

УДК 621.317.73

ОЦІНЮВАННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЄМНІСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

© Євген Походило, 2000

Державний університет "Львівська політехніка", кафедра "Метрологія, стандартизація та сертифікація",
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Проаналізовано похибки активних перетворювачів CLR-параметрів в напругу, зумовлених неінформативним входним імпедансом. Отримано аналітичні залежності складових векторної похибки для перетворювачів із звичайною та оберненою функціями перетворення.

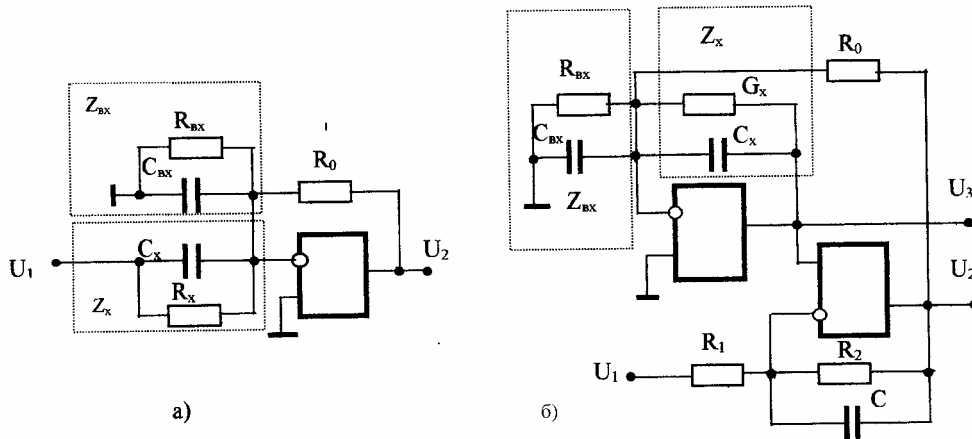
Проведен анализ погрешностей активных преобразователей CLR-параметров в напряжение, обусловленных неинформативным входным импедансом. Получены аналитические зависимости составляющих векторной погрешности для преобразователей с обычной и обращенной функциями преобразования.

The CLR-parameters to voltage converter (transducer) errors, caused by spurious input impedance, are analyzed. The resultant analytical transducers vektorial error dependencies for direct and reverse transformation functins are obtained.

Вступ. Вимірювання та контроль неелектричних величин досить широко пов'язані з використанням ємнісних первинних перетворювачів (ЄПП), параметри яких (ємність і провідність) залежать від вимірюваної величини. Переважно ємність та провідність таких перетворювачів за своїми значеннями невеликі (одиниці пікофарад та наносіменсів, а в ємнісних томографічних системах навіть частки вказаних значень) [1]. Отже, це високоомні об'єкти вимірювання, а тому до засобів вимірювання ставляться досить жорсткі вимоги. Зумовлено це впливом неінформативного паралельного імпедансу (адмітансу), значення параметрів якого в багатьох випадках бувають співмірними (а то й і більшими) від значень інформативних параметрів ЄПП. Вимірювання здійснюються як мостами змінного струму, так і приладами з прямим перетворенням параметра пасивного сенсора (первинного перетворювача) в електричний сигнал. Переважно, таким сигналом є напруга постійного струму, сила струму або частота. Мостові схеми таких засобів вимірювання успішно з цим справляються, однак в багатьох практичних випадках вони не можуть бути використані через свої низькі показники портативності (маса, габарити), а також велику енергоємність. Виходячи з того, засоби вимірювання, що використовують метод прямого

перетворення параметрів ЄПП в напругу, мають значні переваги. Для усунення впливу неінформативного імпедансу на результат вимірювання їх розміщують безпосередньо (конструктивно) поруч із ЄПП, зменшуючи тим самим співвідношення між інформативними та неінформативними параметрами. Однак при дистанційних вимірюваннях проблема залишається нерозв'язаною. Застосування тризатискачевої схеми під'єднання ЄПП до вимірювальної схеми практично усуває неінформативний вплив лінії зв'язку на ЄПП, однак при цьому сама схема піддається аналогічному впливу. Для його оцінки, а також оцінювання метрологічних можливостей таких засобів вимірювання доцільним є проведення аналізу похибок, зумовлених неінформативним імпедансом.

1. Активні перетворювачі. Особливо такий вплив відчутний в активних перетворювачах (АП) параметрів пасивної комплексної величини в напругу, оскільки це призводить до зміни його передавальної характеристики. Розглянемо два типи АП, а саме перетворювач із звичайною функцією перетворення (ЗФП) [2] і перетворювач із оберненою функцією перетворення (ОФП) [3], схеми яких наведені відповідно на рисунку, а, б.



Схеми активних перетворювачів

Для таких перетворювачів найбільший вплив має паралельний імпеданс Z_{bx} , який зумовлений вхідним імпедансом самого активного елемента (в даному випадку операційного підсилювача (ОП)), параметрами вхідного кабеля та монтажем. Переважно це паралельне з'єднання ємності C_{bx} і опору R_{bx} , а його вплив на результат стає відчутним через неідеальність операційного підсилювача. Для реального ОП, як відомо [4], коефіцієнт підсилення має комплексний характер:

$$k = \frac{k_0}{1 + jk_0 \frac{\omega}{\omega_1}}$$

де k_0 – коефіцієнт підсилення ОП на постійному струмі; $\omega = 2\pi f$, f – робоча частота (частота, на якій проводиться вимірювання), $\omega_1 = 2\pi f_1$; f_1 – частота одиничного підсилення ОП. З урахуванням цього реальні коефіцієнти передачі k_1, k_2 відповідно до наведених схем описуються такими формулами:

$$k_1 = \frac{U_2}{U_1} = -(j\omega C_x + G_x)R_0 \times \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{k_0} + j\frac{\omega}{\omega_1}\right) \left(1 + j\omega R_0 C_x + R_0 G_x + j\omega C_{bx} R_0 + \frac{R_0}{R_{bx}}\right)}$$

$$k_2 = \frac{U_2}{U_3} = -(j\omega C_x + G_x)R_0 \left[1 + \left(\frac{1}{k_0} + j\frac{\omega}{\omega_1}\right)\right] \times (1)$$

$$\times \left[1 + \frac{1}{R_0 G_x + j\omega C_x R_0} + \frac{\frac{1}{R_{bx}} + j\omega C_{bx}}{\frac{1}{R_{bx}} + j\omega C_x}\right]$$

де C_x, G_x – ємність та активна провідність ЄПП.

Реактивна Δ_1 та активна Δ_2 складові векторної похибки, зумовленої відмінністю реального коефіцієнта (k_p) від ідеального k_0 ($k_0 = -j\omega C_x + G_x$)

$$\Delta_1 = \text{Im}(k_p) - \text{Im}(k_0), \quad \Delta_2 = \text{Re}(k_p) - \text{Re}(k_0) \quad (2)$$

З урахуванням (1) (у формулах реальні коефіцієнти позначено k_1, k_2) отримуємо для АП із звичайною функцією перетворення

$$\Delta_C = -A(1+b)x - F(1+b)y - 2Axy + F(x^2 - y^2) + c(Fx - Ay) \quad (3)$$

$$\Delta_G = F(1+b)x - A(1+b)y + 2Fxy + A(x^2 - y^2) + c(Fy + Ax) \quad (4)$$

$$\Delta_C^1 = -A(1+b)x - F(1+b)D_C x - 2A D_C x^2 + Fx^2(1 - D_C^2) + c(Fx - A D_C x) \quad (5)$$

$$\Delta_G^1 = F(1+b)D_G y - A(1+b)y + 2F D_G y^2 + Ay^2(D_G^2 - 1) + c(Fy + A D_G y), \quad (6)$$

де Δ_C, Δ_G – відповідно абсолютні похибки вимірювання ємності C_x і провідності G_x (інформативні параметри ЄПП C_x та G_x); Δ_C^1 – абсолютна похибка вимірювання ємності (інформативні параметри ЄПП C_x як головний параметр і тангенс кута втрат D_x як додатковий параметр); Δ_G^1 – абсолютна похибка вимірювання провідності (інформативні параметри ЄПП G_x , як головний параметр і тангенс кута втрат D_G як додатковий параметр).

Позначення: $F = \frac{\omega}{\omega_1}$, $A = \frac{1}{k_0}$, $x = \omega C_x R_0$,

$$y = R_0 G_x, \quad b = \frac{R_0}{R_{вх}}, \quad c = \omega R_0 C_{вх}, \quad D_c = \operatorname{tg} \delta = \frac{G_x}{\omega C_x},$$

$$D_G = \frac{\omega C_x}{G_x}.$$

Аналогічно для АП із оберненою функцією перетворення

$$\Delta_C = F + Fb + Fy + Ax + Ac, \quad (7)$$

$$\Delta_G = A + Ab + Ay - Fx - Fc \quad (8)$$

$$\Delta^1_C = F + Fb + FD_C x + Ax + Ac \quad (9)$$

$$\Delta^1_G = A + Ab + Ay - FD_G y - Fc \quad (10)$$

Отримані аналітичні вирази описують загальний випадок, коли параметри A і F співмірні. Для часткового випадку (A значно менше від F) можна спростити отримані вирази, в результаті чого для АП із звичайною функцією перетворення маємо:

$$\Delta_C = -F(1+b)y + F(x^2 - y^2) + Fxc, \quad (11)$$

$$\Delta_G = F(1+b)x + 2xy + Fyc \quad (12)$$

$$\Delta^1_C = -F(1+b)D_C x + Fx^2(1 - D_C^2) + Fxc, \quad (13)$$

$$\Delta^1_G = F(1+b)D_G y + 2FD_G y^2 + Fyc, \quad (14)$$

а для АП з оберненою функцією перетворення

$$\Delta_C = A + Fb + Fy, \quad (15)$$

$$\Delta_G = -Fx - Fc, \quad (16)$$

$$\Delta^1_C = F + Fb + FD_C x, \quad (17)$$

$$\Delta^1_G = -FD_G y - Fc \quad (18)$$

2. Висновки. Для АП із ЗФП похибка містить (формули (3)-(6)):

– мультиплікативну складову, яка залежить від вимірюваного параметра, прийнятого за головний;

– мультиплікативну складову, яка залежить від додаткового параметра;

– мультиплікативну складову, яка залежить від обох параметрів (головного і додаткового);

– похибки нелінійності.

Водночас необхідно зазначити, що коефіцієнти при головному та додатковому параметрах однакові за модулем, але протилежні за знаком (для мультиплікативних складових). Значення коефіцієнтів залежить від параметрів ОП і параметрів вхідного імпедансу. Характер похибки нелінійності однаковий, причому значення її одного знака для обох складових, але похибка від взаємного впливу має різний знак.

Для АП із ОФП похибка містить (формули (7)-(10)):

– адитивну складову;

– мультиплікативну складову, яка залежить від головного параметра;

– мультиплікативну складову, яка залежить від додаткового параметра.

При цьому видно, що характер і значення мультиплікативних складових таких самий, як і в попередньому випадку, але їх значення мають протилежні знаки. Важливою особливістю такого АП є відсутність похибки нелінійності, а також похибки від взаємного впливу параметрів. Це вказує на істотні переваги АП з ОФП з погляду метрологічних можливостей.

3. Рекомендації: Для зменшення похибок вимірювання параметрів ЄПП необхідно використовувати ОП з параметрами, які на робочій частоті вимірювання забезпечують співвідношення $A \ll F$. Це дає змогу оцінювати похибки вимірювання за формулами (8-15), причому:

– похибка від нелінійності в АП із ЗФП (11)-(13) усувається при рівності активного і реактивного параметрів ($x=y, D_c=1$);

– адитивна складова похибки в АП з ОФП усувається при $x, y=0$ (15)-(18), тобто в режимі "встановлення нуля", а мультиплікативна – внаслідок калібрування за зразковими параметрами;

– похибка вимірювання зменшується, якщо обмежувати номінальні значення "x" та "y", що являє собою співвідношення між значеннями реактивного та активного параметрів об'єкта вимірювання і значенням зразкового резистора (див. введені позначення), а також зменшення "c" і "b", що також являє собою співвідношення між значенням параметрів вхідного імпедансу і значенням зразкового резистора.

Такий аналіз дає можливість теоретично оцінити похибки вимірювання, зумовлені параметрами ОП для наведених на рисунку перетворювачів параметрів високоомних об'єктів, а також здійснити корекцію похибок для практичних схем в нормальних умовах застосування. Знаючи характер та зміну параметрів ОП від дестабілізуючих факторів, можна на підставі отриманого нормувати похибки АП і в робочому діапазоні температур. Практично

це підтверджено в серійних приладах Ф 4320 (реалізовано АП з ЗФП), Е7-13, ЦК 4800, ЦК 4801, АК 121, модулі CLR для інформаційно-вимірювальної системи П 16 (реалізовано АП з ОФП).

1. Bair M.S. and Oakley J.P. Comparison of Excitation Methods for Electrical Capacitance Tomography //

Tomographic techniques. 1993. P.115-126. 2. Гаврилюк М.А., Соголовский Е. П. Электронные измерители CLR. - Львов, 1978. 3. А.С. №1061068 (СССР). Измеритель CLR-параметров. Гаврилюк М.А., Походило Е.В., Соголовский Е.П., Хома В.В. // Бюл. изобрет. 1983, №46. 4. Алексеев А.Г., Коломбет Е.А., Стародуб Г.И. Применение прецизионных аналоговых ИС. М., 1981.

УДК 621.317

АВТОМАТИЧНА КОМПЕНСАЦІЯ СИСТЕМАТИЧНИХ ПОХИБОК ПРИ ВИМІРЮВАННЯХ ПОТУЖНОСТІ В КОЛАХ З ВИМІРЮВАЛЬНИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ СТРУМУ ТА НАПРУГИ

© Петро Євтух, 2000

Тернопільський державний технічний університет ім. Івана Пулюя, вул. Руська, 56, 282000 Тернопіль,
Україна

**Подано формули поправок для автоматичної компенсації систематичних похибок результатів
вимірювання потужності у високовольтних колах.**

**В статье даются формулы поправок для автоматической компенсации систематических
погрешностей результатов измерений мощности в высоковольтных цепях.**

**The formulas of corrections for the systematic errors automatic compensation of the results of power measuring
in the higt voltage circuits are given in the work.**

Результати вимірювань потужності у високовольтних колах значною мірою спотворюються систематичними похибками, зумовленими відхиленнями від номінальних значень коефіцієнтів трансформації високовольтних вимірювальних трансформаторів струму та напруги. Поки що не існує засобів для експериментального визначення поправок для компенсації цих похибок при пусконаладжувальних та ремонтних роботах за місцем експлуатації вимірювальних трансформаторів. Однак у цій ситуації часто можна скористатись відомостями, наведеними у технічних паспортах вимірювальних трансформаторів про значення похибок їх коефіцієнтів трансформації, отриманих на високоточному вимірювальному стенді заводу-виготловача. Існує можливість застосувати ці відомості

для підвищення точності вимірювань за допомогою відповідних поправок. У статті наводяться формули для визначення таких поправок і подано їх обґрунтування.

Відхилення від номінальних значень коефіцієнтів трансформації $k_{нн}$, $k_{ну}$ вимірювальних трансформаторів струму та напруги оцінюється величинами відносних похибок передачі амплітуди струму δI та напруги δU , а також величинами абсолютних похибок ξ_i та ξ_u передачі фази. Комплекс вимірюваної повної потужності \hat{p} , виражений через сигнали на виході вимірювальних трансформаторів з урахуванням їх похибок, описується таким виразом:

$$\hat{p} = \hat{u}\hat{i} = u_0 \exp(i\varphi_u) k_{ну} (1 + \delta_u) \exp(j\xi_u) i_0 \exp(-i\varphi_i) k_{нн} (1 + \delta_i) \exp(-j\xi_i) = u_0 i_0 \exp[-j(\varphi_u - \varphi_i)] k_{ну} k_{нн} (1 + \delta_u)(1 + \delta_i) \exp[-j(\xi_u - \xi_i)], \quad (1)$$