

УДК 621.317

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.04.080>**ІТЕРАЦІЙНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ
ДИФЕРЕНЦІЙНИХ КОНДУКТОМЕТРИЧНИХ СЕНСОРІВ****П.І. Борщов***, канд. техн. наук, **В.Г. Мельник****, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: pavbor2010@gmail.com.

Запропонований метод є розвитком відомого, що базується на визначенні параметрів імпедансів перетворювачів сенсора за трьохелементною еквівалентною схемою на двох частотах. Підвищення точності досягається за рахунок покрокового уточнення значень параметрів з використанням значень, отриманих на попередньому кроці зі спрощених математичних виразів. Наведено математичні вирази для розрахунків вказаних параметрів. Наведено порівняльні результати розрахунків на основі відомого і запропонованого методів з використанням комп'ютерної моделі, які показали можливість суттєвого зниження впливу змін фонові електропровідності розчину порівняно з відомим способом. Бібл. 9, рис. 2, табл. 1.

Ключові слова: диференційний кондуктометричний сенсор, ємність подвійного шару, опір переносу заряду, мостове вимірювальне коло, квазірівновага, ітераційний метод розрахунку.

Кондуктометричні методи вимірювань складу рідин широко застосовують в технічній та медичній діагностиці, для контролю забруднень довкілля, в біотехнологіях [1, 2]. Для забезпечення вибірковості вимірювань відносно певних речовин набула популярності двоелектродна конструкція перетворювачів (сенсорів) на основі планарних зустрічно-гребінчастих електродів, на які нанесено селективну мембрану [3-6]. Інформативною величиною є локальна зміна питомої електропровідності розчину, обумовлена зміною концентрації заряджених часток в результаті хімічної реакції в мембрані. Зокрема, на цьому основанні перспективні засоби екологічного та біотехнологічного контролю – кондуктометричні біосенсори. Кондуктометричному методу притаманна висока чутливість при простоті реалізації. Однак існує проблема залежності результатів від неінформативних параметрів багатоелементної еквівалентної схеми імпедансу вимірювальної комірки, який визначає коефіцієнт перетворення прикладеної тестової напруги в інформативний вихідний струм [5].

Одним з неінформативних параметрів, що суттєво впливає на результати вимірювань, є зміни фонові питомої електропровідності досліджуваного розчину, обумовлені змінами його температури, концентрації та іншими факторами. Для зменшення цього впливу застосовують диференціальний сенсор, що складається з робочого перетворювача з активною мембраною і референсного з пасивною мембраною, за допомогою якого визначають фонову електропровідність розчину. Сенсор, що знаходиться у вимірювальній комірці, підключають у мостове вимірювальне коло, яке приводить в стан рівноваги. Після цього в комірку вносять досліджуваний аналіт, що викликає локальну зміну електропровідності в селективній мембрані та відповідний інформативний сигнал відгуку на виході моста. Якщо параметри еквівалентних схем перетворювачів диференційного сенсора неідентичні, до інформативного сигналу додається сигнал похибки, викликаний різницею коефіцієнтів перетворення зміни фонові електропровідності. В роботі [7] описано метод зниження вказаного впливу шляхом встановлення особливого, розрахункового стану квазірівноваги мостового вимірювального кола, за якого забезпечується взаємна компенсація змін струмів через перетворювачі сенсора у разі зміни фонові електропровідності в умовах неідентичності параметрів двоелементних еквівалентних схем перетворювачів. В роботі [8] запропоновано подальший розвиток цього методу, який задля визначення необхідного стану квазірівноваги враховує як параметри активного опору розчину, так і

© Борщов П.І., Мельник В.Г., 2024

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0003-1363-9252>; ** <https://orcid.org/0000-0002-4470-4339>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

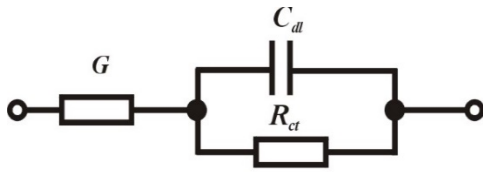


Рис. 1

параметри приелектродного шару, зокрема, опір переносу зарядів, вплив якого є особливо помітним за суттєвої різниці значень параметрів перетворювачів.

На рис. 1 представлено еквівалентну електричну схему перетворювача сенсора, де G – електропровідність розчину, C_{dl} – ємність подвійного приелектродного шару, R_{ct} – активний опір переносу зарядів у приелектродному шарі.

Для реалізації методу спочатку виконують вимірювання складових імпедансів перетворювачів сенсора на двох частотах – на робочій і допоміжній, після чого розраховують значення параметрів перетворювачів. Для сенсорів, що використовують на практиці [5–9], частоти обмежені приблизним діапазоном від 30 кГц до 100 кГц, оскільки, з однієї сторони, на більш низьких частотах відчувається небажаний вплив імпедансу Варбурга, з іншої сторони, на більших частотах зростають похибки вимірювання, обумовлені частотними залежностями коефіцієнтів передачі аналогових електронних елементів [9]. Доцільно основну частоту вибрати максимально близькою до верхньої границі вказаного діапазону, при цьому допоміжна частота вибирається біля нижньої його границі.

В роботі [8] запропоновано розрахувати параметри кожного з перетворювачів за виразами

$$C_{dl} \approx \frac{1}{|\text{Im}(\dot{Z})| \cdot \omega}, \quad (1)$$

$$R_{ct} \approx \frac{1}{[\text{Re}(\dot{Z}_1) - \text{Re}(\dot{Z})] \cdot C_{dl}^2 \cdot \omega_1^2}, \quad (2)$$

$$G \approx \frac{1}{\text{Re}(\dot{Z}) - \frac{R_{ct}}{1 + (\omega \cdot R_{ct} \cdot C_{dl})^2}}. \quad (3)$$

де ω , ω_1 – кругові робоча і допоміжна частоти; \dot{Z} , \dot{Z}_1 – комплексні імпеданси перетворювача на робочій і допоміжній частотах, $\omega > \omega_1$.

Далі перетворювачі сенсора включають у мостове вимірювальне коло, яке містить генератор фіксованої напруги, що прикладена до робочого перетворювача, і генератор, напруга якого може регулюватися за фазою й амплітудою (регульований генератор). Ця напруга прикладається до референсного перетворювача. Різниця струмів через перетворювачі підсилюється, перетворюється в цифровий код і використовується для врівноважування моста шляхом зміни амплітуди та фазового зсуву напруги регульованого генератора відносно напруги генератора фіксованої напруги як описано у [8]. Після досягнення стану рівноваги мостове вимірювальне коло переводиться у стан квазірівноваги задля забезпечення рівності векторів змін струмів через перетворювачі, обумовлених зміною питомої електропровідності розчину. Задля досягнення такого стану необхідно, по-перше, змінити фазу напруги на референсному перетворювачі на величину, що дорівнює різниці фазових кутів імпедансів робочого і референсного перетворювачів. По-друге, потрібно відповідно змінити амплітуду напруги на референсному перетворювачі. Якщо напруга генератора регулюється за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП), то код керування ЦАП для стану квазірівноваги визначається так

$$N_{D2} = N_{D1}^2 \frac{G_R}{G_A}, \quad (4)$$

де N_{D1} , N_{D2} – коди керування ЦАП для станів рівноваги і квазірівноваги; індекси «R» і «A» відповідають референсному і робочому перетворювачам.

Аналіз виразів (1) і (2) показує, що вони дають можливість отримати достатньо точні результати лише тоді, коли значення частот ω і ω_1 значно різняться. Але у випадку, коли значення частот є близькими, розрахунки за вказаними виразами мають досить великі похибки, що не дає змоги точно розрахувати код керування ЦАП за виразом (4), і відповідно, коефіцієнт придушення впливу змін фонові електропровідності розчину виявляється недостатньо високим.

Метою даної роботи є вдосконалення методу визначення параметрів кондуктометричних перетворювачів, описаного в [8], яке додатково підвищить ступень придушення впливу змін фонові електропровідності розчину.

Вирішення цієї задачі базується на наступному.

Точні вирази для визначення комплексного імпедансу перетворювача на частотах ω і ω_1

$$\dot{Z} = \frac{1}{G} + \frac{1}{j\omega C_{dl} + R_{ct}^{-1}}, \quad (5)$$

$$\dot{Z}_1 = \frac{1}{G} + \frac{1}{j\omega_1 C_{dl} + R_{ct}^{-1}}. \quad (6)$$

Після перетворень вираз (5) має вигляд

$$\dot{Z} = \frac{1}{G} + \frac{1}{\omega C_{dl}} \cdot \frac{A - j}{1 + A^2}, \quad (7)$$

де $A = (R_{ct}\omega C_{dl})^{-1}$.

Абсолютне значення уявної частини імпедансу

$$|\text{Im}(\dot{Z})| = \frac{1}{\omega C_{dl}} \cdot \frac{1}{1 + A^2}. \quad (8)$$

Уточнене значення ємності

$$C_{dl} = \frac{1}{|\text{Im}(\dot{Z})| \omega (1 + A^2)}. \quad (9)$$

Дійсні частини імпедансу для двох частот

$$\text{Re}(\dot{Z}) = \frac{1}{G} + \frac{R_{ct}}{(\omega C_{dl} R_{ct})^2 + 1}, \quad (10)$$

$$\text{Re}(\dot{Z}_1) = \frac{1}{G} + \frac{R_{ct}}{(\omega_1 C_{dl} R_{ct})^2 + 1}. \quad (11)$$

Різниця дійсних частин

$$\text{Re}(\dot{Z}_1) - \text{Re}(\dot{Z}) = R_{ct} \left(\frac{(\omega C_{dl} R_{ct})^2 - (\omega_1 C_{dl} R_{ct})^2}{((\omega C_{dl} R_{ct})^2 + 1)((\omega_1 C_{dl} R_{ct})^2 + 1)} \right). \quad (12)$$

Виразимо більшу частоту через меншу: $\omega = K_\omega \omega_1$.

За умови, що на робочій частоті $\omega C_{dl} R_{ct} \gg 1$, маємо

$$\text{Re}(\dot{Z}_1) - \text{Re}(\dot{Z}) \approx \frac{1}{R_{ct} (\omega_1 C_{dl})^2} \cdot \frac{K_\omega^2 - 1}{K_\omega^2} \cdot \frac{1}{1 + (\omega_1 C_{dl} R_{ct})^{-2}}. \quad (13)$$

Звідки знаходимо уточнене значення опору переносу заряду

$$R_{ct} \approx \frac{1}{(\text{Re}(\dot{Z}_1) - \text{Re}(\dot{Z})) (\omega_1 C_{dl})^2} \cdot \frac{K_\omega^2 - 1}{K_\omega^2} \cdot \frac{1}{1 + (\omega_1 C_{dl} R_{ct})^{-2}}. \quad (14)$$

Якщо порівняти вирази (1) і (9), то видно, що для більш точного розрахунку значення ємності, отримане з (1), потрібно поділити на коригуючий коефіцієнт $(1 + A^2)$, який в свою чергу залежить як від ємності, так і від опору переносу заряду.

З порівняння виразів (2) і (14) видно, що для уточненого розрахунку опору переносу заряду значення, отримане з (2), необхідно помножити на два коефіцієнти, один з яких залежить від співвідношення частот, а другий – від ємності та самого опору переносу заряду.

Звичайно, можна знайти рішення рівняння (9) відносно ємності і рівняння (14) відносно опору переносу заряду. Але такі рішення є громіздкими і незручними для практичного застосування в мікропроцесорних приладах. Більш доцільно буде застосувати ітераційний метод розрахунку вказаних параметрів. Для цього на першому кроці можна визначити приблизне значення ємності за виразом (1), який отримано з виразу (9) за умови, що $R_{ct} = \infty$, а також опору переносу заряду за виразом (14) за такої ж умови, при цьому третій множник дорівнює 1. На наступних кроках можна уточнювати значення цих параметрів, підставляючи у (9) і (14) значення, отримані на попередніх кроках.

Розроблений метод складається з таких операцій:

1. Вимірюють дійсні та уявні складові імпедансів перетворювачів на частотах ω і ω_1 .
2. Збирають і врівноважують мостове вимірювальне коло шляхом встановлення відповідних параметрів регульованого генератора: фазового зсуву $\Delta\phi$ і коду керування ЦАП N_{D1} .

3. Обчислюють перші наближені значення: ємностей подвійного приелектродного шару робочого і референсного перетворювачів за виразом (1), опорів переносу заряду за виразом (14) за умов $R_{clA}=\infty$, $R_{clR}=\infty$, електропровідності розчину за виразом (3).
4. Розраховують перше наближене значення коду N_{D2} для стану квазірівноваги за виразом (4).
5. Обчислюють другі (уточнені) значення параметрів за п. 3 з використанням перших наближених значень цих параметрів, отриманих раніше.
6. Розраховують друге (уточнене) значення коду N_{D2} . Обчислюють різницю першого і другого значень цього коду. Якщо різниця не перевищує встановлений поріг у кілька одиниць (визначається експериментально для даного типу сенсорів), обчислення припиняють. Якщо ні – повторюють виконання пунктів 5 і 6 до досягнення встановленого порога.
7. Встановлюють параметри регульованого генератора: $\Delta\phi_1 = 2\Delta\phi$, останнє обчислене значення N_{D2} , тобто міст переводиться в стан квазірівноваги, в якому досягається максимальне зменшення впливу змін фонові електропровідності розчину сенсора.

Необхідно мати на увазі, що знаменник виразу (14) містить різницю дійсних частин імпедансу, виміряних на двох частотах. Якщо параметр R_{cl} досить великий, різниця дійсних частин може наближуватись до нуля, що зробить розрахунки неможливими. Тому перед обчисленням виразу (14) необхідно перевірити чи не є різниця дійсних частин імпедансу нульовою. Якщо це так, то припускають, що $R_{cl} = \infty$, і обчислення електропровідності розчину проводять без врахування цього параметру, тобто

$$G \frac{1}{\operatorname{Re}(Z)}. \quad (15)$$

В цьому випадку немає необхідності у виконанні інших кроків ітерації, крім першого. Таким чином після виконання п. 4 переходять відразу до п. 7.

Для оцінки ефективності розробленого методу було створено математичну модель процесу врівноважування мостового вимірювального кола, в яке включено перетворювачі диференційного сенсора. Вхідні дані моделі: значення параметрів перетворювачів сенсора (G_A , C_{dlA} , R_{clA} , G_R , C_{dlR} , R_{clR}). Обчислюють різницю фаз струмів через перетворювачі сенсора і встановлюють відповідну фазу напруги регульованого генератора (з урахуванням дискретності регулятора фази). Обчислюють різниці струмів через перетворювачі сенсора за різних значеннях коду ЦАП регульованого генератора, будують графік залежності різниці струмів від коду ЦАП. Знаходять на графіку значення коду ЦАП N_{D1} , що відповідає мінімальній різниці струмів, тобто рівновазі вимірювального кола.

На наступному кроці змінюють значення електропровідності робочого перетворювача сенсора на величину, що відповідає зміні фонові електропровідності розчину, і запам'ятовують приріст струму нерівноваги моста, що характеризує вплив даного фактору на результат вимірювання.

Після цього одночасно змінюють на однаковий коефіцієнт значення електропровідностей обох перетворювачів для імітації зміни фонові електропровідності розчину. Обчислюють прирости сигналу нерівноваги вимірювального кола за різних значень коду ЦАП регульованого генератора та за результатами обчислень будують графік залежності цього приросту від коду ЦАП. Знаходять на графіку значення коду ЦАП N_{D2min} , що відповідає мінімальному приросту сигналу нерівноваги моста, тобто таке значення, що визначає стан квазірівноваги вимірювального кола.

Проводять обчислення за пп. 1-7 вказаної вище послідовності операцій і визначають значення коефіцієнту придушення впливу змін фонові електропровідності для знайдених на кожному кроці ітерації значень коду ЦАП N_{D2} .

Наводимо приклади обчислень значень коду ЦАП для різних наборів параметрів сенсора. Частоти, на яких проводяться вимірювання: основна частота 62,5 кГц, допоміжна – 31,25 кГц. Коефіцієнт змін електропровідності перетворювачів, обумовлений зміною фонові електропровідності розчину, прийнято рівним 0,01. Значення коду керування 12-розрядного ЦАП регульованого генератора, що відповідає рівню напруги нерегульованого генератора, прийнято 3072.

Перший набір: $G_A=0,833$ mSm, $C_{dlA}=6,72$ nF, $R_{clA}=7500$ Ω , $G_R=1,2$ mSm, $C_{dlR}=4,48$ nF, $R_{clR}=3000$ Ω . Такі значення ілюструють випадок досить суттєвої різниці параметрів перетворювачів сенсора – майже на 50% відрізняються значення електропровідностей розчину й ємності приелектродних шарів і більше ніж у 2 рази – опори переносу заряду. Така велика різниця параметрів не є притаманною більшості біосенсорів, але такий випадок є імовірним, його можна розглядати як оцінку «найгіршого випадку». Якщо метод працює для такого випадку, він буде працювати для основної кількості

біосенсорів. Другий набір: $G_A=1,0$ mSm, $C_{dIA}=5,0$ nF, $R_{cIA}=9000$ Ω , $G_R=1,1$ mSm, $C_{dIR}=5,1$ nF, $R_{cIR}=4000$ Ω . Третій набір: $G_A=1,613$ mSm, $C_{dIA}=3,82$ nF, $R_{cIA}=4000$ Ω , $G_R=1,6$ mSm, $C_{dIR}=4,8$ nF, $R_{cIR}=10000$ Ω . На рис. 2 показано графік залежності коефіцієнту послаблення впливу змін фонові електропровідності розчину від коду ЦАП в стані квазірівноваги моста для першого набору параметрів. Значення N_{D2ext} , що відповідає мінімальному приросту сигналу нерівноваги моста, становить 3210. При цьому коефіцієнт придушення дорівнює 204. Коефіцієнт придушення R_{supp} розрахований як відношення зміни струму нерівноваги моста за зміни електропровідності лише у робочому перетворювачі до зміни струму нерівноваги, обумовленого зміною електропровідностей в обох перетворювачах.

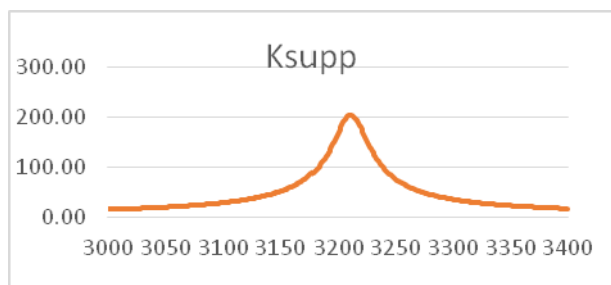


Рис. 2

Результати розрахунків кодів ЦАП та отримані значення коефіцієнтів придушення впливу змін фонові електропровідності розчину K_{supp} на різних кроках ітерації для вказаних вище наборів параметрів приведено в рядках 1-3 таблиці. У стовпчиках 2 і 3 для порівняння наведено результати розрахунків згідно методу, описаного в роботі [8].

№	Метод згідно [8]		Крок 1		Крок 2		Крок 3		Крок 4	
	N_{D2}	K_{supp}	N_{D2}	K_{supp}	N_{D2}	K_{supp}	N_{D2}	K_{supp}	N_{D2}	K_{supp}
1	3080	24	3145	48	3181	96	3186	110	3186	110
2	3141	77	3163	130	3173	149	3173	149	-	-
3	2472	40	2444	74	2426	148	2424	164	2424	164

З даних таблиці видно, що для наборів даних 1 і 3 знадобилось 4 кроки ітерації, при цьому значення коду ЦАП, отримане на третьому і четвертому кроках, співпадають. Для другого набору даних виявилось достатнім виконати три кроки. Поріг зміни розрахованого значення коду ЦАП доцільно встановити на рівні ± 1 . У всіх трьох випадках після завершення ітераційного процесу коефіцієнт придушення впливу змін фонові електропровідності розчину становить більше 100, що є достатнім для практичних задач вимірювань. У порівнянні з методом, описаним в роботі [4], запропонований метод забезпечує підвищення коефіцієнту придушення впливу змін фонові електропровідності розчину у 1,5 – 4 рази.

Висновки. Застосування відомого способу налаштування мостового вимірювального кола в стан квазірівноваги, описаного в роботі [8], не забезпечує достатнього рівня придушення впливу змін фонові електропровідності розчину у разі суттєвих різниць параметрів робочого та референсного перетворювачів сенсора. Розроблено новий ітераційний спосіб налаштування мостового вимірювального кола в стан квазірівноваги. Оскільки вираз для визначення кожного параметра включає значення інших параметрів, то розрахунки на кожному наступному кроці виконуються з використанням значень, отриманих на попередньому кроці. Критерієм завершення процесу є мінімальна зміна розрахованого значення керуючого коду ЦАП регульованого генератора. Результати математичного моделювання показали можливість зниження впливу змін фонові електропровідності розчину у 1,5-4 рази порівняно з відомим способом. Розроблений спосіб може бути використаний для покращення метрологічних характеристик пристроїв задля визначення характеристик технологічних речовин і робочих середовищ в промисловості, а також для екологічних і медико-біологічних досліджень з застосуванням кондуктометричних біосенсорів.

Роботу виконано за рахунок бюджетної теми "Розширення функціональних можливостей та підвищення метрологічних характеристик засобів вимірювання в системах моніторингу і діагностування в електроенергетиці" (шифр – "ПАРАМЕТР-Д"), КПКВК 6541030.

1. Grossi M., Riccò B. Electrical impedance spectroscopy (EIS) for biological analysis and food characterization: a review. *J. Sens. Sens. Syst.* 2017. Vol. 6. Issue 2. Pp. 303–325. DOI: <https://doi.org/10.5194/jsss-6-303-2017>.
2. Kolahchi N., Braiek M., Ebrahimipoura G., Ranaei-Siadate S.O., Jaffrezic-Renaultb F.L.N. Direct detection of phenol using a new bacterial strain-based conductometric biosensor. *Journal of Environmental Chemical Engineering.* 2018. Vol. 6. Issue 1. Pp. 478–484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.023>.
3. Dzyadevych S.V., Arkhypova V.N., Korpan Y.I., Elskaya A.V., Soldatkin A.P., Jaffrezic-Renault N., Martelet C. Conductometric formaldehyde sensitive biosensor with specifically adapted analytical characteristics.

Biopolymers and cell. 2005. Vol. 21 (2). Pp. 91–106.

- Marrakchi M., Dzyadevych S.V., Lagarde F., Martelet C., Jaffrezic-Renault N.E. Conductometric biosensor based on glucose oxidase and beta-galactosidase for specific lactose determination in milk. *Materials Science and Engineering*. 2008. Vol. 28. Issue 5-6. Pp. 872–875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2007.10.046>.
- Дзядевич С.В., Солдаткін О.П. Наукові та технологічні засади створення мініатюрних електрохімічних біосенсорів. К.: Наукова думка, 2006. 256 с.
- Jaffrezic-Renault N., Dzyadevych S.V. Conductometric Microbiosensors for Environmental Monitoring. *Sensors (Basel)*. 2008. Vol. 8 (4). Pp. 2569–2588. DOI: <https://doi.org/10.3390/s8042569>.
- Melnyk V.G., Borshchov P.I., Vasylenko O.D., Brahynets I.O. Optimization of balancing in a bridge measuring circuit with a differential conductometric sensor. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 4. С. 78–88. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.078>.
- Мельник В.Г., Борщов П.І., Василенко О.Д., Ламеко О.Л., Дзядевич С.В. Зменшення впливу опорів переносу заряду у біосенсорних кондуктометричних вимірювальних перетворювачах. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 2. С. 74–82. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.074>
- Мельник В.Г., Борщов П.І., Василенко О.Д., Ламеко О.Л., Дзядевич С.В. Визначення параметрів фарадівського імпедансу для підвищення точності в кондуктометрії і отримання додаткових даних. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. 2022. Т. 19. № 3. С. 38–52.

THE ITERATIVE METHOD OF DETERMINING THE TRANSDUCER PARAMETERS OF THE DIFFERENTIAL CONDUCTOMETRIC SENSOR'S

P.I. Borshchov, V.G. Melnyk

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

56, Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: pavbor2010@gmail.com.

The proposed method is a development of the well-known one, based on the determination of the sensor's transducers impedance parameters according to the three-element equivalent circuit at two frequencies. The increase in accuracy is achieved due to the step-by-step refinement of parameter values using the values obtained in the previous step using simplified mathematical expressions. Mathematical expressions for calculating the specified parameters are presented. Comparative results of calculations based on known and proposed methods using a computer model are presented, which showed the possibility of significantly reducing the influence of changes in the background electrical conductivity of the solution compared to the known method. References 9, figures 2, tables 1.

Keywords: differential conductometric sensor, double layer capacity, charge transfer resistance, bridge measuring circuit, quasi-equilibrium, iterative calculation method.

- Grossi M., Riccò B. Electrical impedance spectroscopy (EIS) for biological analysis and food characterization: a review. *J. Sens. Sens. Syst.* 2017. Vol. 6. Issue 2. Pp. 303–325. DOI: <https://doi.org/10.5194/jsss-6-303-2017>.
- Kolahchi N., Braiek M., Ebrahimipoura G., Ranaei-Siadate S.O., Jaffrezic-Renault F.L.N. Direct detection of phenol using a new bacterial strain-based conductometric biosensor. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018. Vol. 6. Issue 1. Pp. 478–484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.023>.
- Dzyadevych S.V., Arkhypova V.N., Korpan Y.I., Elskaya A.V., Soldatkin A.P., Jaffrezic-Renault N., Martelet C. Conductometric formaldehyde sensitive biosensor with specifically adapted analytical characteristics. *Biopolymers and cell*. 2005. Vol. 21 (2). Pp. 91–106.
- Marrakchi M., Dzyadevych S.V., Lagarde F., Martelet C., Jaffrezic-Renault N.E. Conductometric biosensor based on glucose oxidase and beta-galactosidase for specific lactose determination in milk. *Materials Science and Engineering*. 2008. Vol. 28. Issue 5-6. Pp. 872–875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2007.10.046>.
- Dzyadevych S.V., Soldatkin O.P. Scientific and technological principles of creating miniature electrochemical biosensors. Kyiv: Naukova dumka, 2006. 256 p. (Ukr)
- Jaffrezic-Renault N., Dzyadevych S.V. Conductometric Microbiosensors for Environmental Monitoring. *Sensors (Basel)*. 2008. Vol. 8(4). Pp.2569–2588. DOI: <https://doi.org/10.3390/s8042569>.
- Melnyk V.G., Borshchov P.I., Vasylenko O.D., Brahynets I.O. Optimization of balancing in a bridge measuring circuit with a differential conductometric sensor. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2022. No 4. Pp. 78–88. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.078>.
- Melnyk V.G., Borshchov P.I., Vasylenko O.D., Lameko O.L., Dzyadevych S.V. Reducing the influence of charge transfer resistances in biosensor conductometric measuring transducers. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2023. No 2. Pp. 74–82. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.074> (Ukr).
- Melnyk V.G., Borshchov P.I., Vasylenko O.D., Lameko O.L., Dzyadevych S.V. Determination of Faraday impedance parameters to increase accuracy in conductometry and obtain additional data. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. 2022. Vol. 19. No 3. Pp. 38–52. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2022.3.265297>.

Надійшла 14.03.2024

Остаточний варіант 07.05.2024