УДК 621.317.73

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРВИННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКІСНОГО РІВНЯ ПРОДУКЦІЇ

Т.Г Бойко, Т.З. Бубела, М.С. Міхалєва

Національний університет "Львівська політехніка ", вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, тел. (032)-258-23-94, e-mail: tgbo@ukr.net

Розглянуто матеріали, способи конструктивного вирішення і характеристики ємнісних первинних перетворювачів для імітансного контролю і оцінювання якісного рівня продукції неелектричної природи. Показано можливість використання сенсорів на змінному струмі і їх переваги над сенсорами на постійному струмі.
Ключові слова: ємнісний первинний перетворювач, якість продукції, сенсор, рідина, електрод, об'єкт контролю, нержавіюча сталь, платина, чутливість.

Рассмотрены материалы, способы конструктивного решения и характеристики емкостных первичных преобразователей для имитансного контроля и оценивания качественного уровня продукции неэлектрической природы. Показана возможность использования преобразователей на переменном токе и их преимущества над преобразователями на постоянном токе.
Ключевые слова: емкостный первичный преобразователь, качество продукции, сенсор, жидкость, электрод, объект контроля, нержавеющая сталь, платина, чувствительность.

Capacity primary transducers' materials, constructive solving ways and characteristics purposed for imitance control as well as quality level evaluation of nonelectric-nature production are under our consideration. Possibility of the use of transformers on an alternating current is rotined and them advantage above transformers on a direct current.
Keywords: capacity primary transformer, quality of products, touch-control, liquid, electrode, control object, stainless steel, platinum, sensitiveness.

Під час оцінювання якісного рівня продукції широке застосування мають засоби вимірювання параметрів імітансу (імпеданс та адмітанс) двополюсників, якими подаються об'єкти контролю як електричної, так і неелектричної природи [1]. Якщо для об'єктів електричної природи такі характеристики властивостей як ємність, індуктивність, опір, провідність чи інші проявляються під дією тестового сигналу у вигляді параметрів самостійно, то для об'єктів неелектричної природи характеристики властивостей проявляються лише у взаємодії з первинними перетворювачами – сенсорами. Відповідно в задачах кваліметрії вимоги до засобів оцінювання якості починаються з первинних перетворювачів (ПП), оскільки для об'єктів неелектричної природи характер імітансу визначається типом чутливого елемента у вигляді конденсатора, котушки індуктивності чи резистора, що взаємодіє з об'єктом контролю [2]. Структура об'єкта контролю при цьому призводить до зміни реактивної та активної складових діелектричної проникності середовища імітансного сенсора, який формує об'єкт контролю разом з ПП.

До найбільш істотних властивостей ПП, що впливають на об'єктивність кваліметричної оцінки, є висока чутливість, стійкість до зовнішніх впливів (температури, електромагнітних полів), відсутність впливу неінформативних параметрів та впливу матеріалів, з яких виготовлені сенсори на характеристики досліджуваного об'єкту і навпаки, фізичні обмеження, пов'язані з сумісністю ПП та об'єкту, стабільність власних характеристик сенсора.

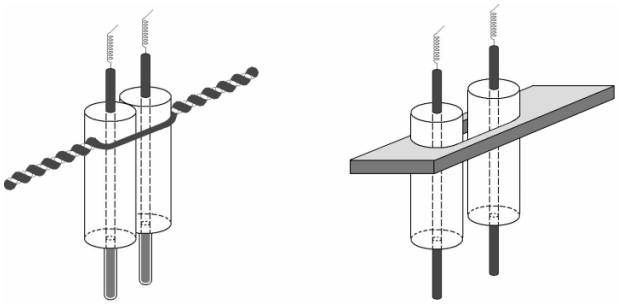
Розглянемо спроби вирішення вказаних обмежень в низці конструкцій первинних перетворювачів, що розроблялися для дослідження якісних властивостей рідин та сипких матеріалів.

Оскільки результати експериментальних досліджень [3] показали низьку ефективність (чутливість) індуктивних сенсорів для контролю якісних властивостей об'єктів кваліметрії, то увага була сконцентрована на ємнісних ПП різних конструкцій, розмірів, геометрії та матеріалів виконання. Відповідно до напрямів досліджень, а це високоомні та низькоомні

об'єкти, розроблювані ПП класифікувались як контактні та безконтактні. Перевагою перших є універсальність, а недоліком - взаємодія матеріалу електрода з досліджуваним об'єктом; другі можуть застосовуватися лише для низькоомних об'єктів, є менш чутливими, однак мають ту перевагу, що відсутня хімічна взаємодія матеріалів електрода і об'єкта.

Для виготовлення електродів ПП використовувались конвенціональні електроматеріали: інструментальна та нержавіюча сталь, мідь, платина у вигляді дроту діаметром (0,5 – 1,0) мм. Як діелектрик було використано скло, поліетилен та хімічно стійкий лак. Відстань між електродами варіювалась в межах (2,0 – 5,0) мм. Довжина активної частини перетворювача забезпечувалась становила (8,0 ± 0,5) мм. Критеріями пошуку оптимальних конструкцій з вказаними розмірами було забезпечення високої завадостійкості, забезпечення мінімального впливу неінформативних параметрів та матеріалу сенсора на характеристики досліджуваного об'єкта.

Конструкції ємнісних контактних та безконтактних ПП з дротяними електродами показані на рис.1. Мідні та сталеві електроди розташовувались фіксовано (рис.1,*а*) або з можливістю варіювання відстані між ними (рис. 1, *б*), а також як з покриттям (рис.1,*а*), що запобігало безпосередньому контакту з матеріалом досліджуваного об'єкта, так і без нього (рис. 1,*б*).



а) *б)*

Рисунок1 – Конструкції первинних перетворювачів з дротяними електродами

В першому випадку використовувався хімічно- і термостійкий лак, завдяки якому ПП класифікувався як безконтактний. Контактні сенсори з електродами без покриття потребували спеціального догляду бо, в результаті взаємодії з досліджуваним об'єктом, їх матеріал окислювався.

Дослідження показали непридатність і стального, і мідного дроту як в одному, так і в другому варіантах. Безконтактний сенсор мав недостатню чутливість, а контактний, окрім того, що кородував, ще й сам ставав джерелом носіїв заряду і вносив іони в досліджуваний матеріал. Тому застосування стального та мідного дроту у електродах ємнісних контактних ПП не знайшло подальшого розвитку.

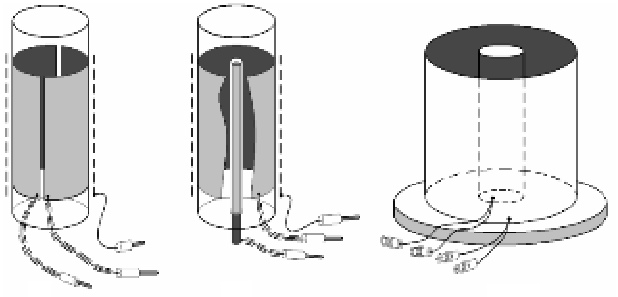
В аналогічному виконанні (рис.1) добре себе зарекомендували ПП з дротяними електродами із нержавіючої сталі та платини. Очевидно, що сталеві електроди значно поступалася за електропровідними властивостями, особливо на низькій частоті, платиновим, які є найменш хімічно активними. Використання і перших, і других в експериментальних показали високу відтворю-ваність повторних результатів, що свідчило про стабільність власних характеристик таких сенсорів, зокрема під час дослідження питної води [4].

Описані ПП характеризувалися високою завадостійкістю, стабільністю при невеликій зміні температури, простотою виконання, але їх низька чутливість, особливо конструкції з покриттям, була вирішальним фактором на користь подальших пошуків у напрямку збільшення площі електродів. Зрозуміло, що платина, як електродний матеріал в цьому випадку не могла використовуватися. Тому для низькоомних об'єктів в подальшому були застосовані безконтактний сенсор з мідними електродами та контактний ПП з вуглецевими (графітовими) електродами, а для високоомних – контактні ПП з міді та нержавіючої сталі.

Особливістю сенсорів, показаних на рис. 2, є їх фіксований об'єм, оскільки вони побудовані як резервуар, стінки якого охоплені електродами. Безконтактний сенсор, зображений на рис. 2, *а*, має два зовнішні електроди, які оточують циліндричний резервуар з поліетилену, а сенсор рис. 2, *б* – зовнішній і внутрішній електроди, ізольовані від досліджуваної речовини. Такий сенсор вже потребував ускладнення конструкції, а саме екранування для усунення впливу неінформативних параметрів, що характеризують паразитну ємність електродів, ємності з'єднувальних дротів, зовнішнє електромагнітне поле тощо, та відповідного догляду для очищення стінок резервуару від залишків досліджуваних матеріалів.

ПП з фіксованим об'ємом використовувалась для дослідження водних і сольових розчинів, мийних засобів тощо. Метою досліджень, в першу чергу, було виявлення можливої інваріантності результатів експерименту до кількості (об'єму) рідкої

речовини, що знаходиться між електродами. Однак встановлено, що об'єм досліджуваної речовини все ж впливає на зміну характеристик імітансу, причому незалежно від того чи зразок знаходиться в активній частині сенсора, чи виходить за її межі (в ділянку, не охоплену електродами). Тому всі подальші дослідженнях виконувалися при сталому об'ємі досліджуваних речовин, який досягався заповненням сенсора до фіксованого рівня, або застосуванням внутрішнього екрану з «вікном» певного сталого розміру.



а) *б)* *в)*

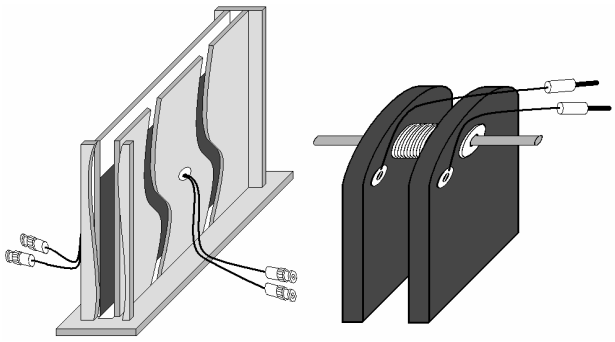
Рисунок. 2 – Конструкції первинних перетворювачів з фіксованим об'ємом

Подібне технічне вирішення було втілено у контактному сенсорі із нержавіючої сталі, що використовувався для дослідження сипких матеріалів (борошно, цукор, сіль, крупа). Поверхні резервуара, що містив об'єкт дослідження, одночасно відігравали роль електродів (рис. 2, *в*).

Використання ПП, що показані на рис. 2, в експериментальних дослідженнях показало необхідність повного зовнішнього екранування, а також термостатування самого імітансного сенсора. По відношенню до циліндричних ПП це створювало певні труднощі, які в поєднанні з складністю виготовлення та догляду, а також невеликою власною ємністю (3–4 пФ, заставило відмовитись від циліндричних конструкцій і зосередити пошуки на плоских сенсорах з відносно великою площею електродів.

Так були виготовлені ПП з лакованої міді у вигляді резервуару прямокутної форми (рис. 3, а)об'ємом ~ 20 $см^3$ та площею електродів ~ 50 $см^2$, та занурюваний ПП з вуглецевими електродами площею ~ 80 $см^2$ (рис. 3, б).

Для сенсора з вуглецевими електродами використано матеріал, який отриманий високотемпературним спіканням графітового порошку, що використовується в промислових гальванічних ваннах. Таке технічне рішення передбачає можливість змінювати об'єм досліджуваного матеріалу, що знаходиться між електродами. Ця особливість сенсора, покладена в основу методики контролю граничнодопустимих концентрацій забруднювачів, зокрема, в стічних водах [5].



а) *б)*

Рисунок 3 – Конструкції первинних перетворювачів з плоскими електродами

Застосування вуглецевих електродів обумовлено також специфікою експериментів, в яких вони використовувались, а саме: дослідженнь води і водних розчинів. Вода, як відомо, теоретично в чистому вигляді не пропускає струм, бо складається з нейтральних молекул. Тільки в присутності контамінантів, а вони, практично, завжди є (навіть у дистильованій воді), молекули хімічних речовин розриваються дипольними молекулами води на іони. При цьому, молекули води так само дисоціюють. Відповідно носіями заряду у водних розчинах є іони. Тому водні розчини є провідниками II роду і механізм передачі заряду в них значно різниться від провідника I роду (металлу).

З метою виявлення придатності сенсора з вуглецевими електродами також для оцінювання якісних властивостей реальної продукції, основними складниками якої є вода, виконувались дослідження такої харчової продукції промислового виробництва, як молочні вершки. На рис. 4 показані залежності зміни реактивної складової адмітансу в широкому частотному діапазоні F для молочних вершків різної жирності.

Аналіз залежностей (рис4.)показує зменшення значень реактивної складової провідності при певному сталому значенні частоти тестового сигналу із збільшенням жирності продукту. Це свідчить про те, що ПП з вуглецевими електродами у взаємодії з RLC – імпедансометром є чутливим до зміни якісних параметрів продукції, яким, наприклад, є вміст жиру у молочних вершках.

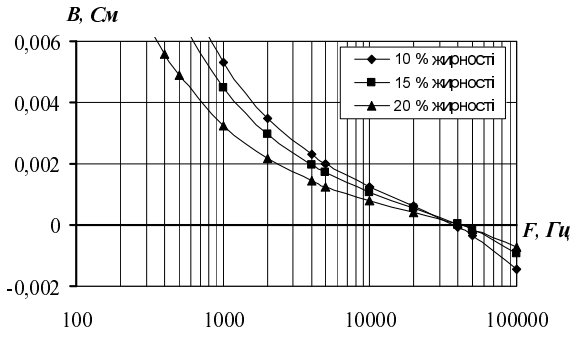


Рисунок 4 – Результати дослідження зміни реактивної складової провідності молочних вершків із застосування сенсора з вуглецевими електродами

В ПП з мідними електродами (рис. 3, *а*) для усунення приелектродних ефектів застосовано суцільний екран, що повністю оточує закритий резервуар, та під'єднання до імпедансометра за чотирьохпровідною схемою. Сенсор використовувався для дослідження водних розчинів цукру, спирту, спиртовмісної продукції, мийних засобів, сольових розчинів тощо.

Оскільки імітанс водних розчинів має сильну температурну залежність (наприклад, підвищення температури на 1^0C супроводжується зростанням провідності на 1,0-2,5 %), то для дослідження невеликих концентрацій домішок, що дисоціюють на іони, та непровідних матеріалів, є необхідність застосування автоматичної температурної корекції або досліджуваний розчин в процесі вимірювань необхідно термостатувати.

Для забезпечення сталої температури в ПП з мідними електродами було виготовлено теплоізоляційний футляр з вбудованими термоелементами (елементи Пельтьє), який відігравав роль активного термостата. Температурна стабільність в середині комірки забезпечувалася на рівні ±0,5 ^{0}C.

Рис. 5 ілюструє характер зміни складових провідності *G* водних розчинів етилового спирту при температурі 19^0C, що досліджувались з використанням безконтактного термостатованого сенсора. Для приготування розчинів використовувалась дистильована вода і, оскільки етиловий спирт слід кваліфікувати як високомний продукт, то досліджувані розчини слід теж вважати високоомними. Аналіз залежностей показує стале зменшення значень активної складової провідності із збільшенням відсотка спирту в розчині на частоті тестового сигналу понад 50 кГц, що свідчить про доцільність використання таких комірок тільки при високочастотних дослідженнях. Відхилення значень Zr2 від загальної тенденції на графіку пояснюється неконтрольованим збільшенням температури експерименту на ~ 1^0C.

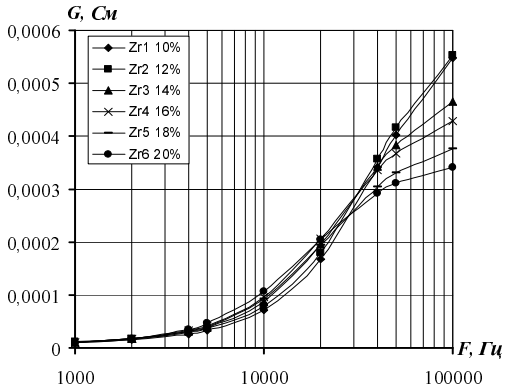


Рисунок 5 – Результати дослідження зміни активної складової провідності водних розчинів спирту із застосування термостатованого безконтактного сенсора з мідними електродами

Дослідження паливомастильних матеріа-лів виконувалися із застосуванням контактного занурюваного сенсора з плоскопаралельними екранованими мідними електродами. Площа електродів становила ~15 см^2, власна ємність комірки становила - ~10 пФ. ПП під'єднувався до імпедансометра за трьохпровідною схемою. З його використанням досліджувалися промисловий бензин різних виробників марок (А95, А80), дизельне паливо, біопаливо на основі ріпака, ріпакова та соняшникова олія.

Під час протікання через імітансний сенсор змінного струму виникають явища, які є еквівалентними увімкненню ємностей паралельно і послідовно до опору досліджуваного матеріалу у ПП. В цьому випадку електричні процеси залежать від матеріалу електродів, стану їхньої поверхні, від зворотного електричного процесу, концентрації потенціаловизначальних іонів, іонної сили розчину, температури та частоти змінного струму [6].

З урахуванням вищевказаного ємнісні сенсори принято подавати у вигляді заступних схем (схем заміщення). Зокрема, приклад заступної схеми ємнісного ПП для звукового діапазону частот показаний на рис. 6. Тут опори R_1, R_2 визначаються електрохімічною поляризацією електродів, а опори R_S та, так звані, псевдоємності C_S є пов'язані із концентраційною поляризацією. C_1 і C_2 зумов-

лені ємністю подвійного шару зарядів на межі електрод – розчин, є нестабільними і їх вплив необхідно усунути в процесі вимірювання. C – міжелектродна ємність, обумовлена діелектричними властивостями досліджуваної речовини, або початкова ємність сенсора (без розчину, але з урахуванням діелектричних властивостей матеріалу, яким можуть бути ізольовані електроди). Сюди ж входить паразитна ємність лінії зв'язку сенсора з вимірювальним приладом. Z_X, в основному, є паралельною схемою заміщення ємнісного характеру з ємнісною складовою C_X, зумовленою переміщенням зарядів один відносно одного на електродах, що відбувається в розчині досліджуваного матеріалу при змінах струму, та активною складовою R_X, якою є опір матеріалу [6].

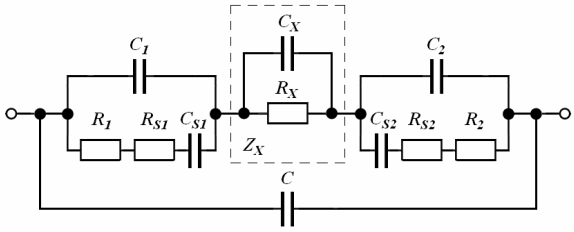


Рисунок 6 – Заступна схема двоелектродного ємнісного сенсора

Розроблені конструкції сенсорів загалом добре узгоджуються з поданою на рис.6 моделлю. Однак аналіз окремих результатів, зокрема отриманих для сенсорів з вуглецевими електродами (рис. 4), показує необхідність на вищих частотах враховувати зміну характеру провідності водних розчинів з високою концентрацією домішок, що буде предметом подальших пошуків.

ВИСНОВКИ

Подані в роботі конструкції ємнісних ПП показали ефективність їх використання для визначення якісного рівня продукції. Вимірювання параметрів імітансу на змінному струмі з використанням ємнісних ПП має перевагу над вимірюванням при постійному струмі і вимірюванням з використанням традиційних кондуктометричних комірок. Останнє не придатне для виявлення якісного складу досліджуваних матеріалів, а лише чутливе до загальної кількості іонів. На відміну від досліджень з використанням постійного струму, що супроводжуються процесом електролізу, дослідження на змінному струмі ємнісними сенсорами, зокрема для водних розчинів, дає можливість уникнути поляризації об'єкта дослідження, при якій може змінюватись якісний і кількісний склад розчинених речовин, тобто аналіз водних розчинів в такому випадку залишається неруйнівним.

Недоліком, однак, є зміна потенціалів електродів на змінному струмі, тобто відбувається процес їх поляризації. Для зменшення поляризації електродів і пов'язаних з нею похибок вимірювання складових імітансу слід використовувати хімічно неактивні електроди з сильно розвинутою поверхнею (*Pt*, *C*), проводити дослідження при малих значеннях напруги тестового сигналу та при високих значеннях його частоти.

1. Походило Є.В. Розвиток теорії та принципів побудови засобів вимірювання імітансу об'єктів кваліметрії: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра. техн. наук : спец. 05.11.05 "Прилади та методи вимірювання електричних та магнітних величин" / Походило Євген Володимирович; Нац. ун-т "Львівська політехніка"– Львів, 2004. – 40 с. 2. Измерение в промышленности : справ. изд.: В 3 -х кн . / [Пер. с нем. под ред. П. Профоса]. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Металургия, 1990 – 648 с. 3. Формування теоретичних і нормативних засад, розроблення нетрадиційних методик та засобів оцінювання рівня якості продукції : звіт про науково-дослідну роботу; № держ. реєстрації 0107U001110 ; Нац. ун-т "Львівська політехніка". – Львів: НУ "Львівська політехніка", 2008. – 57 с. 4. Гонсьор О. Контроль мінералізації води за параметрами адмітансу / Олександр Гонсьор // Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження. – 2008. – № 12, том 2. – С. 605-610. 5. Перспективні електричні експрес-методи контролю рівня якості рідин / [П. Столярчук , В. Яцук, Є. Походило та ін.] // Ресурси природних вод карпатського регіону (Проблеми охорони та раціонального використання) : Матеріали восьмої міжн. наук.-практ. конф. 28-29 травня 2009р., Львів : зб. наук. статей. – Львів : ЛвЦНТЕІ. – 2009. – С. 136-138. 6. Головко Д.Б. Методи та засоби частотно-дисперсійного аналізу речовин та матеріалів / Д.Б. Головко , Ю. О. Скрипник. – К.: ФАДА, ЛТД. – 2000. – 200 с

Поступила в редакцію 09.11.2009р.

Рекомендував до друку канд. техн. наук, доц. Друзюк В.