

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Герасим Марта Романівна



УДК 621.317

**РОЗВИТОК МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАННЯ
ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБ’ЄКТІВ КВАЛІМЕТРІЇ
НЕЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИРОДИ**

05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2014

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Походило Євген Володимирович,
професор кафедри метрології, стандартизації
та сертифікації Національного університету «Львівська
політехніка»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Середюк Орест Євгенович,
професор кафедри методів та приладів контролю
якості і сертифікації продукції
Івано-Франківського національного технічного
університету нафти і газу,
м. Івано-Франківськ

кандидат технічних наук,
Гонсьор Оксана Йосипівна
доцент кафедри автоматизації тваринництва,
якості та стандартизації
Львівського національного аграрного університету,
м. Дубляни

Захист відбудеться «21» листопада 2014 року о 14⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.08 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, м. Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу).

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів-13, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «20» жовтня 2014 року.

*Учений секретар спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., проф.*



Я. Т. Луцик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для дослідження об'єктів неелектричної природи, зокрема контролю якості сировини, матеріалів, готової продукції, екологічного та біологічного контролю за електрофізичними параметрами широко використовують ємнісні контактні первинні перетворювачі (сенсори). Різноманітність первинних перетворювачів, вимірювальних засобів їхніх інформативних параметрів, а також широкий спектр вимірюваних неелектричних величин, недостатнє вивчення методів їх вимірювання, метрологічна незабезпеченість не дають змоги встановити єдині вимоги щодо проведення вимірювань. Зумовлено це тим, що як первинні перетворювачі, так і вимірювальні засоби мають кожен свої електричні параметри, різні режими вимірювань, різні схеми під'єднання, різної природи стандартні зразки тощо. Крім того, під час вимірювального експерименту в широкому діапазоні присутні неінформативні параметри одного з інформативними характеру. У разі вимірювань параметрів низькоомних об'єктів – це ємність подвійного шару та імпеданс з'єднувальних дротів, а у разі вимірювання параметрів високоомних об'єктів – це залишки продукту попередніх вимірювань на електродах, окислення електродів, краєві ефекти тощо. Окрім того частина об'єктів зберігає свої характеристики підчас вимірювань в режимі заданого струму, а частина – в режимі заданої напруги. Деякі об'єкти потребують обмеженого рівня тестового сигналу чи його частоти.

Все зазначене є важливим, оскільки саме це визначає технічну складову метрологічного забезпечення вимірювань електрофізичних параметрів об'єктів неелектричної природи, зокрема рідин, сипких матеріалів, біологічних об'єктів. Тому необхідним є вдосконалювати метрологічне забезпечення таких вимірювань в напрямку оптимального вибору інформативних параметрів, частотного діапазону, режимів роботи, забезпечення інваріантності результатів до неінформативних параметрів, вибору базового зразка, тощо. Саме тим зумовлена актуальність теми даної дисертаційної роботи.

Зв'язок теми дисертації з напрямками науково-дослідних робіт. Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку кафедри метрології, стандартизації та сертифікації. Робота виконана в межах науково-дослідних робіт: «Дослідження електрофізичних параметрів промислової продукції для метрологічного забезпечення оцінювання їх якості» (номер державної реєстрації №0113U005290) з 01.01.2013р.; держбюджетної науково-дослідної роботи «Розроблення та дослідження нових методів і засобів експрес-контролю характеристик якості та безпечності продукції (речовин)» (номер державної реєстрації №0110U001097) з 01.01 2010р., у виконанні яких аспірантка приймала участь як виконавець.

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є покращення метрологічного забезпечення вимірювань електрофізичних параметрів об'єктів кваліметрії неелектричної природи засобами імітансного контролю.

Для досягнення необхідної мети необхідно було виконати такі завдання:

- провести аналіз методів та засобів вимірювання електрофізичних параметрів об'єктів кваліметрії неелектричної природи, а також встановити проблеми, які виникають під час вимірювань;
- проаналізувати види первинних перетворювачів, проаналізувати вплив розмірів та форми електродів імітансних сенсорів на їх інформативні параметри;
- дослідити вплив приелектродних імпедансів на інформативні параметри імітансних сенсорів за математичними моделями;
- оцінити вплив параметрів з'єднувальної схеми на результат кондуктометричних, діелькометричних та імпедансометричних вимірювань електрофізичних параметрів;
- оцінити метрологічні характеристики перетворення «об'єкт-імпеданс-напруга» з урахуванням інформативних та неінформативних параметрів, режимів роботи, конструкції первинних перетворювачів;
- дослідити методичні похибки, зумовлені неінформативними імпедансами в широкому частотному діапазоні;
- на основі проведеного теоретичного аналізу і проблем, які виникають під час вимірювання, запропонувати шляхи зменшення впливу ємності подвійного шару на вимірювання складових імітансу при вимірюванні електрофізичних параметрів;
- провести експериментальні дослідження контактного первинного перетворювача щодо впливу його геометричних розмірів на ємність подвійного шару в частотному діапазоні та впливу рівня напруги джерела тестового сигналу.

Об'єкт дослідження – процес вимірювання електрофізичних параметрів контактними ємнісними первинними перетворювачами.

Предмет дослідження – методи та засоби вимірювального контролю електрофізичних параметрів об'єктів неелектричної природи, що ґрунтуються на вимірюванні електропровідності.

Методи дослідження. У дисертації використано теоретичні основи електротехніки, фізики, хімії, кваліметрії, вимірювальної техніки, теорії електричних кіл та сигналів. Застосовувалися імітансний метод вимірювання параметрів об'єктів неелектричної природи, методи імітаційного моделювання, електрохімічні методи. Експериментальні дослідження проводилися за допомогою лабораторних пристроїв, сучасних вимірювальних приладів та стандартних методик.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розвитку технічної складової метрологічного забезпечення вимірювань електрофізичних параметрів для визначення якісних показників об'єктів неелектричної природи. В дисертаційній роботі отримані наступні наукові результати:

1. Запропоновано на основі аналізу математичних моделей імпедансу та адмітансу первинного перетворювача вибір оптимального інформативного параметра (активна або реактивна складові імітансу) для заданого частотного діапазону, що дає змогу зменшити вплив неінформативного параметра (ємності подвійного шару) на результат вимірювання.

2. Виявлено за результатами математичного моделювання реактивної складової адмітансу в широкому частотному діапазоні характерні зміни в його трьох піддіапазонах, а саме: у першому спостерігаються на окремих частотах екстремальні значення реактивної складової, другий піддіапазон характерний незначною залежністю її від частоти, а третій - стрімким зростанням, що дає змогу використати зазначені особливості піддіапазонів для вимірювань різних інформативних параметрів (частота, опір, ємність).
3. Отримано аналітичні вирази для оцінювання методичної похибки вимірювання залежно від співвідношення між неінформативними параметрами (ємність подвійного шару, індуктивність з'єднувальних дротів) та електричними параметрами досліджуваного об'єкта.
4. Запропоновано структури вимірювальних перетворювачів «імітанс-напруга» об'єктів неелектричної природи з чотириелектродними контактними сенсорами, що забезпечують режими заданого струму та напруги з інваріантністю результату вимірювання до неінформативних імпедансів, утворених параметрами різної природи (ємність подвійного шару, залишки продукту попередніх вимірювань, окислення тощо), а також до параметрів тестового сигналу.
5. Виявлено, що приелектродна ємність контактних первинних перетворювачів з однаковою сталою залежить не тільки від площі електродів, але й від міжелектродної відстані, що вказує на лише індивідуальне використання двоелектродного кондуктометричного сенсора в засобах вимірювання електрофізичних параметрів на низьких частотах.

Практичне застосування отриманих результатів. Результати виконаних теоретичних і експериментальних досліджень можуть застосовуватися для покращення технічної складової метрологічного забезпечення вимірювань електрофізичних параметрів об'єктів неелектричної природи під час оцінювання якості продукції електричними методами, а саме: оцінювання методичних похибок вимірювання інформативного параметра для заданого діапазону частот, для створення електричних моделей стандартних зразків об'єктів неелектричної природи, оптимального вибору інформативного параметра для заданого діапазону частот, вибору геометричних розмірів первинних перетворювачів. Запропоновані вимірювальні перетворювачі імпедансу можуть бути використані для побудови засобів контролю показників якості продукції та інших проблемноорієнтованих засобів вимірювання параметрів об'єктів неелектричної природи. Отримані результати можуть бути використані для розроблення методично-нормативної складової метрологічного забезпечення вимірювань електрофізичних параметрів (методики, стандарти тощо).

Отримані в роботі наукові результати використовуються в навчальному процесі кафедри метрології, стандартизації та сертифікації Національного університету «Львівська політехніка» при викладанні дисциплін: «Фізико-хімічні вимірювання», «Методи та засоби вимірювань, випробувань та контролю», які читаються студентам напряму підготовки 6.051002 «Метрологія, стандартизація та сертифікація» та дисципліни «Імітансний контроль якості» магістрам спеціальності 8.05100201 «Метрологічне забезпечення випробувань та якості продукції».

Особистий внесок здобувача. Здобувачем сформовано основні проблеми вимірювання об'єктів неелектричної природи електричними методами і проаналізовано вплив останніх на інформативні параметри. Основний обсяг теоретичних робіт за темою дисертації та експериментальні дослідження виконано здобувачем самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належить: [8] проаналізовано вплив приелектродної ємності на результат вимірювання інформативних параметрів залежно від частоти тестового сигналу; [4], [6] - проведено математичне моделювання складових адмітансу контактних первинних перетворювачів при різних значеннях параметрів; [7], [12] – метрологічне забезпечення імітансного контролю якості продукції; [11] – вдосконалення перетворювачів в засобах контролю якості.

Апробація результатів. Викладені в дисертаційній роботі наукові положення та наукові результати доповідались та обговорювались на всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях і семінарах: I Міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології і системи». – м. Одеса. – 2012; I Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Сучасні інформаційні системи та технології». Тези доповідей. – м. Суми. – 2012; XII Міжнародна конференція «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)». Тези доповідей // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – м. Вінниця. – 2012; IX міжнародна науково-технічна конференція «Методи і засоби фізичних величин» - «Температура-2012». Тези доповідей. – м. Львів. – 2012; Міжнародна науково-практична конференція. - «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи» (QM-2013). – Львів. – 2013; Міжнародна науково-технічна конференція «Системи – 2013. Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань». – Львів. – 2013.

Публікації. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 13 наукових праць, з них 5 статей у фахових виданнях України (1 – в наукометричних базах), 2 статті – у закордонних періодичних виданнях та 6 тез доповідей (1– у закордонних періодичних виданнях).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація викладена на 145 сторінках друкованого тексту і складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, містить 75 рисунків, 5 таблиць, перелік використаних джерел містить 105 бібліографічних найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі відображено актуальність проблеми дослідження, визначено предмет та об'єкт дослідження. Визначено мету, задачі та методи досліджень, наукову новизну і практичну цінність результатів. Наведено зв'язок роботи із науковими програмами, планами та темами, наведені дані про особистий внесок здобувача, апробацію та публікації результатів досліджень.

У першому розділі дисертації проведено аналіз сучасних досліджень якості різноманітних об'єктів неелектричної природи за електрофізичними параметрами із використанням імітансного методу вимірювання. Зазначено, що об'єкт кваліметрії

неелектричної природи подається у вигляді багатоелементного двополюсника у електричному колі змінного струму широкого частотного діапазону, параметри імпедансу чи адмітансу якого відображають його фізико-хімічні властивості. При цьому одержання основної інформації про об'єкт контролю та перетворення її фізичної величини забезпечується первинними перетворювачами. Проаналізовано методи та засоби вимірювання об'єктів неелектричної природи, наведено їхні переваги та недоліки. Перелічено основні проблеми вимірювань електрофізичних параметрів рідин, зокрема проаналізовано вплив ємності подвійного шару та імпедансу Варбурга на результат вимірювання, встановлено основні причини їх виникнення та теорії дослідження. Наведено відомі в літературі схеми заміщення кондуктометричної комірки із врахуванням приелектродних ефектів. Сформовано задачі дослідження, які необхідно вирішити для вдосконалення технічної складової метрологічного забезпечення вимірювань електрофізичних параметрів об'єктів неелектричної природи для оцінювання якості об'єктів кваліметрії.

У другому розділі проведено теоретичні дослідження електричної та математичної моделей первинного перетворювача з урахуванням приелектродних ефектів на межі «електрод-об'єкт». За інформативні електричні параметри об'єкта контролю вибрано складові імпедансу первинного перетворювача разом з об'єктом дослідження неелектричної природи, а саме: активна та реактивна складова імпедансу. Для дослідження використано узагальнену електричну схему заміщення системи «сенсор-вимірювальний засіб» (рис.1).

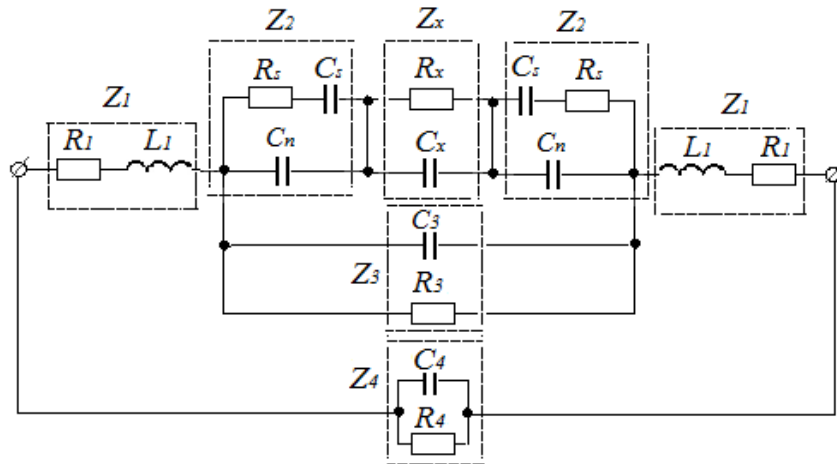


Рисунок 1 - Схема заміщення системи «сенсор-вимірювальний засіб»

Імпеданс Z_1 характеризує схему під'єднання сенсора до приладу, Z_2 – приелектродний імпеданс, утворений параметрами R_s та C_s (імпеданс Варбурга) та C_n (ємністю подвійного шару), Z_3 – міжелектродний конструктивний імпеданс комірки, Z_4 – вхідний імпеданс приладу та Z_x імпеданс об'єкта контролю з параметрами R_x та C_x .

Оскільки вплив імпедансу Z_3 та Z_4 усуваються триконтактною схемою під'єднання (екрануванням), імпеданс Z_2 , як доведено в роботі за умови переважаючої дії ємності подвійного шару над імпедансом Варбурга в частотному

діапазоні від 50Гц і вище, визначається лише ємністю подвійного шару, імпеданс Z_1 визначається індуктивністю, (а з використанням чотириконтактного під'єднання усувається його вплив), то наведена на рис.1 схема спрощується і містить лише імпеданс об'єкта контролю з параметрами R_x та C_x та ємність подвійного шару C_n .

У такому разі імпеданс сенсора визначається за виразом

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

з якого, отримаємо активну $\text{Re}(Z)$ та реактивну $\text{Im}(Z)$ складові, а саме:

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

$$\text{Im}(Z_x) = -\frac{1}{\omega C_n} \cdot \frac{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2 \left(1 + \frac{C_n}{C_x}\right)}{1 + (\omega C_x R_x)^2}, \quad (3)$$

а з урахуванням $\frac{C_n}{C_x} \gg 1$ вираз (3) спрощується і отримуємо

$$\text{Im}(Z_x) = -\frac{1}{\omega C_n} \cdot \frac{1 + \omega^2 C_n C_x R_x^2}{1 + (\omega C_x R_x)^2}. \quad (4)$$

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 опорами об'єкта контролю, поданого паралельною схемою заміщення. Так за умови $(\omega C_x R_x) \ll 1$ з виразу (2) маємо $\text{Re}(Z_x) = R_x$.

Звідси виходить, що на низьких частотах тестового сигналу, як інформативний параметр необхідно використовувати опір R_x контрольованого об'єкта, чим забезпечуватиметься інваріантність результату до ємності подвійного шару. Разом з тим, на низьких частотах реактивна складова імпедансу (4) визначатиметься лише опором, утвореним ємністю подвійного шару, а саме $\frac{1}{\omega C_n}$. Однак із зростанням частоти тестового сигналу реактивна складова імпедансу визначатиметься

реактивними опором $\frac{1}{\omega C_x}$. Тобто, використовуючи як вимірюваний параметр реактивну складову імпедансу, на низьких частотах інформативним може бути ємність подвійного шару, а на високих – ємність об'єкта.

Для адмітансу двополюсника (рис.1) з урахуванням $Y = \frac{1}{Z}$, як інформативного параметра, отримаємо

$$Y = \frac{1 + j\omega C_x R_x}{R_x + \frac{C_x R_x}{C_n} - j\frac{1}{\omega C_n}}, \quad (5)$$

звідки, з урахуванням $\frac{G_x}{\omega C_n} \ll 1$ (така умова досягається високоомними об'єктами або зростанням частоти), активна $\text{Re}(Y)$ та реактивна $\text{Im}(Y)$ складові адмітансу описуються формулами

$$\text{Re}(Y) = G_x \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{C_x}{C_n}\right)^2}, \quad (6)$$

$$\text{Im}(Y) = \omega C_x \cdot \frac{\left(1 + \frac{C_x}{C_n}\right)}{\left(1 + \frac{C_x}{C_n}\right)^2} = \omega C_x \frac{1}{\left(1 + \frac{C_x}{C_n}\right)}. \quad (7)$$

З урахуванням $C_n \gg C_x$ активна складова (6) визначатиметься параметром G_x , а реактивна складова, як видно з виразу (7) визначатиметься реактивною провідністю ωC_x .

Визначатиметься рівень впливу ємності подвійного шару на результат вимірювання інформативного параметра відношенням інформативної ємності до ємності подвійного шару.

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

Для низькоомного та високоомного об'єктів контролю отримані залежності активної складової від частоти тестового сигналу в діапазоні від 50 Гц до 10 ГГц зображені на рис.2 та рис. 3.

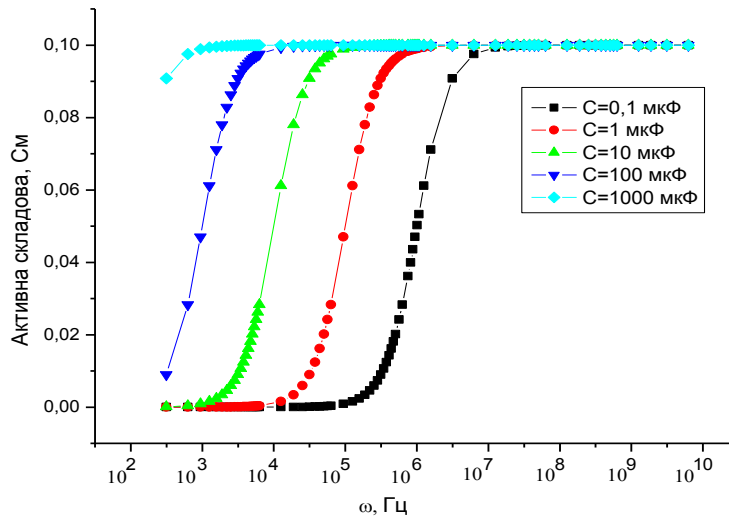


Рисунок 2 - Графік залежності активної складової від частоти тестового сигналу при різних значеннях приелектродної ємності для $R_x = 10$ Ом.

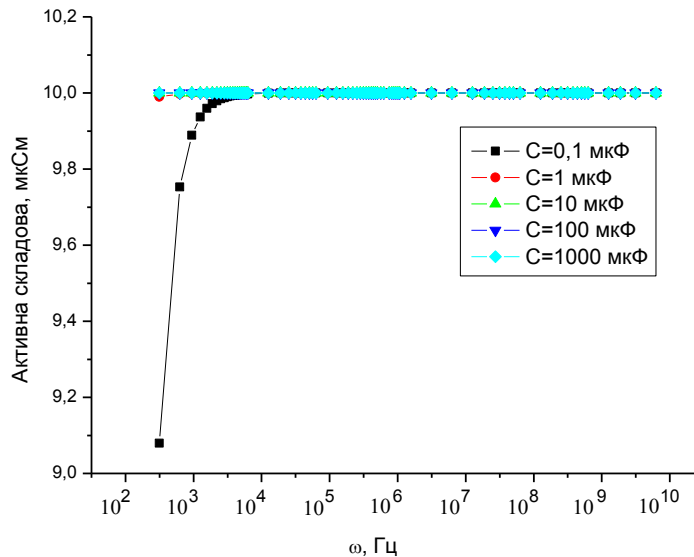


Рисунок 3 - Графік залежності активної складової від частоти тестового сигналу при різних значеннях приелектродної ємності для $R_x = 100$ кОм.

Аналіз отриманих залежностей показує, що із зростанням приелектродної ємності очевидним є зміщення вліво кривих по частоті. Тим самим зміщується частота, з якої при заданому значенні ємності подвійного шару C_n активна складова є частото незалежною. Для отримання незалежності результату вимірювання низькоомного об'єкту на нижчих частотах необхідно збільшувати ємність подвійного шару. Для цього потрібно використовувати сенсор з більшою площею електродів і навпаки.

Забезпечуючи ті ж самі умови, проведено аналогічні дослідження реактивної складової комплексної провідності. Отримані результати для низькоомного об'єкту зображені на рис.4.

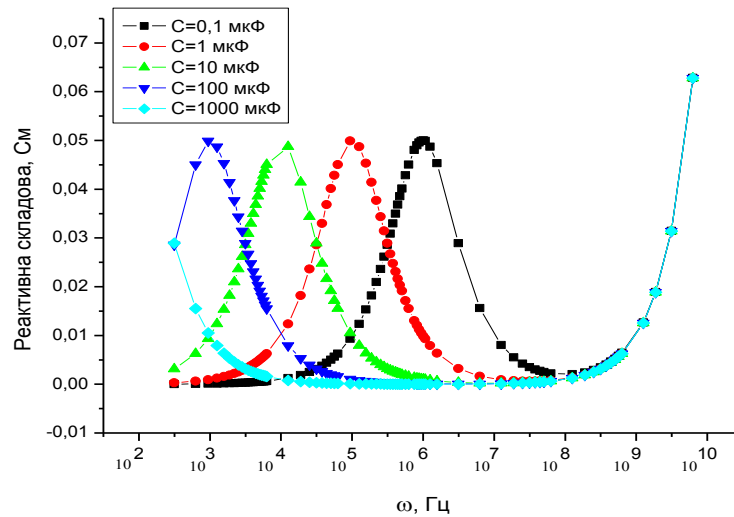


Рисунок 4 - Графік залежності реактивної складової від частоти тестового сигналу при різних значеннях приелектродної ємності для $R_x = 10$ Ом.

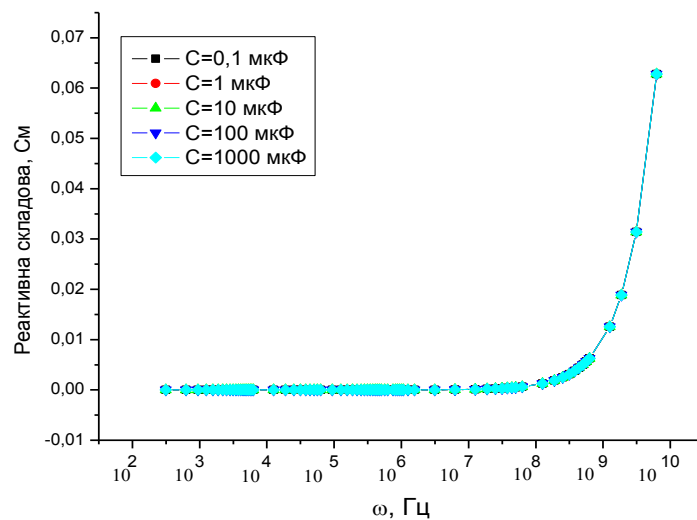


Рисунок 5 - Графік залежностей реактивної складової від частоти тестового сигналу при різних значеннях приелектродної ємності для $R_x = 100$ кОм.

Результати дослідження залежностей активної та реактивної складових для зміни опору низькоомних об'єктів від 10 до 100 Ом з кроком 10 Ом для заданого значення $C_n = 10$ мкФ у цьому ж частотному діапазоні зображено на рис.6 та рис. 7.

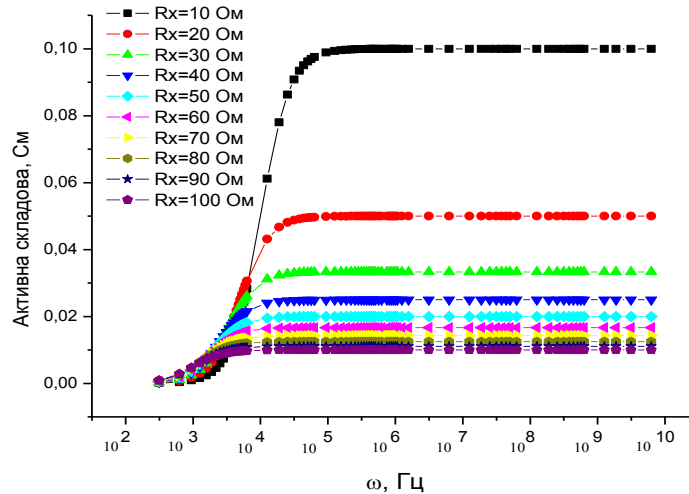


Рисунок 6 - Графік залежності активної складової від частоти тестового сигналу при різних значеннях опору та сталому значенні ємності подвійного шару для $C_n=10$ мкФ.

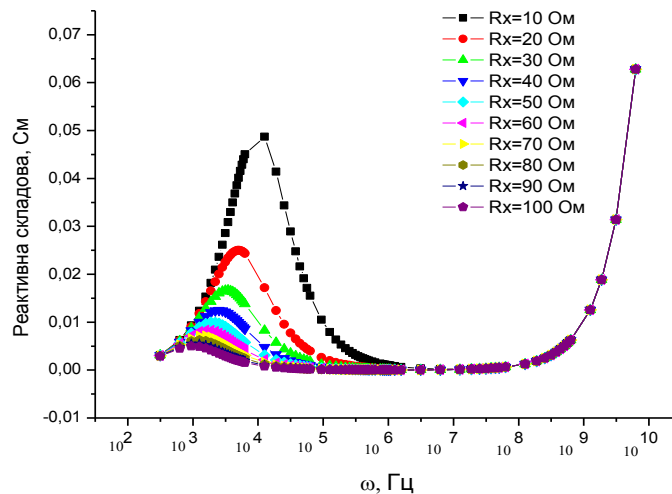


Рисунок 7 - Графік залежності реактивної складової від частоти тестового сигналу при різних значеннях опору та сталому значенні ємності подвійного шару $C_n=10$ мкФ.

Графік залежності реактивної складової від частоти тестового сигналу показує, що при заданому значенні ємності подвійного шару $C_n=10$ мкФ, кожна крива має своє максимальне значення залежно від опору. А при збільшенні приелектродної ємності, всі криві будуть зміщатися вліво.

З отриманих залежностей реактивних складових видно, що для сталого значення приелектродної ємності при зміні опору об'єкта також спостерігаються їхні екстремальні значення. При цьому частота, на якій спостерігаються екстремальні значення збільшується зі збільшенням опору (рис.7). Амплітуда при цьому змінюється пропорційно до зміни опору.

Отже, залежність реактивної складової адмітансу контактного первинного перетворювача з низькоомним об'єктом містить три піддіапазони частот (рис.4), у

яких складова має свій характер зміни. Перший піддіапазон характеризується екстремальним значенням реактивної складової. У другому піддіпазоні спостерігається незалежність реактивної складової від частоти у порівнянні з іншими. В третьому діапазоні складова стрімко зростає із зростанням частоти. Частота, на якій реактивна складова приймає екстремальне значення, обернено пропорційна ємності подвійного шару при сталому значенні опору об'єкта, або при сталій ємності подвійного шару пропорційна опорю. Тобто, частоту у даному разі можна використати як інформативний параметр вимірювання як ємності подвійного шару, так і опорю.

В роботі проаналізовані в частотному діапазоні тестового сигналу за отриманими аналітичними виразами активних та реактивних складових адмітансу первинного перетворювача для кондуктометричних, діелькометричних та імпедансометричних вимірювань з урахуванням індуктивності з'єднувальних дротів та відповідних схем заміщення. Виявлено, що реактивна складова для кондуктометричних та імпедансометричних вимірювань за певних умов приймає нульове значення або змінює знак. Так для кондуктометричних вимірювань:

$$\operatorname{Im}(Y_x) = \frac{\omega C_n - \omega^3 C_n^2 L}{(1 - \omega^2 LC_n)^2 + (\omega C_n R_x)^2}. \quad (8)$$

Це можна використати для вимірювання ємності подвійного шару за умови, що індуктивність є відомою. Для цього необхідно змінювати частоту тестового сигналу до моменту, коли реактивна складова (8) стає рівною нулю. Також можна вибрати частоту тестового сигналу, при якій вплив індуктивності з'єднувальних дротів буде мінімальним. Виявлене може бути основою для розвитку методів метрологічного забезпечення вимірювання електрофізичних параметрів.

У третьому розділі розглянуто питання забезпечення заданих метрологічних характеристик технічної частини метрологічного забезпечення, зокрема проаналізовано методичні похибки вимірювання інформативних параметрів електрофізичних параметрів з використанням дво- та чотириелектродних сенсорів та шляхи їх зменшення, запропоновано удосконалення стандартних зразків.

Розглянуте у попередньому розділі дає змогу стверджувати, що основним джерелом похибок вимірювань вибраного параметра є наявність ємності подвійного шару. Рівень впливу такої ємності визначається діапазоном зміни інформативного параметра та частоти, на якій здійснюються вимірювання. За певних умов такий вплив можна мінімізувати.

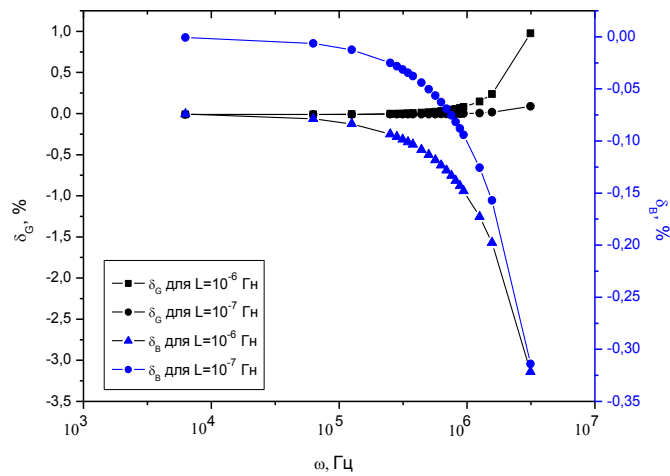
Іншим джерелом похибки вимірювань, особливо у разі дистанційних вимірювань, є параметри з'єднувальних дротів (в основному індуктивність), якими сенсор під'єднується до вимірювального перетворювача чи вимірювача імітансу.

Проаналізовано методичні похибки, зумовлені ємністю подвійного шару та індуктивністю з'єднувальних дротів для двоелектродного сенсора. Для цього отримано вирази для відносної методичної похибки вимірювання активної δ_G та реактивної δ_B складових, які з урахуванням ємності подвійного шару та індуктивності мають вигляд:

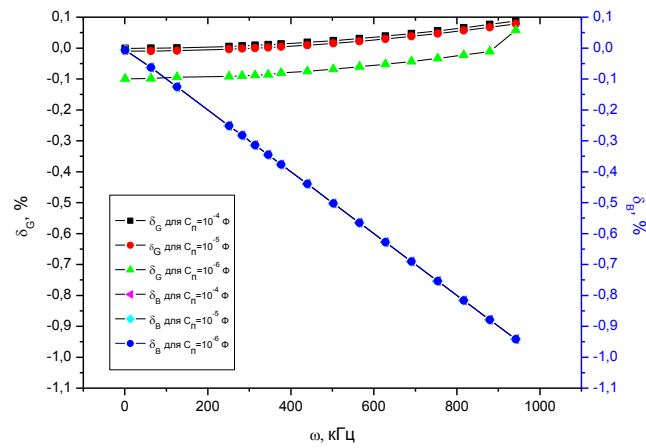
$$\delta_G = -\frac{C_x}{C_n} + \omega^2 LC_x = C_x \left(\omega^2 L - \frac{1}{C_n} \right), \quad (9)$$

$$\delta_B = \frac{G_x}{\omega C_n} - \omega LG_x = G_x \left(\frac{1}{\omega C_n} - \omega L \right). \quad (10)$$

Графіки залежності похибок δ_G та δ_B від частоти для $L = 10^{-6}$ Гн і $L = 10^{-7}$ Гн, $C_x = 10^{-9}$ та $C_n = 10^{-5}$, що характеризують зміну знаку похибок, зображено на рис.8 (на рис.8а показано широкий діапазон частот, на рис.8б – звужений).



а)



б)

Рисунок 8 – Графік залежності δ_G та δ_B від частоти для $L = 10^{-6}$ Гн і $L = 10^{-7}$ Гн (а – широкий діапазон частот, б – звужений діапазон частот)

Аналіз отриманих результатів показує, що для заданого значення похибки можна вибрати відповідну частоту вимірювання. Разом з тим, оскільки ємність подвійного шару C_n залежить від площі електродів сенсора, то можна також для заданого значення похибки вибирати відповідні розміри сенсора.

Іншим шляхом зменшення методичних похибок від впливу неінформативного приелектродного імпедансу є використання чотириелектродного первинного перетворювача. Запропоновано варіанти побудови інваріантних вимірювальних перетворювачів з такими перетворювачами, що реалізують метод прямого перетворення «імпеданс-напруга» на основі пасивних та активних векторних перетворювачів і забезпечують інваріантність результату як до неінформативних імпедансів, так і до параметрів джерела сигналу.

Окрім цього розглядаються перетворювачі, що забезпечують режим заданого струму та напруги на об'єкті контролі. Схема активного перетворювача, що забезпечує режим заданого струму зображена на рис.9.

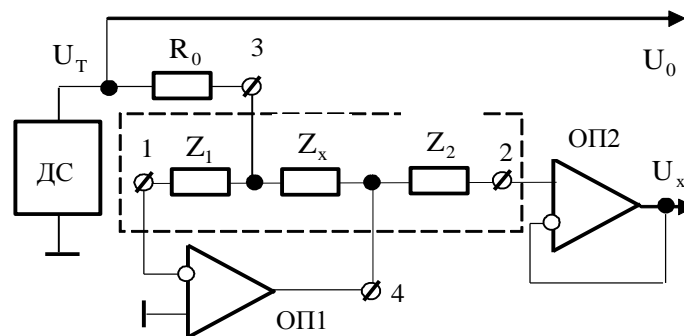


Рисунок 9 - Інваріантний перетворювач параметрів сенсора з режимом заданого струму

Інваріантність результату до неінформативних імпедансів забезпечується у даному разі тим, що неінформативні імпеданси Z_1 та Z_2 виводяться з кола зворотного зв'язку ОП1, а елементами від'ємного зворотного зв'язку ОП1 є лише Z_x та R_0 . Імпеданс Z_2 не впливає на результат, оскільки повторювачем на ОП2 забезпечується високоомний вхід пристрою, що під'єднується до виходу перетворювача.

З урахуванням зазначеного отримуємо лише відношення між інформативним параметром та зразковим опором

$$\frac{U_x}{U_0} = \frac{Z_x}{R_0}. \quad (11)$$

Такий режим доцільно застосовувати для вимірювання електрофізичних параметрів, властивості яких залежать від струму, а також для дистанційних вимірювань параметрів низькоомних об'єктів. Проте, багато об'єктів неелектричної природи потребують режиму заданої напруги, який також використовують у разі вимірювання параметрів високоомних об'єктів (бензини, мастила, олії тощо). На рис.10 зображено схему перетворювача, який забезпечує режим заданої напруги на сенсорі з використанням пасивного перетворювача.

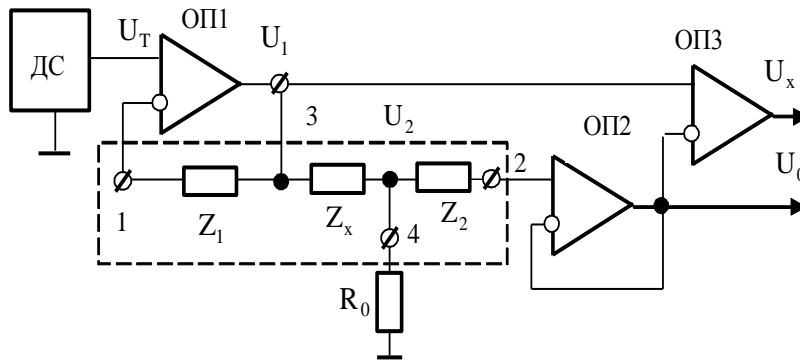


Рисунок 10 - Пасивний перетворювач з режимом заданої напруги

Напруга U_1 на подільнику з допомогою повторювача на ОП1 повторює напругу джерела напруги U_T (усувається вплив імпедансу Z_1 , а вплив імпедансу Z_2 усувається увімкненням його послідовно з високоомним входом повторювача на ОП2).

Розглянуті вимірювальні перетворювачі імпедансу об'єктів неелектричної природи з чотириелектродними контактними сенсорами можуть бути використані для побудови засобів контролю показників якості рідин за реактивною та активною складовими комплексної провідності в широкому частотному діапазоні, забезпечуючи при цьому режим заданої напруги або струму.

Перетворювачами також забезпечується інваріантність результату вимірювання до параметрів джерела сигналу, а також до неінформативних імпедансів, зокрема до ємності подвійного шару, що створюється у разі вимірювання полярних рідин або від залишків продукту попередніх вимірювань у разі вимірювань неполярних рідин.

Запропоновано використовувати для метрологічного забезпечення вимірювань параметрів об'єктів неелектричної природи електричні моделі стандартних зразків об'єктів у разі відомих схем заміщення об'єкта або сукупності активних та реактивних складових на фіксованих частотах – при відсутності таких.

У четвертому розділі наводяться результати експериментальних досліджень.

Досліджено приелектродний імпеданс, зокрема залежність ємності подвійного шару від геометричних розмірів первинного перетворювача (площі електродів, між електродної відстані та сталої) в частотному діапазоні 50 Гц-100 кГц. Для цього було виготовлено 5 кондуктометричних комірок плоскопаралельної конструкції (електроди комірок виготовлено із нержавіючої сталі). У двох зразках стала комірки однакова, інші характеризуються різними площами електродів та відстанню між ними. Дослідження проводилися у середовищі дистильованої води. Отримано результати вимірювань ємності сенсора C_p (визначається в основному ємністю подвійного шару) на фіксованих частотах до 10кГц, та побудовано графічні залежності її від частоти (рис.11, 12) для різних геометричних розмірів сенсора. На рис.11 маємо залежності ємності від частоти для сенсорів однакової площі, але з різною міжелектродною відстанню, а на рис.12 – залежність ємності від частоти для сенсорів з однаковою сталою комірки при різних площі та міжелектродній відстані.

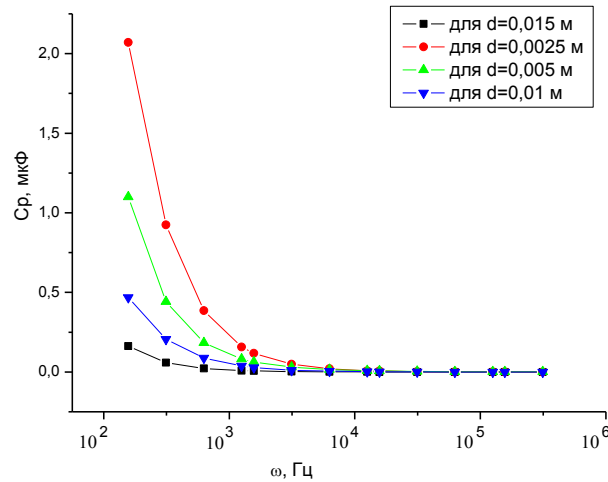


Рисунок 11 - Графік залежності C_p від частоти для зразків з однаковою площею електродів

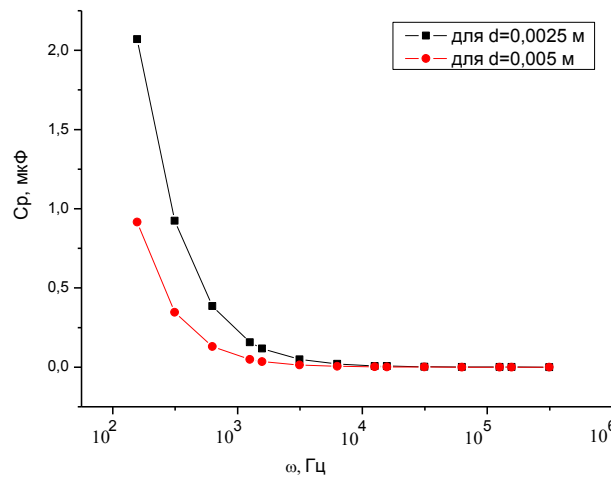


Рисунок 12 - Графік залежності C_p від частоти для зразків з однаковою сталюю комірки

Аналіз графіків (рис.11) показує, що ємність подвійного шару зростає із зменшенням міжелектродної відстані сенсора, причому залежність спадаюча із зростанням частоти. Частота діапазону, в якому отримуємо незалежність ємності від частоти, зростає зі зменшенням міжелектродної відстані. Отже, для зменшення ємності подвійного шару необхідно окрім зменшення площі збільшувати міжелектродну відстань. Тобто, отримана залежність ємності подвійного шару подібна до залежності конструктивної ємності від геометричних розмірів сенсора.

Графік (рис.12) показує, що приелектродна ємність є різною для сенсорів з однаковою сталюю, але з різними геометричними розмірами. Це свідчить про лише індивідуальне використання таких комірок з вимірювальними засобами. В інших випадках необхідне додаткове калібрування приладу.

Проведено експериментальні дослідження складових імітансу сенсора з рідинним об'єктом контролю та вплив рівня тестового сигналу (від 10мВ до 2 В) на результат їхнього вимірювання в частотному діапазоні (від 50Гц до 100кГц).

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Сукупність отриманих в дисертації результатів удосконалює технічну складову та може бути використано для розроблення методично-нормативної складової метрологічного забезпечення вимірювання електрофізичних параметрів об'єктів неелектричної природи.

У дисертаційній роботі отримано такі основні результати, які полягають у наступному:

1. Проведено широкий літературний аналіз сучасних досліджень із застосуванням імітансного методу вимірювання з використанням контактних первинних перетворювачів, який показав ряд невирішених проблем. Однією з них є вплив приелектродних ефектів під час вимірювального експерименту. Наведено схеми заміщення кондуктометричних комірок із врахуванням приелектродних явищ.
2. Проаналізовані активна та реактивна складові комплексної провідності імітансного сенсора за спрощеними схемами заміщення в частотному діапазоні тестового сигналу для кондуктометричних, діелькометричних та імпедансометричних вимірювань з урахуванням індуктивності з'єднувальних дротів.
3. Здійснено математичне моделювання складових адмітансу в широкому частотному діапазоні. Виявлено зміни реактивної складової в трьох піддіапазонах частот: перший характерний екстремальними значеннями реактивної складової, другий – незначною залежністю реактивної складової від частоти, третій діапазон - стрімким зростанням складової. При цьому частота, на якій реактивна складова має екстремальне значення залежить від приелектродної ємності або від опору об'єкта.
4. Показано, що залежно від частотного діапазону доцільно вибирати той чи інший інформативний параметр. Такими параметрами можуть бути опір, провідність, ємність об'єкта контролю або ємність подвійного шару.
5. Запропоновано інваріантні вимірювальні перетворювачі імпедансу об'єктів неелектричної природи з чотириелектродними контактними сенсорами, що забезпечують режим заданого струму або режим заданої напруги як полярних так і неполярних об'єктів.
6. Оцінено методичні похибки вимірювання за отриманими виразами залежно від співвідношення між інформативними та неінформативними параметрами в частотному діапазоні.
7. Запропоновано використовувати для вимірювання електрофізичних параметрів об'єктів кваліметрії неелектричної природи стандартний зразок електричної природи. Такий підхід уніфікує показники якості базового зразка, відповідні засоби контролю та методику виконання вимірювань для оцінювання якості.
8. Виявлено, що приелектродна ємність контактних первинних перетворювачів залежить не тільки від площі електродів, але також і від міжелектродної відстані. Це вказує на індивідуальне використання сталої комірки двоелектродного кондуктометричного сенсора в засобах вимірювання електрофізичних параметрів на низьких частотах.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. 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 / Національний університет "Львівська політехніка"; відповідальний редактор Б. І. Стадник. - Львів : Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2012. – Вип.73. – С. 76-79.

2. Леськів М.Р. Аналіз параметрів імітансних первинних перетворювачів / Леськів, Є. В. Походило // I Міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології і системи». – м. Одеса. – 2012. – С. 134-136.

3. Герасим М. Р. Вимірювальні перетворювачі параметрів контактних ємнісних сенсорів / М. Р. Герасим, Є.В. Походило, Нечай О.М.// Автоматика, вимірювання та керування: міжвідомчий науково-технічний збірник / Національний університет "Львівська політехніка"; відповідальний редактор В. Б. Дудикевич. - Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2013. – №753. – С. 15-20.

4. Герасим М. Р. Математичне моделювання складових адмітансу контактних первинних перетворювачів / М. Р. Герасим, Є.В. Походило// 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", 2013. – №751. – С. 193-198.

5. Herasym M. Invariant Transducers of Capacitive Sensor Parameters into Voltage / M. Herasym, Y. Pokhodylo // Eastern European journal of Enterprise Technologies, ISSN 1729-3774, – Kharkiv, Ukraine. – 2014. –2/9 (68). – P. 28-32.

6. Герасим М. Р. Моделирование контактного первичного преобразователя электрофизических параметров / М. Р. Герасим, Є.В. Походило// Устойчивое развитие: міжнародний науковий журнал / Технічний університет - Варна, – Болгарія, м. Варна. – 2013. – №7. – С. 55-58.

7. Герасим М. Р. Метрологічне забезпечення якості продукції / М.Р. Герасим, Т.З. Бубела // Міжнародна науково-технічна конференція «Якість технологій – якість життя» / Технологічний аудит та резерви виробництва, ISSN 2226-3780, – м. Перемишль, Польща. – 2014. – №1/4 (15). – С. 14-15.

8. Леськів М. Р. Вплив приелектродної ємності на параметри ємнісних сенсорів / М.Р. Леськів, Є.В. Походило // I Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Сучасні інформаційні системи та технології». Тези доповідей. – м. Суми. – 2012. – С. 47.

9. Леськів М. Р. Дослідження електричних та математичних моделей системи "об'єкт-електрод" / М.Р. Леськів, Є.В. Походило / XII Міжнародна конференція «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)». Тези доповідей // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – м. Вінниця. – 2012. – С. 169.

10. Леськів М. Р. Проблеми імітансних вимірювань електрофізичних параметрів речовин та матеріалів / М.Р. Леськів, Є.В. Походило // IX міжнародна науково-технічна конференція «Методи і засоби фізичних величин» - «Температура-2012». Тези доповідей. – м. Львів. – 2012. . – С. 189-190.

11. Герасим М. Р. Вдосконалення перетворювачів «імпеданс-напруга» в засобах контролю якості/ М.Р. Герасим, Є.В. Походило // Міжнародна науково-практична конференція. - «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи» (QM-2013). Тези доповідей. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", – 2013. – С. 231.

12. Походило Є. В. Метрологічне забезпечення імітансного контролю якості продукції / Є.В. Походило, С.Є. Остапчак, М.Р. Герасим // Міжнародна науково-технічна конференція «Системи – 2013. Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань». Тези доповідей / за ред. проф. Б.І Стадника, проф. Б. Венцика, проф. П.Г Столярчука. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – С.183.

13. Леськів М. Р. Приелектродна ємність в імпедансних засобах контролю якості / М.Р. Леськів, Є.В. Походило // VIII Міжнародна конференція «Стратегія якості в промисловості та освіті». Тези доповідей. – Болгарія, м. Варна. – 2012. – С. 108.

АНОТАЦІЯ

Герасим М.Р. Розвиток метрологічного забезпечення вимірювання електрофізичних параметрів об'єктів кваліметрії неелектричної природи. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.02. – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення. Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Львів, 2014 р.

Дисертація присвячена удосконаленню метрологічного забезпечення вимірювання електрофізичних параметрів об'єктів неелектричної природи. Вирішення проблеми ґрунтується на вимірюванні параметрів імітансу об'єкта контролю, що подається у вигляді багатоелементного двополюсника. Перелічено основні проблеми вимірювання об'єктів неелектричної природи електричними методами. Проаналізовано вплив ємності подвійного шару та імпедансу Варбурга на інформативні параметри, а також наведено схеми заміщення первинного перетворювача із врахуванням приелектродних ефектів. Отримано математичне моделювання складових адмітансу в широкому частотному діапазоні, що

характеризується амплітудною зміною та зміною форми залежностей. За результатами аналізу математичної моделі можна вибрати частоту тестового сигналу або частотний діапазон дослідження електрофізичних параметрів об'єктів неелектричної природи за допомогою контактних первинних перетворювачів. Залежність реактивної складової адмітансу контактного первинного перетворювача з низькоомним об'єктом містить три піддіапазони частот, в яких складова має свій характер зміни. Запропоновано вимірювальні перетворювачі імпедансу об'єктів неелектричної природи, які забезпечують інваріантність результату вимірювання до ємності подвійного шару та до параметрів тестового сигналу.

Ключові слова: метрологічне забезпечення, адмітанс, імпеданс, перетворювач, похибки, вимірювання, ємність подвійного шару, інформативні параметри.

ANNOTATION

Herasym M.R. Development of metrological assurance of electrophysical parameters measuring of qualimetry objects of nonelectric nature. As a manuscript.

The thesis for a scientific degree of the Candidate of Technical Sciences by speciality 05.01.02 – standardization, certification and metrological assurance. Lviv National Polytechnic University, Department of education and science of Ukraine, Lviv, 2014.

The thesis is dedicated to the improvement of metrological assurance of electrical parameters measuring of non-electrical nature objects. The solution of problem is based on immittance parameters measurement of control object, supplied as a multi-element two-terminal network. Parameters of such two-terminal network characterize physical and chemical properties of control object. It is established that near-electrode phenomena (in particular, the capacity of the double layer) significantly affect on the measurement result.

The electrical and mathematical models of primary contact transducers with considering of the near-electrode effects are shown. The influence of the near-electrode capacity on the measurement result of informative parameters is analyzed. Mathematical modeling of admittance components in a wide frequency range is conducted. The dependence of the admittance reactive component of the primary contact transducer with a low-frequency control object contains three ranges in which the component has its own character changes. According to the analysis of mathematical model we can select the frequency of the test signal or frequency range of electrophysical parameters research of non-electrical nature objects, using the primary contact transducers.

The variants of construction of “impedance-voltage” transducers with four-electrode contact sensors are suggested. This approach allows to provide a result invariance of the measurement to the near-electrode capacity and to the change of signal parameters. It is found that the near-electrode capacity of primary contact transducer depends not only on the area of the electrode, but also on the inter-electrode distance.

Key words: metrological support, admittance, impedance, transducer, errors, measurement, double layer capacity, informative parameters.

АННОТАЦИЯ

Герасим М.Р. Развитие метрологического обеспечения измерения электрофизических параметров объектов квалиметрии неэлектрической природы. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.01.02. - Стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение. Национальный университет «Львівська політехніка», Министерство образования и науки Украины, Львов, 2014.

Диссертация посвящена улучшению метрологического обеспечения измерения электрофизических параметров объектов неэлектрической природы. Проанализированы широкий спектр современных научных исследований с помощью имитансного метода измерения. Перечислены основные проблемы измерения объектов неэлектрической природы контактными первичными преобразователями. Проведенный анализ влияния емкости двойного слоя и импеданса Варбурга на информативные параметры, а также приведены схемы замещения первичного преобразователя с учетом приэлектродных эффектов.

Получено математическое моделирование составляющих адмитанса в широком частотном диапазоне. Моделирование зависимостей характеризуется изменением как амплитудных значений так и формы. По результатам анализа, в зависимости от частотного диапазона можно измерять или приэлектродную емкость, или параметры объекта контроля. Реактивная составляющая адмитанса контактного первичного преобразователя с низкоомным объектом содержит три диапазона частот, в которых составляющая имеет свой характер изменения. Первый диапазон характеризуется экстремальным значением, второй – малой зависимостью от частоты и третий диапазон - стремительным ростом.

Предложены варианты построения измерительных преобразователей импеданса объектов неэлектрической природы с четырехэлектродными контактными сенсорами, обеспечивающих инвариантность результата к неинформативным импедансам. Рассмотренные измерительные преобразователи могут быть использованы для построения средств контроля показателей качества жидкостей по реактивной и активной составляющими комплексной проводимости в звуковом частотном диапазоне.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, адмитанс, импеданс, преобразователь, погрешности, измерения, емкость двойного слоя, информативные параметры.