

В.В. Жаднов

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ДОПУСКОВ НА ТЕМПЕРАТУРЫ КОРПУСОВ ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТОВ

В статье рассматриваются вопросы расчётной оценки допусков температур корпусов электрорадиоэлементов, установленных на печатной плате. Приводится описание методов расчета допусков и основные расчетные соотношения. Показана целесообразность применения метода Монте-Карло для расчётной оценки допусков температур корпусов электрорадиоэлементов, установленных на печатной плате.

Ключевые слова: электронные средства, допуски, температура, электрорадиоэлементы

Введение

Температура электрорадиоэлементов (ЭРЭ), установленных на печатных платах, является важнейшей характеристикой, определяющей показатели надежности электронных средств (ЭС). Поэтому одним из обязательных видов испытаний являются климатические испытания, в т.ч. направленные на определение устойчивости ЭС к тепловым воздействиям внешней среды. При проектировании ЭС конструктор закладывает такие решения, которые обеспечивают требования технических условий (ТУ) по температурным режимам ЭРЭ и механических элементов (МЭ) печатных узлов ЭС. Однако в процессе производства могут быть внесены определенные дефекты, которые нарушают расчетные режимы и, вследствие этого, ухудшают показатели надежности ЭС, что приводит к их отказам с соответствующими катастрофическими последствиями.

Среди таких дефектов могут присутствовать и латентные дефекты, которые сложно выявить традиционными методами контроля. Одним из возможных путей выявления таких дефектов является диагностирование печатных узлов (ПУ) по температурам корпусов элементов. Однако температуры корпусов элементов являются случайными величинами, т.к. зависят от параметров элементов, печатной платы, условий охлаждения и др. Поэтому при контроле качества ПУ по температурному полю необходимо знать не только номинальные температуры корпусов ЭРЭ но и диапазоны изменения этих температур (поля допусков).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-07-00422)

Методы расчета допусков

В настоящее время для расчета допусков на выходные характеристики ЭС применяются следующие методы, рекомендованные в ГОСТ Р 51901.5 [1]:

- Анализ наихудшего случая
- Имитационное моделирование

Анализ наихудшего случая (worst-case analysis – WCA) представляет собой детерминированный метод определения допусков на выходные характеристики (температуры корпусов ЭРЭ) на основе данных о номинальных значениях параметров ветвей тепловой модели, допусков на них и знака их коэффициентов чувствительности:

$$\text{sign} \left(\frac{dT_j}{dq_{i_0}} \right),$$

где: T_j – температура корпуса j -го ЭРЭ; q_{i_0} – номинальное значение i -го параметра модели ПУ.

Значения параметров ветвей тепловой модели для определения максимальных температур корпусов ЭРЭ определяется на основе соотношения:

$$q_{i_{max}} = \begin{cases} q_{i_0} + \Delta q_i, \text{ при } \text{sign} \left(\frac{dT_j}{dq_{i_0}} \right) = "+" \\ q_{i_0} - \Delta q_i, \text{ при } \text{sign} \left(\frac{dT_j}{dq_{i_0}} \right) = "-" \end{cases} \quad (1)$$

где: I – количество параметров модели ПУ; q_i – значение i -го параметра модели ПУ.
 – в качестве распределения вероятностей температур ЭРЭ и параметров тепловой модели используется нормальное распределение:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma(x) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{[x-m(x)]^2}{2 \cdot [\sigma(x)]^2}}$$

где: $f(x)$ – плотность вероятности; $m(x)$, $\sigma(x)$ – параметры распределения.

В этом случае допуски на температуры корпусов ЭРЭ определяются на основе следующих соотношений:

$$\Delta T_{j_{MAX}} = m(\delta T_j) + \chi \cdot \sigma(\delta T_j); \tag{5}$$

$$\Delta T_{j_{MIN}} = m(\delta T_j) - \chi \cdot \sigma(\delta T_j); \tag{6}$$

где: $m(\delta T_j)$ – математическое ожидание отклонения температуры корпуса j -го ЭРЭ; $\sigma(\delta T_j)$ – среднеквадратичное отклонение отклонения температуры корпуса j -го ЭРЭ; χ – квантиль функции нормального распределения.

Значение χ в формулах (5) и (6) определяется исходя из заданной доверительной вероятности (γ) по формуле:

$$\chi = \Phi^{-1}(\gamma),$$

где: Φ^{-1} – обратная функция нормированной функции Лапласа.

График нормированной функции Лапласа приведен на рис. 2.

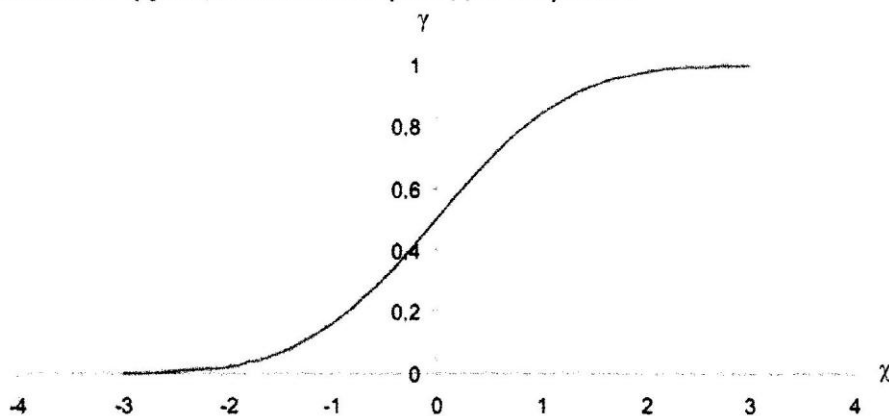


Рис. 2. Нормированная функция Лапласа

Значение $m(\delta T_j)$ в формулах (5) и (6) определяется на основе (4) по правилу вычисления моментов:

$$m(\delta T_j) = \sum_{i=1}^I \left[\frac{dT_j}{dq_{i_0}} \cdot m(\delta q_i) \right],$$

где: δq_i – отклонение i -го параметра модели ПУ; $m(\delta q_i)$ – математическое ожидание.

$$\delta q_i = (q_i - q_{i_0})$$

Значение $\sigma(\delta T_j)$ в формулах (5) и (6) определяется по формуле:

$$\sigma(\delta T_j) = \sqrt{D(\delta T_j)}, \tag{7}$$

где: $D(\delta T_j)$ – дисперсия.

Значение $D(\delta T_j)$ в формуле (7) определяется на основе (4) по правилу вычисления моментов:

$$D(\delta T_j) = \sum_{i=1}^I \left\{ \left[\frac{dT_j}{dq_{i_0}} \right]^2 \cdot D(\delta q_i) \right\},$$

где: $D(\delta q_i)$ – дисперсия.

$$\Delta T_j = m(y) = \int_0^{\infty} Y(X, X \sim L(X)) dX \approx \Delta T_j^* = \tilde{m}(y) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N \hat{y}_n = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N [Y(\hat{X}_n)]$$

где: ΔT_j^* – оценка математического ожидания допуска на температуру j -го ЭРЭ; \hat{y}_n – значение (реализация) отклонения температуры корпуса ЭРЭ в n -ом эксперименте; \hat{X}_n – вектор реализаций значений параметров тепловой модели ПУ в n -ом эксперименте.

Кроме того, также очевидно, что основу процесса статистического моделирования температур корпусов ЭРЭ составляет многократное выполнение операции проведения имитационного эксперимента (Блок 5 на рис. 3). Обобщенная схема имитационного эксперимента приведена на рис. 4.

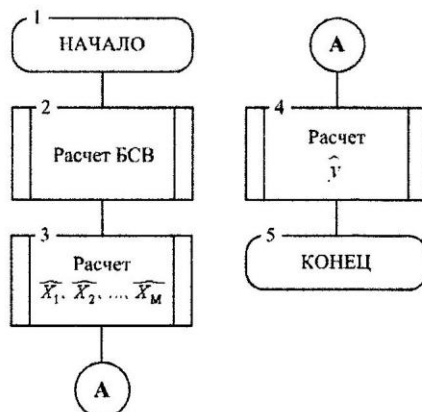


Рис. 4. Обобщенная схема имитационного эксперимента

Как видно из рис. 4, для проведения имитационного эксперимента необходимо выполнение следующих операций:

- расчет реализаций базовой случайной величины (БСВ) – Блок 2;
- расчет реализаций параметров тепловой (формальной) модели ПУ – Блок 3;
- расчет реализации выходных характеристик (отклонений температур корпусов ЭРЭ) – Блок 4.

Таким образом, применение программных средств моделирования тепловых процессов, протекающих в конструкциях ЭС и позволяющих проводить анализ чувствительности температур к изменению параметров модели, позволяет использовать любой из рассмотренных выше методов для расчетов допусков на температуры корпусов ЭРЭ. При этом следует иметь ввиду, что все эти методы, как и любые методы математического моделирования на ЭВМ, обладают ограниченной точностью. Кроме уже упоминавшейся погрешности из-за ограничения по числу имитационных экспериментов, а также погрешности датчика БСВ (БСВ, генерируемая в ЭВМ, является псевдослучайной величиной), присущих методу Монте-Карло, основными источниками погрешностей являются:

- погрешность математической модели тепловых процессов, протекающих в ПУ (в т.ч. погрешность аппроксимации зависимости температуры корпуса ЭРЭ от параметров тепловой модели ПУ рядом Тейлора);
- погрешность исходных данных (в т.ч. погрешность аппроксимации законов распределения параметров тепловой модели ПУ нормальным распределением).
- погрешность вычислений (ограниченность разрядной сетки ЭВМ);
- погрешность расчета реализаций значений статистически-зависимых параметров тепловой модели ПУ и др.

Вместе с тем, постоянное совершенствование методов математического моделирования, развитие средств вычислительной техники, а также постоянное повышение качества ЭРЭ и технологий производства ПУ позволяет говорить о том, что рассмотренные выше методы позволяют обеспечить точность, достаточную для инженерных расчетов, проводимых на ранних этапах проектирования.

Таким образом, рассмотренные выше методы могут использоваться для оценки допусков на температуры корпусов ЭРЭ, необходимых для контроля качества ПУ по температурному полю, однако применение для этих задач программных средств моделирования тепловых процессов делает метод

