МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА РАННИХ ЭТАПАХ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В. В. ЖАДНОВ, Е. М. МАЗНИЦА

Московский институт электроники и математики

Расширение области применения измерительной техники, многообразие измерительных задач, рост ответственности функций, возлагаемых на средства измерений, приводят к необходимости тщательного изучения технических характеристик радиоизмерительных устройств, и в первую очередь их метрологических характеристик. Под метрологическими характеристиками будем понимать основную и дополнительную погрешности.

В соответствии с ГОСТ 16263 — 70 «Метрология. Термины и определения» точность радиоизмерительного устройства определяется его основной погрешностью — погрешностью измерения этим устройством в условиях, принятых в качестве нормальных, и при необходимости — изменением погрешности вследствие отступления (в заранее установленных пределах) от нормальных условий.

Следует особо подчеркнуть, что определенные, нормальные условия измерения или условия эксплуатации радиоизмерительного устройства, для которых следует вести проектирование и рассчитывать показатели точности и надежности, могут быть далеки от идеальных. Это особенно относится к радиоизмерительным устройствам специального назначения, на которые могут воздействовать значительные колебания температуры в течение рабочего дня, вибрации основания различных частот и амплитуд и многие другие факторы.

Таким образом, погрешность измерения определяется по следующей формуле:

$$\delta = \delta_{\text{осн}} + \delta_{\text{доп}}, \tag{1}$$

где $\delta_{\text{осн}}$ — основная погрешность измерения; $\delta_{\text{доп}}$ — дополнительная погрешность измерения.

Если в техническом задании нормируются основные и дополнительные погрешности как для различных измеряемых величин, так и для диапазонов их изменений, то (1) принимает вид:

$$\delta_i = \delta_{i\,\text{осн}} + \delta_{i\,\text{доп}}, \quad i = 1, \ldots, N, \tag{2}$$

где N определяется количеством основных и дополнительных погрешностей, нормируемых в ТЗ.

При исследовании основной и дополнительной погрешности ее зависимость от воздействия внешних возмущающих факторов удобно представить в следующем виде:

$$\delta_i(z_1, z_2, \ldots, z_l) = F_i(\delta_i(z_1), \delta_i(z_2), \ldots, \delta_i(z_l)), \qquad (3)$$

где $\delta_i(z_l)$ — зависимость погрешности i-й измеренной величины от l-го возмущающего фактора; F_i — зависимость, учитывающая мультипликативное действие возмущающих факторов на погрешность i-й измеренной величины; l — количество учитываемых возмущающих факторов.

В качестве такой зависимости удобно использовать кусочно-линейную квазидетерминированную функцию, вид которой определяется следующим выражением:

$$\delta_i(Z_l) = \delta_i(Z_l^\kappa) + \frac{(\delta_i(Z_l^{\kappa+1}) - \delta_i(Z_l^\kappa))(Z_l^{\kappa+1} - Z_l)}{Z_l^{\kappa+1} - Z_l^\kappa}, \qquad (4)$$

где $\delta_i(Z_l)$ — погрешность измерения i-й измеренной величины при значении l-го возмущающего фактора z, которое расположено в интервале между к-м и (к + 1)-м значениями.
Кусочно-линейная квазидетерминированная функция может быть представлена ее значениями, соответствующими концам интервалов дискретизации возмущающего фактора:

$$\delta_i(Z) = (\delta_i^{Z^1}, \delta_i^{Z^2}, \ldots, \delta_i^{Z^p}), \qquad (5)$$

где Z^1, Z^2, ..., Z^p — значения возмущающего фактора; p — количество значений.

Рис. 1 поясняет смысл такой функции на примере кусочно-линейной аппроксимации одной реализации случайного процесса.

Вместо закона распределения можно использовать числовые характеристики этого закона, наиболее удобными из которых являются вероятностные моменты. Поскольку закон распределения случайной величины δ_i в силу центральной предельной теоремы можно считать нормальным, для задания функции $\delta_i(Z)$ достаточно задать моменты первого и второго порядка:

$$m(\delta_1), m(\delta_2), \ldots, m(\delta_N),$$

$$\mu(\delta_i, \delta_j) = \begin{vmatrix} D(\delta_1), \mu(\delta_1, \delta_2), \ldots, \mu(\delta_1, \delta_N) \\ \mu(\delta_2, \delta_1), D(\delta_2), \ldots, \mu(\delta_2, \delta_N) \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ \mu(\delta_N, \delta_i), \mu(\delta_N, \delta_2), \ldots, D(\delta_N) \end{vmatrix} \qquad (6)$$

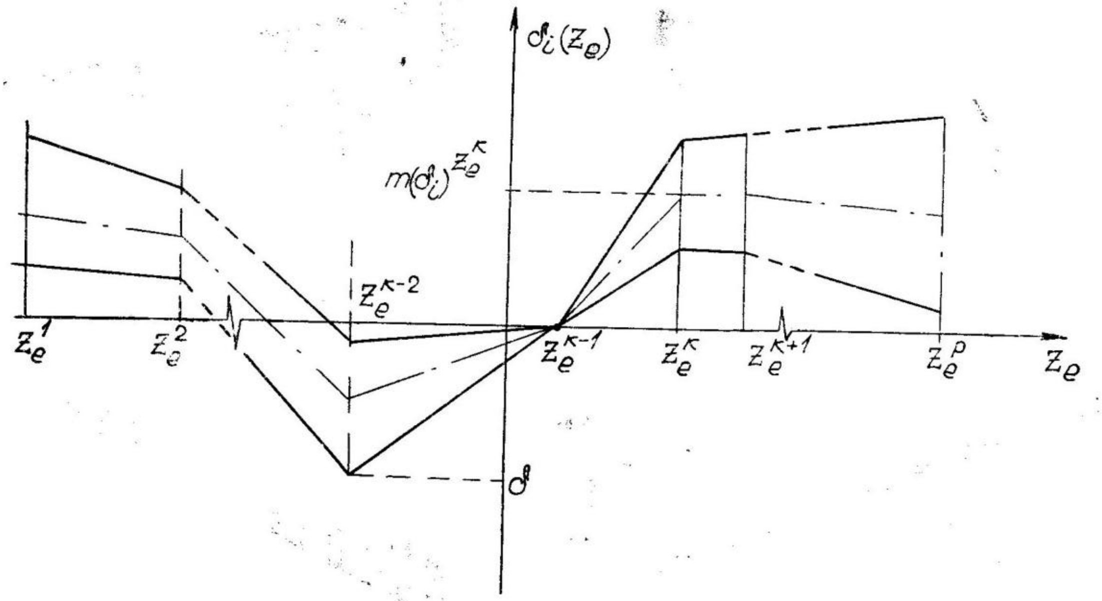

Рис. 1. Кусочно-линейная аппроксимация одной реализации случайного процесса изменения i-й метрологической характеристики от l-го возмущающего фактора Z

где $m(\delta_i)$ — математическое ожидание погрешности i-й измеренной величины; $\mu(\delta_i, \delta_j)$ — второй смешанный момент между погрешностями i-й и j-й измеренными величинами; $D(\delta_i)$ — дисперсия погрешности i-й измеренной величины.

Далее скажем, что математическое ожидание (среднее значение) погрешности i-й измеренной величины $m(\delta_i)$ представляет собой систематическую составляющую основной (дополнительной) погрешности измерения, а среднеквадратическое отклонение $\sigma(\delta_i) = \sqrt{D(\delta_i)}$ — среднюю квадратическую ошибку измерения, которая характеризует рассеивание случайной составляющей.

Погрешность измерения радиоизмерительных устройств при использовании кусочно-линейной квазидетерминированной функции для моделирования зависимостей метрологических характеристик от возмущающих факторов можно рассчитать на основе соотношения

$$\delta_i = \max_{s=1,\,s} (\delta_i^{Z_s}), \quad (7)$$

где S — число сочетаний значений возмущающих факторов; $\delta_i^{Z_s}$ — погрешность измерения радиоизмерительных устройств при s-м сочетании значений возмущающих факторов.

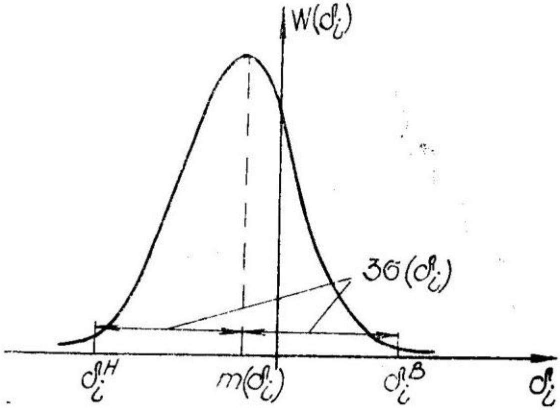

Рис. 2. Закон распределения i-й метрологической характеристики и ее числовые характеристики

Исходя из нормального закона распределения погрешность i-й измеренной величины радиоизмерительного устройства при s-м сочетании значений возмущающих факторов для доверительной вероятности $P = 0{,}9973$ можно определить по формуле (рис. 2):

$$\delta_i^{Z_s} = |m(\delta_i^{Z_s})| + 3\sigma(\delta_i^{Z_s}), \quad (8)$$

причем математическое ожидание и дисперсию погрешности измерения при комплексном воздействии возмущающих факторов можно получить, используя линейные соотношения:

$$m(\delta_i^{Z_s}) = \sum_{l=1}^{L} m(\delta_i^{Z_l^K});$$

$$D(\delta_i^{Z_s}) = \sum_{l=1}^{L} D(\delta_i^{Z_l^K}), \quad (9)$$

где L — число возмущающих факторов, учитываемых в расчетах; $m(\delta_i^{Z_l^\kappa})$, $D(\delta_i^{Z_l^\kappa})$ — математическое ожидание и дисперсия погрешности i-й измеренной величины при κ-м значении l-го возмущающего фактора.

Таким образом, для оценки метрологических характеристик радиоизмерительных устройств необходимы числовые характеристики значений функции (3), которые могут быть получены с помощью функциональной модели радиоизмерительных устройств, представленной на рис. 3 с позиции системного подхода.

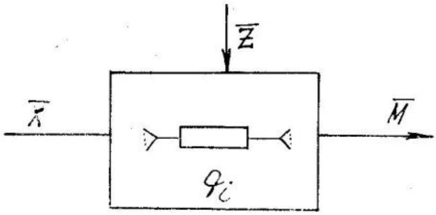

Рис. 3. Функциональная модель радиоизмерительного устройства, представленная с позиции системного подхода, где $\bar{Z}$ — вектор значений возмущающего фактора; g_i — параметр i-го элемента; $\bar{x}$ — вектор значений измеряемых величин; $\bar{M}$ — вектор измеренных характеристик

Различные методы функционального моделирования позволяют представить зависимость измеренных характеристик от внутренних параметров элементов радиоизмерительных устройств при заданном векторе измеряемых величин как

$$M_i = f_i(q_1, q_2, \dots, q_n), \tag{10}$$

где n — количество параметров элементов радиоизмерительных устройств; S_i — некоторая зависимость измеренных характеристик от внутренних параметров элементов радиоизмерительных устройств (функция преобразования).

Однако при исследовании погрешности измерения удобнее использовать ее разложение в ряд Тейлора. Ограничиваясь линейными членами разложения этого ряда, получим

$$\delta_i = \sum_{j=1}^{n} S_{q_j}^{M_i} \delta_{q_j}, \tag{11}$$

где $S_{q_j}^{M_i} = \frac{\partial M_i}{\partial_{q_j}} \frac{q_j}{M_i}$ — относительная функция параметрической чувствительности измеренной величины к изменению j-го элемента.

Чтобы получить выражение для оценки моментов параметров функции (3), необходимо применить к (11) правило вычисления моментов:

$$m(\delta_i^{Z_l^\kappa}) = \sum_{j=1}^{n} S_{q_j}^{M_i} m(\delta_{q_j}^{Z_l^\kappa}),$$

$$\mu(\delta_i^{Z_l^\kappa}, \delta_j^{Z_m^d}) = \sum_{p=1}^{n} \sum_{r=1}^{n} S_{q_p}^{M_i} S_{q_r}^{M_j} \mu(\delta g_{q_p}^{Z_l^\kappa}, \delta_{q_r}^{Z_m^d}). \tag{12}$$

Моменты параметров моделей нелинейных элементов (диодов, транзисторов и др.) рассчитываются методом Монте-Карло на основе соответствующих зависимостей, связывающих параметры ветвей топологических моделей элементов и первичных параметров, вида

$$q = Y(p_1, p_2, \ldots, p_m, E), \tag{13}$$

где $p_1, p_2, \ldots, p_m$ — первичные параметры элементов; E — независимая переменная; m — количество параметров элемента.

Например, для параметра модели диода:

$$q = E/(p_1^*(\exp(E/p_2) - 1)),$$

где q — нелинейное сопротивление диода; p_1 — тепловой ток; p_2 — температурный потенциал; E — напряжение на p-n-переходе.

Для моделирования зависимостей параметров элементов от возмущающих факторов удобно использовать квазидетерминированные функции:

$$p_m(Z) = f_m(a_1, a_2, \ldots, a_к, Z), \tag{14}$$

где p_m — m-й параметр элементов; f_m — некоторая известная аналитическая зависимость; $a_1, a_2, \ldots, a_к$ — случайные коэффициенты.

Например, для температурной зависимости теплового тока диода

$$p(Z) = a_1 * (Z/293) ** 3 * \exp(a_2 * (1/293 - 1/Z)),$$

где p — тепловой ток; Z — температура p-n-перехода; a_1 — тепловой ток при температуре 20°C; a_2 — температурный коэффициент теплового тока.

Достоинством функции (14) является то, что она позволяет описывать реально существующие нелинейные процессы изменения параметров элементов с помощью небольшого количества характеристик. В качестве зависимостей f_m можно использовать известные зависимости параметров элементов от возмущающих факторов (температурные, временные и т. д.), приведенные в нормативно-технической и справочной литературе.

Таким образом, приведенные выше соотношения представляют собой метод исследования погрешности измерений радиоизмерительных устройств. Разработанный метод был использован на Мытищинском НИИ радиоизмерительных приборов для оценки основной и дополнительной погрешности измерения ряда проектируемых радиоизмерительных устройств.
