ВПЛИВ ПРИЕЛЕКТРОДНОГО ІМПЕДАНСУ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА НА РЕЗУЛЬТАТ ВИМІРЮВАННЯ СКЛАДОВИХ ІМІТАНСУ

THE INFLUENCE OF THE NEAR-ELECTRODE IMPEDANCE OF THE CAPACITIVE SENSOR ON THE RESULT OF MEASURING THE ACTIVE AND REACTIVE COMPONENTS OF THE IMMITTANCE

Походило Є.В.¹, д.т.н. проф., Герасим М.Р.², к.т.н., Піщора В.І.³

¹ – кафедра інформаційно-вимірювальних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», Україна; e-mail: evgenp@meta.ua;

² – метролог у КЗ ЛОР «Львівський обласний клінічний діагностичний центр», Україна; e-mail: marta88leskiv@gmail.com

³ – студент, Національний університет «Львівська політехніка», Україна

Анотація

Проаналізовано вплив приелектродного імпедансу ємнісного сенсора, утвореного ємністю подвійного шару та імпедансом Варбурга, на результат вимірювання активної та реактивної складових імітансу (імпедансу та адмітансу) електролітичних об'єктів в частотному діапазоні тестового сигналу. Показано, що реактивна складова приелектродного імпедансу на низьких частотах залежить лише від ємності подвійного шару. Активна складова приелектродного імпедансу на низьких частотах визначається опором, утвореним ємністю подвійного шару та відношенням до неї поляризаційної ємності, завдяки чому вплив приелектродної ємності на активну складову приелектродного імпедансу послаблюється. На вищих частотах активна складова залежить від аналогічного опору, а також від тангенса кута паралельного з'єднання ємності подвійного шару та поляризаційного опору. Відповідно до цього приелектродний імпеданс можна подати спрощеною схемою заміщення відповідно до режиму вимірювання. Наведено відповідні спрощені схеми заміщення контактного ємнісного сенсора з об'єктом контролю, поданим двоелементною паралельною схемою заміщення.

Abstract

Influence of near-electrode impedance of capacitive sensor on result of measuring the active and reactive components of the admittance of electrolytic objects is considered. Near-electrode impedance is formed by capacity of the double layer and the Warburg impedance. Reactive and active components of admittance are the informative parameters of object's electro physical parameters, in particular dielectric permittivity and specific conductivity. Product quality is assessed by comparing the reactive and active object components of the impedance or admittance with the corresponding parameters of the standard samples. Significant influence on the result of measuring immittance components of such objects is fixed at low frequencies. However, we need to measure the electro physical quantities at the mentioned frequencies.

So we develop the mathematical models of reactive and active components at different frequencies and analyse the obtained results for evaluating the effect of near-electrode impedance. Dissimilar impact of the near-electrode impedance parameters on its active and reactive components is revealed. It is shown that at low frequencies the reactive component of the near-electrode impedance depends on the double layer capacity and does not depend on the parameters of the Warburg impedance.

At higher frequencies, the active component depends on similar resistance as well as on the tangent of the parallel connection angle of the double-layer capacity and polarization resistance. Corresponding equivalent circuits of the contact capacitive sensor with the measured object are given.

Regarding the research of mathematical models of active and reactive components of immittance control objects of non-electric nature, in particular electrolytic substances the conclusions are fulfilled. In order to reduce the methodological error it is not recommended to apply the substitution scheme of the contact capacitance sensor, since the impact of the parameters of electrode impedance differs for inadequate measuring modes. Therefore, for analysis of mathematical models of immittance active and reactive components of measuring object, the appropriate substitution scheme is recommended.

Ключові слова

Ємнісний сенсор, приелектродний імпеданс, ємність подвійного шару, об'єкт кваліметрії, комплексна похибка, імпеданс, адмітанс, імпеданс Варбурга.

Keywords

Capacitive Sensor, Near-Electrode Impedance, Double Layer Capacity, Qualimetry Object, Complex Error, Impedance, Admittance, Warburg Impedance.

1. Вступ

Одним із електричних методів контролю якості продукції неелектричної природи є імітансний метод [1]. Суть його полягає в тому, що об'єкт контролю подається двополюсником, параметри електропровідності якого порівнюються з відповідними параметрами базового зразка. Інформативними параметрами порівняння здебільшого є активна та реактивна складові імпедансу або адмітансу. За результати вимірювання складових імпедансу можна здійснювати частотно-дисперсійний аналіз речовин та матеріалів [2] або за аналогічними складовими адмітансу можна визначити електрофізичні параметри, зокрема діелектричну проникність та питому провідність об'єктів контролю [3], які можуть бути їхніми ідентифікаційними ознаками. З використанням для таких вимірювань ємнісного сенсора (ємнісна комірка) [4], який безпосередньо контактує з об'єктом, виникає на межі «електрод-об'єкт», як відомо [5, 6], приелектродний імпеданс, зумовлений ємністю подвійного шару та імпедансом Варбурга. Вплив такого імпедансу на різних частотах, який подається багатоелементною схемою заміщення і додається до схеми двополюсника, яким безпосередньо подається об'єкт контролю оцінюється методичною похибкою [1]. В основному для такого оцінювання використовується одна схема заміщення приелектродного імпедансу у разі вимірювання як реактивної, так і активної складових адмітансу. Тому є актуальним проаналізувати математичні моделі реактивної та активної складових приелектродного імпедансу, що подається відомою схемою заміщення. У такому разі можна оцінити вплив кожного параметра такої схеми на результат вимірювання відповідних складових, як інформативних параметрів для контролювання якості продукції неелектричної природи з використанням ємнісних сенсорів двоелектродної конструкції.

2. Недоліки

Широке застосування ємнісних сенсорів двоелектродної конструкції призводить до впливу на результат вимірювання складових адмітансу об'єктів контролю неелектричної природи. Для зменшення такого впливу, як відомо використовують чотириелектродні ємнісні сенсори або вибирають вищий частотний діапазон [5, 6]. Це ускладнює вимірювальний експеримент і не завжди можна використати серійні вимірювальні засоби вимірювання разом з сенсором. Однак, багато досліджень об'єктів неелектричної природи за електропровідністю проводиться на низьких частотах вимірювального струму без урахування зазначених поляризаційних ефектів, що дає значну розбіжність результатів. По-різному сьогодні подаються електричні моделі контактного ємнісного первинного перетворювача, а відповідно і не існує типової окремої електричної моделі такого пристрою у разі вимірювання активної або реактивної складових адмітансу. Для аналізування та математичного моделювання використовують одну електричну модель. Істотний вплив на результат має приелектродна ємність подвійного шару та імпеданс Варбурга, а саме співвідношення інформативної провідності та імпедансу, зумовленої приелектродним імпедансом на частоті вимірювання. Разом з тим, у деяких випадках завдяки наявності приелектродного імпедансу, а саме ємності подвійного шару, можна отримати інформацію щодо змін внутрішньої структури об'єкта контролю, виявлення певних компонентів за зміною характеру реактивної складової тощо.

3. Мета роботи

Метою роботи є дослідження впливу приелектродного імпедансу та його вплив на результат вимірювання інформативних параметрів імітансу об'єкта контролю

4. Матеріали та методи

4.1. Приелектродний імпеданс та його електрична та математична моделі

Електрична схема, що відображає на низькій частоті приелектродний імпеданс ємнісного сенсора, який безпосередньо контактує з об'єктом контролю, подана на рис.1 [6, 7].

Рис. 1. Електрична схема заміщення приелектродного імпедансу

Fig. 1. Electric scheme for substitution a near-electrode impedance

Як відомо [6], утворюється приелектродний імпеданс ємністю подвійного шару C_p та імпедансом Варбурга на кожному електроді. Імпеданс Варбурга представляється як послідовне з'єднання поляризаційної ємності C_s та опору R_s (рис.1) і залежить від частоти змінного струму. Для оцінювання впливу всіх зазначених параметрів приелектродного імпедансу на результат вимірювання активної та реактивної складових імпедансу та адмітансу доцільно спочатку проаналізувати відповідні складові приелектродного імпедансу. Ємність C_p не залежить від частоти, але визначається площею електродів, їхнього матеріалу та якості поверхні, а також видом об'єкта та його діелектричною проникністю. У такому разі для одного електрода сенсора отримаємо приелектродний імпеданс, який описується виразом

$$Z_p = \frac{\frac{1}{j\omega C_p} \cdot \left(R_s + \frac{1}{j\omega C_s} \right)}{\frac{1}{j\omega C_p} + \frac{1}{j\omega C_s} + R_s} = \frac{1 + j\omega C_s R_s}{-\omega^2 C_p C_s R_s + j\omega C_p + j\omega C_s}, \quad (1)$$

звідки активна $\text{Re}(Z_p)$ та реактивна $\text{Im}(Z_p)$ складові описуються виразами

$$\text{Re}(Z_p) = \frac{\omega^2 C_s^2 R_s}{\omega^4 C_p^2 C_s^2 R_s^2 + \omega^2 (C_p + C_s)^2}, \quad (2)$$

$$\text{Im}(Z_p) = -\frac{\omega^3 C_p C_s^2 R_s^2 + \omega (C_p + C_s)}{\omega^4 C_p^2 C_s^2 R_s^2 + \omega^2 (C_p + C_s)^2}. \quad (3)$$

З урахуванням того, що ємність подвійного шару C_p більша за ємність C_s імпедансу Варбурга [6] (тобто прийнявши $C_p + C_s \approx C_p$), вирази (2) та (3) можна спростити до вигляду:

$$\text{Re}(Z_p) = \frac{\omega^2 C_s^2 R_s}{\omega^2 C_p^2 C_s^2 R_s^2 + \omega^2 C_p^2} = \frac{\omega^2 C_s^2 R_s}{\omega^2 C_p^2 (1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2)}, \quad (4)$$

$$\text{Im}(Z_p) \approx -\frac{C_p (1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2)}{\omega C_p^2 (1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2)} = -\frac{1}{\omega C_p}. \quad (5)$$

Отримані математичні моделі вказують на різний вплив параметрів приелектродного імпедансу на його активну та реактивну складові. Відповідно і такий вплив буде у разі вимірювання відповідних складових імітансу об'єктів контролю. Аналіз отриманого виразу (5) показує, що реактивна складова приелектродного імпедансу практично не залежить від імпедансу Варбурга, тобто від параметрів C_s та R_s . Отже із трьох елементів схеми заміщення приелектродного імпедансу на результат вимірювання реактивної складових імпедансу двополюсника, яким подається об'єкт контролю, буде мати вплив лише ємність подвійного шару C_p . Звідси виходить, що для такого режиму вимірювань впливом імпедансу Варбурга можна нехтувати.

У виразі (4) маємо вплив всіх параметрів приелектродного (рис.1) імпедансу на його активну складову. Однак з урахуванням того, що поляризаційні опір та ємність на низьких частотах подається тангенсом кута між струмом і напругою, а кут $\psi = 45^\circ$, то за послідовною схемою заміщення з елементами R_s та C_s , як відомо [6]

$$\operatorname{tg}\psi = R_s C_s \omega = 1. \quad (6)$$

На низьких частотах $\omega^2 C_s^2 R_s^2 \ll 1$ та з урахуванням (6) вираз (4) спрощується, а саме:

$$\operatorname{Re}'(Z_p) = \frac{\omega^2 C_s^2 R_s}{\omega^2 C_p^2 (1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2)} = \frac{C_s^2}{C_p^2} \cdot R_s = \frac{C_s^2}{C_p^2} \cdot \frac{1}{\omega C_s} = \frac{C_s}{C_p} \cdot \frac{1}{\omega C_p}, \quad (7)$$

а на високих частотах $\omega^2 C_s^2 R_s^2 \gg 1$ матимемо

$$\operatorname{Re}''(Z_p) = \frac{\omega^2 C_s^2 R_s}{\omega^2 C_p^2 (1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2)} = \frac{R_s}{\omega^2 R_s^2 C_p^2} = \frac{1}{\omega R_s C_p} \cdot \frac{1}{\omega C_p}. \quad (8)$$

З (7) видно, що активна складова приелектродного імпедансу залежить від співвідношення між поляризаційною ємністю C_s та ємністю C_p подвійного шару, а також утвореного нею реактивного опору $\frac{1}{\omega C_p}$.

Вираз (8) показує залежність активної складової від аналогічного реактивного опору і $\frac{1}{\omega R_s C_p}$, що є тангенсом

кута паралельної схеми з елементами C_p та R_s .

Отже, отримані дві різні математичні моделі, що описують активну складову приелектродного імпедансу на високих та низьких частотах. За одержаними виразами можна розрахувати активні складові, які будуть співпадати за наступної умови. Для цього необхідно врахувати особливість імпедансу Варбурга, а саме: кут, що визначається його складовими є однаковим для різних значень поляризаційних елементів за умови, що реактивна $\frac{1}{\omega C_s}$ та активна R_s складові імпедансу Варбурга є рівними для кожного значення частоти ω . Тому, з урахуванням (6), для заданої частоти та заданого значення одного (C_s або R_s) із поляризаційних параметрів можна знайти інший невідомий параметр. Тільки за таких умов отримані значення активної складової приелектродного імпедансу за виразами (7) та (8) будуть співпадати, а тому для практичних досліджень їх однаково можна використовувати. Разом з тим, поляризаційна ємність є завжди меншою від ємності подвійного шару.

4.2. Схема заміщення контактного двоелектродного сенсора з об'єктом контролю та аналіз складових його імітансу

Приелектродний імпеданс контактний ємнісний сенсора будь-якого конструктивного виконання (плоско паралельний, коаксіальний тощо) двоелектродного ємнісний сенсора (першого та другого електродів, відповідно) Z_{p1} , Z_{p2} послідовно додається до імпедансу об'єкта контролю, поданого багатоелементним двополюсником з імпедансом Z_x або адмітансом Y_x . Тобто, електрична модель двоелектродного контактний імпедансний сенсора містить послідовне з'єднання електричної моделі приелектродного імпедансу та електричної моделі об'єкта контролю. Відповідно до цього імпеданс Z'_x або адмітанс Y'_x , які вимірюються відповідним приладом, матимуть вигляд:

$$Z'_x = Z_{p1} + Z_x + Z_{p2}, \quad (9)$$

$$Y'_x = \frac{1}{Z'_x} = \frac{1}{Z_{p1} + Z_x + Z_{p2}}, \quad (10)$$

а відповідні їхні складові

$$\operatorname{Re}(Z'_x) = \operatorname{Re}(Z_{p1}) + \operatorname{Re}(Z_{p2}) + \operatorname{Re}(Z_x) \quad (11)$$

$$\operatorname{Im}(Z'_x) = \operatorname{Im}(Z_{p1}) + \operatorname{Im}(Z_{p2}) + \operatorname{Im}(Z_x) \quad (12)$$

$$\operatorname{Re}(Y'_x) = \operatorname{Re}\left(\frac{1}{Z_{p1} + Z_x + Z_{p2}}\right) \quad (13)$$

$$\operatorname{Im}(Y'_x) = \operatorname{Im}\left(\frac{1}{Z_{p1} + Z_x + Z_{p2}}\right) \quad (14)$$

Для спрощення виразів прийемо приелектродний імпеданс однаковим, а саме $Z_{p1} = Z_{p2} = Z_p$ для двох електродів, а його параметри відповідно до схеми рис.1 як : $C_{p1} = C_{p2} = C_p$, $C_{s1} = C_{s2} = C_s$, $R_{s1} = R_{s2} = R_s$.

З урахуванням зазначеного вище, розглянемо електричні та математичні моделі ємнісного сенсора (з урахуванням одного електрода) з об'єктом контролю, поданого двоелементною паралельною схемою заміщення для різного частотного діапазону.

Для вимірювання активної складової імпедансу об'єкта контролю на основі отриманих результатів аналізування активної складової приелектродного імпедансу (7) можна подати схему заміщення контактного двоелектродного ємнісного сенсора зображену на рис.2.

Рис. 2. Електрична схема заміщення контактного двоелектродного ємнісного сенсора з інформативною активною складовою на низьких частотах

Fig. 2. Electrical scheme for substitution a contact double electrode capacitive sensor with an active informative component at low frequencies

У такому разі для схеми (рис.2) з опором Z_x та з урахуванням (9) та (7) отримаємо математичну модель активної складової

$$\text{Re}'(Z'_x) = \frac{R_x}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2} + \frac{1}{\omega C} = \frac{R_x}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2} + \frac{C_s}{C_p} \cdot \frac{1}{\omega C_p}. \quad (15)$$

Для низьких і середніх частот $\omega^2 C_x^2 R_x^2 \ll 1$ і тоді

$$\text{Re}'(Z'_x) = R_x + \frac{C_s}{C_p} \cdot \frac{1}{\omega C_p}, \quad (16)$$

а за умови $\omega^2 C_s^2 R_s^2 \gg 1$ (високі частоти)

$$\text{Re}'(Z'_x) = R_x \cdot \frac{1}{\omega^2 C_x^2 R_x^2} + \frac{C_s}{C_p} \cdot \frac{1}{\omega C_p} \approx R_x \cdot \frac{1}{\omega^2 C_x^2 R_x^2}. \quad (17)$$

Активна складова на низьких та середніх частотах лінійно залежить від опору R_x (16) з методичною похибкою, яка зменшується із зростанням частоти і залежить від вимірюваного опору та ємності подвійного шару. На високих частотах активна складова не залежить від приелектродного імпедансу і є нелінійною. Відповідна електрична модель, що враховує поляризаційний опір імпедансу Варбурга та ємність подвійного шару зображена на рис.3.

Рис. 3. Електрична схема заміщення контактного двоелектродного ємнісного сенсора з інформативною активною складовою на середніх та високих частотах

Fig. 3. Electrical scheme for substitution a contact double electrode capacitive sensor with an active informative component at medium and high frequencies

Математична модель активної складової імпедансу такої схеми описується виразом

$$\operatorname{Re}''(Z'_x) = \frac{R_s}{1 + \omega^2 C_p^2 R_s^2} + \frac{R_x}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2}. \quad (18)$$

З урахуванням $\omega^2 C_p^2 R_s^2 \ll 1$ (низькі частоти) матимемо

$$\operatorname{Re}''(Z'_x) = R_s + R_x \frac{1}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2}, \quad (19)$$

а за умови $\omega^2 C_p^2 R_s^2 \gg 1$ (середні частоти) отримаємо

$$\operatorname{Re}''(Z'_x) = \frac{1}{\omega^2 C_p^2 R_s^2} + R_x \cdot \frac{1}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2}. \quad (20)$$

На високих частотах $\omega^2 C_x^2 R_x^2 \gg 1$ активна складова визначатиметься виразом

$$\operatorname{Re}''(Z'_x) = R_x \cdot \frac{1}{\omega^2 C_x^2 R_x^2}. \quad (21)$$

У разі вимірювання реактивної складової імпедансу можна вважати, що послідовно з об'єктом контролю Z_x вмикається імпеданс, який подається лише ємністю подвійного шару C_p . З урахуванням зазначеного, електрична модель ємнісного сенсора з аналогічним об'єктом контролю Z_x прийматиме вигляд, зображений на рис.4.

Рис.4. Електрична схема заміщення контактної двоелектродної ємнісної сенсора з інформативною реактивною складовою

Fig. 4 Electrical scheme for substitution a contact double electrode capacitive sensor with a reactive informative component

Відповідно до (9) та за умови, що $Z_p = \frac{1}{j\omega C_p}$, математичні моделі активної та реактивні складових імпедансу такої схеми заміщення (рис.4) описується виразом

$$\operatorname{Im}(Z'_x) = -\omega C_x \cdot \frac{R_x^2}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2} - \frac{1}{\omega C_p} \quad (22)$$

За умови $\omega^2 C_x^2 R_x^2 \ll 1$ (досягається на низьких частотах) маємо

$$\operatorname{Im}(Z_x) = -\omega C_x \cdot R_x^2 - \frac{1}{\omega C_p}, \quad (23)$$

а для низькоомних об'єктів реактивна складова визначатиметься в основному ємністю подвійного шару, а саме

$$\operatorname{Im}(Z_x) = -\frac{1}{\omega C_p}. \quad (24)$$

За умови $\omega^2 C_x^2 R_x^2 \gg 1$ (високі частоти) реактивна складова імпедансу визначається ємністю об'єкта контролю, тобто

$$\operatorname{Im}(Z_x) = -\frac{1}{\omega C_x} - \frac{1}{\omega C_p} \approx -\frac{\omega(C_p + C_x)}{\omega^2 C_x C_p} \approx -\frac{1}{\omega C_x} \quad (25)$$

Відповідно до (10), адмітанс схеми (рис.4) та його відповідна реактивна складова описуються виразами

$$Y_x = \frac{1}{Z'_x} = \frac{1}{\frac{1}{j\omega C_p} + \frac{R_x}{1 + j\omega C_x R_x}} = \frac{j\omega C_p - \omega^2 C_p C_x R_x}{1 + j\omega^2 R_x^2 (C_p + C_x)}, \quad (26)$$

$$\text{Im}(Y_x) = \omega C_p \frac{1}{1 + \frac{\omega^2 C_p^2}{G_x^2}} + \omega C_x \frac{1}{1 + \frac{G_x^2}{\omega^2 C_p^2}}. \quad (27)$$

Аналіз виразу (27) показує, що в широкому частотному діапазоні тестового сигналу маємо різний вплив ємності подвійного шару та ємності об'єкта контролю, причому він залежить від співвідношення активної провідності G_x об'єкта контролю та реактивної провідності ωC_p , зумовленої ємністю подвійного шару на заданій частоті ω . Так на низьких частотах переважає вплив ємності подвійного шару приелектродного імпедансу, а на вищих частотах ємність об'єкта.

За умови $\frac{G_x^2}{\omega^2 C_p^2} \ll 1$ з виразу (27) маємо

$$\text{Im}(Y_x)' = \frac{G_x^2}{\omega^2 C_p^2} + \omega C_x \approx \omega C_x, \quad (28)$$

а за умови $\frac{G_x^2}{\omega^2 C_p^2} \gg 1$

$$\text{Im}(Y_x)' = \omega C_x \frac{G_x^2}{\omega^2 C_p^2} + \omega C_p \approx \omega C_p \quad (29)$$

Тобто, на високих частотах інформативним параметром у разі вимірювання реактивної складової імпедансу є ємність об'єкта контролю, а на низьких – ємність подвійного шару.

5. Результати і обговорення

В літературі наводиться багато різноманітних схем заміщення об'єктів неелектричної природи з урахуванням приелектродного імпедансу [1-7]. Відповідно, результати моделювання складових імпедансу чи адмітансу (імпедансу) за такими схемами в частотному діапазоні часто відрізняються. Причина в тому, як показали в даній роботі дослідження математичних моделей активної та реактивної складових безпосередньо приелектродного імпедансу, що не всі параметри впливають на його відповідні складові. З метою оцінити такий вплив на результат вимірювання авторами проаналізовано математичні моделі реактивної та активної складових приелектродного імпедансу на різних частотах. При цьому виявлено різний вплив параметрів приелектродного імпедансу на його складові. Відповідно до цього приелектродний імпеданс можна подати спрощеною схемою заміщення відповідно до режиму вимірювання. Такі схеми заміщення контактної ємнісної сенсора з об'єктом контролю з урахуванням впливу приелектродного імпедансу для режимів вимірювання активної та реактивної складових імпедансу об'єктів контролю, поданих двоелементною схемою заміщення, наведені в роботі. За результатами аналізу математичних моделей реактивної складової імпедансу та адмітансу контрольованого об'єкта в широкому частотному діапазоні таких схем показано, що на низьких частотах реактивна складова як імпедансу, так і адмітансу визначається переважно ємністю подвійного шару, а на вищих частотах переважає ємність об'єкта контролю. Такий перехід від низьких частот до вищих супроводжується тим, що реактивна складова набуває екстремальних значень в частотному діапазоні. Це може бути ідентифікаційною ознакою об'єктів контролю неелектричної природи різного походження, зокрема контролю концентрації солей у водних розчинах, горілочних виробів, м'яса тощо [2, 3, 8, 9]. Окрім цього на низьких частотах ємність подвійного шару можна використати як інформативний параметр об'єкта контролю.

На основі схем заміщення контактної ємнісної сенсора з об'єктом контролю для режиму вимірювання активної складової на низьких та високих частотах та аналізування їхніх математичних моделей можна сказати, що для оцінювання методичних похибок необхідно використовувати відповідну схему заміщення. Це дасть змогу прогнозувати похибку вимірювання, оптимізувати геометричні розміри сенсора, вибирати частотний діапазон вимірювання. З урахуванням зазначеного можна отримати адекватні результати теоретичних і експериментальних досліджень засобів вимірювального контролю за параметрами імпедансу. Аналогічно можна

будувати схеми заміщення контактного сенсора з об'єктами поданими багатоелементними двополюсниками та отримати відповідні математичні моделі активної та реактивної складових імпедансу.

6. Висновки

1. Проаналізовано активну та реактивну складову за математичними моделями складових приелектродного імпедансу та визначено вплив його параметрів. Виявлено різний вплив параметрів приелектродного імпедансу на його активну та реактивну складові, з урахуванням якого можна усунути розбіжності між результатами математичного моделювання та експериментального дослідження.
2. Показано, що у разі вимірювання реактивної складової адмітансу вплив приелектродного імпедансу зумовлений в основному ємністю подвійного шару, а імпеданс Варбурга практично не впливає на результат вимірювання.
3. Активна складова приелектродного імпедансу по-різному залежить від його параметрів. На низьких частотах активна складова імпедансу визначається опором, утвореним ємністю подвійного шару та відношенням до неї поляризаційної ємності. Завдяки цьому вплив приелектродної ємності на активну складову приелектродного імпедансу послаблюється. На вищих частотах активна складова залежить від аналогічного опору, а також від тангенса кута паралельного з'єднання ємності подвійного шару та поляризаційного опору.
3. Запропоновано схеми заміщення контактного сенсора з урахуванням окремих параметрів приелектродного імпедансу для вимірювання активної та (або) реактивної складових імпедансу об'єктів неелектричної природи з двоелементною схемою заміщення. Отримані математичні моделі таких складових відповідно до схеми заміщення та здійснено їхній аналіз в частотному діапазоні тестового сигналу.

Список літератури

1. Походило Є.В. Імітансний контроль якості: монографія / Є.В. Походило, П.Г. Столярчук. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012.-164с.
2. Головка Д.Б., Скрипник Ю.О. Методи та засоби частото - дисперсійного аналізу речовин та матеріалів // Фізичні основи. – 2000. – 200 с.
3. Походило Є.В., Юзва В.З., Вимірювання електрофізичних параметрів спиртових розчинів // Комп'ютерні науки та інформаційні технології: міжвідомчий науково-технічний збірник / Національний університет "Львівська політехніка"; відповідальний редактор Ю. М. Рашкевич. - Львів : Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2015.
4. James R. Carstens 'Electrical sensors and transducers', Regents / Prentice Hall, 1993, 498p.
5. Герасим М.Р. Розвиток метрологічного забезпечення вимірювання електрофізичних параметрів об'єктів кваліметрії неелектричної природи. Автореф. дис. кандидата техн. наук / НУ «Львівська політехніка» МОН України. - Львів, 2014. – 20 с.
6. Лопатин Б. А. Теоретические основы электрохимических методов анализа. Учеб. пособие для ун-тов. М., «Высш. школа», 1975.
7. Hans-Rolf Tränkler Smart sensor systems using impedance spectroscopy Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., – 2007. – P. 455–478.
8. Arnold W.M. et al., Electrical impedance methods for assessing fruit quality: avoidance of electrode artifacts. Acta Hort., 1998, No. 464. – P. 85–90.
9. Heidari M., Azimi P. 'Conductivity Effect on the Capacitance Measurement of a Parallel-plate Capacitive Sensor System', African Physical Review, 2010.- pp. 135-143.

References

- [1] Ye. Pokhodylo, P. Stolyarchuk, *Immitance quality control*. Lviv, Ukraine: Lviv Polytechnic Publ. House, 2012.
- [2] D. Golovko, Ye. Skrypnyk, *Methods and means of frequency-dispersion analysis of substances and materials*. Lviv, Ukraine: Physical bases, 2000.
- [3] Ye. Pokhodylo, V. Yusva, "Measurement of electrophysical parameters of alcoholic solutions", *Computer sciences and information technologies. interdepartmental scientific and technical proc.*, Lviv, Ukraine: Publ. House Lviv Polytech. Nat. Univer., 2015.
- [4] R. Carstens, *Electrical sensors and transducers*. Regents, Prentice Hall, 1993.
- [5] M. Herasym, "Development of metrological assurance of electrophysical parameters measuring of qualimetry objects of nonelectric nature", PhD thesis, Lviv Polytech. Nat. Univer., Lviv, Ukraine, 2014.
- [6] B. Lopatin, *Theoretical bases of electrochemical methods of analysis*. Moscow, USSR: High School, 1975.

- [7] H.-R. Tränkler, “Smart sensor systems using impedance spectroscopy”, *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, p.455–478, 2007.
- [8] W. Arnold et al, “Electrical impedance methods for assessing fruit quality: avoidance of electrode artifacts”, *Acta Hort.*, no.464, p.85–90, 1998.