ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОВЕРИТЕЛЬНОГО ИНТЕРВАЛА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ УСТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Ю.А. Козусев

Гомельский политехнический институт им.П.О. Сухого, Беларусь

Необходимость проведения высокоточных измерений длительности переходного процесса электрического сигнала возникает при решении широкого класса задач: контроль динамических параметров высокоразрядных ЦАП и **АЦП,** ОУ, УВХ, компараторов, цифровых ИМС, различных датчиков и измерительных преобразователей.

При определении $t_{уст}$ как момента последнего вхождения сигнала U(t) в зону установления $\pm\varepsilon_0$ относительно установившегося значения одна из составляющих погрешности обусловлена неточностью формирования зоны установления. Эта погрешность включает погрешность определения и компенсации установившегося сигнала, погрешность определения и формирования ширины зоны установления (особенно для высокоразрядных ЦАП с токовым выходом и прецизионных ОУ), напряжение смещения сравнивающего устройства (дифференциальный усилитель, компаратор, осциллограф), температурный и временной дрейф влияющих величин.

Погрешность задания зоны установления с учетом шума элементов измерительного канала и как функция достаточно большого числа влияющих величин является случайной величиной и требует оценки статистических параметров.

Графическую связь между погрешностью измерения Δ_t и распределенной по нормальному закону с нулевым матожиданием погрешностью задания зоны Δ_ε поясняет рис.1. Значению $\Delta_\varepsilon \to -\varepsilon_0$ соответствует значение измеряемой величины $\Delta_t \to \infty$, а при $\Delta_\varepsilon < -\varepsilon_0$ процесс измерения невозможен, так как уровни сформированной зоны "не захватывают" установившееся значение сигнала. Математически условие реализуемости можно сформулировать в виде $\Delta_\varepsilon > -\varepsilon_0$.

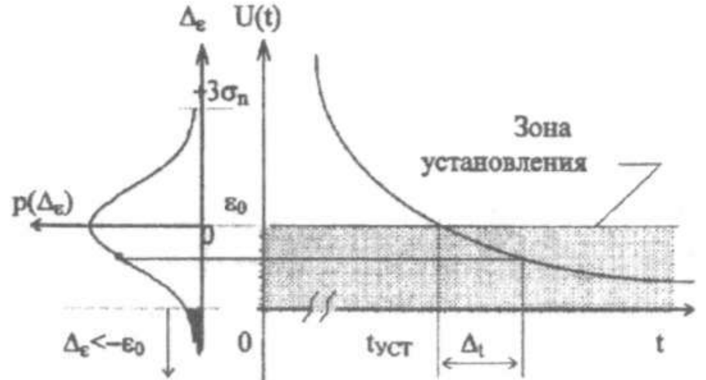

Рис. 1

Центр $p(\Delta_\varepsilon)$ при отсутствии систематической погрешности формирования зоны совпадает с уровнем ε_0. Ввиду исключения части значений Δ_ε (заштрихованный участок на рис.1) исходный закон $p(\Delta_\varepsilon)$ следует считать усеченным нормальным и возникает необходимость определить доверительный интервал величины Δ_t из-за отбрасывания части значений амплитудной погрешности.

Интерпретируя в условиях решаемой задачи известное "правило трех сигм", то есть полагая $\varepsilon_0=3\sigma_n$, получим вероятность $p(-\infty< \Delta_\varepsilon \le -3\sigma_n)=0.5-\Phi(3) = 0.00135$.

Следовательно, если величина с.к.о. случайной погрешности Δ_ε составляет 1/3 от номинального уровня ε_0, то теряется 0.14% всех возможных значений Δ_ε. Значение $\Delta_\varepsilon=-\varepsilon_0$ при $\sigma_n=\varepsilon_0/3$ есть 0.14 %-ная квантиль, а доля не теряющихся значений - доверительная вероятность - авна 1–0.00135=0.99865. При одностороннем выходе погрешности за границы доверительного интервала в метрологии принято использовать доверительную вероятность 0.95, что соответствует доле потерянных значений 0.05, значению функции Лапласа $\Phi(x)=0.45$ и величине аргумента $x=\varepsilon_0/\sigma_n=1.65$. Доверительная вероятность 0.95 реализуется таким образом при значении с.к.о. $\sigma_n=0.6\varepsilon_0$.

Основываясь на функциональной связи между амплитудной Δ_ε и временной Δ_t погрешностями при экспоненциальной модели U(t):

$$\Delta_t = -\tau \cdot \ln\left(1 + \Delta_\varepsilon/\varepsilon_0\right) = -\tau \cdot \ln\left(1 + \delta_\varepsilon\right),$$

получим плотность вероятности временной погрешности Δ_t

$$g(\Delta_t) = \frac{\exp\left(-\Delta_t/\tau\right)}{C(\delta)\tau\delta\sqrt{2\pi}}\left\{\exp\left[-\frac{1}{2\delta^2}\left(1-\exp\left(-\Delta_t/\tau\right)\right)\right]\right\}, \quad -\infty < \Delta_t < \infty$$

где τ – постоянная времени функции U(t) на конечном участке,

δ_ε– относительная погрешность формирования зоны,

$\delta=\sigma_n/\varepsilon_0$ – нормированное с.к.о. погрешности Δ_ε,

$C(\delta) = 0.5\left\{1+Erf\left[1/\delta\sqrt{2}\right]\right\}$ –нормирующий множитель.

Определены значения параметра δ, при которых $C(\delta)$ принимает применяемые в метрологии значения доверительного интервала:

	0.3236	0.3333	0.3594	0.4299	0.4869	0.608	0.7803
$C(\delta)$	0.9990	0.9986	0.9973	0.9900	0.9800	0.9500	0.9000

Уменьшение доверительного интервала от 1 (при $\sigma_n \ll \varepsilon_0$ и $\delta \to 0$) до принятого, например, значения 0.95 при измерении времени установления можно определить как методическое, так как оно вызвано ограничением области определения исходной плотности $p(\Delta_\varepsilon)$.