline{\lambda}_\alpha, \overline{\lambda}_\alpha]\\ \alpha\in[\underline{\alpha}_\alpha, \overline{\alpha}_\alpha]\\ P\in[\underline{P}_\alpha, \overline{P}_\alpha]\\ \sigma_P\in[\underline{\sigma}_{P\alpha}, \overline{\sigma}_{P\alpha}]\\ \vartheta_0\in[\underline{\vartheta}_{0\alpha}, \overline{\vartheta}_{0\alpha}]}} (\alpha l S^{-1}\lambda^{-1})^{-1/2} \times$$

$$\times arcth((P - \sigma_P\vartheta_0)(N(\alpha l S\lambda)^{1/2}\vartheta_0)^{-1}) - S/l$$

а также могут быть найдены иные представляющие интерес в предпроектном моделировании характеристики разбросов параметров анализируемой радиаторной конструкции. Наряду с нечетко-множественными выходными характеристиками рассматриваемой модели, определяемыми на основе расчетных соотношений (11) – (16), могут быть также получены показатели их усреднения на основе дефаззификации соответствующих нечетких величин методом медиан либо методом центров тяжести.

Заключение

В результате представленных в работе исследований осуществлена разработка численно-аналитического нечетко-множественного метода учета разбросов в значениях исходных геометрических и физических параметров в математических тепловых расчетных моделях стержневых элементов радиаторов и создаваемых с их применением радиаторных конструкций для систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры.

Метод позволяет получать уточненные проектные данные о характеристиках стержневых конструктивных элементов радиаторов, обеспечивающих задаваемые уровни теплоотдачи и температуры перегрева радиоэлектронных устройств.

В качестве способа исследования рассматриваемой задачи для неопределенных исходных расчетных параметров реализуется переход к нечетко-множественным представлениям, рассматриваемым далее в качестве аргументов в функциональных соотношениях детерминистических вариантов анализируемых моделей, и получение соответствующих выходных параметров в нечетко-множественной форме на основе применения модифицированной $\alpha-$уровневой версии эвристического принципа обобщения.

Литература

1. Муратов А.В. Способы обеспечения тепловых режимов РЭС / А.В. Муратов, Н.В. Ципина. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2007. – 96 с.

2. Хайрнасов К.З. Моделирование и тепловой анализ электронных устройств космических аппаратов / К.З. Хайрнасов // Вестник Московского авиационного института. – 2013. – Т. 20, № 3. – С. 134–138.

3. Кофанов Ю.Н. Информационные технологии теплового и механического моделирования радиоэлектронных средств / Ю.Н. Кофанов, С.Ю. Сотникова. – М.: НИУ ВШЭ, 2014. – 88 с.

4. Садыхов Г.С. Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники / Г.С. Садыхов, В.П. Савченко, Н.И. Сидняев. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. – 382 с.

5. Муромцев Д.Ю. Конструирование блоков радиоэлектронных средств / Д.Ю. Муромцев, И.В. Тюрин, О.А. Белоусов, Р.Ю. Курносов. – М.: Лань, 2018. – 252 с.

6. Islamov I. Design of Radio-Electronic Means Taking into Account Electromagnetic, Thermal and Mechanical Characteristics / I. Islamov, E. Hunbataliyev, M. Binnatov, A. Zulfugarli // Easy Chair Preprint, no. 4872. – January 6, 2021. – 14 p. – https://easychair.org/publications/preprint/396k

7. Costa R.L. Evaluation of Inherent Uncertainties of the homogeneous Effective thermal Conductivity Approach in Modeling of Printed Circuit boards for Space Applications / R.L. Costa, V. Vlassov // Journal of Electronics Cooling and Thermal Control. – 2013. – Vol. 3. – P. 35–41.

8. Ермаков С.М. Метод Монте-Карло в вычислительной математике / С.М. Ермаков. – СПб: Невский диалект, 2009.– 192 с.

9. Chandrasekaran S. Applications of Fuzzy Number Mathematics / S. Chandrasekaran, E. Tamilmani // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. – 2015. – Vol. 2, issue 11. – P. 149–176.

10. Seresht N.G. Fuzzy Arithmetic Operations: Theory and Applications in Construction Engineering and Management / N.G. Seresht, A.R. Fayek // In: Fuzzy Hybrid Computing in Construction Engineering and Management. – Bingley: Emerald Publishing Limited, 2018. – P. 111–147. – https://doi.org/10.1108/978-1-78743-868-220181003

11. Нгуен, Куок Ши. Исследование моделей высокотемпературной термостабилизации с нечеткими параметрами / Нгуен Куок Ши, Чан Ба Ле Хоанг, С.В. Сторожев. – Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2019. – 216 с.

12. Storozhev S.V. Fuzzy-multiple estimates of the parameter uncertainty influence in the computing devices elements calculating theory / S.V. Storozhev, V.I. Storozhev, V.G. Vyskub, Duong Minh Hai, V.E. Bolnokin // Journal of Physics: Conference Series, vol. 1399, 2019, 044028. doi:10.1088/1742-6596/1399/4/044028

13. Bolnokin V.E. Accounting of data uncertainty in advanced technological models of design calculations of acoustoelectronic components from piezoelectric materials / V.E. Bolnokin, D.I. Mutin, E.I. Mutina, S.V. Storozhev, V.I. Storozhev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, vol. 862, 2020, 022006. doi:10.1088/1757-899X/862/2/022006

14. Bolnokin V.E. The models of thermoelastic deformation of thin elliptic boundary contours plates with accounting uncertainty factors / V.E. Bolnokin, V.I. Storozhev, Duong Minh Hai, D.I. Mutin // International Journal on Information Technologies & Security. – 2020. – Vol. 12, № 4. – P. 77–82.

Павлыш В.Н., Сторожев С.В., Номбре С.Б. Учет разброса параметров в тепловой модели стержневых элементов радиаторов систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры: метод нечетких множеств. *Рассматриваются вопросы применения аппарата теории нечетких вычислений при решении проблемы учета разбросов исходных геометрических и физических параметров в аналитической расчетной модели теплового отвода от корпуса радиоэлектронного устройства с применением конструкций ребристых либо игольчато-штыревых радиаторов. Задачей исследования является получение уточненных проектных данных о характеристиках стержневых конструктивных элементов радиаторов, обеспечивающих задаваемые уровни теплоотдачи и температуры перегрева устройства в зоне крепления радиатора. В качестве метода исследования рассматриваемой задачи предложено введение нечетко-множественных представлений* *для неопределенных исходных расчетных параметров, являющихся аргументами в функциональных соотношениях детерминистического варианта анализируемой модели, и получение соответствующих выходных параметров в нечетко-множественной форме на основе применения $\alpha -$уровневой модифицированной версии эвристического принципа обобщения.*

Ключевые слова: *радиоэлектронные устройства, тепловые режимы функционирования, радиаторные конструкции, стержневые элементы, расчетные тепловые модели, неопределенность исходных параметров, методы нечетких вычислений, эвристический принцип расширения.*

Pavlysh V., Storozhev S., Nombre S. Accounting of parameter scatter errors in the thermal model of rod elements for radiators of cooling systems radioelectronic equipment: a fuzzy-set method. *The issues of applying the apparatus of the theory of fuzzy calculations in solving the problem of taking into account the spread of initial geometric and physical parameters in the analytical calculation model of heat removal from the body of a radio-electronic device using finned or needle-pin radiator designs are considered. The objective of the study is to obtain updated design data on the characteristics of the core structural elements of radiators that provide specified levels of heat transfer and overheating temperature of the device in the radiator mounting area. As a method for studying the problem under consideration, it is proposed to introduce fuzzy-set representations for uncertain initial design parameters, which are arguments in the functional relationships of the deterministic version of the analyzed model, and obtain the corresponding output parameters in fuzzy-set form based on the use of a level-modified version of the heuristic generalization principle.*

Key words: *radio-electronic devices, thermal modes of operation, radiator structures, rod elements, calculation thermal models, uncertainty of initial parameters, fuzzy calculation methods, heuristic principle of generalization.*

Статья поступила в редакцию 20.10.2023
Рекомендована к публикации профессором Зори С. А.