

В.В. Жаднов

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ДОПУСКОВ 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 расчёта 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 определяются 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: Δq_i – допуск на i -й параметр модели ПУ.

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

$$q_{i_{\max}} = \begin{cases} q_{i_0} + \Delta q_i, & \text{если } \operatorname{sign}\left(\frac{dT_j}{q_{i_0}}\right) = "-" \\ q_{i_0} - \Delta q_i, & \text{если } \operatorname{sign}\left(\frac{dT_j}{q_{i_0}}\right) = "+" \end{cases} \quad (2)$$

В результате на основе (1) и (2) формируются два вектора параметров тепловой модели ПУ (Q_{\max} и Q_{\min}), которые являются входными данными для расчета предельных значений температур ЭРЭ. Для расчета температур используются соответствующие программные средства моделирования тепловых процессов, протекающих в конструкциях ЭС. На рис. 1, в качестве примера, приведены результаты расчета теплового поля ПУ в программном комплексе ТРИАНА [2].

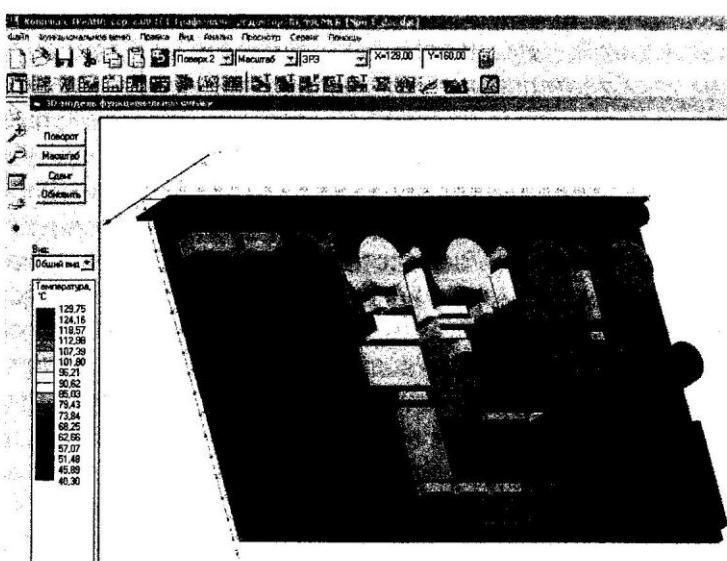


Рис. 1. Результаты расчета теплового режима печатного узла

Имитационное моделирование

Имитационное моделирование представляет собой вероятностный метод определения допусков на температуры корпусов ЭРЭ на основе данных о распределениях вероятностей значений параметров ветвей тепловой модели. Существуют два типовых метода моделирования:

- метод момента (вероятностных моментов);
- метод Монте-Карло.

Метод моментов представляет собой аналитический метод и основан на аппроксимации зависимости температуры корпуса ЭРЭ от параметров тепловой модели ПУ рядом Тейлора:

$$T_j = T_{j_0} + \frac{dT_j}{dq_{i_0}} \cdot (q_i - q_{i_0}) + \frac{dT_j}{dq_{i_0}^2} \cdot (q_i - q_{i_0})^2 + \dots \quad (3)$$

где: T_{j_0} – температура корпуса j -го ЭРЭ; при номинальных значениях параметров модели ПУ; I – количество параметров модели ПУ; q_i – значение i -го параметра модели ПУ.

В ГОСТ Р 51901.5 [1], наряду с ограничением, что необходима математическая модель тепловых процессов ПУ, пригодная для дифференцирования, также накладываются дополнительные ограничения, а именно:

- линейная аппроксимация зависимости (3):

$$T_j = T_{j_0} + \sum_{i=1}^I \left[\frac{dT_j}{dq_{i_0}} \cdot (q_i - q_{i_0}) \right], \quad (4)$$

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:

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

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

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

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

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

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.

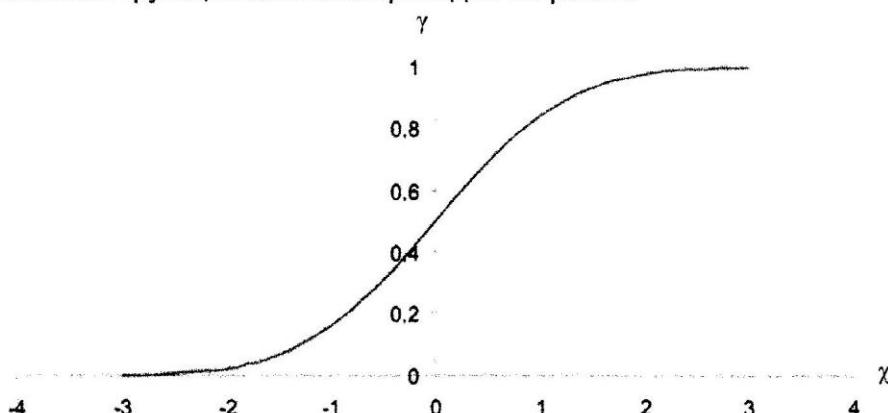


Рис. 2. Нормированная функция Лапласа

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:

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

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.

Следует отметить, что в ОСТ 4-Г0.012.035 [3] приведены расчетные соотношения для случаев аппроксимации функции T_j рядами Тейлора высших порядков и распределений δq_i , отличных от нормального. Кроме того, в работах [2, 4-8] рассмотрены особенности применения метода моментов для оценки допусков на выходные характеристики ЭС при комплексном воздействии внешних возмущающих факторов (ВВФ), использования квазитерминированных функций при нелинейных зависимостях параметров ЭРЭ от ВВФ и др., а также комбинированный метод расчета допусков, представляющий собой сочетание метода моментов и метода Монте-Карло.

Метод Монте-Карло представляет собой численный метод, при реализации которого значение каждого параметра тепловой модели ПУ выбирается случайным образом в соответствии с заданным распределением вероятностей.

В соответствии с ГОСТ 27.301 [9] при использовании метода Монте-Карло для расчета допусков необходимо синтезировать формальную модель, в качестве которой может использоваться та же модель тепловых процессов ПУ, что и в методе WCA, либо модель (3), которая, по сути, представляет собой макромодель по отношению к конечно-элементной (или конечно-разностной) модели.

Тогда алгоритм метода статистического моделирования допусков температур ЭРЭ может быть представлен в виде, приведенном на рис. 3.



Рис. 3. Алгоритм процесса статистического моделирования допусков температур ЭРЭ

Как видно из рис. 3, процесс статистического моделирования допусков температур ЭРЭ включает в себя следующие этапы:

- построение формальной модели тепловых процессов ПУ – Блок 2;
- проведение имитационного эксперимента на формальной модели – Блок 5;
- многократное (N раз) повторение имитационного эксперимента – Блоки 4-6;
- проведение статистической обработки результатов имитационных экспериментов (вычисление допусков на температуры ЭРЭ) – Блок 7.

Следует отметить, что число повторений имитационного эксперимента N определяет погрешность метода статистического моделирования. Поскольку N не может быть бесконечно большим, то это определяет ограничение по точности оценки ΔT методом Монте-Карло.

Таким образом (см. рис. 3) результат (допуск на температуру корпуса ЭРЭ – ΔT_j) находится как математическое ожидание выходной характеристики $y = |T_j - T_{j0}|$ (случайной величины), которая является неслучайной (квазидетерминированной) функцией случайной величины $X = \{q_1, q_2, \dots, q_I\}$, имеющей распределение $L[X]$, заданного плотностями вероятностей $f_1^3, f_2^3, \dots, f_I^3$:

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

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.

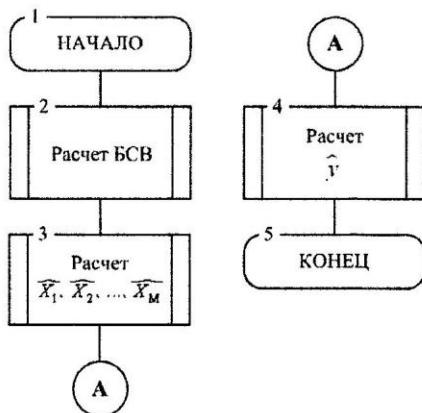


Рис. 4. Обобщенная схема имитационного эксперимента

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 реализаций 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

Монте-Карло наиболее простым и эффективным, как по точности (по сравнению с методом WCA), так и по трудоемкости (по сравнению с методами вероятностных моментов ОСТ 4-Г0.012.035).

Поэтому в разрабатываемом новом методе синтеза допусков на значения температур корпусов ЭРЭ, необходимых для выявления латентных дефектов ПУ, для расчета допусков будет использоваться метод Монте-Карло как для оценки разбросов мощностей тепловыделений ЭРЭ, так и для расчета отбраковочных допусков на температуры корпусов ЭРЭ.

Заключение

В заключение следует отметить, что классификация методов расчета допусков, приведенная в ГОСТ Р 51901.5, является достаточно условной. Так, метод WCA можно рассматривать как частный случай метода Монте-Карло при $N = 2$. Что же касается метода вероятностных моментов, то его вряд ли следует относить к имитационному (статистическому) моделированию, т.к. никаких экспериментов над формальной моделью в нем не предполагается. В этом плане более приемлема следующая классификация методов:

- аналитические методы, в которых оценки отклонений температур корпусов ЭРЭ не являются результатом статистической обработки результатов имитационных экспериментов (метод WCA, метод вероятностных моментов);
- статистические методы, в которых оценки отклонений температур корпусов ЭРЭ являются результатом статистической обработки результатов имитационных экспериментов (метод Монте-Карло и его модификации – метод матричных испытаний и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 51901.5-2005 Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности.
2. Жаднов В.В. Управление качеством при проектировании теплонаагруженных радиоэлектронных средств: учебное пособие. / В.В. Жаднов, А.В. Сарафанов – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2012. – 464 с. – Сер. «Библиотека инженера».
3. ОСТ 4-Г0.012.035-73. Аппаратура радиосвязи. Расчет надежности по постепенным отказам.
4. Фомин, А.В. Допуски в радиоэлектронной аппаратуре. / А.В. Фомин, В.Ф. Борисов, В.В. Чермошенский. – М.: Советское радио, 1973. – 131 с. – Сер. «Библиотека радиоконструктора».
5. Жаднов В.В. Метод исследования погрешности измерений радиоизмерительных устройств на ранних этапах проектирования. / В.В. Жаднов, Е.М. Мазница. // Цифровые модели в проектировании и производстве РЭС: Межвуз. сб. науч. тр. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. техн. ун-та, 1995. – с. 124-129. – Вып. 6.
6. Жаднов В.В. Методика анализа и обеспечения стабильности ИВЭП. / В.В. Жаднов, Е.М. Мазница. // Цифровые модели в проектировании и производстве РЭС: Межвуз. сб. науч. тр. – Пенза: Пенз. политехн. ин-т, 1990. – с. 46-49. – Вып. 2.
7. Жаднов В.В. Автоматизация расчётов стабильности микросборок. / В.В. Жаднов, В.Н. Куликов, И.Г. Шрамков. // Межвуз. сб. Ленингр. ин-т авиац. приборостр. – Л.: ЛИАП, 1983. – с. 78-82. – № 163.
8. Кофанов Ю.Н. Оценка стабильности функциональных характеристик преобразовательных устройств. / Ю.Н. Кофанов, Ю.К. Розанов, В.Н. Куликов, В.В. Жаднов. // Сб. «Электротехническая промышленность», Сер. «Преобразовательная техника». – Вып. 6(143). – М.: Информэлектро, 1982. – с. 1-4.
9. ГОСТ 27.301-95 Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.

Жаднов Валерий Владимирович,
канд. техн. наук, профессор кафедры
«Радиоэлектроника и телекоммуникации»
НИУ ВШЭ
E-mail: vzhadnov@hse.ru

V.V. Zhadnov

**METHODS OF CALCULATION OF TOLERANCES OF HOUSINGS FOR TEMPERATURE CORPS
RADIO ELECTRONIC ELEMENTS**

The article considers the issues of estimating the temperature tolerances of housings radio electronic elements mounted on the circuit board. Describes the methods of calculation of tolerances and key ratios calculated. The expediency of application of the Monte-Carlo method for calculation of tolerances temperature corps radio electronic elements mounted on the circuit board.

Keywords: *electronic equipment, tolerances, temperature, radio electronic elements.*

References

1. GOST R 51901.5-2005 Menedzhment riska. Rukovodstvo po primeneniyu metodov analiza nadezhnosti.
2. Zhadnov, V.V. Upravlenie kachestvom pri proektirovaniy teplonagruzhenykh radioelektronnykh sredstv: uchebnoe posobie. / V.V. Zhadnov, A.V. Sarafanov – M.: SOLON-PRESS, 2012. – 464 s. – Ser. «Biblioteka inzhenera».
3. OST 4-G0.012.035-73. Apparatura radiosvyazi. Raschet nadezhnosti po postepennym otkazam.
4. Fomin, A.V. Dopuski v radioelektronnoj apparature. / A.V. Fomin, V.F. Borisov, V.V. Chernoshenskij. – M.: Sovetskoe radio, 1973. – 131 s. – Ser. «Biblioteka radiokonstruktora».
5. Zhadnov, V.V. Metod issledovaniya pogreshnosti izmerenij radioizmeritel'nykh ustrojstv na rannikh ehtapakh proektirovaniya. / V.V. Zhadnov, E.M. Maznitsa. // Tsifrovye modeli v proektirovaniy i proizvodstve REHS: Mezhvuz. sb. nauch. tr. – Penza: Izd-vo Penz. gos. tekhn. un-ta, 1995. – s. 124-129. – Vyp. 6.
6. Zhadnov, V.V. Metodika analiza i obespecheniya stabil'nosti IVEP. / V.V. Zhadnov, E.M. Maznitsa. // TSifrovye modeli v proektirovaniy i proizvodstve RES: Mezhvuz. sb. nauch. tr. – Penza: Penz. politekhn. in-t, 1990. – s. 46-49. – Vyp. 2.
7. Zhadnov, V.V. Avtomatizatsiya raschytov stabil'nosti mikrosborok. / V.V. Zhadnov, V.N. Kulikov, I.G. Shramkov. // Mezhvuz. sb. Leningr. in-t aviats. priborostr. – L.: LIAP, 1983. – s. 78-82. – № 163.
8. Kofanov, Y.N. Otsenka stabil'nosti funktsional'nykh kharakteristik preobrazovatel'nykh ustrojstv. / Y.N. Kofanov, Y.K. Rozanov, V.N. Kulikov, V.V. Zhadnov. // Sb. «Ehlekrotehnicheskaya promyshlennost», Ser. «Preobrazovatel'naya tekhnika». – Vyp. 6(143). – M.: Informehlektron, 1982. – s. 1-4.
9. GOST 27.301-95 Nadezhnost' v tekhnike. Raschet nadezhnosti. Osnovnye polozheniya.

Zhadnov Valery Vladimirovich
*Ph.D., Professor of Radioelectronics
 and Telecommunications Department*
HSE
E-mail: vzhadnov@hse.ru