

М. Герасим, Є. Походило
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра метрології, стандартизації та сертифікації

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДОВИХ АДМІТАНСУ КОНТАКТНИХ ПЕРВИННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

© Герасим М., Походило Є., 2013

Здійснено математичне моделювання складових адмітансу у частотному діапазоні для різних значень приелектродної ємності і заданих параметрів об'єкта контролю.

Ключові слова: імітансний метод, контактний первинний перетворювач, математичне моделювання, об'єкт контролю.

The mathematical modeling of admittance components in the frequency range for various parameters of the near-electrode capacitance and set parameters of control object is conducted.

Key words: immitance method, contact primary converter, mathematical modeling, control object.

Вступ

Широке застосування імітансного методу контролю параметрів об'єктів неелектричної природи зумовлено простотою його практичної реалізації, оперативністю та доступністю відповідних засобів. Відомо, що найсуттєвіший вплив на результати вимірювань електрофізичних параметрів рідин та сипких матеріалів з допомогою контактних первинних перетворювачів мають приелектродні ефекти, зокрема ємність подвійного шару [1, 2]. Визначається вона площею електродів, діелектричною проникністю контрольованого об'єкта (речовини чи матеріалу) та ін. Дослідження її впливу на активну та реактивну складові імітансу загалом [3, 4] показують, що залежно від частотного діапазону тестового сигналу, яким діють на первинний перетворювач, можна вибирати той чи інший інформативний параметр (активний опір, активна чи реактивна складові, тангенс кута втрат). Враховуючи, що діапазон зміни інформативних параметрів може бути дуже широким (від одиниць Ом до сотень МОм), то актуальним є аналізування впливу ємності подвійного шару на результат вимірювання таких об'єктів. Тим більше, що діапазон зміни ємності подвійного шару може бути в межах від десятків мкФ до сотень мкФ [5, 6], а при цьому ємність, що визначається параметрами сенсора та об'єктом контролю, знаходиться в межах від одиниць пФ до сотень пФ. На основі таких досліджень можна виробити рекомендації щодо вибору розмірів сенсора та особливостей вимірювань при цьому електрофізичних параметрів низькоомних та високоомних об'єктів, виявлення нових способів вимірювань та контролю.

Мета роботи

Проаналізувати особливості вимірювань електрофізичних параметрів контактними первинними перетворювачами на основі результатів математичного моделювання складових імітансу з урахуванням ємності подвійного шару та параметрів об'єкта контролю в широкому частотному діапазоні тестового сигналу.

Математична модель імітансного контактного перетворювача

Розглянемо математичну модель первинного перетворювача з об'єктом контролю на основі спрощеної схеми заміщення (без урахування елементів, що описують окремі особливості об'єктів

контролю та неінформативні імпеданси). Комплексна провідність Y_x такої схеми заміщення з урахуванням послідовного з'єднання ємності подвійного шару C одного електрода двоелектродного сенсора та параметрів об'єкта (паралельне з'єднання опору R_x та ємності C_x) має вигляд:

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

звідки активна та реактивна складові комплексної провідності описуються виразами:

$$\text{Im}(Y) = \omega C \frac{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2 + \omega^2 C_x C R_x^2}{1 + \omega^2 R_x^2 (C_x + C)^2} = \omega C \frac{1}{1 + \omega^2 R_x^2 (C_x + C)^2} + \omega C_x \frac{\omega^2 C^2 R_x^2 \left(1 + \frac{C_x}{C}\right)}{1 + \omega^2 R_x^2 (C_x + C)^2}, \quad (2)$$

$$\text{Re}(Y) = \frac{\omega^2 C^2 R_x}{1 + \omega^2 R_x^2 (C_x + C)^2}. \quad (3)$$

Враховуючи, що ємність подвійного шару суттєво переважає ємність перетворювача з об'єктом контролю, як зазначено вище, вирази (2) і (3) за умови $C \gg C_x$ спрощуються і набувають вигляду

$$\text{Im}(Y) = \omega C \frac{1}{1 + \omega^2 R_x^2 C^2} + \omega C_x \frac{\omega^2 C^2 R_x^2}{1 + \omega^2 R_x^2 C^2}; \quad (4)$$

$$\text{Re}(Y) = \frac{\omega^2 C^2 R_x}{1 + \omega^2 R_x^2 C^2}. \quad (5)$$

Як бачимо, залежності (4) та (5) пов'язані із частотою тестового сигналу, а вибір частоти пов'язаний із параметрами об'єкта контролю і ємністю подвійного шару. Разом з тим, активна складова не залежить від ємності об'єкта контролю і за певних умов також не залежатиме від частоти тестового сигналу. Реактивна складова залежить від параметрів об'єкта контролю і ємності подвійного шару. При цьому очевидним є таке. Реактивна складова за певних умов може визначатися або ємністю подвійного шару, або ємністю об'єкта контролю. Забезпечуються такі умови зміною частоти або зміною опору об'єкта контролю для заданого значення ємності C і для заданої частоти тестового сигналу. З метою виявлення особливостей вимірювання електрофізичних параметрів контактними перетворювачами проведено математичне моделювання складових адмітансу (4) та (5) при широких діапазонах змін ємності подвійного шару та опору об'єкта.

Математичне моделювання

Завданням математичного моделювання було оцінити вплив ємності подвійного шару на вимірювання параметрів об'єктів для різних значень приелектродної ємності в частотному діапазоні тестового сигналу та при фіксованому значенні ємності сенсора з контрольованим об'єктом.

Для низькоомного об'єкта контролю (з опором $R_x = 10$ Ом) при $C = 0,1$ мкФ, $C = 1$ мкФ, $C = 10$ мкФ, $C = 100$ мкФ, $C = 1000$ мкФ та при $C_x = 10$ пФ отримано залежності активної складової від частоти тестового сигналу в діапазоні від 50 Гц до 10 ГГц, зображені на рис. 1.

Аналіз отриманих залежностей показує, що із зростанням приелектродної ємності очевидним є зміщення ліворуч кривих за частотою. Тим самим зміщується частота, з якої при заданому значенні ємності подвійного шару C активна складова є частотою незалежною. Як видно з рис.1, якщо при ємності 0,1 мкФ частота становить 10 МГц, то при ємності 100 мкФ вона зменшується до 10 кГц.

Тобто, для отримання незалежності результату вимірювання низькоомного об'єкта на нижчих частотах необхідно збільшувати ємність подвійного шару. Для цього треба використовувати сенсор з більшою площею електродів, і навпаки.

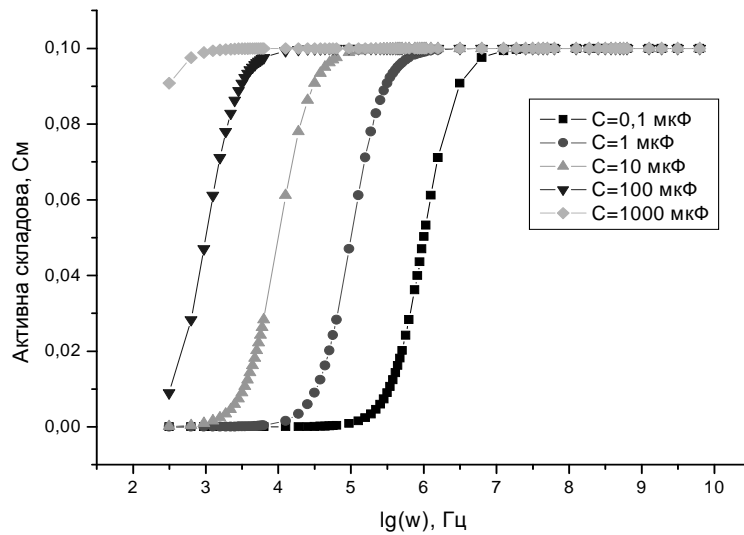


Рис. 1. Графік залежності активної складової від частоти тестового сигналу при різних значеннях приелектродної ємності для $R_x = 10 \text{ Ом}$

Для об'єктів з більшим опором, як показали дослідження, також розширюється діапазон частотної незалежності аналогічно до впливу ємності подвійного шару. Наприклад, вже для опору $R_x = 1 \text{ МОм}$ матимемо залежності активних складових, зображені на рис. 2.

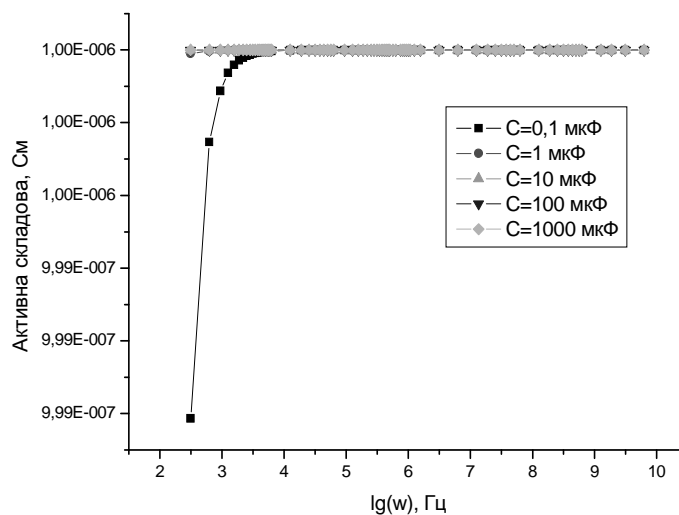


Рис. 2. Графік залежності активної складової від частоти тестового сигналу при різних значеннях приелектродної ємності для $R_x = 1 \text{ МОм}$

Аналогічно, забезпечуючи ті самі умови, проведемо дослідження для реактивної складової комплексної провідності. Отримані результати для низькоомного об'єкта (10 Ом) зображено на рис. 3.

Результати математичного моделювання реактивної складової показали ряд кривих, зміщених за частотою ліворуч із збільшенням на порядок приелектродної ємності, кожна з яких має свій максимум. Криві характеризуються наростанням до точки максимуму і плавним спаданням до певного мінімального значення. Аналіз залежностей (рис. 3) показує, що збільшення ємності подвійного шару призводить до зміщення екстремального значення реактивної складової в бік зменшення частоти тестового сигналу і навпаки. При цьому діапазон частот, у якому реактивна складова адмітансу практично залишається сталою, розширюється. Зменшення ємності звужує такий частотний діапазон.

Так, якщо при ємності 0,1 мкФ мінімальне значення складової досягається на частоті 100 МГц, то при ємності 1000 мкФ мінімальне значення знаходиться в діапазоні 10кГц – 100МГц.

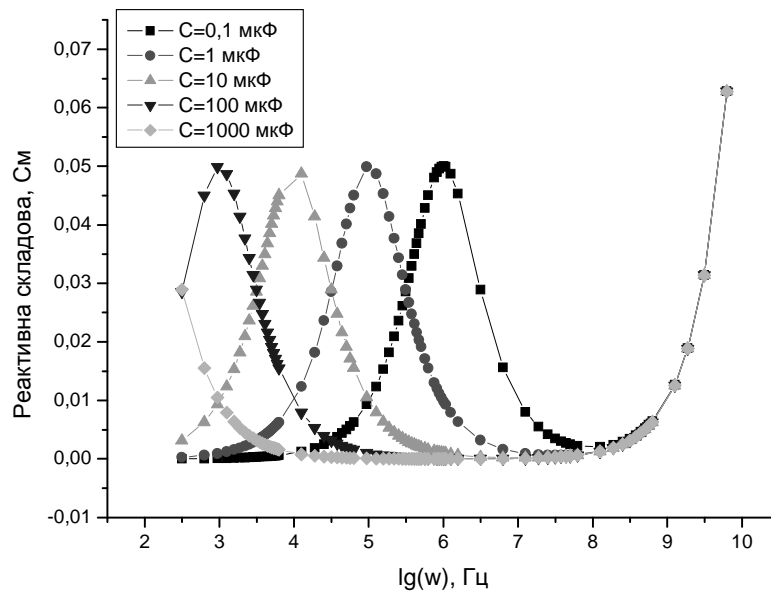


Рис. 3. Графік залежності реактивної складової від частоти тестового сигналу при різних значеннях приелектродної ємності для $R_x = 10 \text{ Ом}$

Аналогічні дослідження проводилися для об'єктів з опором $R_x=100 \text{ Ом}$; $R_x=1 \text{ кОм}$; $R_x=10 \text{ кОм}$; $R_x=100 \text{ кОм}$; $R_x=1 \text{ МОм}$. З наближенням значення опору до 1 МОм спостерігається зміна форми кривих і зменшення їх амплітуди до мінімального значення, тому маємо таку залежність (рис. 4).

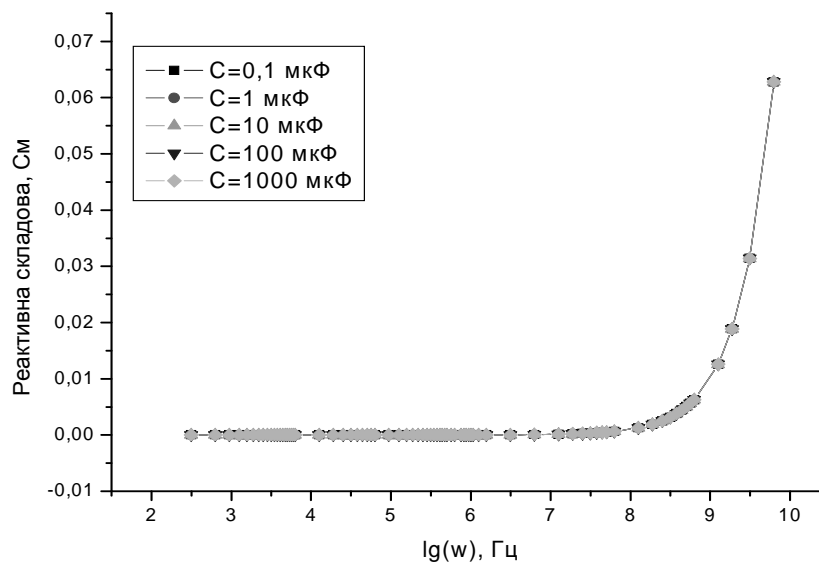


Рис. 4. Графік залежності реактивної складової від частоти тестового сигналу при різних значеннях приелектродної ємності для $R_x = 1 \text{ МОм}$

У горизонтальній частині графіка розглядається незалежність реактивної складової від частоти у доволі широкому частотному діапазоні і її значення наближається до нуля. Залежності реактивної складової від ємності подвійного шару не спостерігається. Зростання реактивної складової на частотах вищих за 100 МГц зумовлено ємністю C_x .

Результати дослідження залежностей активних складових для зміни опору низькоомних об'єктів від 10 до 100 Ом з кроком 10 Ом для заданого значення $C=0,1 \text{ мкФ}$ у цьому ж частотному діапазоні зображено на рис. 5.

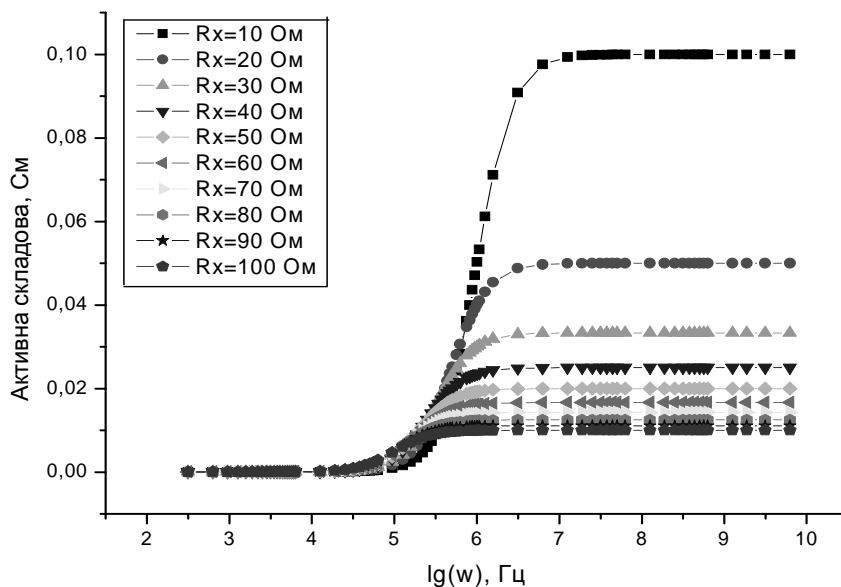


Рис. 5. Графік залежності активної складової від частоти тестового сигналу при різних значеннях опору та сталому значенні ємності подвійного шару $C=0,1$ мкФ

Графік залежності активної складової від частоти тестового сигналу показує, що при заданому значенні ємності подвійного шару $C=0,1$ мкФ кожна крива має своє максимальне значення залежно від опору. А із збільшенням приелектродної ємності всі криві змістатимуться ліворуч. Так, наприклад, при значенні $C=1000$ мкФ кожна крива активної складової не залежатиме від частоти тестового сигналу. Залежності реактивних складових від частоти відповідно до заданих умов зображено на рис. 6.

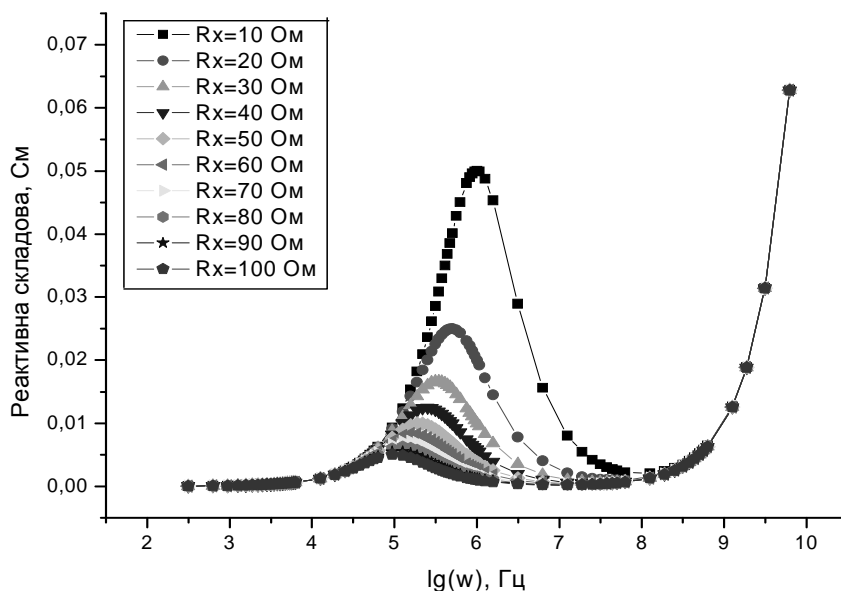


Рис. 6. Графік залежності реактивної складової від частоти тестового сигналу при різних значеннях опору та сталому значенні ємності подвійного шару $C = 0,1$ мкФ

З отриманих залежностей реактивних залежностей видно, що за сталого значення приелектродної ємності при зміні опору об'єкта також спостерігаються їх екстремальні значення. При цьому частота, на якій спостерігаються екстремальні значення, збільшується зі збільшенням опору. Амплітуда при цьому пропорційно змінюється до зміни опору

Висновки

За результатами математичного моделювання активних та реактивних складових в частотному діапазоні можна зробити такі висновки.

1. Залежність реактивної складової адмітансу контактного первинного перетворювача з низькоомним об'єктом містить три діапазони частот, у яких складова має свій характер зміни. У першому діапазоні частот спостерігаються екстремальні значення реактивної складової. Другий діапазон характерний тим, що в ньому спостерігається незалежність реактивної складової від частоти порівняно з іншими. В третьому діапазоні складова стрімко зростає із зростанням частоти.

2. Частота, на якій реактивна складова набуває екстремального значення, обернено пропорційна ємності подвійного шару при сталому значенні опору об'єкта або при сталій ємності подвійного шару пропорційна опору. Частоту тоді можна використати як інформативний параметр.

3. Вимірювання ємності первинного перетворювача з об'єктом контролю необхідно здійснювати у високочастотному діапазоні. При цьому результат не залежить від ємності подвійного шару.

4. Частотний діапазон, в якому забезпечується інваріантність активної складової від частоти, залежить від ємності подвійного шару та опору об'єкта. При сталому значенні опору із збільшенням ємності діапазон розширюється, а при сталій ємності із зростанням опору діапазон звужується.

1. Григорчак І.І. Імпедансна спектроскопія: навч. посібник / І.І. Григорчак, Г.В. Понеділок. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 352 с. 2. Делахей П. Двойной слой и кинетика электродных процессов. – М.: Мир, 1967. – 351 с. 3. Походило Є.В. Дослідження впливу ємності подвійного шару на інформативні параметри імітансних сенсорів / Є.В. Походило, М.Р. Леськів // Вимірювальна техніка та метрологія: міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2012. – Вип. 73. – С. 76–79. 4. Лопатин Б.А. Теоретические основы электрохимических методов анализа: учеб. пособие для ун-тов / Б.А. Лопатин. – М.: Высшая школа, 1975. – 295 с. 5. Дамаскин Б.Б. Адсорбция органических соединений на электродах / О.А. Петрий, В.В. Батраков. – М.: Наука, 1968. – 334 с. 6. Дамаскин Б.Б. Электрохимия / О.А. Петрий, Г.А. Цирлина. – 2-е изд., испр. и перераб. – М.: Химия, КолосС, 2006. – 672 с.