

УДК 681.5 + 543.257.1

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.2.7>

ІНФОРМАЦІЙНО ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ДОМІШОК У ВОДІ НА ОСНОВІ КОНДУКТОМЕТРИЧНОГО СЕНСОРА

Дудатьєв І. А. – кандидат технічних наук,
доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Вінницького національного технічного університету
ORCID ID: 0000-0002-8810-4706
Scopus-Author ID: 57195673898

Притула М. О. – кандидат технічних наук,
старший викладач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій
і систем
Вінницького національного технічного університету
ORCID ID: 0000-0003-1577-5215
Scopus-Author ID: 57189330230

Озменчук І. С. – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій
і систем
Вінницького національного технічного університету
ORCID ID: 0009-0005-2263-3110

Контроль якості води є важливим завданням екологічного моніторингу, промисловості та медицини [1–3]. Вода є універсальним розчинником, що легко накопичує різні хімічні речовини, важкі метали, органічні та неорганічні домішки, які можуть впливати на здоров'я людини та довкілля. Тому своєчасний аналіз якості води є необхідним для запобігання негативним наслідкам її забруднення.

Існує безліч методів аналізу якості води, таких як спектрофотометрія, хроматографія, мас-спектрометрія та інші, однак більшість із них є дорогими, складними у використанні та потребують значного часу на підготовку проб. Одним з ефективних методів аналізу, що дозволяє оперативно визначати концентрацію іонних домішок у воді, є кондуктометрія. Вона базується на вимірюванні електропровідності розчину, яка змінюється в залежності від концентрації розчинених іонів. Цей метод має низку переваг, серед яких висока швидкість вимірювання, простота реалізації та можливість автоматизації процесу аналізу.

Аналітичний контроль якості води є критично важливим завданням для екологічного моніторингу, промислових процесів та медичної сфери. У представленій роботі розглянуто створення інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) для визначення концентрації домішок у воді на основі кондуктометричного сенсора. Основною перевагою використання кондуктометрії є її висока швидкість вимірювань, простота реалізації та можливість автоматизації процесу контролю.

У сучасних інформаційно-вимірювальних системах (ІВС) використовуються різні типи сенсорів для визначення параметрів води. Одним з основних сенсорів для контролю домішок у воді є кондуктометричний сенсор, що дозволяє отримувати точні дані про її електропровідність. Використання таких сенсорів у складі автоматизованих систем моніторингу дає змогу здійснювати безперервний контроль стану води в режимі реального часу.

Запропонована ІВС забезпечує ефективний інструмент для безперервного контролю якості води в режимі реального часу. Результати дослідження можуть стати основою для подальших розробок та вдосконалення систем моніторингу з метою їх широкого практичного застосування.

Ключові слова: контроль якості води, кондуктометрія, електропровідність, інформаційно-вимірювальна система, кондуктометричний сенсор, калібрування, температурна компенсація.

Dudatiev I. A., Prytula M. O., Ozmenchuk I. S. Information-measurement system for determining the concentration of impurities in water based on a conductometric sensor

Water quality control is a vital task for environmental monitoring, industry, and medicine [1–3]. Water is a universal solvent that easily accumulates various chemical substances, heavy metals, organic and inorganic impurities, which can affect human health and the environment. Therefore, timely analysis of water quality is essential to prevent the negative consequences of its contamination.

There are many methods for water quality analysis, such as spectrophotometry, chromatography, mass spectrometry, and others. However, most of them are expensive, complex to use, and require significant time for sample preparation. One of the effective methods that allows for rapid determination of ionic impurity concentrations in water is conductometry. This method is based on measuring the electrical conductivity of a solution, which varies depending on the concentration of dissolved ions. It offers several advantages, including high measurement speed, ease of implementation, and the possibility of process automation.

Analytical control of water quality is critically important for environmental monitoring, industrial processes, and the medical field. This study presents the development of an information-measurement system (IMS) for determining the concentration of impurities in water based on a conductometric sensor. The main advantage of using conductometry lies in its high measurement speed, simplicity of implementation, and the possibility of automating the control process.

Modern information-measurement systems (IMS) use various types of sensors to determine water parameters. One of the key sensors for monitoring water impurities is the conductometric sensor, which enables accurate data acquisition on its electrical conductivity. The integration of such sensors into automated monitoring systems allows for continuous real-time water quality monitoring.

The proposed IMS provides an efficient tool for continuous water quality control in real-time. The results of this research may serve as a foundation for further development and improvement of monitoring systems for their broad practical application.

Key words: water quality control, conductometry, electrical conductivity, information-measurement system, conductometric sensor, calibration, temperature compensation.

Постановка проблеми. Незважаючи на широке використання кондуктометричних сенсорів, існує низка проблем, пов'язаних із забезпеченням їх високої точності, стабільності та надійності. Основні труднощі виникають через вплив температурних коливань, паразитних ефектів і необхідність регулярного калібрування системи. Це вимагає розробки методів компенсації та покращення алгоритмів вимірювання електропровідності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень і публікацій у сфері кондуктометричних сенсорів для моніторингу якості води свідчить про значний прогрес у цій галузі. Зокрема, у статті [4] представлено огляд існуючих сенсорів, включаючи контактні та безконтактні методи вимірювання електропровідності. Автори підкреслюють, що контактні сенсори часто стикаються з проблемами забруднення електродів, що впливає на точність вимірювань, тоді як безконтактні сенсори, такі як індуктивні та ємнісно-зв'язані, можуть зменшити ці проблеми, але мають свої обмеження, зокрема невизначеність шляху струму та складність конструкції.

Незважаючи на ці досягнення, існують певні виклики. Наприклад, безконтактні сенсори можуть мати складну конструкцію та вимагати ретельного калібрування для забезпечення точності. Крім того, використання наноматеріалів може підвищити вартість сенсорів та ускладнити їх виробництво. Таким чином, подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію конструкції сенсорів, зниження їх вартості та підвищення надійності в реальних умовах експлуатації.

Метою даного дослідження є розробка інформаційно-вимірювальної системи з використанням кондуктометричного сенсора для точного та стабільного контролю якості води. В роботі проведено аналіз фізико-хімічних процесів у сенсорі,

побудовано його електричну еквівалентну схему, досліджено вплив параметрів розчину на його імпеданс, а також запропоновано методи підвищення точності вимірювання електропровідності, що враховують температурні та паразитні ефекти. Крім того, визначено способи калібрування системи для забезпечення її надійності та ефективності.

Виклад основного матеріалу. Контроль якості води є важливим завданням екологічного моніторингу, промисловості та медицини. Визначення концентрації іонних домішок здійснюється за допомогою різних методів, серед яких кондуктометрія є однією з найбільш ефективних. У цій роботі розглядається розробка ІВС з головним вимірювальним каналом якої є кондуктометричний сенсор, який дозволяє визначати концентрацію домішок на основі електропровідності водного розчину.

Кондуктометричну осередок можна уявити як коаксіальну ємність із пластинчастими електродами, що забезпечують рівномірний розподіл електричного струму. Заповнення комірки досліджуваним розчином здійснюється через спеціальні заливні горловини. Під час проходження електричного струму через електроліт відбуваються електрохімічні та термодинамічні процеси, що впливають на розподіл електричного поля.

При відсутності напруги іони в розчині здійснюють лише хаотичний тепловий рух. При подачі напруги в осередку створюється електричне поле, напруженість якого визначає напрямок руху іонів до електродів, що накладається на тепловий рух.

Саме кондуктометричний осередок буде слугувати основним вимірювальним каналом (чутливим елементом) ІВС. Сама ІВС містить два вимірювальних канали і має наступну структуру (на рис. 1).

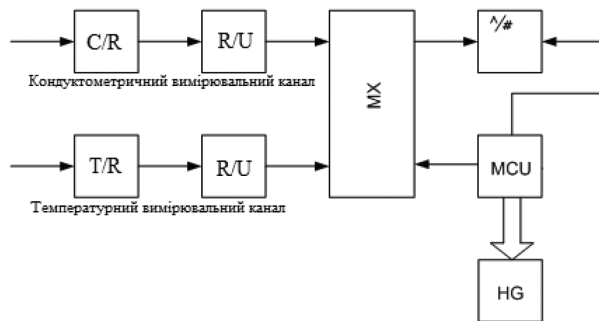


Рис. 1. Реалізація структурної схеми ІВС визначення концентрації домішок у воді на основі кондуктометричного сенсора

Позначення на схемі: C/R та T/R (ПП) – первинний вимірювальний перетворювач, R/U (ВП) – вторинний вимірювальний перетворювач, – аналого-цифровий перетворювач, MX – мультиплексор, HG – засоби відображення інформації, MCU – мікроконтролер.

Принцип роботи даної схеми наступний: по двом каналам одночасно проводяться вимірювання вхідного сигналу. На виході цих каналів після вимірювання утворюються аналогові величини, які потім перетворюються в змінний електричний сигнал (напругу) за допомогою ПП та ВП.

Після чого уніфікований сигнал поступає на вхід мультиплексора. Мультиплексор у відповідності з керуючим кодом здійснює комутацію певного

вимірювального сигналу, який поступає на його вхід зі своїм виходом. Після цього вимірювальний сигнал з виходу мультиплексора поступає на вхід АЦП, який здійснює його перетворення у цифровий код. Цифровий код поступає на шину обміну даними, за допомогою якої здійснюється обмін даними між функціональними вузлами вимірювальної системи. Мікроконтролер здійснює керування всіма вузлами вимірювальної системи.

Другий вимірювальний канал у ІВС – сенсор температури. Вирішено що даним сенсором буде слугувати терморезистивний промисловий давач СТ1-19. СТ1-19 – напівпровідниковий резистор з нелінійною вольтамперною характеристикою має виражену температурну залежність електричного опору. Для компенсації температурного впливу необхідно, щоб температурні коефіцієнти опору (ТКС) терморезистора і осередку були рівними. Для цього до осередку підключають паралельний шунт $R_{ш}$, що значно знижує ТКС всього паралельного з'єднання, наближаючи його до ТКС терморезистора. Оскільки температурні коефіцієнти опору терморезистора R_t та елементів ланцюга $R_{ш}$ мають протилежні знаки (опір терморезистора збільшується, а розчину – зменшується), загальний опір ланцюга залишається практично незмінним при зміні температури. Функціональна схема ПВП ІВС представлена на рис. 2.

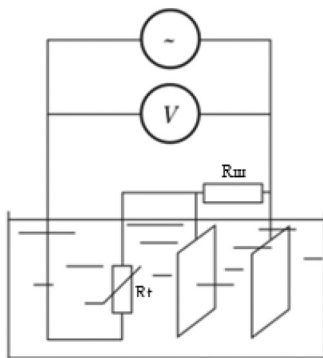


Рис. 2. Функціональна схема ПВП ІВС

Кондуктометричні сенсори працюють на принципі вимірювання електропровідності (або опору) рідини, що змінюється залежно від концентрації розчинених іонів. Основні залежності, які визначають поведінку сенсора, можна описати математично [5].

Електропровідність розчину визначається як:

$$\kappa = \sum_i \lambda_i c_i, \quad (1)$$

де κ – електропровідність розчину, S/m; λ_i – молярна еквівалентна провідність іона i , $S \cdot m^2/mol$; c_i – концентрація іона i , mol/m^3 .

З огляду на те, що кондуктометричний сенсор вимірює опір R , його можна виразити через електропровідність:

$$R = \frac{L}{\kappa A}, \quad (2)$$

де R – опір розчину, Ω ; L – відстань між електродами, m; A – площа електродів, m^2 .

Підставимо вираз для κ :

$$R = \frac{L}{A \sum_i \lambda_i c_i}. \quad (3)$$

Припустимо, що в розчині домінують шкідливі домішки певного типу з концентрацією c і еквівалентною провідністю λ . Тоді рівняння спрощується до:

$$R = \frac{L}{A \lambda c}. \quad (4)$$

Температура впливає на провідність, тому врахуємо температурну корекцію:

$$\kappa_T = \kappa_{T_0} (1 + \alpha(T - T_0)), \quad (5)$$

де T – поточна температура, °C; T_0 – еталонна температура (зазвичай 25 °C); α – температурний коефіцієнт провідності (≈ 0.02 °C⁻¹).

З урахуванням температури опір стає:

$$R = \frac{L}{A \lambda c (1 + \alpha(T - T_0))}. \quad (6)$$

де всі параметри мають фізичний зміст і можуть бути визначені експериментально.

Так як сенсором температури обрано давач СТ1-19 який в залежності від температури водного розчину терморезистор має електричний опір, що зв'язаний з температурою нелінійною функцією, яка описується формулою Стейнхард Харта (метод параметричної ідентифікації).

$$T = \frac{1}{C0 + C1 \cdot \ln R + C2 \cdot (\ln R)^3}, \quad (7)$$

де T – температура, яка діє на ТРД; R – опір ТРД; $C_{1,2,3}$ – коефіцієнти, які підбираються за умови найкращого наближення до отриманої експериментальної залежності.

Тоді основна математична модель сенсора, яка показує, що опір обернено пропорційний концентрації c

$$c = \frac{L}{A \lambda R \left(1 + \alpha \left(\frac{1}{C0 + C1 \cdot \ln R + C2 \cdot (\ln R)^3} - T_0 \right) \right)}. \quad (8)$$

Калібрування кондуктометричного сенсора. Щоб визначити параметри сенсора (λ – молярну еквівалентну провідність іонів, L – відстань між електродами (наприклад, за допомогою мікрометра), A – площу електродів (наприклад, якщо електроди круглі, то $A = \pi r^2$, де r – радіус електродів)), необхідно провести калібрувальний експеримент.

Для калібрування сенсора з відомими концентраціями готують серію розчинів з концентраціями $c(M)_1 - c(M)_N$. Для кожного розчину вимірюють опір R_i при кімнатній температурі (наприклад, 25 °C). Результати записують у таблицю 1:

Обчислення молярної еквівалентної провідності λ . Використовувавши рівняння 4 для кожного c_i виражаємо λ :

$$\lambda = \frac{L}{A R c}. \quad (9)$$

Таблиця 1

Експериментальний визначення $R(\Omega)$

№	Концентрація $c(M)$	Вимірний опір $R(\Omega)$
1	$c(M)_1$	$R(\Omega)_1$
2	$c(M)_2$	$R(\Omega)_2$
...	...	...
4	$c(M)_N$	$R(\Omega)_N$

Обчислимо λ для всіх вимірювань (таблиця 2):

Таблиця 2

Експериментальний визначення λ

№	Концентрація $c(M)$	Вимірний опір $R(\Omega)$	Обчислене λ ($S \cdot m^2/mol$)
1	$c(M)_1$	$R(\Omega)_1$	λ_1
2	$c(M)_2$	$R(\Omega)_2$	λ_2
3	...	...	...
4	$(M)_N$	$R(\Omega)_N$	λ_N

Отримані параметри сенсора L , A та λ дозволяють розраховувати концентрацію шкідливих домішок у воді за формулою (8) навіть якщо температура відрізняється від 25 °С. Цей метод дозволяє точно калібрувати сенсор і отримати його характеристики для подальшого використання у визначенні концентрації шкідливих домішок у воді [6, 7].

Висновки. Розроблена інформаційно-вимірвальна система на основі кондуктометричного сенсора дозволяє точно та оперативно визначати концентрацію іонних домішок у воді. Проведений аналіз фізико-хімічних процесів у сенсорі, побудова його електричної еквівалентної схеми та дослідження впливу параметрів розчину на імпеданс дозволили вдосконалити методику вимірювання електропровідності.

Запропоновані методи компенсації температурних і паразитних ефектів забезпечують високу точність та стабільність вимірювань у реальних умовах експлуатації. Впровадження автоматизованої системи контролю якості води на основі розробленого сенсора сприяє безперервному моніторингу та швидкому реагуванню на зміни у складі води, що є важливим для екологічного моніторингу, промисловості та медицини.

Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення систем водного аналізу, зокрема шляхом інтеграції сучасних методів обробки даних та підвищення чутливості сенсорів до низьких концентрацій домішок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Кравченко Н. Б., Зеленська Є.І. Порівняльна оцінка якості питної води з закритих джерел м. Харкова. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2015. № 3–4. С. 84–88.
2. Гонсьор О. Й. Вдосконалення нормативно-методичного забезпечення для оцінювання якості питного водопостачання: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.01.02 Львів, 2008. 20 с.
3. Екотрофологія. Основи екологічно безпечного харчування / Т. М. Димань та ін. Київ : Лібра, 2006. 304 с.

4. Tejaswini K., George B., Mukhopadhyay S., Kumar V. Conductivity sensors for water quality monitoring: a brief review. *Technological Solutions for Water Sustainability: Challenges and Prospects*. 2023. Vol. 19. P. 213–221.
5. Dudatiev I., Ozmench I. Conductometric sensor for determining the concentration of impurities in water. *International Conference on Optoelectronic Information Technologies*: Vinnytsia, 2025. P. 228–230.
6. Tyagi S., Sharma B., Singh P., Dobhal R. Water quality assessment in terms of water quality index. *American Journal of Water Resources*. 2013. Vol. 1. P. 34–38.
7. Talagala P., Hyndman R., Leigh C., Mengersen K., Smith K. Feature-based framework for detecting technical outliers in water-quality data from in situ sensors. *Miles Water Resources Research*. 2019. Vol. 55. P. 8547–8568.

REFERENCES:

1. Kravchenko N. B., Zelensjka Je.I. (2015) Porivnjaljna ocinka jakosti pytnoji vody z zakrytykh dzherel m. Kharkova [Comparative assessment of drinking water quality from closed sources in Kharkiv]. *Ljudyna ta dovykillja. Problemy neoekologhiji*. (3–4), 84–88. [in Ukrainian].
2. Ghonsjor O.J. (2008) *Vdoskonalennja normatyvno-metodychnogho zabezpechennja dlja ocinjuvannja jakosti pytnogho vodopostachannja* [Improving regulatory and methodological support for assessing the quality of drinking water supply] (PhD Thesis) Lviv. [in Ukrainian].
3. Dymanj T.M. (2006) *Ekotrofologhija. Osnovy ekologhichno bezpechnogho kharchuvannja* [Basics of environmentally friendly food]. Kyjiv: Libra. [in Ukrainian].
4. Tejaswini K., George B., Mukhopadhyay S., Kumar V. Conductivity sensors for water quality monitoring: a brief review. *Technological Solutions for Water Sustainability: Challenges and Prospects*. 2023. Vol. 19. P. 213–221. [in English].
5. Dudatiev I., Ozmench I. Conductometric sensor for determining the concentration of impurities in water. *International Conference on Optoelectronic Information Technologies*: Vinnytsia, 2025. P. 228–230. [in English].
6. Tyagi S., Sharma B., Singh P., Dobhal R. Water quality assessment in terms of water quality index. *American Journal of Water Resources*. 2013. Vol. 1. P. 34–38. [in English].
7. Talagala P., Hyndman R., Leigh C., Mengersen K., Smith K. Feature-based framework for detecting technical outliers in water-quality data from in situ sensors. *Miles Water Resources Research*. 2019. Vol. 55. P. 8547–8568. [in English].