

УДК 621.317.

Ю.М. ФЕДЮШКО, канд. техн. наук, доц., ХНТУСХ, Харьков
А.Д. ЧЕРЕНКОВ, д-р техн. наук, проф., ХНТУСХ, Харьков

АНАЛИЗ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БИООБЪЕКТОВ

Проведена оцінка і аналіз випадкових похибок рефлектометра.

Проведена оценка и анализ случайных погрешностей рефлектометра.

Постановка проблемы.

Внедрение импульсной рефлектометрии в практику исследования диэлектрических параметров биообъектов на сверхвысоких частотах выдвигает на первый план проблемы метрологического обеспечения импульсных рефлектометрических систем.

К числу таких проблем относятся:

- определение, оценка и анализ погрешностей;
- нормирование метрологических характеристик;
- разработка методов и средств поверки систем.

Анализ предшествующих исследований.

В некоторых работах [1, 2] в общем виде рассмотрены основные погрешности средств измерения. Однако следует отметить, что результаты полученные в этих работах не могут быть использованы для анализа погрешностей импульсного рефлектометра.

Целью настоящей статьи является анализ и оценка случайных погрешностей рефлектометра используемого для измерения диэлектрических параметров биообъектов.

Анализ систематической погрешности.

На результаты измерений диэлектрических параметров биообъектов, с помощью импульсного рефлектометра, могут оказывать ряд факторов, обусловленных искажением импульсных сигналов в конструктивных элементах зондируемого волновода, техническим несовершенством отдельных узлов импульсно-рефлектометрической системы и методом обработки регистрируемых рефлектограмм.

В этой связи при внедрении метода импульсной рефлектометрии в метрологическую практику радиоизмерений задача анализа основных

составляющих случайной и систематической погрешностей всех этапов его реализации является весьма актуальной.

Систематические погрешности возникают из-за нелинейностей по каналам "X" "Y", рассогласования импедансов в измерительном тракте, потерь в конструктивных элементах зондируемого волновода, а также неточности временной и амплитудной калибровок.

Погрешности из-за нелинейностей по каналам "X" "Y" относятся к классу систематических погрешностей и связаны с характеристиками стробоскопического преобразователя, усилителя вертикального отклонения, аналого-цифрового преобразователя, а также каскадов развертки по оси времени и цифро-аналогового преобразователя. Для установления возникающей при этом погрешности измерения КО воспользуемся теоремой нелинейного преобразования времени [3].

Предполагая, что функция изменения шага квантования известна, то на основе теоремы Котельникова можно сформировать сигнал помехи:

$$\Theta(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \mu_n \frac{\sin[\omega_{\text{найкв}}(\tau - n\Delta t)]}{\omega_{\text{найкв}}(\tau - n\Delta t)}, \quad (1)$$

где $\mu_n = \Theta(n\Delta t)$ – временная нестабильности момента n -ой ординаты.

Положим далее, $t = \tau - \Theta(\tau)$ и будем считать, что существует однозначная обратная связь $\tau = \gamma(t)$, то с учетом того, что $\tau = n\Delta t$ получаем $t = n\Delta t - \Theta(n\Delta t) = n\Delta t - \mu_n$.

Отсюда следует, что нелинейное преобразование времени осуществляет трансформацию моментов отсчетов $n\Delta t - \mu_n$ расположенных на оси t , в моменты времени $n\Delta t$ на оси τ . Положив равенство $f(t) = f[\tau = \Theta(\tau)] \equiv q(\tau)$, имеем $q(n\Delta t) = f(n\Delta t - \mu_n)$. Так как значение исследуемой функции $f(n\Delta t - \mu_n)$ определены экспериментально, то $q(t)$ становится тоже известной. Предполагая, что $\Theta(\tau)$ достаточно мало, то при разложении $f[\tau - \Theta(\tau)]$ в ряд Тейлора можно пренебречь членами высших порядков:

$$q(t) = f[\tau - \Theta(\tau)] \approx f(\tau) - \Theta(\tau)f'(\tau). \quad (2)$$

Приняв, что $\Theta(\tau)$ и $j\omega F(j\omega)$ являются преобразованиями Фурье, соответственно, то на основании последнего соотношения и теоремы о свертке в частной области заключаем, что:

$$\sigma(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau - \int_{-\infty}^{\infty} \Theta(\tau)f'(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau \approx F(j\omega) - \frac{1}{2\pi}[j\omega F(j\omega) \cdot \Theta(j\omega)]. \quad (3)$$

Так как функция рефлектограммы $f(\tau)$ ограничена частотой

ω_{max} , а функция $\Theta(\tau)$ – частотой $\omega_{найкв}$, то спектр свертки в частной области будет ограничен частотой $(\omega_{max} + \omega_{найкв})$. Вследствие этого возникает погрешность вычисления спектра за счет появления высокочастотных составляющих, вызванных неравномерным стробированием. Абсолютное значение погрешности измерения спектра, определенное по методу интерференционных искажений, определится формулой [4]:

$$\Delta_{|F(j\omega)|}^{нелин} = \int_{-\infty}^{\infty} \Theta(\tau) f'(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, что погрешность измерения однозначно определяется нелинейностью системы и функцией рефлектограммы. Она может быть количественно оценена и программным путем в какой-то степени может быть скомпенсирована.

Количественная оценка данных погрешностей может быть определена путем калибровки вертикального и горизонтального каналов стробоскопического преобразователя по государственной поверочной схеме эталонов постоянного напряжения и времени (частоты) соответственно.

Калибровка рефлектора по оси Y осуществляется следующим образом. На вход рефлектометра подается набор известных напряжений от рабочего эталона постоянных напряжений. Одновременно процессор рефлектометра регистрирует реакцию осциллографа на эти уровни постоянных напряжений и вычисляет набор поправочных коэффициентов шкалы напряжений, видимых на экране осциллографа.

В дальнейшем при записи импульсного сигнала по этим поправочным коэффициентам устанавливается правильный масштаб по оси Y рефлектометра путем линейной интерполяции.

Погрешность измерения амплитуды импульсов прямоугольной формы может быть определена выражением:

$$\Delta U = \sqrt{\delta_0^2 + \delta_H^2 + \delta_{виз.в}^2}, \quad (5)$$

где δ_0 – погрешность изменения напряжения (статическая); δ_H – неравномерность переходной характеристики; $\delta_{виз.в}$ – визуальная погрешность, вычисляемая по формуле

$$\delta_{виз.в} = \sqrt{\delta_{совм}^2 + \delta_{отсч}^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{5} \frac{b}{h} \cdot 100\right)^2 + \left(\frac{1}{3} \frac{b}{h} \cdot 100\right)^2} \approx \frac{0,4b}{h} \cdot 100, \quad (6)$$

где $\delta_{совм}^2$ – погрешность совмещения линии с делением шкалы, равная

$1/5$ ширины линии (луча), мм; $\delta_{\text{отсч}}^2$ – погрешность отсчета положения линии относительно деления шкалы, равная $1/3$ ширины линии (луча), мм; b – ширина линии (луча), мм; h – размер изображения, мм.

Визуальная погрешность при размере изображения на экране $2...5$ см составляет $0,4...1$ %. Погрешность источника калибровочных сигналов $0,3...1$ %.

Неравномерность переходной характеристики для осциллографа разных видов (универсальных, скоростных) лежит в пределах $1...4$ %. Погрешность совмещения линии луча с рисками шкалы 1 %. Таким образом, при этих условиях общая погрешность амплитудных измерений по методу калиброванных шкал составит $2,8...3,3$ %.

Аналогичное значение погрешностей имеет место и при временных измерениях. Поэтому применение таких осциллографов, используемых при измерениях методик калибровки шкал, в СВЧ импульсных рефлектометрических системах для исследования диэлектрической проницаемости биообъектов нежелательно, так как не обеспечивается необходимая точность измерений.

Выводы. При измерении исследуемых сигналов с помощью курсорного метода и при наличии газоразрядной индикаторной панели визуальная погрешность практически исключается. Также следует отметить, что при измерении относительных значений параметров с неизменным коэффициентом вертикального отклонения погрешности калибровки Y – тракта не оказывают влияния на получаемый результат. Общая погрешность в этом случае составит не более 1 %. Калибровка горизонтальной оси рефлектометра выполняется с помощью генератора меток времени, откалиброванного по государственному эталону времени.

Список литературы: **1.** Гольденберг Л.М. Импульсные и цифровые устройства. – М.: Связь, 1973. – 33 с. **2.** Морчин Л.А. Наносекундная импульсная техника / Л. Морчин, Г. Глебович. – М.: Связь, 1966. – 68 с. **3.** Пушков К.А. Функциональные ряды в теории нелинейных систем. – М.: Наука, 1076. – 448 с. **4.** Витвицкий В.Г. Исследование интермодуляционных искажений в усилителях на полевых транзисторах с барьером Шотки / В. Витвицкий, Г. Гринберг, Л. Могилевская, Ю. Хотунцов // Радиотехника и электроника. – 1984. – Т. 29, № 2. – С. 351-356.

Поступила в редколлегию 10.03.2009