

УДК 658.62:658.562

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ОВОЧІВ

© Мідик Ігор<sup>1</sup>, Чабан Олесь<sup>2</sup>, 2016

<sup>1</sup>Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,  
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

<sup>2</sup>Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького, кафедра медичної інформатики,  
вул. Пекарська, 69, 79010, Львів, Україна

*Складено електричну та математичну модель контролю якості об'єктів неелектричної природи, враховуючи відомі сьогодні прототипи та результати проведених експериментальних досліджень зміни активної та реактивної складових провідності (адмітансу) в частотному діапазоні тестового сигналу. Проведено математичне моделювання складових адмітансу в разі зміни ємності приелектродного шару, опору та ємності об'єкта неелектричної природи у частотному діапазоні тестового сигналу. Опрацьовано отримані результати зміни активної та реактивної складових провідності, подано рекомендації щодо оптимального частотного діапазону проведення вимірювань та особливостей конструктивних елементів електричної моделі контролю якості об'єктів неелектричної природи.*

*Ключові слова: адмітанс, математичне моделювання, об'єкт контролю, активна складова адмітансу, реактивна складова адмітансу.*

*Составлено электрическую и математическую модели контроля качества объектов неэлектрической природы, учитывая известные сегодня прототипы и результаты проведенных экспериментальных исследований изменения активной и реактивной составляющих проводимости (адмитансу) в частотном диапазоне тестового сигнала. Проведено математическое моделирование составляющих адмитанса при изменениях емкости приелектродного слоя, сопротивления и емкости объекта неэлектрической природы в частотном диапазоне тестового сигнала. Обработано полученные результаты изменения активной и реактивной составляющих проводимости и даны рекомендации относительно оптимального частотного диапазона проведения измерений и особенностей конструктивных элементов электрической модели контроля качества объектов неэлектрической природы.*

*Ключевые слова: адмитанс, математическое моделирование, объект контроля, активная составляющая адмитанса, реактивная составляющая адмитанса.*

*Operational control of quality vegetables can be made using the method immitance control their electrical parameters. Vegetables – are objects of non-electric nature, and their juices – this electrolyte solutions, where there are free charged particles – ions, and it immitance method is based on measuring the electrical conductivity control objects. Therefore, research is relevant electrical parameters vegetable juices as well as development of electric and mathematical models immitance contact transducer.*

*The object of the research is the process of measuring electrical parameters of objects of non-electrical nature.*

*The study examined the features are measuring electrical parameters of the objects of nature electic primary contact transducers.*

*The aim of the research is to identify the influence of parameters of contact transducers for measuring electrical parameters results electic nature objects in a frequency range test signal.*

*Main tasks:*

- Make electric model quality control facilities electic nature; taking into account known today prototypes;*
- Make a mathematical model of quality control facilities electic nature;*
- Assess the impact of the model parameters (resistance and capacitance facility and capacity electrode layer) on the results of measurements of electrical parameters electic nature objects in a frequency range test signal.*

*To study the electrical parameters of vegetable juice prepared generalized electrical equivalent circuit system “sensor-measuring tool”. Based on the equivalent circuit constructed system “sensor-measuring means” formed mathematical*

*model of the transformer primary object of control. Informative electrical parameters are immitance components (active and reactive component) primary converter with vegetable juice (non-electric research object nature). Make up electrical and mathematical model of quality control objects non-electrical nature, taking into account known today prototypes and the results of experimental studies of changes active and reactive components of the conductivity (admittance) in the frequency range test signal. Using the experimental results of change of active and reactive components of the conductivity (admittance) using Solve Block in the software package MathCad Prime 3.1, values obtained resistance and capacitance object electic nature and capacity electrode layer in a frequency range test signal. Done mathematical modelling of admittance components with changes capacitance of electrode layer, resistance and capacitance of object non-electrical nature in a frequency range test signal. Processed obtained results of change of active and reactive components of the conductivity and provides guidance on the optimal frequency range of measurement and features of structural elements of the electrical model quality control objects non-electrical nature. The results of mathematical modeling components admittance was concluded that with increasing frequency electrode layer capacitance  $C_n$  frequency from which the active component is independent frequency decreases. And for independence measurement result object nature electic resistance  $R_x = 46$  ohms and a capacity  $C_x = 1500$  p $kF$  (eg Carrot juice) at lower frequencies necessary to increase the capacity electrode layer, using a sensor with a greater area of the electrodes.*

*Changing the capacity control object  $C_x$  does not affect the value immitance (this follows from the analysis of the expression of the active component of impedance as  $C_n \gg C_x$ ). Frequency from which reactive component is practically constant, slightly increases with increasing facility capacity control  $C_x$ .*

*With the growing resistance of the control object  $R_x = 20, 40, 60, 80, 100$  ohms (this range of resistance values corresponding to different vegetable juices) curves active component of impedance shifted downward by the value of active component of impedance and left in frequency, that frequency, from which the active component is independent frequency decreases. Therefore, for the independence of the measurement result object electic nature with less resistance required measurements at higher frequencies. However, with increasing resistance  $R_x$  frequency control facility from which the reactive component is practically constant, unchanged.*

**Key words:** *admittans, mathematical modeling, object control, admittance active component, reactive component admittance.*

**1. Постановка проблеми.** Оперативний контроль якості овочів можна здійснювати за допомогою імітансного методу контролю їхніх електрофізичних параметрів. Овочі – це об'єкти неелектричної природи, їх соки – це розчини електролітів, у яких містяться вільні заряджені частинки – іони, і саме імітансний метод ґрунтується на вимірюванні електричної провідності об'єктів контролю. Тому актуальними є дослідження електрофізичних параметрів овочевих соків, а також розроблення електричної та математичної моделей імітансного контактного перетворювача.

**2. Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Контроль розчинів електролітів сьогодні можна здійснювати із застосуванням спектроскопічних методів і методів математичного моделювання. Проте надійні спектроскопічні дані можна одержати тільки у достатньо концентрованих розчинах і ці дані не завжди поширюються на слабкоконцентровані розчини [1]. А концентрація аналізованих речовин в овочевих соках якраз незначна. У разі застосування спектроскопічних

методів контролю проблемним є виділення ефектів, які стосуються окремих наявних у розчинах іонів, особливо якщо дія цих іонів взаємокомпенсується. Для цього потрібно здійснити порівняльне дослідження серій розчинів, що відрізняються природою тільки одного типу іонів. Додатково зіставляють експериментальні спектральні результати з квантово-хімічними розрахунками, що стосуються окремих іонів та порівняно простих комбінацій іонів [1].

Для застосування спектроскопії ядерного магнітного резонансу (ЯМР) ядра досліджуваних іонів повинні мати ненульовий магнітний момент, а іони – діамагнітні властивості (наявність неспарених електронів) [1]. В останні 10–15 років інтенсивно розвиваються спектроскопічні методи, основані на комбінації випромінювань високих і низьких частот [2]. Обладнання для таких досліджень доволі дороге.

На думку автора статті, для дослідження якості овочів необхідно розробити методи із широкою сферою використання, високою чутливістю, роздільною здатністю, простою підготовкою проб та доступною за

вартістю та легкістю роботи з приладом у виробничих умовах, значною швидкістю проведення аналізу. Таким вимогам, в основному, відповідають кондуктометричні методи дослідження. Кондуктометричний метод ґрунтується на вимірюванні електричної провідності об'єктів контролю. Нині кондуктометрія застосовується для швидкого визначення концентрації розчинів солей, кислот, основ, для контролю складу деяких промислових розчинів. Переважно ці методи використовують для контролю одиничних показників якості речовин рідинного стану або газового середовища [3, 4]. Кондуктометрія охоплює прямі методи аналізу (використовувані, наприклад, в солемирах) і непрямі (наприклад, у газовому аналізі) із застосуванням постійного або змінного струму (низької та високої частоти), а також хронокондуктометрію, низькочастотне і високочастотне титрування [5, 6]. Концентрацію визначають прямою кондуктометриєю (за калібрувальним графіком – дає змогу безпосередньо визначати концентрацію електроліту, вимірюючи електропровідність розчину з відомим якісним складом) або за допомогою кондуктометричного титрування (метод аналізу, оснований на визначенні вмісту речовини за зломом кривої титрування). Криву будують за вимірюваннями питомої електропровідності аналізованого розчину, мінливої в результаті хімічних реакцій під час титрування). Для визначення складу рідини використовують частотну залежність діелектричних втрат речовини, оскільки вона є характеристикою матеріалу. Кондуктометричний аналіз оснований на зміні концентрації речовини або хімічного складу середовища в міжелектродному просторі; він не пов'язаний з потенціалом електрода, який часто близький до рівноважного значення. Показники, що характеризують неелектричні властивості продукції, вимірюють, перетворюючи фізико-хімічні властивості речовин та матеріалів на електричний сигнал за допомогою різних первинних перетворювачів (сенсорів) [7–14]. На засадах кондуктометричного методу в цій роботі виконано експериментальні дослідження, суть яких полягає у подаванні синусоїдального сигналу на досліджуваній розчин і аналізі відгуку на виході.

**3. Формулювання цілей статті.** Метою проведення досліджень є виявлення впливу параметрів контактних перетворювачів на результати вимірювання електрофізичних параметрів об'єктів неелектричної природи у частотному діапазоні тестового сигналу.

Для реалізації поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- скласти електричну модель контролю якості об'єктів неелектричної природи, враховуючи відомі сьогоденні прототипи;
- скласти математичну модель контролю якості об'єктів неелектричної природи;
- оцінити вплив параметрів моделі (опору та ємності об'єкта, а також ємності приелектродного шару) на результати вимірювання електрофізичних параметрів об'єктів неелектричної природи у частотному діапазоні тестового сигналу.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання електрофізичних параметрів об'єктів неелектричної природи.

Предметом дослідження є особливості вимірювань електрофізичних параметрів об'єктів неелектричної природи контактними первинними перетворювачами. У роботі досліджено електричну та математичну моделі первинного перетворювача в об'єктах неелектричної природи (продукції овочівництва).

**4. Виклад основного матеріалу.** Для дослідження електрофізичних параметрів овочевих соків на підставі прототипів [10] складено узагальнену електричну схему заміщення системи “сенсор–вимірювальний засіб” (рис. 1).

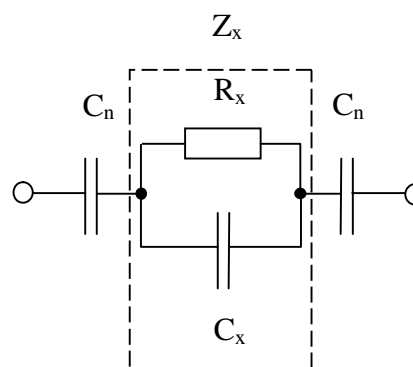


Рис. 1. Схема заміщення системи “сенсор–вимірювальний засіб”:  $Z_x$  – імпеданс об'єкта контролю (овочевого соку);  $C_n$  – приелектродний імпеданс

Fig. 1. Chart replacement system “sensor-measuring tool”:  $Z_x$  – impedance control object (vegetable juice);  $C_n$  – electrode impedance

У наведеній схемі імпеданс  $Z_x$  – це імпеданс об'єкта контролю (овочевого соку). Схема заміщення враховує приелектродні ефекти на межі “електрод–

об'єкт", а саме приелектродний імпеданс  $C_n$ , утворений ємністю подвійного шару. Імпеданс Варбурга усувається, оскільки цей імпеданс суттєвий на низьких частотах (до 50 Гц), а за результатами експерименту [15] інформативними для аналізу електричних параметрів овочевого соку є частоти, вищі за 100 Гц.

Інформативними електричними параметрами є складові імітансу (активна та реактивна складові) первинного перетворювача з овочевим соком (об'єкт дослідження неелектричної природи).

На підставі побудованої схеми заміщення системи "сенсор-вимірювальний засіб" сформуємо математичну модель первинного перетворювача з об'єктом контролю. У разі послідовного з'єднання ємності подвійного шару  $C_n$  та параметрів об'єкта (паралельне з'єднання опору  $R_x$  та ємності  $C_x$ ) комплексну провідність  $Y_x$  такої схеми заміщення подамо у вигляді:

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

Виділимо активну та реактивну складові провідності й представимо їх такими виразами:

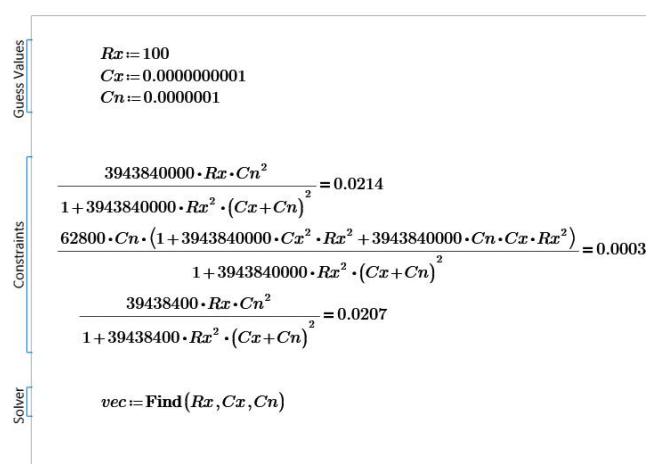
$$\begin{aligned} Re(Y) &= \frac{\omega^2 R_x C_n^2}{1 + \omega^2 R_x^2 (C_x + C_n)^2} \\ Im(Y) &= \frac{\omega C_n(1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2 + \omega^2 C_x C_n R_x^2)}{1 + \omega^2 R_x^2 (C_x + C_n)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

Використовуючи результати експериментальних досліджень зміни активної  $G$  та реактивної  $B$  складових провідності (адмітансу) в частотному діапазоні від 50 Гц до 100 кГц у морквяному соці [15] запишемо рівняння:

$$\begin{aligned} \frac{3943840000 R_x C_n^2}{1 + 3943840000 R_x^2 (C_x + C_n)^2} &= 0.0214 \\ \frac{62800 C_n (1 + 3943840000 C_x^2 R_x^2 + 3943840000 C_x C_n R_x^2)}{1 + 3943840000 R_x^2 (C_x + C_n)^2} &= 0.0003 \\ \frac{39438400 R_x C_n^2}{1 + 39438400 R_x^2 (C_x + C_n)^2} &= 0.0207 \end{aligned}$$

Наведені рівняння записані на частотах 1000 і 10000 Гц. Систему дробово-раціональних рівнянь розв'язано за допомогою SolveBlock у програмному пакеті MathCadPrime 3.1.

У першій графі подано початкові наближення, в другій – обмеження, тобто запис самих рівнянь з використанням логічного оператора порівняння. У третій – розв'язок за допомогою функції Find. Початкові наближення необхідні, оскільки рівняння розв'язують методом ітерацій.



Одержано такі результати:

$$\begin{aligned} R_x &= 46 \text{ Ом.} \\ C_x &= 1.522 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.} \\ C_n &= 1.844 \cdot 10^{-5} \text{ Ф.} \end{aligned}$$

Крім отриманих результатів на частотах 1000 і 10000 Гц, доцільно здійснити математичне моделювання активної та реактивної складових адмітансу за зміни параметрів складових у широкому діапазоні частот [16].

Математичне моделювання проводилося на підставі експерименту, дані якого наведено на кожному з графіків. Досліджено вплив зміни параметрів  $R_x$ ,  $C_x$ ,  $C_n$  на результуючий адмітанс. Під час кожного моделювання за основу брали результати експерименту, змінюючи лише один параметр. Окрім цього, через неясність продовження кривих діапазон частоти під час моделювання розширений до 100М Гц. У результаті видно, як криві виходять на паралелі, й подальшої зміни в графіках не прогнозується. Роботу виконано на підставі прототипу найпоширенішої електричної схеми заміщення об'єкта контролю [10]. На графіках здійснена нумерація щодо моделювання змін параметрів  $R_x$ ,  $C_x$ ,  $C_n$ .

Враховуючи отримані результати, проведемо математичне моделювання складових адмітансу в разі змін опору та ємності об'єкта неелектричної природи, ємності приелектродного шару у частотному діапазоні тестового сигналу.

Для об'єкта контролю з опором  $R_x=46$  Ом та ємністю  $C_x = 1500$  пФ за  $C_n=0,01$  мкФ,  $C_n=0,1$  мкФ,  $C_n=1$  мкФ,  $C_n=10$  мкФ,  $C_n=100$  мкФ отримано залежності активної складової від частоти тестового сигналу в діапазоні від 50 Гц до 10 ГГц, зображені на рис. 2. Аналізуючи отримані залежності, бачимо, що зі зростанням ємності приелектродного шару  $C_n$  криві активної складової імпедансу зміщуються ліворуч за частотою. Отже, у разі зростання ємності приелектродного шару  $C_n$  частота, починаючи з

якої активна складова є частотою незалежною, зменшується. За ємності 0,1 мкФ частота становить 100 МГц, а за ємності 100 мкФ вона зменшується до 1 кГц. Тому для незалежності результату вимірювання об'єкта неелектричної природи з опором  $R_x=46$  Ом та ємністю  $C_x=1500$  пФ (наприклад, морквяного соку) на нижчих частотах необхідно збільшувати ємність приелектродного шару. Для цього треба використовувати сенсор з більшою площею електродів.

Аналізуючи отримані залежності реактивної складової від частоти тестового сигналу (Гц) за різних значень приелектродної ємності  $C_n=0,01$  мкФ,  $C_n=0,1$  мкФ,  $C_n=1$  мкФ,  $C_n=10$  мкФ,  $C_n=100$  мкФ для  $R_x=46$  Ом,  $C_x=1500$  пФ, бачимо, що частота, починаючи з якої реактивна складова практично стала, збільшується зі зростанням ємності приелектродного шару  $C_n$ . За ємності 0,1 мкФ частота становить 100 Гц, а за ємності 100 мкФ зменшується до 10 кГц.

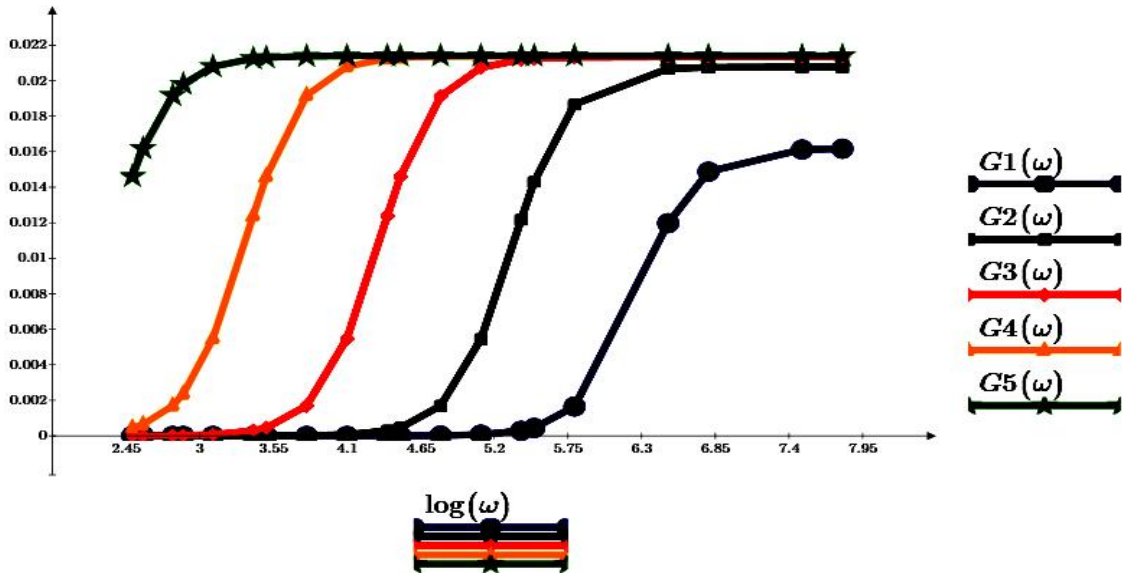


Рис. 2. Графік залежності активної складової  $G(\omega)$  від частоти тестового сигналу (Гц) за різних значень приелектродної ємності для  $R_x=46$  Ом,  $C_x=1500$  пФ  
 Fig. 2. Graph of dependence the active component  $G(\omega)$  with the test signal frequency (Hz) at different values of the electrode capacity for  $R_x=46$  Ом,  $C_x=1500$  pF

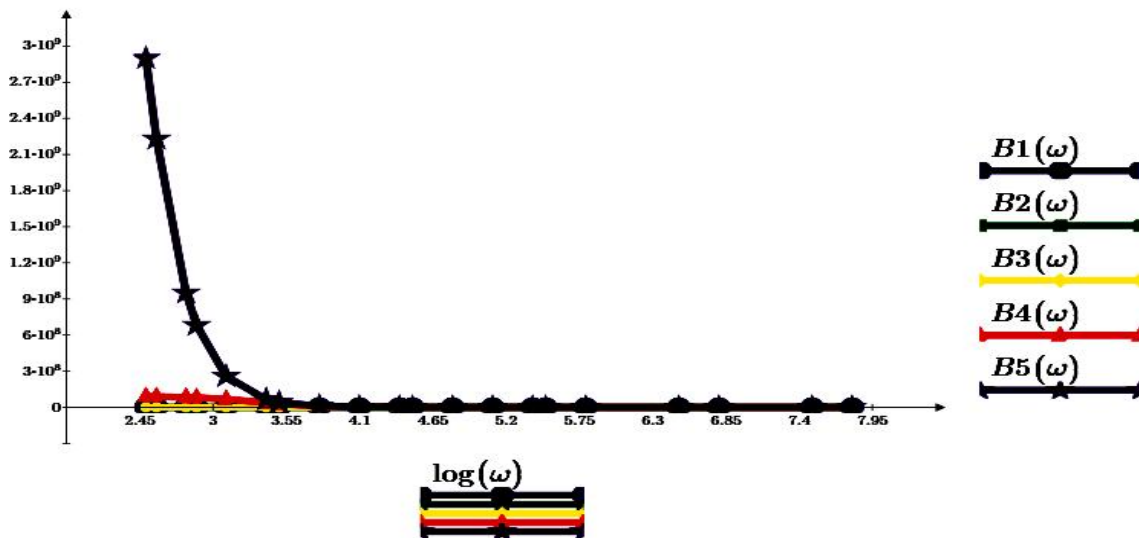


Рис. 3. Графік залежності реактивної складової  $B(\omega)$  від частоти тестового сигналу (Гц) за різних значень приелектродної ємності для  $R_x=46$  Ом,  $C_x=1500$  пФ  
 Fig. 3. Graph of dependence the reactive component  $B(\omega)$  with the test signal frequency (Hz) at different values of the electrode capacity for  $R_x=46$  Ом,  $C_x=1500$  pF

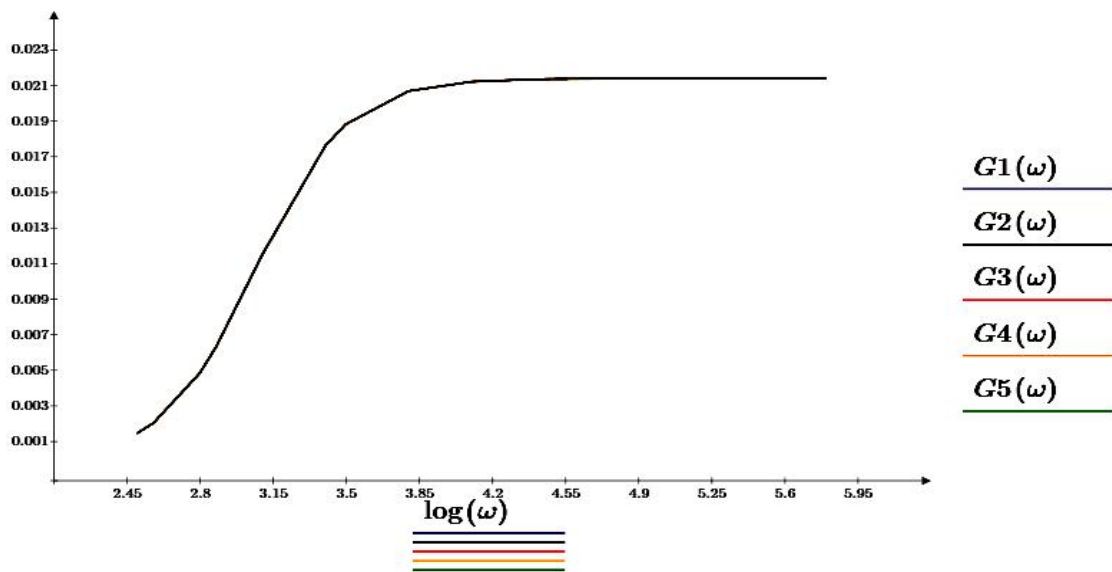


Рис. 4. Графік залежності активної складової  $G(\omega)$  від частоти тестового сигналу (Гц) за різних значень ємності об'єкта контролю для  $C_n = 18 \text{ мкФ}$ ,  $R_x = 46 \text{ Ом}$

Fig. 4. Graph of dependence the active component  $G(\omega)$  with the test signal frequency (Hz) at different values of the object capacity for  $R_x = 46 \text{ Ом}$ ,  $C_n = 18 \text{ мФ}$

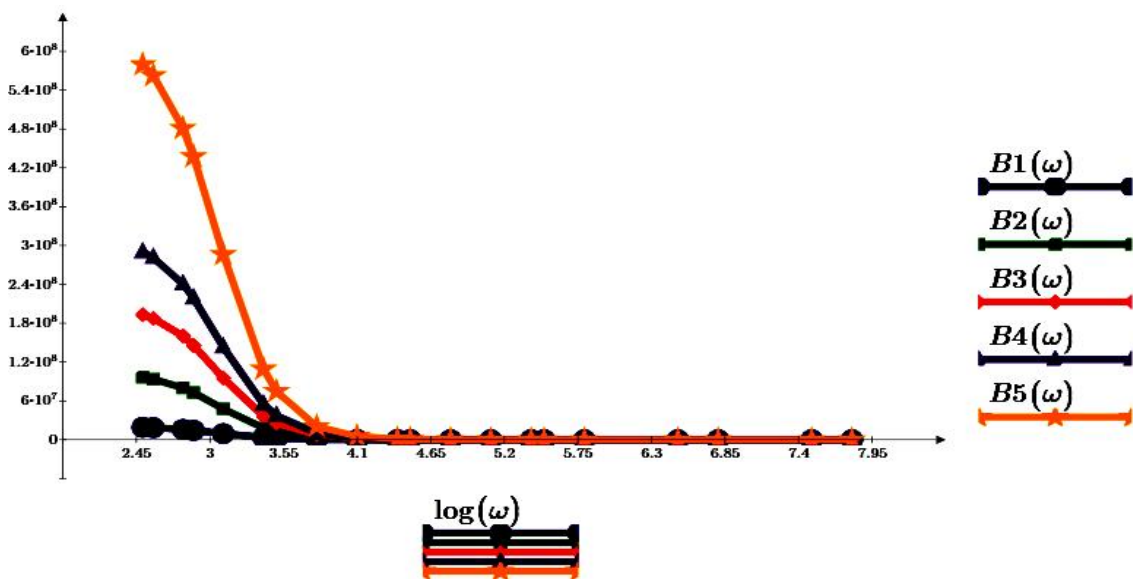


Рис. 5. Графік залежності реактивної складової  $B(\omega)$  від частоти тестового сигналу (Гц) за різних значень ємності об'єкта контролю для  $C_n = 18 \text{ мкФ}$ ,  $R_x = 46 \text{ Ом}$

Fig. 5. Graph of dependence the reactive component  $B(\omega)$  with the test signal frequency (Hz) at different values of the object capacity for  $R_x = 46 \text{ Ом}$ ,  $C_n = 18 \text{ мФ}$

З графіка на рис. 4 видно, що для  $C_n = 18 \text{ мкФ}$ ,  $R_x = 46 \text{ Ом}$  за значень ємності об'єкта контролю  $C_x = 100, C_x = 500, C_x = 1000, C_x = 1500, C_x = 3000 \text{ пФ}$  криві залежності активної складової від частоти тестового сигналу накладаються. Отже, зміна  $C_x$  не впливає на значення імітансу, що пояснює аналіз формули активної складової (2), оскільки  $C_n \gg C_x$ .

З графіка на рис. 5 видно, що для  $C_n = 18 \text{ мкФ}$ ,  $R_x = 46 \text{ Ом}$  за значень ємності об'єкта контролю  $C_x = 100, C_x = 500, C_x = 1000, C_x = 1500, C_x = 3000 \text{ пФ}$ , частота, починаючи з якої реактивна складова практично стала, дещо збільшується зі зростанням ємності об'єкта контролю  $C_x$ . За ємності  $100 \text{ пФ}$  частота становить  $1 \text{ кГц}$ , а за ємності  $3000 \text{ пФ}$  вона зменшується до  $10 \text{ кГц}$ .

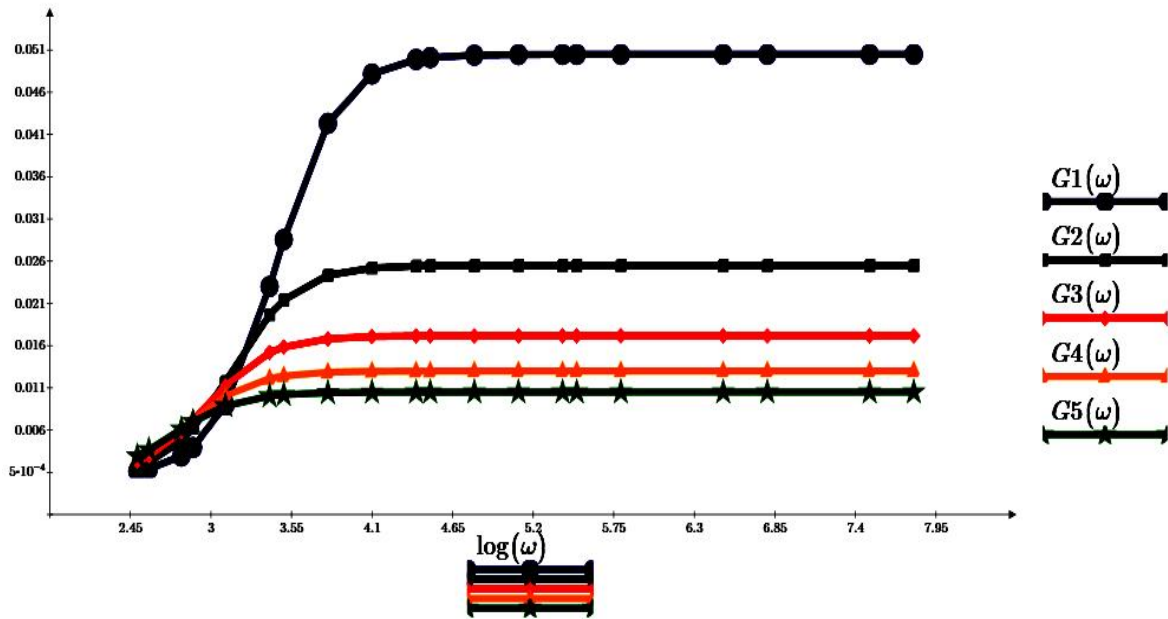


Рис. 6. Графік залежності активної складової  $G(\omega)$  від частоти тестового сигналу (Гц) за різних значень опору об'єкта контролю.  $C_n = 18 \text{ мкФ}$ ,  $C_x = 1500 \text{ пФ}$ ,  $R_x = 20, 40, 60, 80, 100 \text{ Ом}$

Fig. 6. Graph of dependence the active component  $G(\omega)$  with the test signal frequency (Hz) at different values of the object resistance for  $C_n = 18 \text{ мкФ}$ ,  $C_x = 1500 \text{ пФ}$ ,  $R_x = 20, 40, 60, 80, 100 \text{ Ом}$

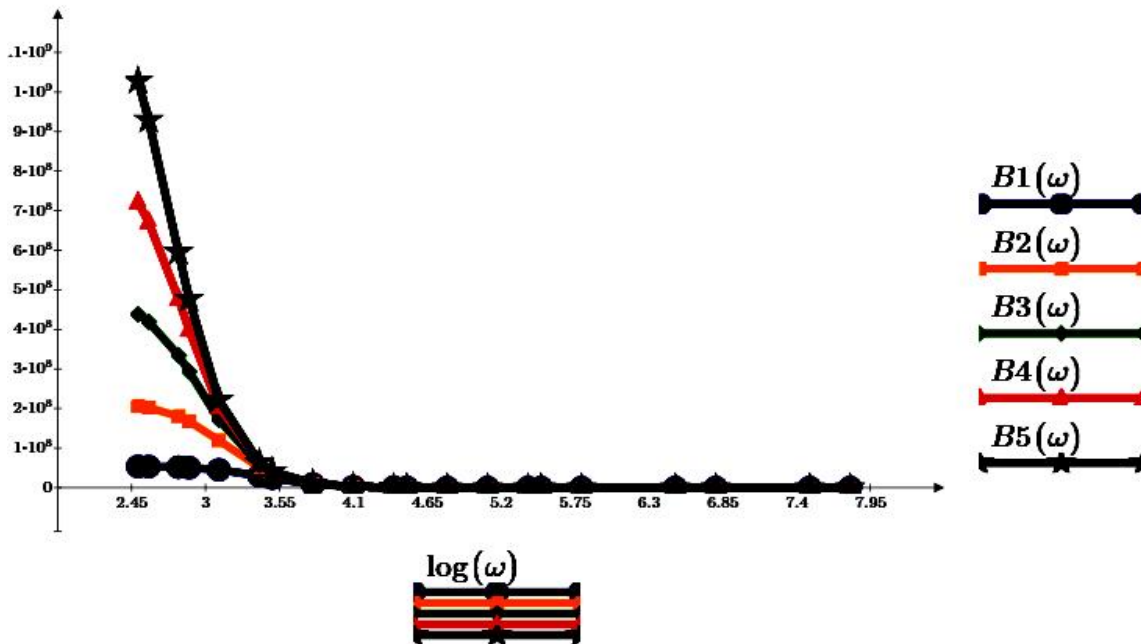


Рис. 7. Графік залежності реактивної складової  $B(\omega)$  від частоти тестового сигналу (Гц) за різних значень опору об'єкта контролю.  $C_n = 18 \text{ мкФ}$ ,  $C_x = 1500 \text{ пФ}$ ,  $R_x = 20, 40, 60, 80, 100 \text{ Ом}$

Fig. 7. Graph of dependence the reactive component  $B(\omega)$  with the test signal frequency (Hz) at different values of the object resistance for  $C_n = 18 \text{ мкФ}$ ,  $C_x = 1500 \text{ пФ}$ ,  $R_x = 20, 40, 60, 80, 100 \text{ Ом}$

Для об'єкта контролю з ємністю  $C_x = 1500$  пФ та  $C_n = 18$  мкФ за  $R_x = 20, 40, 60, 80, 100$  Ом (цей діапазон значень опору відповідає різних овочевим сокам) отримано залежності активної складової від частоти тестового сигналу в діапазоні від 50 Гц до 100 МГц, зображені на рис. 6.

Аналізуючи отримані залежності (рис. 6), бачимо, що зі зростанням опору об'єкта контролю  $R_x$  криві активної складової імпедансу зміщуються у бік зменшення за значенням активної складової імпедансу та вліво за частотою. Отже, зі зростанням опору  $R_x$  частота, починаючи з якої активна складова є частотою незалежною, зменшується. За опору 20 Ом частота становить 39,81 кГц, а за опору 100 Ом зменшується до 3,16 кГц. Тому, щоб добитись незалежності результату вимірювання об'єкта неелектричної природи із меншим опором, потрібно проводити вимірювання на вищих частотах.

Аналізуючи залежності на рис. 7, бачимо, що зі зростанням опору об'єкта контролю  $R_x$  частота, починаючи з якої реактивна складова практично стала, не змінюється і становить 3,5 кГц.

Виконавши математичне моделювання складових адмітансу за змін опору та ємності об'єкта неелектричної природи, ємності приелектродного шару в частотному діапазоні тестового сигналу, одержані дані порівнювали з даними експерименту [15]. Результати збігаються в околі значень  $R_x = 46$  Ом,  $C_x = 1,522 \cdot 10^{-9}$  Ф,  $C_n = 1,844 \cdot 10^{-5}$  Ф. Тому за результатами математичного моделювання складових адмітансу можна дати рекомендації щодо покращення результатів контролю якості об'єктів неелектричної природи.

## Висновки

1. Складено електричну та математичну моделі контролю якості об'єктів неелектричної природи, враховуючи відомі сьогодні прототипи та результати проведених експериментальних досліджень зміни активної та реактивної складових провідності (адмітансу) у частотному діапазоні тестового сигналу в морквяному соці.

2. Використовуючи розроблену модель, проведено математичне моделювання складових адмітансу в разі змін опору та ємності об'єкта неелектричної природи, ємності приелектродного шару в частотному діапазоні тестового сигналу.

3. За результатами математичного моделювання складових адмітансу можна зробити висновки, що зі

зростанням ємності приелектродного шару  $C_n$  частота, починаючи з якої активна складова є частотою незалежною, зменшується. І щоб добитись незалежності результату вимірювання об'єкта неелектричної природи з опором  $R_x = 46$  Ом та ємністю  $C_x = 1500$  пФ (наприклад, морквяного соку), на нижчих частотах необхідно збільшувати ємність приелектродного шару, використавши сенсор з більшою площею електродів.

4. Зміна ємності об'єкта контролю  $C_x$  не впливає на значення імітансу (це також впливає із аналізу виразу активної складової імпедансу, оскільки  $C_n \gg C_x$ ). Частота, починаючи з якої реактивна складова практично стала, дещо збільшується зі зростанням ємності об'єкта контролю  $C_x$ .

5. Зі зростанням опору об'єкта контролю  $R_x = 20, 40, 60, 80, 100$  Ом (цей діапазон значень опору відповідає різних овочевим сокам) криві активної складової імпедансу зміщуються у бік зменшення за значенням активної складової імпедансу та вліво за частотою, тобто частота, починаючи з якої активна складова є частотою незалежною, зменшується. Тому, щоб досягти незалежності результату вимірювання об'єкта неелектричної природи із меншим опором, потрібно проводити вимірювання на вищих частотах. Водночас зі зростанням опору об'єкта контролю  $R_x$  частота, починаючи з якої реактивна складова практично стала, не змінюється.

1. Дамаскин Б. Б. *Электрохимия* / О. А. Петруй, Г. А. Цирлина. – 2-е изд., испр. и перераб. — М.: Химия, Колос, 2006. – 672 с.
2. Bard A. J., Faulkner L. R. *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*. – N. Y.: Wiley, 2001.
3. Андреев, В. С. *Кондуктометрические методы и приборы в биологии и медицине [Текст]* / В. С. Андреев. – М.: Медицина, 1973. – 335 с.
4. Mazur A. *Influence of the pre-dam reservoir on the quality of surface waters supplying reservoir "nielisz"* [Text] / A. Mazur // ТЕКА Komisji Ochrony Kształtowania Środowiska. – 2010. – No. 7. – P. 243–250.
5. Профос П. *Измерение в промышленности [Текст]: справ. изд.; в 3 кн. / под ред. П. Профоса. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. – Кн. 2. – 305 с.*
6. Лопатин Б. А. *Кондуктометрия [Текст]* / Б. А. Лопатин. – Н.: СО АН СССР, 1964. – 182 с.
7. Stolyarcuk P. *Electric Sensors for Express-Method Checking of Liquid Quality Level Monitoring [Text]* / P. Stolyarcuk, V. Yatsuk, Y. Pokhodylo, M. Mikhalieva,



- T. Boyko, O. Basalkevych // *Sensors & Transducers Journal*. – 2010. – Vol. 8, No. 2. – P. 88–98. 8. Міхалева М. С. Результати експериментальних досліджень модельних водних розчинів новим електричним імідансним методом [Текст] / М. С. Міхалева // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія “Автоматика, вимірювання та керування”. – 2010. – № 665. – С. 169–173. 9. Stolyarchuk, P. Multicomponent Liquids’ Research [Text] / P. Stolyarchuk, M. Mikhalieva, V. Yatsuk, Ye. Pokhodylo, O. Basalkevych // *Sensors & Transducers Journal*. – 2013. – Vol. 148, No. 1. – P. 95–99. 10. Походило Є. В. Імідансний контроль якості [Текст]: монографія / Є. В. Походило, П. Г. Столярчук. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 164 с. 11. Форейт И. Емкостные датчики незлектрических величин [Текст] / И. Форейт. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 160 с. 12. Pohodylo E. PC-based devices for immittance control of multidimensional objects [Text] / E. Pohodylo, P. Stolyarchuk, M. Chyrka // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2002. – Vol. 51, No. 5. – P. 1133–1136. doi:10.1109/tim.2002.806014. 13. Majewski J. Zastosowanie sensorów pojemnościowych do szybkiej kontroli parametrów roztworów wieloskładnikowych [Text] / J. Majewski, P. Malacziwskyj, V. Yatsuk, P. Stolyarczuk, M. Michalewa // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2010. – No. 10. – P. 92–95. 14. Ivakhiv O. Production Quality Testing with Imittance Sensors Using Instrumentation [Text]: материалы конференційне / O. Ivakhiv, Ye. Pokhodylo, P. Stolyarchuk // VII Konferencja naukowa “Czujniki optoelektronicznej i elektronicznej” (COE’2002), 5–8 czerwca 2002. – Rzeszow, 2002. – Vol. 2. – P. 297–300. 15. Мідик І.-М. В. Оцінка якості продукції овочівництва за електричними характеристиками / І.-М. В. Мідик // Міжнародний науковий журнал “Технологічний аудит та резерви виробництва”. 2016. – № 3/2 (29). – С. 30–35. 16. 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”; відповід. ред. Ю. М. Рашкевич. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2013. – № 751. – С. 193–198.