

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОНТАКТНОГО ТА БЕЗКОНТАКТНОГО МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ

Метою дослідження є порівняльний аналіз контактного вимірювання електропровідності водних розчинів та імпедансного підходу, який розглядається як перший етап побудови безконтактного сенсора для визначення електропровідності. У роботі використано двоелектродний контактний датчик електропровідності з коефіцієнтом комірки $K = 0.993 \text{ см}^{-1}$.

Для одного й того самого зразка води міського походження проаналізовано довготривалий дрейф прямого контактного каналу та досліджено вплив значення опорного резистора на точність визначення модуля імпедансу електролітної комірки у схемі подільника напруги змінного струму з керованим вибором опорного елемента. Комутація опорних резисторів номіналами від 1 кОм до 220 кОм здійснювалася аналоговим мультиплексором CD4051 під керуванням мікроконтролера STM32G431, а вхідна та вихідна напруги оцифровувалися вбудованим аналого-цифровим перетворювачем.

Експериментально встановлено, що прямий контактний канал для незмінного зразка води демонструє відносний дрейф електропровідності близько 12.03 %, зумовлений поляризаційними процесами на межі електрод–електроліт, формуванням подвійного електричного шару та повільною динамікою приелектродного шару. Показано, що навіть спрощений одночастотний імпедансний тракт суттєво зменшує вплив повільних дрейфових процесів порівняно з прямим контактним каналом, а найменша похибка визначення модуля імпедансу, яка становить 0.21 %, досягається за умови узгодження опорного резистора з модулем досліджуваного імпедансу, що повністю відповідає теоретичному мінімуму коефіцієнта похибки.

На основі отриманих результатів обґрунтовано доцільність подальшого переходу до безконтактного вимірювання електропровідності через аналіз повної форми спектра електрохімічного імпедансу в широкому частотному діапазоні, що дозволить одержувати не лише інтегральний показник провідності, а й додаткові інформативні параметри, пов'язані з концентрацією та рухливістю іонів у розчині.

Ключові слова: електрохімічний імпеданс, електропровідність, безконтактний сенсор, електролітна комірка, опорний резистор, подільник напруги, дрейф, поляризація електродів, STM32G431, CD4051.

Вступ. Використання компактних контактних датчиків електропровідності є простим і доступним засобом оперативного контролю якості води. Разом з тим прямий контакт електродів з розчином робить результат чутливим до поляризаційних процесів, стану поверхні електродів, температури та паразитних ємнісних ефектів. Унаслідок цього навіть для незмінного зразка води вимірювальний канал може демонструвати повільний систематичний дрейф, який не пов'язаний зі зміною хімічного складу проби [1, 11, 13]. Для задач екологічного моніторингу водних ресурсів, де потрібно відстежувати невеликі зміни властивостей середовища у часі, така нестабільність є принциповим обмеженням, що робить актуальним пошук стабільніших вимірювальних підходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дрейф та варіабельність вихідного сигналу контактних датчиків електропровідності при повторних вимірюваннях зразків міської води детально проаналізовано у [1], де показано систематичний характер зсуву, не пов'язаного зі зміною складу проби. Перспективним шляхом подолання цієї проблеми є перехід від прямого вимірювання електропровідності до аналізу електрохімічного імпедансу. У безконтактних EIS-сенсорах інформаційним параметром стає не лише інтегральний омичний опір, а й форма частотної залежності активної та реактивної складових імпедансу, що відкриває можливість роздільного аналізу концентрації та рухливості іонів і зменшує вплив повільних дрейфових

процесів завдяки роботі на частотах, значно вищих за характерні частоти поляризаційного зсуву [2, 4-10]. Питання адаптивного вибору опорного опору в портативних імпедансних вимірювачах розглянуто у [3], а принципи, обмеження та сучасні тенденції ємнісно-зв'язаної безконтактної кондуктометрії узагальнено у [4-7].

Теоретико-методологічна база електрохімічної імпедансної спектроскопії сформована у працях, присвячених еквівалентним схемам, діаграмам Найквіста, елементу Варбурга, СРЕ-моделям, перевірці коректності спектрів та підходам до інверсії імпедансних даних [16-28]. Окремий напрям становить ємнісно-зв'язана безконтактна кондуктометрія, що розвивалася від перших реалізацій C4D у капілярному електрофорезі до сучасних оглядів інструментальних схем і застосувань [4-15]. Нормативні та метрологічні вимоги до визначення електропровідності води, а також контекст онлайн-моніторингу якості води розглядаються у стандартах і оглядових роботах [29-41]. Для побудови мініатюрних сенсорів важливими є також результати з імпедансних сенсорних і біосенсорних систем, апаратної реалізації АЦП, мультиплексування та вибору вимірювальної архітектури [42-50].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на наявні результати, залишається недостатньо дослідженим питання кількісного порівняння стабільності прямого контактного каналу та імпедансного тракту для однієї й тієї самої електролітної комірки, а також експериментального обґрунтування вимог до вибору опорного елемента вимірювального тракту як етапу побудови безконтактного EIS-сенсора.

Мета статті. Метою роботи є порівняльний аналіз поведінки прямого контактного каналу вимірювання електропровідності та імпедансного вимірювання для тієї самої електролітної комірки у схемі змінного струму. Такий підхід дає змогу не лише показати обмеження контактного методу, а й експериментально обґрунтувати вимоги до вибору опорного елемента у майбутньому безконтактному сенсорі [3].

Виклад основного матеріалу

Теоретичні передумови дослідження. У прямому контактному каналі електропровідність розчину визначається через омичний опір комірки. Для двоелектродного датчика з коефіцієнтом комірки K_{cell} справедливий вираз:

$$\sigma = \frac{K_{cell}}{R} \quad (1)$$

У цьому випадку будь-яка повільна зміна опору електродного інтерфейсу безпосередньо переходить у похибку визначення електропровідності. Для кількісної оцінки довготривалого дрейфу зручно використовувати відносне відхилення:

$$\delta_{\sigma} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\sigma_{min}} \cdot 100 \% \quad (2)$$

Для імпедансного вимірювання електролітна комірка включається до схеми подільника напруги змінного струму. На комірку з модулем імпедансу $|Z_x|$ та опорний резистор R_{ref} подається гармонічний сигнал амплітуди V_{in} , а на комірці формується вихідна напруга V_{out} . Для модуля імпедансу маємо:

$$V_{out} = V_{in} \frac{|Z_x|}{R_{ref} + |Z_x|} \quad (3)$$

$$|Z_x| = R_{ref} \frac{V_{out}}{V_{in} - V_{out}} \quad (4)$$

У більш загальному вигляді, якщо перейти до амплітудного коефіцієнта передачі та комплексного імпедансу, отримуємо співвідношення:

$$K(\omega) = \frac{V_{out}(\omega)}{V_{in}(\omega)} \quad (5)$$

$$Z(\omega) = \frac{K(\omega)R}{1 - K(\omega)} \quad (6)$$

З аналізу похибки такого методу випливає, що її величина визначається коефіцієнтом:

$$s(\omega) = 2 + \frac{R}{|Z(\omega)|} + \frac{|Z(\omega)|}{R} \quad (7)$$

Мінімум цього коефіцієнта реалізується за умови:

$$R_{ref} \approx |Z_x| \quad (8)$$

Саме ця умова була покладена в основу експериментального підбору опорного резистора у цій роботі.

Для майбутнього безконтактного EIS-сенсора електролітний об'єм описується еквівалентною схемою, у якій активний опір розчину R_s , зарядопереносний опір R_{ct} , ємність подвійного шару C_{dl} та дифузійна складова Warburg формують частотну залежність імпедансу [8-10, 12]:

$$Z_{cell}(\omega) = R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_{ct}} + j\omega C_{dl}} + Z_W(\omega) \quad (9)$$

Для ділянки Нернста характерна частота:

$$\omega_N = \frac{1}{R_{ct} C_{dl}} \quad (10)$$

а дифузійна частина у першому наближенні описується імпедансом Варбурга:

$$Z_W(\omega) = \sigma_W \frac{1-j}{\sqrt{\omega}} \quad (11)$$

Узагальнена діаграма Найквіста, наведена на рисунку 1, демонструє, що форма годографа містить окремі ділянки, чутливі до концентрації та рухливості іонів. Саме ця властивість і робить безконтактний імпедансний підхід принципово інформативнішим за інтегральне пряме вимірювання електропровідності [2, 4-10].

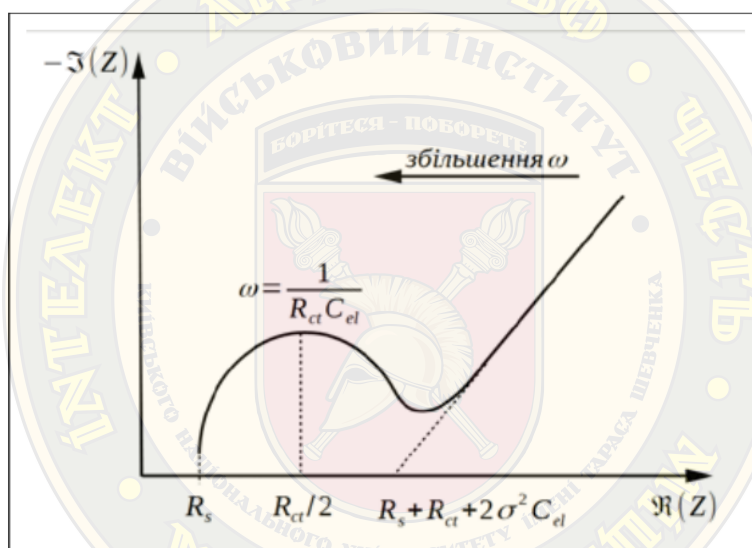


Рисунок 1 – Узагальнена діаграма Найквіста електрохімічної комірки як теоретична основа імпедансного підходу

Методика експериментальних досліджень. Експериментальна установка включала двоелектродний контактний датчик електропровідності з коефіцієнтом комірки $K = 0.993 \text{ см}^{-1}$. У прямому каналі датчик працював на частоті збудження близько 1 кГц. Аналоговий сигнал реєструвався та перераховувався у температурно компенсовані значення електропровідності для однієї й тієї самої проби води міського походження.

Для аналізу імпедансного підходу ту саму електролітну комірку було включено до схеми подільника напруги на базі STM32G431. Вхідна напруга становила 3.3 В, а частота збудження також підтримувалася поблизу 1 кГц, що дозволило порівнювати результати в однаковому частотному діапазоні. Вхідна та вихідна напруги оцифровувалися вбудованим АЦП мікроконтролера.

Для зміни значення опорного елемента використовувався аналоговий мультиплексор CD4051, до входів якого були підключені резистори 1 кОм, 4.7 кОм, 10 кОм, 47 кОм, 100 кОм та 220 кОм. Така схема дозволяла швидко комутувати R_{ref} і дослідити вплив співвідношення між R_{ref} та $|Z_x|$ на точність вимірювання. Для кожного значення опорного резистора фіксувалися V_{in} , V_{out} , розраховане значення $|Z_x|$ та відносна похибка.

Результати експериментальних досліджень та їх практичне значення. У прямому контактному каналі для незмінного зразка води було виконано 50 послідовних вимірювань. Вихідна напруга зросла від 1.68 В до 1.77 В, а температурно компенсована електропровідність – від 1.58 до 1.77 мС/см. Це відповідає відносному дрейфу електропровідності приблизно 12.03 %, що прямо вказує на систематичний зсув, пов'язаний з поляризацією електродів та повільною динамікою приелектродного шару (рис. 2).

шару в часі (рис. 1).

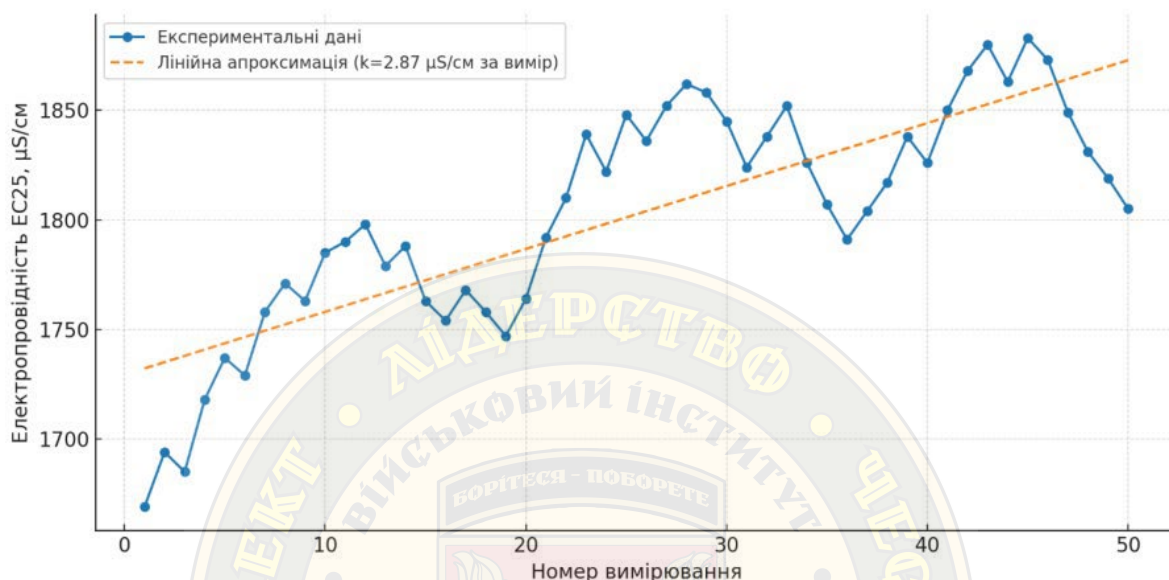


Рисунок 2 – Експериментальна динаміка вихідного сигналу контактного сенсора електропровідності для одного й того самого зразка води

Для того самого сенсора далі було досліджено імпедансний вимірювальний тракт при різних значеннях опорного резистора. Результати експерименту наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати визначення модуля імпедансу електролітної комірки при різних значеннях опорного резистора

№	Опорний резистор, Ом	Вхідна напруга, В	Напруга на комірці, В	$ Z_x $, Ом	Похибка, %
1	1 000	3.30	2.73	4650	1.06
2	4 700	3.30	1.65	4710	0.21
3	10 000	3.30	1.06	4760	1.27
4	47 000	3.30	0.31	5050	7.45
5	100 000	3.30	0.16	5200	10.64
6	220 000	3.30	0.07	5480	16.60

Для наведених у таблиці значень коефіцієнт узгодження $L = R_{ref} / |Z_x|$ дорівнює 0.215, 0.998, 2.101, 9.307, 19.231 та 40.146 відповідно, а коефіцієнт похибки $s(\omega)$ – 6.865, 4.000, 4.577, 11.414, 21.283 та 42.171. Таким чином, експериментальні дані прямо підтверджують теоретичний мінімум похибки поблизу умови $R_{ref} \approx |Z_x|$ (рис. 3, рис. 4).

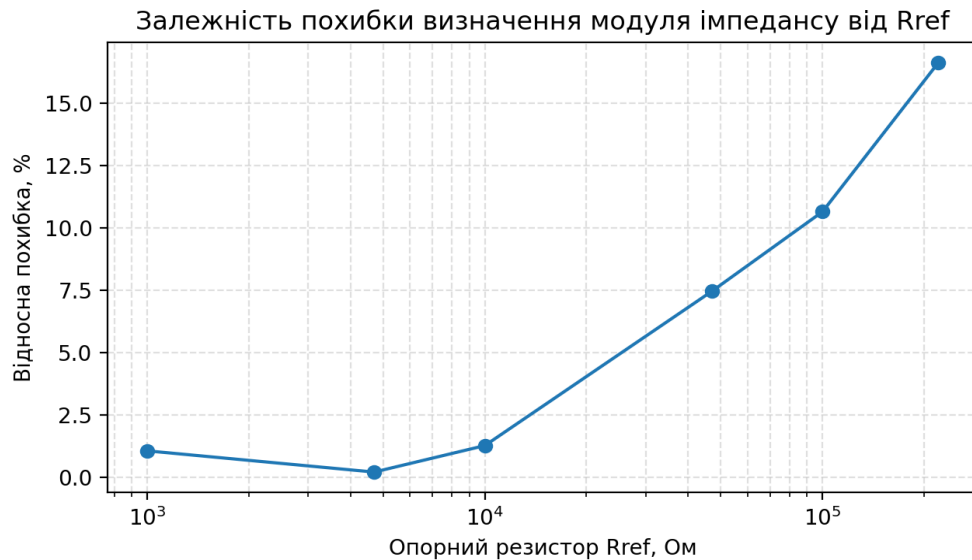


Рисунок 3 – Залежність відносної похибки визначення модуля імпедансу від значення опорного резистора



Рисунок 4 – Теоретична залежність коефіцієнта похибки $s(\omega)$ від значення опорного резистора для $|Z_x| \approx 4.7$ кОм

Наведені результати показують, що прямий контактний канал навіть за сталої температури та незмінного складу проби демонструє помітний дрейф. Його джерелом є не вимірюваний показник як такий, а перебудова електродного інтерфейсу, формування подвійного шару та повільні процеси релаксації заряду. Саме тому контактне вимірювання інтегральної електропровідності виявляється недостатньо стабільним для задач, де потрібно відслідковувати невеликі зміни властивостей середовища у часі.

Імпедансний тракт працює за іншою логікою: замість безпосереднього використання абсолютного вихідного рівня реєструється відношення V_{out}/V_{in} у схемі змінного струму. Це дозволяє істотно зменшити вплив повільних зсувів і перенести акцент з інтегрального омичного опору на частотну поведінку електролітної комірки. Уже в одночастотному режимі при правильно підбраному R_{ref} вдалося отримати похибку лише 0.21 %, що більш ніж у п'ятдесят разів менше за зафіксований відносний дрейф електропровідності у прямому контактному каналі (рис. 5).



Рисунок 5 – Порівняння характерного відхилення для прямого контактного каналу та найкращого режиму імпедансного тракту

Таблиця 1, рис. 3 і рис. 4 показують, що мінімум похибки реалізується при $R_{ref} = 4.7$ кОм, тобто у випадку, коли опорний резистор за порядком величини збігається з модулем досліджуваного імпедансу. Це повністю узгоджується з теоретичним мінімумом коефіцієнта $s(\omega)$. При переході до $R_{ref} = 47$ кОм, 100 кОм та 220 кОм похибка швидко зростає, оскільки напруга на комірці стає занадто малою, а внесок шуму, квантової похибки АЦП та паразитних параметрів схеми збільшується.

Разом з тим поточна реалізація ще не є безконтактним сенсором у повному розумінні. По-перше, у цій роботі визначався лише модуль імпедансу, тоді як фазова складова не реєструвалася. По-друге, сама електролітна комірка залишалася контактною, тому електродна поляризація повністю не усувалася, а лише ставала менш впливовою для результату. По-третє, використання CD4051 додає власний опір відкритого каналу та паразитні ємності, що особливо помітно при малих опорах і може вносити систематичну похибку.

Отже, проведений експеримент слід розглядати як важливий інженерний етап на шляху до безконтактного вимірювання провідності через імпеданс. Він показує, що вибір опорного елемента не є другорядним конструктивним параметром, а безпосередньо визначає точність вимірювального тракту. У майбутньому перехід від контактної комірки до безконтактного EIS-сенсора дозволить поєднати переваги стабільнішого імпедансного методу з аналізом форми спектра, тобто одержувати не лише інтегральний показник провідності, а й додаткові інформативні параметри, пов'язані з концентрацією та рухливістю іонів.

Висновки. Експериментально встановлено, що прямий контактний канал вимірювання електропровідності для сталого зразка води демонструє відносний дрейф близько 12.03 %, що зумовлено поляризаційними процесами на межі електрод–електроліт.

Показано, що при переході до імпедансного тракту на основі подільника напруги та вимірювання відношення V_{out}/V_{in} точність визначення модуля імпедансу суттєво залежить від вибору опорного резистора.

Мінімальна похибка 0.21 % досягається при $R_{ref} = 4.7$ кОм, тобто за умови узгодження опорного резистора з модулем досліджуваного імпедансу. Це узгоджується з теоретичним мінімумом коефіцієнта похибки $s(\omega)$.

Навіть у спрощеній одночастотній реалізації імпедансний підхід є значно стійкішим до повільних дрейфових зсувів, ніж пряме контактне вимірювання електропровідності.

Отримані результати обґрунтовують подальший перехід до безконтактного сенсора електропровідності на основі методу електрохімічного імпедансу, у якому будуть використані не лише значення модуля, а й повна форма спектра у широкому частотному діапазоні.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Каберник В.О., Ольшевський С.В. Аналіз дрейфу та варіабельності вихідного сигналу контактних датчиків електропровідності при повторних вимірюваннях зразків міської води. *Proceedings of the Conference on Electronic Measurement and Instrumentation*. Kyiv, Ukraine. 2025. с. 45-49.
2. Ольшевський С.В., Бех І.І., Каберник В.О. Вдосконалення систем екологічного моніторингу водних ресурсів шляхом застосування безконтактних сенсорів електрохімічного імпедансу. *Екологічні науки*. 2024. № 2(53). с. 39-49.
3. Wang X., Zhao H., Wang A., Dong Z., Fan Y., Zhai Z. A Portable Impedance Spectroscopy Measurement Method Through Adaptive Reference Resistance. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. p. 88011-88018. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3077308.
4. Tůma A., Kubáň P. Capacitively coupled contactless conductivity detection: Principles, limitations and recent trends. *Analytical Methods*. 2012. Vol. 4. No. 1. p. 25-33. DOI: 10.1039/C1AY05424A.
5. Kubáň P., Hauser P.C. A review of the recent achievements in capacitively coupled contactless conductivity detection. *Analytica Chimica Acta*. 2008. Vol. 607. No. 1. P. 15-29. DOI: 10.1016/j.aca.2007.11.045.
6. Kubáň P., Hauser P.C. Ten years of axial capacitively coupled contactless conductivity detection for CZE - a review. *Electrophoresis*. 2009. Vol. 30. No. 1. p. 176-188. DOI: 10.1002/elps.200800478.
7. Kubáň P., Hauser P.C. Capacitively coupled contactless conductivity detection for microseparation techniques - recent developments. *Electrophoresis*. 2011. Vol. 32. No. 1. p. 30-42. DOI: 10.1002/elps.201000354.
8. Kubáň P., Hauser P.C. Contactless conductivity detection for analytical techniques - developments from 2014 to 2016. *Electrophoresis*. 2017. Vol. 38. No. 1. p. 95-114. DOI: 10.1002/elps.201600280.
9. Kubáň P., Hauser P.C. Contactless conductivity detection for analytical techniques: Developments from 2016 to 2018. *Electrophoresis*. 2019. Vol. 40. No. 1. p. 124-139. DOI: 10.1002/elps.201800248.
10. Hauser P.C., Kubáň P. Capacitively coupled contactless conductivity detection for analytical techniques - Developments from 2018 to 2020. *Journal of Chromatography A*. 2020. Vol. 1632. Article 461616. DOI: 10.1016/j.chroma.2020.461616.
11. Hauser P.C., Kubáň P. Contactless conductivity detection for capillary electrophoresis - developments from 2020 to 2024. *Electrophoresis*. 2025. DOI: 10.1002/elps.202400217.
12. Zemmann A.J., Schnell E., Volgger D., Bonn G.K. Contactless conductivity detection for capillary electrophoresis. *Analytical Chemistry*. 1998. Vol. 70. No. 3. p. 563-567. DOI: 10.1021/ac9707592.
13. Fracassi da Silva J.A., do Lago C.L. An oscillometric detector for capillary electrophoresis. *Analytical Chemistry*. 1998. Vol. 70. No. 20. p. 4339-4343. DOI: 10.1021/ac980185g.
14. Brito-Neto J.G.A., Fracassi da Silva J.A., Blanes L., do Lago C.L. Understanding capacitively coupled contactless conductivity detection in capillary and microchip electrophoresis. Part 1. Fundamentals. *Electroanalysis*. 2005. Vol. 17. No. 13. p. 1198-1206. DOI: 10.1002/elan.200503237.
15. Brito-Neto J.G.A., Fracassi da Silva J.A., Blanes L., do Lago C.L. Understanding capacitively coupled contactless conductivity detection in capillary and microchip electrophoresis. Part 2. Peak shape, stray capacitance, noise, and actual electronics. *Electroanalysis*. 2005. Vol. 17. No. 13. P. 1207-1214. DOI: 10.1002/elan.200503238.
16. Barsoukov E., Macdonald J.R. (eds.). *Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications*. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2018. 560 p. DOI: 10.1002/9781119381860.
17. Orazem M.E., Tribollet B. *Electrochemical Impedance Spectroscopy*. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2017. 768 p. DOI: 10.1002/9781119363682.
18. Lasia A. *Electrochemical Impedance Spectroscopy and its Applications*. New York: Springer, 2014. 367 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-8933-7.
19. Bard A.J., Faulkner L.R., White H.S. *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2022. 1104 p. ISBN: 978-1-119-33406-4. URL: <https://books.wiley.com/titles/9781119334064/>
20. Zoski C.G. (ed.). *Handbook of Electrochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 2007. 935 p. DOI: 10.1016/B978-0-444-51958-0.X5000-9.
21. Newman J., Thomas-Alyea K.E. *Electrochemical Systems*. 3rd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2004. 672 p. ISBN: 978-0-471-47756-3. URL: https://books.google.com/books/about/Electrochemical_Systems.html?id=vArZu0HM-xYC
22. Randles J.E.B. Kinetics of rapid electrode reactions. *Discussions of the Faraday Society*. 1947. Vol. 1. P. 11-19. DOI: 10.1039/DF9470100011.

23. Brug G.J., van den Eeden A.L.G., Sluyters-Rehbach M., Sluyters J.H. The analysis of electrode impedances complicated by the presence of a constant phase element. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*. 1984. Vol. 176. No. 1-2. p. 275-295. DOI: 10.1016/S0022-0728(84)80324-1.
24. Hsu C.H., Mansfeld F. Technical note: Concerning the conversion of the constant phase element parameter Y_0 into a capacitance. *Corrosion*. 2001. Vol. 57. No. 9. P. 747-748. DOI: 10.5006/1.3280607.
25. Boukamp B.A. A package for impedance/admittance data analysis. *Solid State Ionics*. 1986. Vol. 18-19. Part 1. p. 136-140. DOI: 10.1016/0167-2738(86)90100-1.
26. Ciucci F., Chen C. Analysis of electrochemical impedance spectroscopy data using the distribution of relaxation times: A Bayesian and hierarchical Bayesian approach. *Electrochimica Acta*. 2015. Vol. 167. p. 439-454. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.03.123.
27. Effendy S., Song J., Bazant M.Z. Analysis, design, and generalization of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) inversion algorithms. *Journal of The Electrochemical Society*. 2020. Vol. 167. No. 10. Article 106508. DOI: 10.1149/1945-7111/ab9c82.
28. Halleman N., Howey D., Battistel A., Saniee N.F., Scarpioni F., Wouters B., La Mantia F., Hubin A., Widanage W.D., Lataire J. Electrochemical impedance spectroscopy beyond linearity and stationarity - a critical review. *Electrochimica Acta*. 2023. Vol. 466. Article 142939. DOI: 10.1016/j.electacta.2023.142939.
29. ASTM D1125-23. Standard Test Methods for Electrical Conductivity and Resistivity of Water. West Conshohocken: ASTM International, 2023. 8 p. DOI: 10.1520/D1125-23.
30. ISO 7888:1985. Water quality - Determination of electrical conductivity. Geneva: International Organization for Standardization, 1985. 6 p.
31. APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Method 2510B: Conductivity - Laboratory Method. Standard Methods Online. URL: https://www.nemi.gov/methods/method_summary/5702/
32. U.S. Environmental Protection Agency. Method 120.1: Conductance (Specific Conductance, μmhos at 25°C). Approved for NPDES, Editorial Revision 1982. URL: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P101AVQP.txt>
33. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda. Geneva: World Health Organization, 2022. 614 p. ISBN: 978-92-4-004506-4.
34. Storey M.V., van der Gaag B., Burns B.P. Advances in on-line drinking water quality monitoring and early warning systems. *Water Research*. 2011. Vol. 45. No. 2. p. 741-747. DOI: 10.1016/j.watres.2010.08.049.
35. Banna M.H., Imran S., Francisque A., Najjaran H., Sadiq R., Rodriguez M., Hoorfar M. Online drinking water quality monitoring: Review on available and emerging technologies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2014. Vol. 44. No. 12. p. 1370-1421. DOI: 10.1080/10643389.2013.781936.
36. Lambrou T.P., Anastasiou C.C., Panayiotou C.G., Polycarpou M.M. A low-cost sensor network for real-time monitoring and contamination detection in drinking water distribution systems. *IEEE Sensors Journal*. 2014. Vol. 14. No. 8. p. 2765-2772. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2316414.
37. Banna M.H., Najjaran H., Sadiq R., Imran S.A., Rodriguez M., Hoorfar M. Miniaturized water quality monitoring pH and conductivity sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2014. Vol. 193. p. 434-441. DOI: 10.1016/j.snb.2013.12.002.
38. Zhou B., Bian C., Tong J., Xia S. Fabrication of a miniature multi-parameter sensor chip for water quality assessment. *Sensors*. 2017. Vol. 17. No. 1. Article 157. DOI: 10.3390/s17010157.
39. Geetha S., Gouthami S. Internet of things enabled real time water quality monitoring system. *Smart Water*. 2017. Vol. 2. Article 1. DOI: 10.1186/s40713-017-0005-y.
40. Pasika S., Gandla S.T. Smart water quality monitoring system with cost-effective using IoT. *Heliyon*. 2020. Vol. 6. No. 7. Article e04096. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04096.
41. Droujko J., Molnar P. Open-source, low-cost, in-situ turbidity sensor for river network monitoring. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Article 10341. DOI: 10.1038/s41598-022-14228-4.
42. Grossi M., Riccò B. Electrical impedance spectroscopy (EIS) for biological analysis and food characterization: a review. *Journal of Sensors and Sensor Systems*. 2017. Vol. 6. p. 303-325. DOI: 10.5194/jsss-6-303-2017.
43. Lisdat F., Schäfer D. The use of electrochemical impedance spectroscopy for biosensing. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2008. Vol. 391. No. 5. P. 1555-1567. DOI: 10.1007/s00216-008-1970-7.
44. Daniels J.S., Pourmand N. Label-free impedance biosensors: Opportunities and challenges. *Electroanalysis*. 2007. Vol. 19. No. 12. p. 1239-1257. DOI: 10.1002/elan.200603855.

45. Yang L., Bashir R. Electrical/electrochemical impedance for rapid detection of foodborne pathogenic bacteria. *Biotechnology Advances*. 2008. Vol. 26. No. 2. p. 135-150. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2007.10.003.
46. Patil R.S., Juvekar V.A., Nalage U. An electrochemical technique for measurements of electrical conductivity of aqueous electrolytes. *arXiv preprint*. 2017. arXiv:1712.07382.
47. STMicroelectronics. STM32G431C6 product page: Mainstream Arm Cortex-M4 MCU 170 MHz with 32 Kbytes Flash memory and medium analog integration. Geneva: STMicroelectronics. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32g431c6.html>
48. Texas Instruments. CD405xB CMOS Single 8-Channel Analog Multiplexer or Demultiplexer With Logic-Level Conversion: Datasheet SCHS047O Rev. O. Dallas: Texas Instruments, 2026. 48 p.
49. Kester W. (ed.). *The Data Conversion Handbook*. Burlington: Newnes, 2005. 953 p. DOI: 10.1016/B978-0-7506-7841-4.X5000-3.
50. Kester W. *ADC Architectures III: Sigma-Delta ADC Basics*. Tutorial MT-022. Norwood: Analog Devices, 2008. 12 p.

REFERENCES:

1. Kabernyk, V.O. and Olshevskiy, S.V. (2025), "Analiz dreifu ta variabelnosti vykhidnoho syhnalu kontaktnykh datchykyv elektroprovodnosti pry povtornykh vymyriuvanniakh zrazkiv miskoï vody" [Analysis of drift and variability of the output signal of contact conductivity sensors during repeated measurements of urban water samples], *Proceedings of the Conference on Electronic Measurement and Instrumentation*, Kyiv, Ukraine, pp. 45-49.
2. Olshevskiy, S.V., Bekh, I.I. and Kabernyk, V.O. (2024), "Vdoskonalennia system ekolohichnoho monitorynhu vodnykh resursiv shliakhom zastosuvannia bezkontaktnykh sensoriv elektrokhimichnoho impedansu" [Improvement of water resources ecological monitoring systems through the use of contactless electrochemical impedance sensors], *Ekolohichni nauky*, No. 2(53), pp. 39-49.
3. Wang, X., Zhao, H., Wang, A., Dong, Z., Fan, Y. and Zhai, Z. (2021), "A Portable Impedance Spectroscopy Measurement Method Through Adaptive Reference Resistance", *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 88011-88018. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3077308.
4. Tůma, A. and Kubáň, P. (2012), "Capacitively coupled contactless conductivity detection: Principles, limitations and recent trends", *Analytical Methods*, Vol. 4, No. 1, pp. 25-33. DOI: 10.1039/C1AY05424A.
5. Kubáň, P. and Hauser, P.C. (2008), "A review of the recent achievements in capacitively coupled contactless conductivity detection", *Analytica Chimica Acta*, Vol. 607, No. 1, pp. 15-29. DOI: 10.1016/j.aca.2007.11.045.
6. Kubáň, P. and Hauser, P.C. (2009), "Ten years of axial capacitively coupled contactless conductivity detection for CZE - a review", *Electrophoresis*, Vol. 30, No. 1, pp. 176-188. DOI: 10.1002/elps.200800478.
7. Kubáň, P. and Hauser, P.C. (2011), "Capacitively coupled contactless conductivity detection for microseparation techniques - recent developments", *Electrophoresis*, Vol. 32, No. 1, pp. 30-42. DOI: 10.1002/elps.201000354.
8. Kubáň, P. and Hauser, P.C. (2017), "Contactless conductivity detection for analytical techniques - developments from 2014 to 2016", *Electrophoresis*, Vol. 38, No. 1, pp. 95-114. DOI: 10.1002/elps.201600280.
9. Kubáň, P. and Hauser, P.C. (2019), "Contactless conductivity detection for analytical techniques: Developments from 2016 to 2018", *Electrophoresis*, Vol. 40, No. 1, pp. 124-139. DOI: 10.1002/elps.201800248.
10. Hauser, P.C. and Kubáň, P. (2020), "Capacitively coupled contactless conductivity detection for analytical techniques - Developments from 2018 to 2020", *Journal of Chromatography A*, Vol. 1632, Article 461616. DOI: 10.1016/j.chroma.2020.461616.
11. Hauser, P.C. and Kubáň, P. (2025), "Contactless conductivity detection for capillary electrophoresis - developments from 2020 to 2024", *Electrophoresis*. DOI: 10.1002/elps.202400217.
12. Zemmann, A.J., Schnell, E., Volgger, D. and Bonn, G.K. (1998), "Contactless conductivity detection for capillary electrophoresis", *Analytical Chemistry*, Vol. 70, No. 3, pp. 563-567. DOI: 10.1021/ac9707592.
13. Fracassi da Silva, J.A. and do Lago, C.L. (1998), "An oscillometric detector for capillary electrophoresis", *Analytical Chemistry*, Vol. 70, No. 20, pp. 4339-4343. DOI: 10.1021/ac980185g.
14. Brito-Neto, J.G.A., Fracassi da Silva, J.A., Blanes, L. and do Lago, C.L. (2005), "Understanding capacitively coupled contactless conductivity detection in capillary and microchip electrophoresis. Part 1. Fundamentals", *Electroanalysis*, Vol. 17, No. 13, pp. 1198-1206. DOI: 10.1002/elan.200503237.

15. Brito-Neto, J.G.A., Fracassi da Silva, J.A., Blanes, L. and do Lago, C.L. (2005), "Understanding capacitively coupled contactless conductivity detection in capillary and microchip electrophoresis. Part 2. Peak shape, stray capacitance, noise, and actual electronics", *Electroanalysis*, Vol. 17, No. 13, pp. 1207-1214. DOI: 10.1002/elan.200503238.
16. Barsoukov, E. and Macdonald, J.R. (eds.) (2018), *Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications*, 3rd ed., Wiley, Hoboken, 560 p. DOI: 10.1002/9781119381860.
17. Orazem, M.E. and Tribollet, B. (2017), *Electrochemical Impedance Spectroscopy*, 2nd ed., Wiley, Hoboken, 768 p. DOI: 10.1002/9781119363682.
18. Lasia, A. (2014), *Electrochemical Impedance Spectroscopy and its Applications*, Springer, New York, 367 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-8933-7.
19. Bard, A.J., Faulkner, L.R. and White, H.S. (2022), *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 3rd ed., Wiley, Hoboken, 1104 p. ISBN: 978-1-119-33406-4. Available at: <https://books.wiley.com/titles/9781119334064/>
20. Zoski, C.G. (ed.) (2007), *Handbook of Electrochemistry*, Elsevier, Amsterdam, 935 p. DOI: 10.1016/B978-0-444-51958-0.X5000-9.
21. Newman, J. and Thomas-Alyea, K.E. (2004), *Electrochemical Systems*, 3rd ed., Wiley-Interscience, Hoboken, 672 p. ISBN: 978-0-471-47756-3. Available at: https://books.google.com/books/about/Electrochemical_Systems.html?id=vArZu0HM-xYC
22. Randles, J.E.B. (1947), "Kinetics of rapid electrode reactions", *Discussions of the Faraday Society*, Vol. 1, pp. 11-19. DOI: 10.1039/DF9470100011.
23. Brug, G.J., van den Eeden, A.L.G., Sluyters-Rehbach, M. and Sluyters, J.H. (1984), "The analysis of electrode impedances complicated by the presence of a constant phase element", *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, Vol. 176, No. 1-2, pp. 275-295. DOI: 10.1016/S0022-0728(84)80324-1.
24. Hsu, C.H. and Mansfeld, F. (2001), "Technical note: Concerning the conversion of the constant phase element parameter Y_0 into a capacitance", *Corrosion*, Vol. 57, No. 9, pp. 747-748. DOI: 10.5006/1.3280607.
25. Boukamp, B.A. (1986), "A package for impedance/admittance data analysis", *Solid State Ionics*, Vol. 18-19, Part 1, pp. 136-140. DOI: 10.1016/0167-2738(86)90100-1.
26. Ciucci, F. and Chen, C. (2015), "Analysis of electrochemical impedance spectroscopy data using the distribution of relaxation times: A Bayesian and hierarchical Bayesian approach", *Electrochimica Acta*, Vol. 167, pp. 439-454. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.03.123.
27. Effendy, S., Song, J. and Bazant, M.Z. (2020), "Analysis, design, and generalization of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) inversion algorithms", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 167, No. 10, Article 106508. DOI: 10.1149/1945-7111/ab9c82.
28. Halleman, N., Howey, D., Battistel, A., Saniee, N.F., Scarpioni, F., Wouters, B., La Mantia, F., Hubin, A., Widanage, W.D. and Lataire, J. (2023), "Electrochemical impedance spectroscopy beyond linearity and stationarity - a critical review", *Electrochimica Acta*, Vol. 466, Article 142939. DOI: 10.1016/j.electacta.2023.142939.
29. ASTM D1125-23 (2023), *Standard Test Methods for Electrical Conductivity and Resistivity of Water*, ASTM International, West Conshohocken, 8 p. DOI: 10.1520/D1125-23.
30. ISO 7888:1985 (1985), *Water quality - Determination of electrical conductivity*, International Organization for Standardization, Geneva, 6 p.
31. APHA, AWWA and WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Method 2510B: Conductivity - Laboratory Method, *Standard Methods Online*. Available at: https://www.nemi.gov/methods/method_summary/5702/
32. U.S. Environmental Protection Agency (1982), *Method 120.1: Conductance (Specific Conductance, μmhos at 25 °C)*, Approved for NPDES, Editorial Revision 1982. Available at: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=P101AVQP.txt>
33. World Health Organization (2022), *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda*, World Health Organization, Geneva, 614 p. ISBN: 978-92-4-004506-4.
34. Storey, M.V., van der Gaag, B. and Burns, B.P. (2011), "Advances in on-line drinking water quality monitoring and early warning systems", *Water Research*, Vol. 45, No. 2, pp. 741-747. DOI: 10.1016/j.watres.2010.08.049.

35. Banna, M.H., Imran, S., Francisque, A., Najjaran, H., Sadiq, R., Rodriguez, M. and Hoorfar, M. (2014), "Online drinking water quality monitoring: Review on available and emerging technologies", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 44, No. 12, pp. 1370-1421. DOI: 10.1080/10643389.2013.781936.
36. Lambrou, T.P., Anastasiou, C.C., Panayiotou, C.G. and Polycarpou, M.M. (2014), "A low-cost sensor network for real-time monitoring and contamination detection in drinking water distribution systems", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 14, No. 8, pp. 2765-2772. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2316414.
37. Banna, M.H., Najjaran, H., Sadiq, R., Imran, S.A., Rodriguez, M. and Hoorfar, M. (2014), "Miniaturized water quality monitoring pH and conductivity sensors", *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 193, pp. 434-441. DOI: 10.1016/j.snb.2013.12.002.
38. Zhou, B., Bian, C., Tong, J. and Xia, S. (2017), "Fabrication of a miniature multi-parameter sensor chip for water quality assessment", *Sensors*, Vol. 17, No. 1, Article 157. DOI: 10.3390/s17010157.
39. Geetha, S. and Gouthami, S. (2017), "Internet of things enabled real time water quality monitoring system", *Smart Water*, Vol. 2, Article 1. DOI: 10.1186/s40713-017-0005-y.
40. Pasika, S. and Gandla, S.T. (2020), "Smart water quality monitoring system with cost-effective using IoT", *Heliyon*, Vol. 6, No. 7, Article e04096. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04096.
41. Droujko, J. and Molnar, P. (2022), "Open-source, low-cost, in-situ turbidity sensor for river network monitoring", *Scientific Reports*, Vol. 12, Article 10341. DOI: 10.1038/s41598-022-14228-4.
42. Grossi, M. and Riccò, B. (2017), "Electrical impedance spectroscopy (EIS) for biological analysis and food characterization: a review", *Journal of Sensors and Sensor Systems*, Vol. 6, pp. 303-325. DOI: 10.5194/jsss-6-303-2017.
43. Lisdat, F. and Schäfer, D. (2008), "The use of electrochemical impedance spectroscopy for biosensing", *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, Vol. 391, No. 5, pp. 1555-1567. DOI: 10.1007/s00216-008-1970-7.
44. Daniels, J.S. and Pourmand, N. (2007), "Label-free impedance biosensors: Opportunities and challenges", *Electroanalysis*, Vol. 19, No. 12, pp. 1239-1257. DOI: 10.1002/elan.200603855.
45. Yang, L. and Bashir, R. (2008), "Electrical/electrochemical impedance for rapid detection of foodborne pathogenic bacteria", *Biotechnology Advances*, Vol. 26, No. 2, pp. 135-150. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2007.10.003.
46. Patil, R.S., Juvekar, V.A. and Nalage, U. (2017), "An electrochemical technique for measurements of electrical conductivity of aqueous electrolytes", *arXiv preprint*, arXiv:1712.07382.
47. STMicroelectronics, STM32G431C6 product page: Mainstream Arm Cortex-M4 MCU 170 MHz with 32 Kbytes Flash memory and medium analog integration, STMicroelectronics, Geneva. Available at: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32g431c6.html>
48. Texas Instruments (2026), CD405xB CMOS Single 8-Channel Analog Multiplexer or Demultiplexer With Logic-Level Conversion: Datasheet SCHS047O Rev. O, Texas Instruments, Dallas, 48 p.
49. Kester, W. (ed.) (2005), *The Data Conversion Handbook*, Newnes, Burlington, 953 p. DOI: 10.1016/B978-0-7506-7841-4.X5000-3.
50. Kester, W. (2008), *ADC Architectures III: Sigma-Delta ADC Basics*, Tutorial MT-022, Analog Devices, Norwood, 12 p.

Kabernyk V., D.Sc. Olszewski S.

COMPARATIVE ANALYSIS OF CONTACT AND CONTACTLESS METHODS FOR DETERMINING THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF AQUEOUS SOLUTIONS

The purpose of this study is a comparative analysis of the direct contact measurement of the electrical conductivity of aqueous solutions and the impedance-based approach, which is considered as the first stage in the development of a contactless sensor for determining the conductivity of aqueous solutions. A two-electrode contact conductivity sensor with a cell constant $K = 0.993 \text{ cm}^{-1}$ was used in this work. For the same sample of municipal water, the long-term drift of the direct contact channel was analyzed, and the influence of the reference resistor value on the accuracy of determining the impedance modulus of the electrolytic cell in an AC voltage divider circuit with controlled selection of the reference element was investigated. The switching of reference resistors with nominal values from 1 k Ω to 220 k Ω was performed by a CD4051 analog multiplexer controlled by an STM32G431 microcontroller, while the input and output voltages were digitized by the built-in analog-to-digital converter. It was experimentally established that the

direct contact channel demonstrates a relative conductivity drift of about 12.03 % for an unchanged water sample, which is caused by polarization processes at the electrode–electrolyte interface, the formation of the electric double layer and the slow dynamics of the near-electrode layer. It is shown that even a simplified single-frequency impedance channel significantly reduces the influence of slow drift processes compared to the direct contact channel, and the smallest error of determining the impedance modulus, equal to 0.21 %, is achieved when the reference resistor is matched to the modulus of the impedance under study, which fully corresponds to the theoretical minimum of the error coefficient. Based on the obtained results, the expediency of a further transition to contactless conductivity measurement through the analysis of the full shape of the electrochemical impedance spectrum in a wide frequency range is substantiated, which will make it possible to obtain not only an integral conductivity value, but also additional informative parameters related to the concentration and mobility of ions in the solution.

Keywords: *electrochemical impedance, electrical conductivity, contactless sensor, electrolytic cell, reference resistor, voltage divider, drift, electrode polarization, STM32G431, CD4051.*

