

УДК 621.317.73

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЄМНОСТІ ПОДВІЙНОГО ШАРУ НА ІНФОРМАТИВНІ ПАРАМЕТРИ ІМІТАНСНИХ СЕНСОРІВ

Ї Походило Євген, Леськів Марта, 2012

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Проаналізовано вплив ємності подвійного шару на активну та реактивну складові імпедансу як інформативні параметри первинного перетворювача (сенсора) засобів вимірювального контролю властивостей об’єктів неелектричної природи.

Проанализировано влияние емкости двойного слоя на активную и реактивную составляющие импеданса как информативные параметры первичного преобразователя (сенсора) средств измерительного контроля свойств объектов неэлектрической природы.

The influence of double layer capacitance on the active and reactive components of impedance as informative parameters of the primary transducer (sensor) means of measuring control of properties of non-electric nature objects is analysed.

Вступ. Дослідження об’єктів неелектричної природи за їхніми електричними параметрами, зокрема складовими імпедансу (імпедансу чи адмітансу), пов’язано з проблемами впливу приелектродних ефектів. Останні виникають, як відомо [1], на межі «електрод-об’єкт» і являють собою своєрідний молекулярний конденсатор, ємність якого визначається діелектричною проникністю шару Гельмгольца (переважно це діелектрична проникність контрольованого об’єкта), активною площею поверхні електродів та відстанню між електродами, сформованими молекулярними шарами двох середовищ. Оскільки така міжелектродна відстань мала, то приелектродна ємність одиниці поверхні може бути в межах десятків мкФ на квадратний сантиметр. Разом з тим, ємність контрольованого об’єкта, як інформативного параметра, може відрізнятись на порядки. Саме цим зумовлені основні проблеми вимірювань параметрів рідин та сипких матеріалів за електричними параметрами. Для зменшення впливів приелектродної ємності, або, як її називають, ємності подвійного шару, використовують чотириелектродні первинні перетворювачі або тестовий сигнал вищої частоти.

Мета роботи. Проаналізувати залежності інформативних електричних параметрів імпедансних первинних перетворювачів об’єктів неелектричної природи від ємності, зумовленої приелектродними ефектами. Оцінити вплив ємності подвійного шару на активну та реактивну складові імпедансу.

Аналіз впливу приелектродної ємності на параметри імпедансу. Інформативними параметрами перетворення імпедансного контролю об’єктів неелектричної природи переважно є активний чи реактивний опір, повний опір, тангенс кута втрат, активні та реактивні складові імпедансу чи адмітансу [2]. Оскільки активна та реактивна складові імпедансу в широкому частотному діапазоні тестового сигналу найповніше характеризують властивості об’єктів неелектричної природи, то доцільно оцінити вплив приелектродної ємності саме на їхню залежність. Для цього розглянемо електричну модель об’єкта контролю та її математичну модель, що описує її імпеданс та адмітанс у частотному діапазоні тестового сигналу. Переважно електрична модель – це багатоелементний двополосник, що характеризує фізико-хімічні властивості об’єкта контролю, поміщений в міжелектродний простір контактного первинного перетворювача. Спрощену схему заміщення двополосного елемента контролю, яким подається об’єкт неелектричної природи, зображено на рисунку.

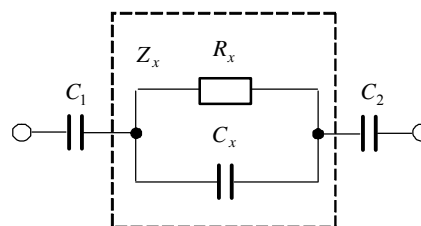


Рис. 1. Спрощена схема заміщення двоелектродного імпедансного сенсора

Таке спрощення обґрунтовано тим, що дослідження здійснюються на частотах, на яких інші види імпедансів, наприклад імпеданс Вайбурга [3], неінформативні послідовні та паралельні імпеданси, практично відсутні. У такому разі імпеданс Z_x двополюсника, зображеного на рис. 1, описуватиметься виразом

$$Z_x = \frac{1}{j\omega C} + \frac{R_x}{1 + j\omega C_x R_x}, \quad (1)$$

де C_x та R_x – параметри об’єкта контролю; $C = C_1 = C_2$, а C_1 та C_2 – приелектродна ємність першого та другого електродів первинного перетворювача.

Якщо електроди первинного перетворювача мають однакову активну площу, то $C_1 = C_2$. Це властиво ємнісному первинному перетворювачу плоскопаралельної конструкції. Для перетворювачів коаксіальної конструкції така рівність не забезпечується, оскільки площа електродів є різною.

В результаті перетворення виразу (1) отримаємо активну $\text{Re}(Z_x)$ та реактивну $\text{Im}(Z_x)$ складові, що описуються формулами

$$\text{Re}(Z_x) = R_x \frac{1}{1 + (\omega C_x R_x)^2}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Im}(Z_x) &= -\frac{1}{\omega C_x} \cdot \frac{R_x + \frac{C_x}{C} R_x + \frac{1}{\omega^2 C C_x R_x}}{R_x^2 + \left(\frac{1}{\omega C_x}\right)^2} = \\ &= -\frac{1}{\omega C_x} \cdot \frac{R_x}{|Z_x|^2} \cdot \left(1 + \frac{C_x}{C} + \frac{1}{\omega^2 C C_x R_x^2}\right), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{де } |Z_x|^2 = R_x^2 + \left(\frac{1}{\omega C_x}\right)^2.$$

Аналіз виразу (2) показує, що активна складова імпедансу не залежить від приелектродної ємності, а залежить лише від співвідношення між реактивним $\frac{1}{\omega C_x}$ та активним R_x опором об’єкта контролю, поданого паралельною схемою заміщення. Так, за умови $(\omega C_x R_x) \ll 1$ з виразу (2) маємо $\text{Re}(Z_x) = R_x$. Якщо забезпечується умова $(\omega C_x R_x) \gg 1$ збільшенням частоти, то вираз (2) можна записати як

$$\text{Re}(Z_x) = R_x \cdot \frac{1}{(\omega C_x R_x)^2} = R_x \cdot \frac{1}{(\text{tg}d)^2}, \quad (4)$$

й активна складова істотно зменшується. У виразі $\text{tg}d$ – кут діелектричних втрат двополюсника, поданого паралельною схемою заміщення об’єкта контролю.

Звідси випливає, що на низьких частотах тестового сигналу необхідно використовувати як інформативний параметр активну складову, тобто опір R_x контрольованого об’єкта. Тим самим забезпечуватиметься інваріантність результату до ємності подвійного шару.

Разом з тим, на низьких частотах реактивна складова імпедансу залежить від співвідношення між активним опором та модулем імпедансу об’єкта контролю, співвідношеннями між значеннями ємностей (інформативною та приелектродною), а також співвідношенням між реактивними опорами $\frac{1}{\omega C}$,

$\frac{1}{\omega C_x}$ й активним опором R_x . Однак зі зростанням частоти тестового сигналу модуль імпедансу визначатиметься активним опором $-\frac{R_x}{|Z_x|^2} \rightarrow \frac{1}{R_x}$, складова виразу (3) $\frac{1}{\omega^2 C C_x R_x^2} \rightarrow 0$. У такому разі залежність (3)

спрощується і тоді реактивна складова імпедансу багатоеlementного двополюсника визначатиметься лише співвідношенням активної та реактивної складових двоелементної схеми та відношенням ємності інформативної та ємності. Тобто отримуємо

$$\text{Im}(Z_x) = -\frac{1 + \frac{C_x}{C}}{\omega C_x R_x} = -\frac{1}{\text{tg}d} \left(1 + \frac{C_x}{C}\right), \quad (5)$$

Проаналізуємо вплив ємності подвійного шару в разі використання складових адмітансу як інформативних параметрів. Для цього запишемо вираз адмітансу Y_x , зображеного на рис. 1 двополюсника, скориставшись виразом (1). Тоді з урахуванням залежності $Y_x = \frac{1}{Z_x}$ одержимо

$$Y_x = \frac{j\omega C (G_x + j\omega C_x)}{G_x + j\omega C + j\omega C_x}, \quad (6)$$

звідки активна $\text{Re}(Y_x)$ та реактивна $\text{Im}(Y_x)$ складові адмітансу описуються формулами

$$\operatorname{Re}(Y_x) = G_x \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{C_x}{C}\right)^2 + \left(\frac{G_x}{\omega C}\right)^2}, \quad (7)$$

$$\operatorname{Im}(Y_x) = \frac{\omega C_x \cdot \left(1 + \frac{C_x}{C}\right) + \frac{G_x}{\omega C_x} \cdot \frac{G_x}{\omega C}}{\left(1 + \frac{C_x}{C}\right)^2 + \left(\frac{G_x}{\omega C}\right)^2}. \quad (8)$$

Аналіз отриманих виразів (5), (6) показує, що із зростанням частоти тестового сигналу вони спрощуються, оскільки деякі складові виразів (7), (8) прямує до нуля, а саме: $\frac{G_x}{\omega C} \rightarrow 0$ та $\frac{G_x}{\omega C_x} \rightarrow 0$. Тобто одержимо

$$\operatorname{Re}(Y_x) = G_x \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{C_x}{C}\right)^2}, \quad (9)$$

$$\operatorname{Im}(Y_x) = \frac{\omega C_x \cdot \left(1 + \frac{C_x}{C}\right)}{\left(1 + \frac{C_x}{C}\right)^2} = \frac{\omega C_x \cdot \omega C}{\omega C_x + \omega C}, \quad (10)$$

а з урахуванням того, що приелектродна ємність істотно переважає ємність об'єкта контролю, то активна складова на високих частотах визначатиметься параметром G_x . Реактивна складова, як видно з виразу (10), визначається ємністю – послідовним з'єднанням конденсаторів з ємностями C_x та C , однак за умови $C_x \ll C$ визначатиметься параметром ωC_x .

Висновки. Аналіз математичних моделей імітансних первинних перетворювачів показав, що:

1) серед параметрів імітансу (активні та реактивні складові імпедансу та адмітансу), що вибирають як

інформативні в засобах вимірювального контролю параметрів об'єктів неелектричної природи, інваріантність результату до ємності подвійного шару забезпечується лише у разі використання залежності активної складової імпедансу двополюсника. На низьких частотах тестового сигналу активна складова визначатиметься лише активним опором об'єкта контролю;

2) у всіх інших випадках вибору інформативних параметрів, а саме: реактивні складові імпедансу та адмітансу, активна складова адмітансу, для зменшення впливу ємності подвійного шару необхідно збільшувати частоту тестового сигналу. Визначатиметься рівень такого впливу відношенням інформативної ємності до ємності подвійного шару. У разі істотної переваги ємності подвійного шару над інформативною ємністю активна та реактивна складові адмітансу визначатимуться відповідними параметрами двоелементної схеми заміщення;

3) у разі вибору реактивної складової імпедансу як інформативного параметра за умов використання тестового сигналу високої частоти та малого співвідношення між ємностями складова пропорційна до тангенсу кута втрат.

1. Григорчак І.І. Імпедансна спектроскопія: навч. посіб. / І.І. Григорчак, Г.В. Понеділок. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 352 с. 2. Походило Є. В. Розвиток теорії та принципів побудови засобів вимірювання імітансу об'єктів кваліметрії: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.11.05 / Національний ун-т "Львівська політехніка". Львів, 2004. – 40 с. 3. Лопатин Б.А. Теоретические основы электрохимических методов анализа: учеб. пособие для ун-тов / Б. А. Лопатин – М. : Высшая школа, 1975. – 295 с.