

ОЦІНКА ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БІООБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ІМПУЛЬСНОЇ РЕФЛЕКТОМЕТРІЇ

Косуліна Н. Г., Гаркавенко О. С.

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

Приведено розрахунки похибки вимірювання частотних характеристик біооб'єктів за допомогою методу імпульсної рефлектометрії.

Постановка проблеми. Впровадження імпульсної рефлектометрії в практику дослідження біооб'єктів на надвисоких частотах висуває на перший план проблеми метрологічного забезпечення імпульсних рефлектометричних систем. До числа таких проблем відносяться: визначення, оцінка та аналіз похибок; нормування метрологічних характеристик; розробка методів і засобів перевірки (калібрування) систем.

У вимірній техніці при аналізі процесу вимірювань прийнято до числа основних похибок вимірювання відносити інструментальну похибку і похибку методу вимірювання основних параметрів [1, 2].

При вимірюванні параметрів кола і трактів в тимчасовій області [1, 2] до інструментальним похибкам відносяться похибки, які пов'язані з реєстрацією піко-секундних сигналів, які викликані: нелінійністю стробоскопічного перетворення напруги; нелінійністю тимчасової розгортки; тимчасовою нестабільністю зчитування сигналів; наявністю адитивних випадкових складових перетвореного сигналу.

Інструментальні похибки можна оцінити простими технічними засобами. Похибка, що викликається нелінійністю перетворення напруги, може бути оцінена за допомогою джерела прецизійних рівнів напруги. Похибка, що викликається нелінійністю розгортки, оцінюється за допомогою генератора гармонійних сигналів і частотоміра. Нестабільність синхронізації і рівень адитивних випадкових складових визначаються безпосередньо на стробоскопічному перетворювачі.

Мета статті. Оцінити процес визначення похибки вимірювання основних параметрів через інструментальну похибку і формули обчислення відповідних основних параметрів.

Основні матеріали дослідження. Оцінимо похибку вимірювання частотних характеристик досліджуваних об'єктів. Частотна характеристика чотирипольника при дослідженні в імпульсному рефлектометрії визначається виразом [3]:

$$K(j\omega) = S_0(j\omega) / S_3(j\omega), \quad (1)$$

де $S_3(j\omega)$ – спектр зонduючого сигналу; $S_0(j\omega)$ – спектр відгуку.

Тому для оцінки точності вимірювань частотних характеристик слід оцінити точність обчислення спектра по спостережуваному сигналу. Знаючи похибки обчислення спектрів, можна підрахувати похибку вимірювання частотної характеристики. Так, у разі, коли

частотна характеристика визначається діленням комплексних спектрів, з виразу (1), отримаємо, що відносна похибка вимірювання амплітудно-частотної характеристики і рівна їй абсолютна похибка вимірювання фазо-частотної характеристики визначаються виразом:

$$\sigma_K^2 / K^2(\omega) = \sigma_\phi^2 = \sigma_0^2 / S_0^2(\omega) + \sigma_3^2 / S_3^2(\omega),$$

де $\sigma_K^2, \sigma_\phi^2, \sigma_0^2, \sigma_3^2$ – дисперсії амплітудно- і фазо-частотної характеристик, спектральної щільності відклику і спектральної щільності зонduючого сигналу відповідно; S_0 і S_3 – модулі спектра відклику і зонduючого сигналу.

Наведений вираз наближений і справедливий при великому відношенні сигнал-шум ($\sigma_0 / S_0 \ll 1, \sigma_3 / S_3 \ll 1$). Оцінка точності обчислення спектра сигналу обчислюється за допомогою дискретного перетворення Фур'є:

$$C(jk) = \sum_{n=0}^{K-1} u(n) e^{-jkn2\pi/K}. \quad (2)$$

При використанні стробоскопічного перетворювача спостережуваний сигнал $u(n)$ може бути представлений у вигляді адитивної суми сигналу $u_0(n)$ і шуму $e(n)$, який з високим ступенем точності може бути апроксимований білим гауссовим шумом [3]:

$$u(n) = u_0(n) + e(n). \quad (3)$$

Так як дискретне перетворення Фур'є лінійне, то похибка обчислення спектральних компонентів визначається виразом:

$$N(jk) = \sum_{n=0}^{K-1} e(n) e^{-jkn2\pi/K} \quad (4)$$

Для дисперсії похибки спектральної компоненти можна записати вираз:

$$\sigma_N^2 = \langle N(jk)N(-jk) \rangle = \sum_{n=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{K-1} \langle e(m)e(n) \rangle e_j^{(m-n)k2\pi/K}. \quad (5)$$

Дужки $\langle \rangle$ означають усереднення. Так як значення $e(m)$ і $e(n)$ для білого гауссового шуму некорельовані, то $\langle e(n)e(m) \rangle = 0$ при $m \neq n$.

Враховуючи що $\langle e^2(n) \rangle = \sigma^2$ (σ^2 – дисперсія шуму), отримаємо вираз для дисперсії похибки обчислення спектра:

$$\sigma_N^2 = K\sigma^2. \quad (6)$$

Ця оцінка виявляється тривіальною; дисперсії для всіх K відгуків тимчасової функції складаються, але вона не може бути поліпшена, якщо справедлива модель білого гауссовського шуму.

За знайденою дисперсією комплексних спектральних компонент можна визначити дисперсію модуля і фази цих компонент. На рис. 1 представлена комплексна площина, на якій зображені компоненти спектра $C(jk)$ у вигляді вектору і шум з дисперсією $\sigma_N^2 = K\sigma^2$ у вигляді сфери радіусом $\sigma_N/\sqrt{2}$.

При такому зображенні квадратурні компоненти шуму мають дисперсію $\sigma_N^2/2$ (сумарна дисперсія цих компонент виявляється рівною σ_N^2). З рисунку 1 видно, що при малому шумі дисперсія модуля компоненти дорівнює дисперсії однієї з квадратурних компонент:

$$\sigma_C^2 = \sigma_N^2/2 = 0,5K\sigma^2, \text{ а дисперсія фази:}$$

$$\sigma_\phi^2 = \sigma_N^2/2|C^2(jk)|^2 = K\sigma^2/2|C(jk)|^2. \quad (7)$$

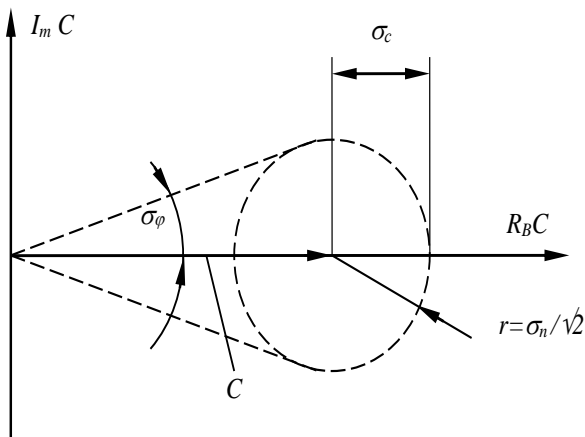


Рисунок 1 – Подання комплексної компоненти спектра $C(jk)$ на комплексній площині

Більш точні результати можна отримати на основі аналізу розподілу модуля і фази суми гармонійного сигналу і нормального шуму. Використовуючи відомі результати [3], можна записати формули, справедливі при малій дисперсії шуму:

$$\langle |C(jk)| \rangle = |C(jk)| \left[1 - \frac{\sigma_N^2}{4|C(jk)|^2} \right]; \quad (9)$$

$$\sigma_C^2 = \frac{\sigma_N^2}{2} \left[1 - \frac{\sigma_N^2}{4|C(jk)|^2} \right], \quad \sigma_\phi^2 = \frac{\sigma_N^2}{2|C(jk)|^2}. \quad (10)$$

Більш точні результати відрізняються від наближених наявністю зміщення в оцінці модуля і дещо зміненою дисперсією σ_C^2 , проте поправки мають порядок $(\sigma_N/C(k))^2$ і при малому шумі можуть не враховуватися.

Висновки. Таким чином, похибки обчислення модуля і фази спектральних компонент можуть визначитися за формулами (7) і (8) відповідно. Зауважимо, що хоча дисперсії помилок зростають з ростом числа дискретних відкликів K , але при цьому приблизно пропорційна числу K збільшуються амплітуди спектральних компонент, що призводить до збільшення приблизно в \sqrt{K} раз точності обчислень. Наведені аналітичні вирази не вичерпують всіх питань оцінки точності вимірювань частотних характеристик, так як крім шумів стробоскопічного перетворювача необхідно враховувати багато інших джерел похибок вимірювань. Тому важливо розглянути методи атестації вимірювальної системи, що використовує імпульсні сигнали.

Список використаних джерел

1. Юдин М. Ф. Основные термины в области метрологии. Словарь-справочник. М.: Стандарты, 1989, 113 с.
2. Федюшко Ю. М. Сучасні пристрої рефлектметрії // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА, 2007. – Вип. 7. – С. 15 – 25.
3. Федюшко Ю. М. Вимірювання діелектричної проникності біологічних об'єктів в широких частотних діапазонах / Ю. М. Федюшко // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград: КНТУ, 2009. – Вип. 39. – С. 347 – 356.

Анотация

ОЦЕНКА ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БИООБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Косулина Н. Г., Гаркавенко А. С.

Приведены расчеты ошибки измерения частотных характеристик биообъектов с помощью методов рефлектметрии

Abstract

EVALUATION OF ERROR OF MEASUREMENT OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF BIOLOGICAL OBJECTS USING THE METHOD OF PULSE REFLECTOMETRY

N. Kosulina, O. Harkavenko

The calculations of the measurement error of frequency characteristics of biological objects using the method of pulse reflectometry are considered.