

## МЕТОДИ І ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 532.538;621.38

DOI: 10.31471/1993-9981-2022-2(49)-36-45

### ІДЕНТИФІКАЦІЯ ХАРЧОВОЇ ПРОДУКЦІЇ ЗА ЕЛЕКТРИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

*Є. В. Походило, Ю. А. Стасишин**Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, вул. С. Бандери, 12,  
Україна, 79013. E-mail: [yevhen.v.pokhodylo@lpnu.ua](mailto:yevhen.v.pokhodylo@lpnu.ua), [yurii.a.stasyshyn@lpnu.ua](mailto:yurii.a.stasyshyn@lpnu.ua)*

Наведено метод ідентифікації харчової продукції за результатами вимірювання електричних параметрів. Такими параметрами вибрано реактивну та активну компоненти адмітансу багатоеlementного двополюсника, яким подається контрольована продукція. У роботі наведено електричну модель первинного ємнісного перетворювача двоелектродної конструкції з неізолюваними електродами та контрольованим харчовим продуктом. Вона містить паралельне з'єднання еквівалентних ємності та опору контрольованого об'єкта та послідовно ємності подвійного шару кожного з електродів. Відповідно до електричної моделі отримано математичну модель у вигляді аналітичного виразу, що описує активну та реактивну компоненти адмітансу. Проаналізовано такі моделі в широкому частотному діапазоні для різних значень параметрів. Активна та реактивна компоненти адмітансу залежать пропорційно від реактивної та активної провідностей контрольованого об'єкта. Разом з тим, зміна характеру кривих, що описують активну та реактивну компоненти, також залежать від співвідношення між активною провідністю об'єкта контролю та ємністю подвійного шару і частотою. Відповідно до математичної моделі реактивна компонента визначається сумою складових. Одна складова пропорційна ємності подвійного шару, а друга – еквівалентній ємності об'єкта. Із зростанням частоти перша зменшується, а друга зростає. Відповідно, зменшення частоти призводить до зростання першої і зменшення другої. Звідси очевидним є те, що в широкому частотному діапазоні крива, що описує реактивну компоненту, має два екстремальних значення. Також за отриманими результатами моделювання можна оцінити вплив ємності подвійного шару на зміну компонент адмітансу при сталих інших параметрах математичної моделі в широкому частотному діапазоні. На основі цього виявлено ідентифікаційні ознаки, за якими доцільно ідентифікувати харчову продукцію. Однією з них є залежність активної компоненти від частоти. На початку діапазону така зміна є нелінійною і залежить від частоти, а на вищих частотах має адитивний характер від частоти. Іншою ідентифікаційною ознакою є зміна форми кривої, що відображає реактивну компоненту адмітансу. Характерною ознакою є наявність двох екстремальних значень, які є максимальними та мінімальними відповідно до діапазону частот. При цьому екстремальне значення для різного значення активної провідності об'єкта має свою частоту, а також змінюється за амплітудою. Зроблено висновки щодо застосування виявлених ідентифікаційних ознак для ідентифікації харчових продуктів за параметрами адмітансу.

**Ключові слова:** адмітанс; імпеданс; активна компонента; реактивна компонента; ідентифікація; імпедансна спектроскопія; математична модель; електрична модель

The method of identification of food products based on the results of measuring electrical parameters is given. These parameters are used to select the reactive and active components of the admittance of the multi-element bipolar device, which supplies the controlled products. The paper presents an electrical model of a primary capacitive transducer of a two-electrode design with non-insulated electrodes and a controlled food product. It contains a parallel connection of the equivalent capacitance and resistance of the controlled object and in series the capacitance of the double layer of each of the electrodes. According to the electrical model, a mathematical model was obtained in the form of an analytical expression describing the active and reactive components of the admittance. Such models were analyzed in a wide frequency range for different values of model parameters. The active and reactive components of the admittance depend proportionally on the reactive and active conductivities of the controlled object. At the same time, the change in the nature of the curves describing the active and reactive components also depends on the ratio

between the active conductivity of the control object and the double-layer capacity and frequency. According to the mathematical model, the reactive component is determined by the sum of the components. One component is proportional to the capacity of the double layer, and the second is to the equivalent capacity of the object. As the frequency increases, the first decreases, and the second increases. Accordingly, a decrease in frequency leads to an increase in the first and a decrease in the second. From this it is obvious that in a wide frequency range the curve describing the reactive component has two extreme values. Also, based on the obtained simulation results, it is possible to estimate the influence of the double-layer capacitance on the change in the admittance components with constant other parameters of the mathematical model in a wide frequency range. On the basis of this, identifying signs were found, which should be used to identify food products. One of them is the frequency dependence of the active component. At the same time, at the beginning of the range, such a change is non-linear and depends on the frequency, and at higher frequencies it has an additive character depending on the frequency. Another identifying feature is a change in the shape of the curve, which reflects the reactive component of the admittance. A characteristic feature is the presence of two extreme values, which are maximum and minimum according to the frequency range. At the same time, the extreme value for a different value of the active conductivity of the object has its own frequency, and also changes in amplitude. Conclusions were made regarding the application of the identified identification features for the identification of food products by admittance parameters.

**Key words:** admittance; impedance; active component; reactive component; identification; impedance spectroscopy; mathematical model; electric model

**Вступ.** Розширення ринків реалізації харчової продукції сприяє її фальсифікації. Це стає проблемою для державних контролюючих органів та споживачів фальсифікованої продукції. Найпоширенішими методами фальсифікації харчових продуктів є її підміна, розбавлення, приховування інформації, неправильне маркування та підроблення. З метою забезпечення певних органолептичних характеристик (смак, аромат, колір тощо) фальсифікують харчові продукти через додавання до неї різного виду добавок. При цьому досить важко відрізнити справжній продукт від фальсифікованого. Ідентифікувати справжній харчовий продукт чи виявити фальсифікацію можливо лише в результаті проведення складних та лабораторних досліджень. Недоліком всіх традиційних методів та засобів контролю якості та безпечності харчових продуктів є їхня складність та тривалість у застосуванні. Такі засоби здебільшого є вартісними та часто недоступними широкому колу споживачів харчової продукції. Разом з тим, широкого використання набули електричні методи вимірювання, що виділяються багатьма своїми перевагами. Серед таких методів є метод імпедансної спектроскопії [2] або імітансний метод [4], який характеризується тим, що об'єкт контролю неелектричної природи можна подати у колі змінного струму у вигляді дво- або багатоелементного двополюсника. Одним із практичних реалізацій такого методу є

вимірювання параметрів моделі об'єкта контролю і базового зразка (поданих двополюсниками) за певних умов та порівняння параметрів цих двох двополюсників. А параметри таких двополюсника містять основну інформацію про фізико-хімічні властивості контрольованого та базового зразків об'єктів. Електричні параметри двополюсника відображають відповідні одиничні показники якості харчової продукції (домішки, концентрацію, жирність, вологість, вміст добавки тощо).

**Об'єкт дослідження** – методи та засоби ідентифікації харчової продукції.

**Предмет дослідження** – ідентифікація харчової продукції за параметрами адмітансу.

**Мета роботи** – створення способів ідентифікації харчових продуктів за електричними параметрами.

**Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:** проаналізувати способи ідентифікації фальсифікованої продукції, дослідити зміни параметрів адмітансу за певних умов дослідження в частотному діапазоні, проаналізувати електричну та математичні моделі первинного перетворювача «об'єкт-адмітанс», запропонувати ідентифікаційні ознаки, за якими можна реалізувати ідентифікацію

**Наукова новизна отриманих результатів дослідження** – запропоновано ідентифікаційні ознаки, за якими можна ідентифікувати

харчову продукцію. Вони полягають в тому, що активна компонента адмітансу об'єкта контролю пропорційно залежить від його інформативного опору. Реактивна складова того ж об'єкта має як амплітудну, так і частотну залежність, а саме на окремих частотах значення реактивної складової має екстремальне значення, частотна залежність якого зв'язана з інформативною реактивною компонентою об'єкта.

**Практична значущість результатів дослідження** – запропоновані ідентифікаційні ознаки можуть бути використані для розроблення відповідних портативних технічних засобів контролю якості продукції або враховані у разі використання для досліджень харчових продуктів серійних CLR-метрів.

#### **Аналіз досліджень та публікацій.**

Багато останніх досліджень та публікацій щодо контролю якості та безпечності харчових продуктів стосується як нормативного [1], так і методично-технічного забезпечення. Серед електричних методів технічного забезпечення одним із найпоширенішим є метод імпедансної [2] або адмітансної [3] спектроскопії, що справедливим є узагальнений термін «імітансної спектроскопії». Відомий імітансний метод контролю якості [4], суть якого полягає в тому що аналізуються параметри імпедансу чи адмітансу об'єктів неелектричної природи в широкому частотному діапазоні. Запропоновано метод вимірювання твердості води за параметрами імітансу та його метрологічне забезпечення [5]. Відомий спосіб експресного визначення вмісту етилового спирту у водно-спиртовому розчині [6], а також розроблено імпедансний аналізатор для ідентифікації марок водно-спиртових напیتків [7]. Використовується електричний метод ідентифікації м'ясної продукції, зокрема досліджено залежність імпедансу від електропровідності м'яса [8] та спосіб ідентифікації свіжого та розмороженого м'яса методом імпедансної спектроскопії [9]. Електроімпедансна спектрометрія використовується для контролю процесу виробництва подрібнених м'ясних продуктів [10]. Також електричний метод використовується для контролю якості та дозрівання деяких фруктів, зокрема

спектроскопії електричного імпедансу мандарина під час дозрівання [11], дозрівання та розвиток охолодження у плодах хурми [12].

#### **Імітансний метод ідентифікації харчових продуктів**

Одним з електричних методів контролю є метод імпедансної чи адмітансної спектроскопії (тобто імітансної спектроскопії або імітансний метод). Такий метод контролю якості продукції [4] ґрунтується на тому, що вона подається багатоелементним двополюсником, параметри якого відображають її фізико-хімічні властивості. Тобто, за зміною електричних параметрів можна судити і про зміну показників якості продукції. Одним із практичних реалізацій такого методу є вимірювання параметрів моделі об'єкта контролю і базового зразка (поданих двополюсниками) у певних умовах та порівняння параметрів цих двох двополюсників. Такими параметрами є активна та реактивна компоненти імітансу двополюсника на різних частотах або окремі параметри елементів. На основі теорії електричних кіл можна сказати, що еквівалентними є двополюсники, в яких комплексні опори (імпеданси) або комплексні провідності (адмітанси) є рівними  $Z_{x1} = Z_{x2}, Y_{x1} = Y_{x2}$ . Відповідно, вони можуть замінювати один одного, не змінюючи характеристик кола, з яким вони сполучені. Еквівалентність може мати місце на одній частоті, в певному діапазоні частот або в всьому діапазоні від нуля до нескінченності. Можна вважати, що стосується це і двополюсників, якими подається у нашому випадку харчова продукція. У цьому і полягає суть застосування імітансного методу ідентифікації харчової продукції, за допомогою якого можна встановити електричні параметри як контрольованого, так і базового зразків продукту у вигляді окремих електричних параметрів багатоелементного двополюсника, яким їх подають. Якщо схема заміщення (електрична модель) об'єкта відома, то такими параметрами будуть елементи схеми. Для невідомої моделі (у більшості випадків) інформативними параметрами будуть активні та реактивні компоненти імпедансу та адмітансу на окремих частотах тестового сигналу. Окрім цього інформативними параметрами також можуть бути модулі та фазові кути або

еквівалентні ємності та опори схеми, поданими паралельною чи послідовною схемами заміщення. Тобто, імпеданс та адмітанс можна зобразити у вигляді векторів на комплексній площині для будь-якої частоти тестового

сигналу. На рис. 1 показано вектори імпедансів  $Z_x, Z_0$  (рис. 1а) та адмітансів  $Y_x, Y_0$  (рис. 1б) контрольованого та базового зразків, їхні модулі та фазові кути, активні та реактивні складові.

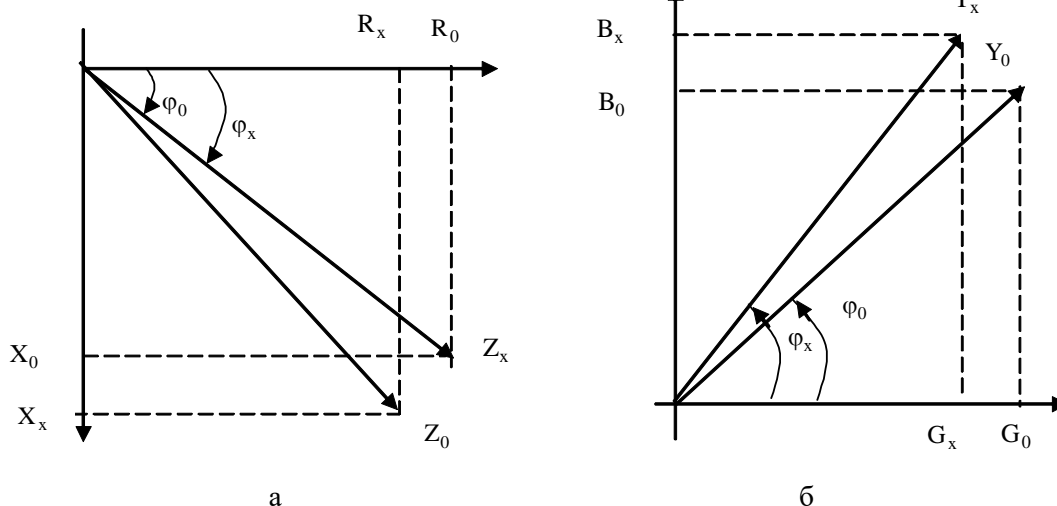


Рисунок 1 – Вектори імпедансів та адмітансів об’єктів порівняння на одній частоті

Не співпадіння векторів імітансу, як показано на рис. 1, контрольованої та базової продукції свідчить про різний рівень її внутрішньої структури, а відповідно і показників якості. Кількісне оцінювання здійснюється за результатами вимірювання та порівнянням параметрів, що характеризують зазначені вектори, а саме: модуль і фаза, активна та реактивна компоненти або інші комбінації перелічених параметрів [4].

Концепція диференційного імітансного методу [4] ідентифікації харчової продукції за складовими адмітансу ґрунтується на вимірюванні параметрів електричної моделі, якою подається об’єкт контролю. У такому разі для складових адмітансу, як інформативних параметрів, відносні показники відповідно до складової адмітансу описуються виразами

$$\left(\frac{\operatorname{Re}(Y_x)}{\operatorname{Re}(Y_0)}\right)_{f_1} = A_1, \left(\frac{\operatorname{Re}(Y_x)}{\operatorname{Re}(Y_0)}\right)_{f_2} = A_2, \left(\frac{\operatorname{Re}(Y_x)}{\operatorname{Re}(Y_0)}\right)_{f_3} = A_3, \dots, \left(\frac{\operatorname{Re}(Y_x)}{\operatorname{Re}(Y_0)}\right)_{f_n} = A_n, \quad (1)$$

$$\left(\frac{\operatorname{Im}(Y_x)}{\operatorname{Im}(Y_0)}\right)_{f_1} = P_1, \left(\frac{\operatorname{Im}(Y_x)}{\operatorname{Im}(Y_0)}\right)_{f_2} = P_2, \left(\frac{\operatorname{Im}(Y_x)}{\operatorname{Im}(Y_0)}\right)_{f_3} = P_3, \dots, \left(\frac{\operatorname{Im}(Y_x)}{\operatorname{Im}(Y_0)}\right)_{f_n} = P_n, \quad (2)$$

де  $Y_x, Y_0$  - адмітанси досліджуваних зразків контрольованого та базового об’єктів;

$\operatorname{Im}(Y_x), \operatorname{Re}(Y_x), \operatorname{Im}(Y_0), \operatorname{Re}(Y_0)$  - реактивна та активна складові досліджуваних зразків контрольованого та базового об’єктів;

$f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$  - частоти, на яких вимірюються складові;

$A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  - відношення активних складових;

$P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$  - відношення реактивних складових.

За результатами вимірювань одержані значення повинні міститися в заданих межах для конкретного об’єкта контролю. На основі цього можна ідентифікувати продукцію як таку, що відповідає або не відповідає заданому рівні якості. Тобто, загалом вимірювальна процедура зводиться до визначення відмінності між

електричними параметрами адмітансу досліджуваного та базового зразків.

### Електрична та математична моделі первинного перетворювача «об'єкт-адмітанс»

Для вибору електричної моделі первинного перетворювача скористаємося графічними залежностями отриманими за результатами дослідження спиртового розчину з різним вмістом спирту у дистильованій воді

[13]. Отримані результати експериментальних досліджень у графічному вигляді наведені на рис. 2-4. На рис. 2 та рис. 3 зображені залежності активних та реактивних складових від частоти в діапазоні 100 Гц – 100 кГц для різного рівня концентрації спиртового розчину, а на рис. 4 зображено їхню залежність від частоти у діапазоні 50 Гц - 1 кГц.

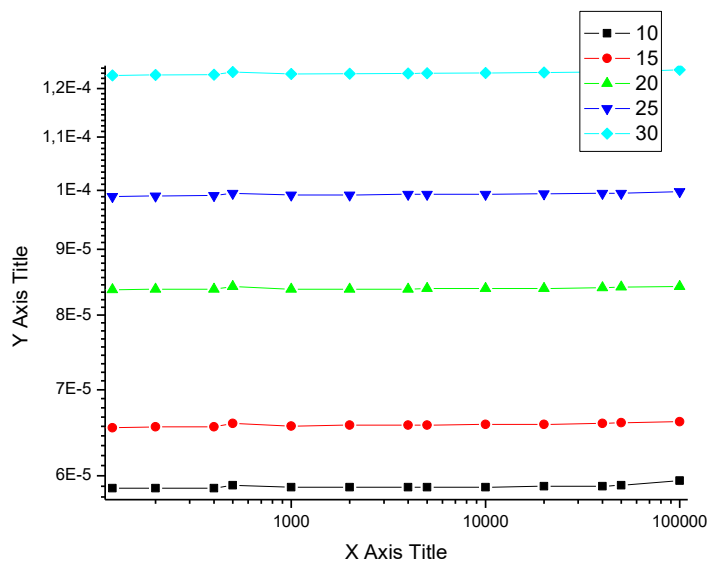


Рисунок 2 – Залежність активних складових адмітансів спиртових розчинів різної концентрації від частоти в діапазоні 100 Гц – 100 кГц.

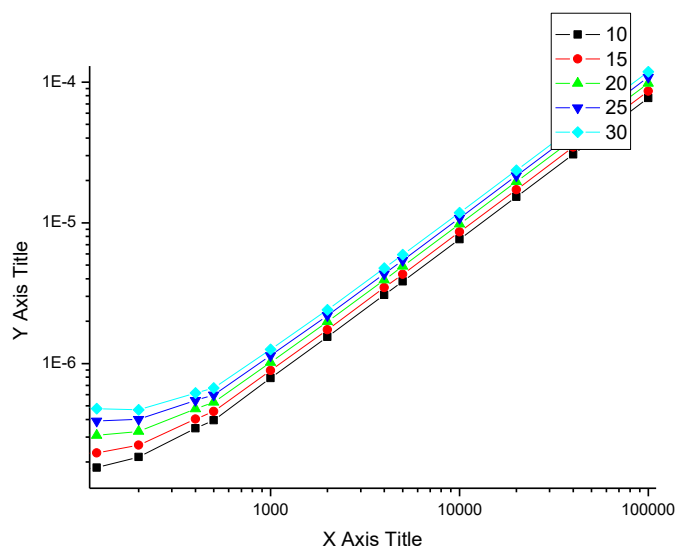
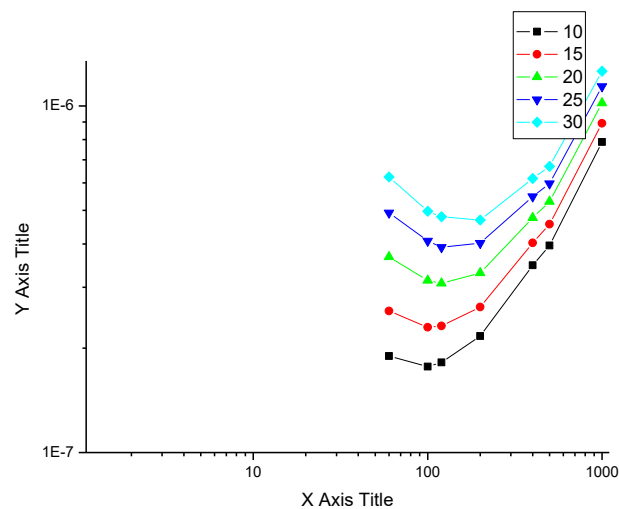


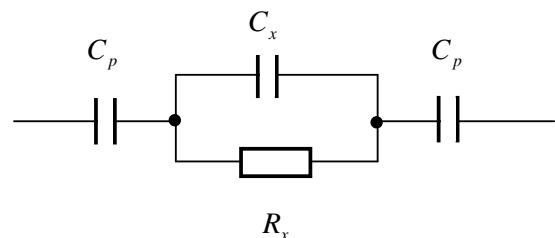
Рисунок 3 – Залежність реактивних складових адмітансів спиртових розчинів різної концентрації від частоти в діапазоні 100 Гц – 100 кГц.



**Рисунок 4 – Залежність реактивних складових адмітансів спиртових розчинів різної концентрації від частоти в діапазоні 50 Гц – 1 кГц**

Аналіз графічних залежностей складових адмітансу показує, що активна складова практично не залежить у вказаному діапазоні від частоти тестового сигналу. Амплітудний рівень складової пропорційний до концентрації спиртового розчину. Реактивна складова містить нелінійну складову до 1 кГц (рис. 3), а далі є лінійною. Амплітудне її значення також залежить від концентрації. Для кращої наглядності нелінійності кривих на рис. 4 показано фрагмент залежності її від частоти в діапазоні 50 Гц – 1 кГц. З рисунка видно, що криві мають явно виражені екстремальні значення на різних частотах заданого діапазону. При цьому вони є пропорційними до концентрації розчину. Звідси виходить, що електрична модель спиртового розчину повинна містити суму реактивностей, які по різному впливають на форму кривої. На низьких частотах амплітудне значення складової зростає набагато швидше від впливу другої реактивності до деякої частоти. Потім вплив реактивностей вирівнюється, після чого вплив першої реактивності спадає, а другої зростає. У такому разі перша реактивність це приелектродний імпеданс ємнісного характеру, а друга імпеданс розчину, схема якого містить паралельно з'єднані еквівалентні ємність та опір. Приелектродний імпеданс на межі «електрод - об'єкт» складається з послідовного з'єднання елементів С та R, що характеризують

імпеданс Варбурга, які паралельно з'єднані з приелектродною ємністю  $C_n$ . Однак, з урахуванням того, що дослідження здійснюються на частотах, на яких інші види імпедансів, наприклад імпеданс Варбурга [15], неінформативні послідовні та паралельні імпеданси практично відсутні, то електрична модель може бути спрощеною. Отже, можна вважати, що приелектродний імпеданс визначається, в основному, імпедансом, утвореним ємністю подвійного шару. На основі цього для подальших досліджень можна використовувати спрощену електричну модель контактного (з неізолюваними електродами) первинного перетворювача, яка зображена на рис. 5.



**Рисунок 5 – Спрощена схема заміщення двоелектродного імітансного сенсора**

На схемі конденсатор  $C_p$  відображає ємність подвійного шару першого та другого

електродів;  $R_x$  та  $C_x$  - еквівалентні опір та ємність об'єкта контролю.

Ємність подвійного шару пропорційна площі електродів. Якщо електроди первинного перетворювача мають однакову активну площу (площа електрода, що контактує з об'єктом контролю), то і приелектродні ємності однакові. Це властиве ємнісному первинному перетворювачу плоско-паралельної конструкції. Для перетворювачів коаксіальної конструкції така рівність не забезпечується, оскільки площа електродів є різною. Вона залежить від діаметрів електродів та їхньої довжини, а тому співвідношення площ, а відповідно і ємностей  $C_p$  подвійного шару пропорційне відношенню діаметрів електродів такого сенсора.

Математична модель відповідно до електричної моделі (рис. 5) в частотному діапазоні описується імпедансом  $Z_x$ :

$$Z_x = \frac{1}{j\omega C_p} + \frac{R_x}{1 + j\omega C_x R_x} = \frac{1 + j\omega C_x R_x + j\omega C_p R_x}{j\omega C_p (1 + j\omega C_x R_x)} \quad (3)$$

або з урахуванням  $Y_x = \frac{1}{Z_x}$  та  $C_x \ll C_p$  [2]

адмітансом  $Y_x$ :

$$\text{Im}(Y_x) = \omega C_p \frac{1}{1 + \omega^2 C_p^2 R_x^2} + \omega C_x \frac{1}{1 + \omega^2 C_p^2 R_x^2} = \omega C_p \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega C_p}{G_x}\right)^2} + \omega C_x \frac{1}{1 + \left(\frac{G_x}{\omega C_p}\right)^2} \quad (8)$$

Проаналізуємо отримані математичні моделі активної (7) та реактивної (8) складових адмітансу. З виразів (7), (8) очевидно, що на характер активної та реактивної складових впливає співвідношення між активною

провідністю  $G_x \left(G_x = \frac{1}{R_x}\right)$  об'єкта контролю

та реактивною провідністю  $\omega C_p$ , утвореною ємністю подвійного шару. При цьому рівень впливу визначається значенням такого співвідношення у порівнянні з одиницею. Тому розглянемо такий вплив за крайніх умов, а саме

за умови  $\left(\frac{G_x}{\omega C_p}\right)^2 \ll 1$ .

У такому разі зазначені складові матимуть вигляд:

$$\text{Re}(Y) = G_x, \quad (9)$$

$$Y_x = \frac{j\omega C_p (1 + j\omega C_x R_x)}{1 + j\omega C_x R_x + j\omega C_p R_x} = \frac{j\omega C_p (1 + j\omega C_x R_x)}{1 + j\omega C_p R_x}. \quad (4)$$

З урахуванням перетворення виразу (4) матимемо:

$$Y_x = \frac{(j\omega C_p - \omega^2 C_p C_x R_x)(1 - j\omega C_p R_x)}{1 + \omega^2 C_p^2 R_x^2} \quad (5)$$

З виразу (5) виділимо активну складову адмітансу:

$$\text{Re}(Y_x) = \frac{\omega^2 C_p^2 R_x^2 - \omega^2 C_p C_x R_x}{1 + \omega^2 C_p^2 R_x^2} = \frac{\omega^2 C_p^2 R_x^2 \left(1 - \frac{C_x}{C_p R_x}\right)}{1 + \omega^2 C_p^2 R_x^2}, \quad (6)$$

а після перетворення (6) з урахуванням  $\frac{C_x}{C_p} \ll 1$  та матимемо:

$$\text{Re}(Y_x) = \frac{\omega^2 C_p^2 R_x^2}{1 + \omega^2 C_p^2 R_x^2} = G_x \frac{1}{1 + \omega^2 C_p^2 R_x^2} = G_x \frac{1}{1 + \left(\frac{G_x}{\omega C_p}\right)^2} \quad (7)$$

Аналогічно з виразу (5) виділимо реактивну складову адмітансу:

$$\text{Im}(Y) = \omega C_x + \frac{G_x^2}{\omega C_p} \quad (10)$$

Аналіз виразу (9) показує, що на високих частотах активна складова адмітансу не залежить від частоти. Як видно з виразу (10) розширення діапазону частот у сторону зменшення визначається співвідношенням

$\frac{G_x}{\omega C_p}$ . Амплітудний рівень активної складової

адмітансу пропорційний інформативному параметру  $G_x$ . На низьких частотах залежність активної складової нелінійний, а діапазон частот, у якому є така не лінійність,

визначається співвідношенням  $\frac{G_x}{\omega C_p}$ . Аналіз

виразу (8) показує, що реактивна складова містить дві частини. Перша стосується впливу

ємності  $C_x$ , а друга - ємності  $C_p$ . При цьому їхній вплив на результат (8) різний і визначається співвідношенням між активною провідністю та ємністю подвійного шару,  $\frac{G_x}{\omega C_p}$

або навпаки  $\frac{\omega C_p}{G_x}$ .

Прийнята умова досягається високою частотою тестового сигналу та низькою активною провідністю при сталому значенні ємності подвійного шару для вибраного типу первинного перетворювача. За такої умови матимемо незалежність активної складової адмітансу (9) від ємності подвійного шару у даному частотному діапазоні. Разом з тим, за цих же умов реактивність (10) визначається сумою складових, які по різному залежать від частоти, а саме: якщо то перша зростає лінійно із зростанням частоти, то друга із зростанням частоти нелінійно зменшується. Тобто маємо не лінійність реактивної складової на низьких частотах, оскільки переважає друга складова над першою. В подальшому із зростанням частоти вплив другої складової на реактивність (10) зменшується.

За умови  $\left(\frac{G_x}{\omega C_n}\right)^2 \gg 1$ , а відповідно матимемо  $\left(\frac{\omega C_n}{G_x}\right)^2 \ll 1$ , отримуємо наступні вирази:

$$\operatorname{Re}(Y) = \frac{\omega^2 C_n^2}{G_x} \quad (11)$$

$$\operatorname{Im}(Y) = \omega C_p + \omega C_x \frac{\omega^2 C_p^2}{G_x^2} \quad (12)$$

Досягається така умова малою частотою та високою провідністю при сталому значенні ємності подвійного шару. За такої умови, як видно з виразів (11) та (12), активна складова пропорційна квадрату частоти та обернено пропорційна активній провідності. За цих же умов реактивність (12) визначається сумою складових, які по-різному залежать від частоти, а саме: якщо перша із зростанням частоти зростає лінійно, то інша зростає нелінійно із

зростанням частоти. Тобто маємо не лінійність реактивної складової на низьких частотах, оскільки переважає друга складова над першою. В подальшому із зростанням частоти вплив другої складової зростає скоріше.

Отже, на основі аналізу математичних моделей за крайніх умов та аналіз частоті залежності реактивної складової можна зробити висновок, що крива, що її описує має два екстремальні значення у частотному діапазоні. На початку діапазону реактивна складова зростає до екстремального (максимального) значення, а потім спадає до екстремального (мінімального) значення. Визначається це також окрім частоти активною електропровідністю об'єкта.

#### Обговорення результатів дослідження

Розглянуто використання двоелектродного ємнісного сенсора з об'єктом контролю з урахуванням впливу приелектродного імпедансу для режимів вимірювання активної та реактивної компонент адмітансу об'єктів контролю. З метою оцінювання залежностей інформативних параметрів, а також впливу ємності подвійного шару на результат авторами проаналізовано математичні моделі реактивної та активної компонент в широкому частотному діапазоні. При цьому виявлено різний вплив параметрів приелектродного імпедансу на його активну та реактивну складові. 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, горілочаних виробів, м'яса тощо [3,5,8]. Окрім цього на низьких частотах ємність подвійного



шару можна використати як інформативний параметр об'єкта контролю.

### Висновки

1. Отримано математичні моделі активних та реактивних компонент, за якими можна здійснювати комп'ютерне моделювання в широкому частотному діапазоні і для різних значень інформативних параметрів.

2. Зміна характеру кривих, що описують активну та реактивну компоненти залежать від співвідношення між активною провідністю об'єкта контролю та ємністю подвійного шару і частотою.

3. Реактивна компонента визначається сумою двох складових, одна з яких пропорційна ємності подвійного шару, а друга – еквівалентній ємності об'єкта. При цьому із зростанням частоти перша зменшується, а друга зростає. Відповідно, зменшення частоти призводить до зростання першої і зменшення другої.

4. На основі результатів аналізу математичної моделі запропоновано ідентифікаційні ознаки, за якими можна здійснювати ідентифікацію харчової продукції.

### Список використаних джерел

1. ДСТУ ISO 22000:2019 (ISO 22000:2019 IDT). Системи керування безпечністю харчових продуктів.
2. Григорчак І. І. Імпедансна спектроскопія: навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 352 с.
3. Pokhodylo Ye., Stasyshyn Y. Identification of food products with additive E621 according to admittance parameters. *Вимірювальна техніка та метрологія: міжвідомчий науково-технічний збірник*. 2022. Вип. 83, № 4. С. 43–46.
4. Походило Є. В. Імітансний контроль якості: монографія. Л.: НУЛП, 2012. – 164 с.
5. Мартинович Н. В. Метод вимірювання твердості води за параметрами імітансу та його метрологічне забезпечення: Автореф. дис. кандидата техн. наук. НУ «Львівська політехніка» МОН України. - Львів, 2012. – 18 с.
6. Патент України № 93243. Спосіб експресного визначення вмісту етилового спирту в водно-спиртовому розчині, МПК G01N27/48, G01N27/02, від 25.09.2014.

7. Пат. на КМ №93243 Україна, МПК G01N27/48, G01N27/02. Імпедансний аналізатор для ідентифікації марок водно-спиртових напитків / Кукла А. Л., Павлюченко А. С., Майстренко А. С, Мамикін А. В. Технологія і конструювання в електронній промисловості, Київ, 2012, №1, С.15-21.,

8. Походило Є. В., Флюнт Н. Б. Ідентифікація свіжого та розмороженого м'яса методом імпедансної спектроскопії. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2010 № 80 (3). С. 15-20.

9. Щербетовська О. О., Бик О. О. Визначення свіжості курячого м'яса методом імпедансної спектроскопії. ЛНУВМ ім. С. Гжицького. 2011. вип. 13, № 4(4), С. 352–358.

10. Chanet, M., Riviere, C., and Eynard, P.: Electroimpedance spectrometry for process control of minced meat products. *Food Eng.* 1999. № 42, p. 153–159.

11. Chowdhury, A., Singh, P., Kanti Bera, T., Ghoshal, D., and Chakraborty, B.: Electrical impedance spectroscopy study of mandarin during ripening. *Food Meas. Character.* 2017 p 1–11, <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9545-y>, 2017b.

12. Harker, F. R. and Forbes, S. K.: Ripening and chilling development in persimmon fruit: an electrical impedance study. *New Zeal Crop Hort.* 1997. № 25, P. 149–157.

13. Походило Є. В., Юзва В. З. Вимірювання електрофізичних параметрів спиртових розчинів. *Комп'ютерні науки та інформаційні технології: міжвідомчий науково-технічний збірник. Видавництво Національного університету "Львівська політехніка"*, 2015. №1. С.37-45.

14. 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.

### Referencis

1. DSTU ISO 22000:2019 (ISO 22000:2019 IDT). Systemy keruvannya bezpechnistyu kharchovykh produktiv. [in Ukrainian]
2. Hryhorchak I.I. Impedansna spektroskopiya: navchal'nyu posibnyk. L'viv:

Vydavnytstvo L'vivs'koyi politekhniky, 2011. 352 s. [in Ukrainian]

3. Pokhodylo Ye., Stasyshyn Y. Identification of food products with additive E621 according to admittance parameters. *Vymiryuval'na tekhnika ta metrolohiya: mizhvidomchyy naukovo-tekhnichnyy zbirnyk*. 2022. Vyp. 83, № 4. S. 43–46. [in Ukrainian]

4. Pokhodylo YE. V. *Imitansnyy kontrol' yakosti: monohrafiya*. L.: NULP, 2012. – 164 s. [in Ukrainian]

5. Martynovych N.V. *Metod vymiryuvannya tverdosti vody za parametry imitansu ta yoho metrolohichne zabezpechennya: Avtoref. dys. kandydata tekhn. nauk. NU «L'vivs'ka politekhnika» MON Ukrayiny*. L'viv, 2012. – 18 s. [in Ukrainian]

6. Patent Ukrayiny № 93243. Sposib ekspresnoho vyznachennya vmistu etylovoho spyrtu v vodno-spyrtovomu rozchyni, MPK G01N27/48, G01N27/02, vid 25.09.2014. [in Ukrainian]

7. Pat. na KM №93243 Ukrayina, MPK G01N27/48, G01N27/02. Impedansnyy analizator dlya identyfikatsiyi marok vodno-spyrtovykh napytkiv / Kukla A. L., Pavlyuchenko A. S., Maystrenko A. S., Mamykin A. V. *Tekhnolohiya i konstruyuvannya v elektronniy promyslovosti*, Kyiv, 2012, №1, S.15-21. [in Ukrainian]

8. Pokhodylo YE. V., Flyunt N. B. Identyfikatsiya svizhoho ta rozmorozhenoho m'yasa metodom impedansnoyi spektroskopiyi. *Vymiryuval'na tekhnika ta metrolohiya*. 2010 № 80 (3). S. 15-20. [in Ukrainian]

9. Shebetovs'ka O. O., Byk O. O. Vyznachennya svizhosti kuryachoho m'yasa metodom impedansnoyi spektroskopiyi. *LNUVM im. S. Hzhys'koho*. 2011. vyp. 13, № 4(4), S. 352–358. [in Ukrainian]

10. Chanet, M., Riviere, C., and Eynard, P.: Electroimpedance spectrometry for process control of minced meat products. *Food Eng.* 1999. № 42, p. 153–159.

11. Chowdhury, A., Singh, P., Kanti Bera, T., Ghoshal, D., and Chakraborty, B.: Electrical impedance spectroscopy study of mandarin during ripening. *Food Meas. Character.* 2017 p 1–11, <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9545-y>, 2017b.

12. Harker, F. R. and Forbes, S. K.: Ripening and chilling development in persimmon fruit: an

electrical impedance study. *New Zeal Crop Hort.* 1997. № 25, P. 149–157.

13. Pokhodylo YE. V., Yuzva V. Z. Vymiryuvannya elektrofizychnykh parametriv spyrtovykh rozchyniv. *Komp'yuterni nauky ta informatsiyi tekhnolohiyi: mizhvidomchyy naukovo-tekhnichnyy zbirnyk. Vydavnytstvo Natsional'noho universytetu "L'vivs'ka politekhnika"*, 2015. №1.C.37-45. [in Ukrainian]

14. Herasym M. R. *Rozvytok metrolohichnoho zabezpechennya vymiryuvannya elektrofizychnykh parametriv ob'yektiv kvalimetriyi neelektrychnoyi pryrody: Avtoref. dys. kandydata tekhn. nauk / NU «L'vivs'ka politekhnika» MON Ukrayiny*. L'viv, 2014. 20 s. [in Ukrainian]