

ЗАСІБ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ NaCl У ВОДІ НА ОСНОВІ КОНДУКТОМЕТРИЧНОГО СЕНСОРА

¹Вінницький національний технічний університет

Запропоновано сучасний підхід до визначення концентрації NaCl у воді за допомогою кондуктометричного сенсора, який поєднує класичні електрохімічні методи з новітніми схемотехнічними та математичними рішеннями.

Ключовим компонентом вимірювального засобу є коаксіальний кондуктометричний сенсор з плоскими електродами, здатний формувати стабільне електричне поле для точного вимірювання електропровідності розчину. Принцип дії сенсора базується на прямій залежності провідності від концентрації розчинених іонів, зокрема Na^+ і Cl^- . Засіб оснащений температурним сенсором (герметичним терморезистором), що забезпечує автоматичну температурну компенсацію, враховуючи зміну іонної рухливості за різних температур.

Розроблено математичну модель, яка описує залежність електропровідності від концентрації, температури, геометрії сенсора та молярної провідності іонів. Зокрема, показано, що підвищення температури на кожний градус Цельсія збільшує провідність на 2...3 %, що обґрунтовує необхідність впровадження температурної корекції. Мостова схема Уїтстона використовується для виявлення змін опору, пов'язаних зі зміною концентрації солі.

Калібрування сенсора здійснюється із застосуванням еталонних розчинів Milwaukee, сертифікованих за стандартом NIST. Результати метрологічного дослідження підтверджують високу точність — відносна похибка становила лише 1,46 % за концентрації 342 ppm.

Розроблений засіб вирізняється простотою конструкції, доступністю компонентної бази, а також придатністю для використання як у лабораторних, так і у польових умовах. Запропоноване рішення є перспективним для впровадження в автоматизовані системи контролю якості води, зокрема в аграрному, промисловому та медичному секторах.

Подальші напрямки досліджень передбачають удосконалення чутливого елемента шляхом мікроструктуризації електродів, розширення діапазону вимірювань, реалізацію бездротових інтерфейсів для віддаленого моніторингу, впровадження самокалібрувальних алгоритмів та розширення функціональності до мультиіонного аналізу.

Ключові слова: кондуктометричний сенсор, NaCl, мостова схема Уїтстона, концентрація іонів, калібрування, електроди, температурна компенсація.

Вступ

Контроль вмісту розчинених солей, зокрема хлориду натрію (NaCl), у воді має важливе значення для широкого спектра прикладних задач — від екологічного моніторингу та сільськогосподарства до харчової промисловості, фармацевтики та водоочисних технологій [1]. Перевищення допустимої концентрації солей може негативно впливати на технічне обладнання, живі організми та якість продукції. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні простих, доступних і водночас точних засобів для визначення мінералізації водних середовищ у реальному часі.

Одним з ефективних підходів до визначення концентрації іонів у рідких середовищах є кондуктометрія — метод, що базується на залежності електропровідності водного розчину від кількості наявних іонів. Перевагами цього методу є швидкодія, простота апаратної реалізації та безперервного моніторингу. Особливої актуальності набуває розробка таких сенсорів з урахуванням температурних впливів, оскільки провідність розчину суттєво змінюється зі зміною температури.

У роботі спроектовано, математично обґрунтовано та промодельовано кондуктометричний сенсор для вимірювання концентрації NaCl у воді. Запропонований пристрій реалізує електропровідні вимірювання з використанням мостової схеми Уїтстона та температурної компенсації, що забезпечує високу чутливість і точність у широкому діапазоні концентрацій.

Метою роботи є розробка та дослідження засобу вимірювання концентрації натрій хлориду (NaCl) у воді на основі кондуктометричного сенсора з урахуванням температурної компенсації, що забезпечує високу точність, стабільність та придатність до застосування в умовах екологічного моніторингу, водопідготовки та технологічного контролю.

Методи контролю іонного складу водних розчинів, зокрема натрій хлориду, широко досліджуються у сучасній науково-технічній літературі. Основну увагу приділено вдосконаленню сенсорних технологій, математичних моделей та способів обробки сигналів. У працях [2]—[4] описані підходи до побудови кондуктометричних сенсорів з урахуванням температурної компенсації та геометричних особливостей вимірювальної комірки. Наголошено, що для забезпечення точності вимірювань важливим є правильний вибір матеріалів електродів, а також реалізація стабільного електричного поля всередині осередку.

У публікаціях [5]—[7] досліджено вплив температури на електропровідність води та розчинених у ній солей. Зокрема, показано, що підвищення температури на кожний °C викликає зростання провідності приблизно на 2...3 %, що вимагає впровадження температурної корекції для підвищення достовірності результатів.

Більшість наявних рішень орієнтовані на вузькоспеціалізовані або лабораторні застосування, що обмежує їх використання в умовах польових вимірювань або вбудованих екосистем моніторингу. До того ж, багато публікацій приділили увагу лише загальній електропровідності без акценту на конкретних іонних складниках, таких як Na^+ і Cl^- , що є ключовими для визначення саме концентрації солі.

У контексті цього дослідження запропоновано інтегрувати переваги класичних підходів з практичною реалізацією точного, стабільного та технологічно простого засобу для визначення концентрації NaCl у воді. Запропонована система поєднує сучасну математичну модель з доступною електронною базою та придатна як для лабораторного, так і для прикладного використання.

Результати дослідження

Одним з найефективніших методів визначення вмісту іонних домішок, зокрема Na^+ і Cl^- , є кондуктометрія — електрохімічний підхід, що базується на вимірюванні електропровідності розчину.

У цій роботі запропоновано вимірювальний засіб, головним елементом якого є кондуктометричний сенсор, здатний точно визначати концентрацію NaCl на основі провідності водного розчину. Конструктивно сенсор реалізовано у вигляді коаксіальної комірки з плоскими електродами, які формують однорідне електричне поле під час подачі напруги. Заповнення комірки розчином відбувається через спеціальні горловини, що забезпечують стабільні гідродинамічні умови.

У стані спокою, без електричного поля, іони Na^+ і Cl^- перебувають у стані хаотичного теплового руху. У разі прикладення змінної напруги в сенсорі формується електричне поле, що викликає впорядкований дрейф іонів до відповідних електродів, накладаючись на тепловий рух і спричиняючи зміну електропровідності розчину.

Принцип дії сенсора базується на прямій залежності провідності від концентрації розчинених іонів. На точність вимірювання також впливають температура, геометрія сенсора, а також властивості самих іонів.

Повна електропровідність розчину визначається як сума внесків усіх наявних іонів

$$k = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot (1 + \alpha_i \cdot (T - T_0)) \cdot c_i, \quad (1)$$

де k — електропровідність розчину, [S/m]; λ_i — еквівалентна провідність i -го іона за еталонної температури T_0 , [S·m²/mol]; α_i — температурний коефіцієнт провідності i -го іона; T — температура розчину, [°C]; T_0 — еталонна температура, зазвичай 25 °C; c_i — концентрація i -го іона, [mol/л]; n — кількість типів іонів у розчині.

Наявність температурного контролю зумовлена необхідністю температурної компенсації результатів, адже електропровідність води змінюється в залежності від температури. Зокрема, з підвищенням температури зростає рухливість іонів, що збільшує загальну провідність. З метою корек-

ктного визначення концентрації NaCl значення температури вводиться у формулу компенсації, нормалізовану на референсну температуру, найчастіше 25 °C.

Електричний опір рідини між електродами сенсора визначається за формулою (при цьому стандартні [mol/л] представимо у [ppm]):

$$\Delta R = \frac{L}{A \cdot \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot (1 + \alpha_i \cdot (T - T_0)) \frac{c_i}{1000 \cdot M_i}}, \quad (2)$$

де ΔR — опір розчину, [Ω]; L — відстань між електродами, [m]; A — ефективна площа електродів, [m²]; M_i — молярна маса i -го іона, [г/моль].

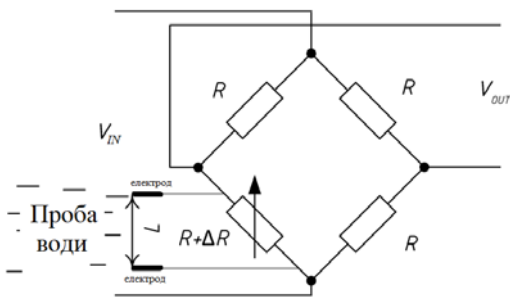


Рис. 1. Схема кондуктометричного сенсора

Функціональна схема кондуктометричного сенсора [8] для моніторингу концентрації домішок у водних середовищах показана на рис. 1.

Мостова схема Уїтстона використовується для точного визначення малих змін електричного опору, у нашому випадку що виникають внаслідок зміни концентрації NaCl у воді. Вона складається з чотирьох резисторів, з яких один змінює свій опір. У разі рівноваги вихідна напруга дорівнює нулю, але зі зміною опору виникає напруга, пропорційна цій зміні. Таким чином, схема дозволяє перетворювати фізичні впливи на електричний сигнал для подальшого аналізу.

У розробленому кондуктометричному сенсорі одне плече змінюється на $\Delta R + R$, а решта мають значення R , вихідна напруга V_{out} визначається за формулою

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{\Delta R}{4R + \Delta R} \right). \quad (3)$$

Підставивши рівняння (2) у рівняння (3), отримаємо остаточний вираз

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{\frac{L}{A \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot (1 + \alpha_i (T - T_0)) \frac{c_i}{1000 M_i}}}{4R + \frac{L}{A \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot (1 + \alpha_i (T - T_0)) \frac{c_i}{1000 M_i}}} \right). \quad (4)$$

Моделювання залежності концентрації NaCl від напруги на виході сенсора у повному діапазоні вимірювання показано на рис. 2.

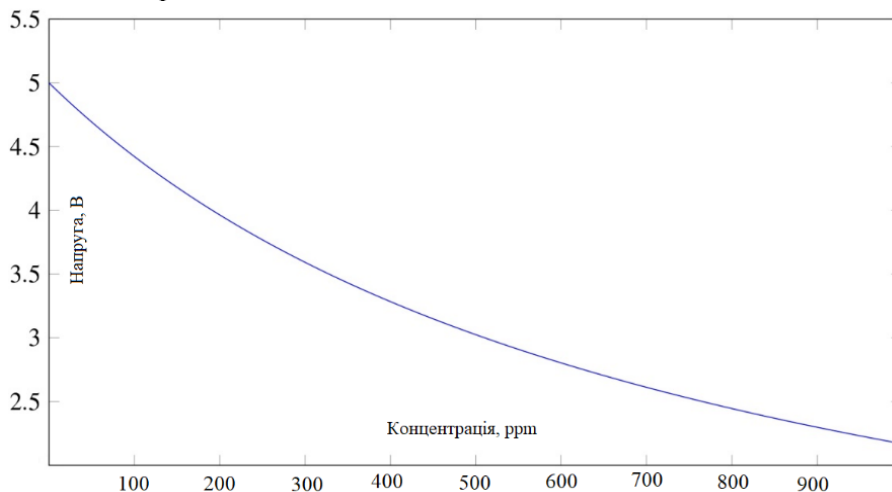


Рис. 2. Залежність концентрація – напруга відповідно до математичної моделі (4)

Моделювання проводилось за вхідної напруги $V_{in} = 5$ V, опорі $R = 10000$ Ом, відстані між електродами $L = 0,005$ m, ефективної площі електродів $A = 2,5 \cdot 10^{-5}$ m², молярної еквівалентної провідності іонів NaCl $\lambda = 0,763$ S·m²/mol, молярної маси іонів NaCl $M_i = 58,44$ g/mol, температурного коефіцієнта провідності іонів NaCl $\alpha = 0,02$, температури розчину $T = 25$ °C.

Основними апаратними елементами засобу вимірювання концентрації NaCl у воді є контактні електроди. Оскільки іони натрію (Na^+) і хлору (Cl^-) добре проводять струм, зміна провідності прямо корелює з концентрацією солі. Також у складі засобу є температурний сенсор (терморезистор), розміщений в окремому герметичному зонді. Такий зонд виготовляється з вологостійкого матеріалу з високою теплопровідністю, що забезпечує швидке й точне вимірювання температури середовища без прямого контакту електроніки з водою. Герметичність термосенсора є критичною умовою [9], оскільки електролітичні властивості водного середовища можуть спричинити корозію або порушення роботи сенсорного елемента в разі потрапляння рідини до внутрішньої частини пристрою. Апаратна реалізація розробленого засобу вимірювання концентрації NaCl у воді показана на рис. 3.



Рис. 3. Розроблений засіб вимірювання концентрації NaCl у воді



Рис. 4. Калібрувальні суміші Milwaukee 800, 1382 та 1500 ppm

Для калібрування розробленого засобу використано розчин Milwaukee для TDS-метрів, призначений для налаштування точності вимірювання під час визначення мінералізації (вмісту солей) води. Заводське калібрування здійснене за допомогою калію хлориду відповідно до стандарту NIST 2202 SRM (стандартний еталонний матеріал) у деіонізованій воді для аналітичного використання згідно з вимогами ISO 3696/BS3978. Контрольні калібрувальні концентрації становлять 800 ppm, 1382 ppm та 1500 ppm (рис. 4).

Для визначення метрологічних характеристик розробленого сенсора використано розчин Milwaukee з концентрацією 342 ppm. Значенням, яке найбільше відрізняється від дійсного (ряд складався з 30 послідовних вимірювань), є 347 ppm, відповідно відносна похибка становить 1,46 %.

Висновки

Розроблено та математично обґрунтовано засіб вимірювання концентрації NaCl у воді на основі кондуктометричного сенсора. Пристрій реалізує метод електропровідного контролю із застосуванням мостової схеми Уїтстона, що забезпечує реакцію з високою чутливістю на зміну концентрації іонів у розчині. Для підвищення точності передбачено температурну компенсацію за допомогою вбудованого герметичного терморезистора. Моделювання показало узгодженість між аналітичною залежністю та фактичними результатами. Визначені метрологічні характеристики засобу підтвердили його практичну придатність — відносна похибка не перевищує 1,5 %.

До перспектив подальших досліджень у цьому напрямі варто віднести: впровадження самокалібрувальних алгоритмів для забезпечення довготривалої стабільності та адаптацію сенсора для мультиіонного аналізу в реальних водних системах.

Отримані результати можуть бути основою для створення повноцінних мобільних або стаціонарних систем контролю якості води в різних сферах — від аграрного сектору до промисловості та медицини.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] I. A. Dudatiev, and I. S. Ozmench, "Conductometric sensor for determining the concentration of impurities in water" *International Conference on Optoelectronic Information Technologies*, Vinnytsia, Ukraine, 2025, pp. 228-230.
- [2] W. Z. Taffese, et al., "Autonomous corrosion assessment of reinforced concrete structures: Feasibility study," *Sensors*, vol. 20, no. 23, pp. 1-18, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20236825>.
- [3] A. M. Ibernón, I. Gasch, J. M. Romero, and J. Soto, "New use of an Ag electrode and a potentiodynamic method to control the presence of chlorides in porous media like concrete," *Electrochimica Acta*, vol. 476, pp. 143-251, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.143251>.

- [4] K. Lal, S. A. Jaywant, and K. M. Arif, "Electrochemical and optical sensors for real-time detection of nitrate in water," *Sensors*, vol. 23, no. 16, pp. 70-99, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23167099>.
- [5] S. N. Zainurin, et al., "Advancements in monitoring water quality based on various sensing methods: a systematic review," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 21, pp. 14080, 2022. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114080>.
- [6] F. Valentini, A. Calcaterra, S. Antonaroli, and M. Talamo, "Smart portable devices suitable for cultural heritage: a review," *Sensors*, vol. 18, no. 8, pp. 24-34, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18082434>.
- [7] K. Sun, W. Cui, and C. Chen, "Review of underwater sensing technologies and applications," *Sensors*, vol. 21, no. 23, pp. 7849, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21237849>.
- [8] I. Helm, L. Jalukse, and I. Leito, "Measurement uncertainty estimation in amperometric sensors: A tutorial review," *Sensors*, vol. 10, no. 5, pp. 4430-4455, 2010. <https://doi.org/10.3390/s100504430>.
- [9] M. Cuartero, M. Parrilla, and G. A. Crespo, "Wearable potentiometric sensors for medical applications," *Sensors*, vol. 19, no. 2, pp. 363, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19020363>.

Рекомендована кафедрою інформаційних радіоелектронних технологій і систем

Стаття надійшла до редакції 18.06.2025

Озменчук Ілля Сергійович — аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, e-mail: illiaozmenchuk@gmail.com ;

Дудат'єв Ігор Андрійович — канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, e-mail: dudatiev.igor@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

I. S. Ozmenchuk¹
I. A. Dudatiev¹

Device for Measuring NaCl Concentration in Water Based on a Conductometric Sensor

¹Vinnytsia National Technical University

The article presents modern approach to determining NaCl concentration in water, using a conductometric sensor that combines classical electrochemical methods with advanced circuit design and mathematical modeling solutions.

Key component of the measuring device is a coaxial conductometric sensor with flat electrodes capable of forming a stable electric field for accurate measurement of solution conductivity. The sensor operation is based on the direct relationship between conductivity and the concentration of dissolved ions, particularly Na^+ and Cl^- . The device is also equipped with a temperature sensor (a hermetically sealed thermistor), which enables automatic temperature compensation by accounting for changes in ion mobility at different temperatures.

Detailed mathematical model has been developed to describe the dependence of conductivity on ion concentration, temperature, sensor geometry, and ionic molar conductivity. In particular, it has been shown that the temperature increase by one degree Celsius leads to 2...3 % rise in conductivity, justifying the need for temperature correction.

Wheatstone bridge circuit is employed to sensitively detect changes in resistance associated with variations in salt concentration. The resulting analog signal is processed by an operational amplifier and then converted into a digital form using an ADC. The relationship between the sensor's output voltage and NaCl concentration is analytically modeled and supported by numerical simulations.

Sensor calibration is performed using Milwaukee standard solutions certified according to NIST standards. Metrological evaluation confirmed high accuracy, with a relative error of only 1.46 % at a concentration of 342 ppm.

The developed device is characterized by a simple design, accessible component base, and suitability for both laboratory and field applications. The proposed solution holds promise for integration into automated water quality monitoring systems, particularly in agriculture, industry, and healthcare.

Future research directions include enhancing the sensitivity element through microstructuring of the electrodes, expanding the measurement range via automatic scaling, implementing wireless interfaces for remote monitoring, introducing self-calibration algorithms, and extending functionality to multi-ion analysis in real water systems.

Keywords: conductometric sensor, NaCl, Wheatstone bridge circuit, ion concentration, calibration, electrodes, temperature compensation.

Ozmenchuk Illia S. — Post-Graduate Student of the Chair of Information Radioelectronic Technologies and Systems, e-mail: illiaozmenchuk@gmail.com ;

Dudatiev Ihor A. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Information Radioelectronic Technologies and Systems, e-mail: dudatiev.igor@gmail.com