

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2025.04.010>

УДК 544.5:543.5

М.Д. Кошель, <https://orcid.org/0000-0001-6979-7546>

С.А. Кошель, <https://orcid.org/0009-0002-7859-5262>

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

E-mail: kkknd@ua.fm, S.A.Koshel@nas.gov.ua

Визначення параметрів кондуктометричних сенсорів для автоматизованого управління енергетичним обладнанням

Представлена академіком НАН України А.Ф. Булатом

Встановлено закономірності процесів визначення робочих характеристик кондуктометричних сенсорів, призначених для автоматизованого управління енергетичним обладнанням шляхом вимірювання питомої електропровідності та концентрації розчинів електролітів в умовах невизначеності та нестаціонарності параметрів навколишнього середовища. Описано техніку калібрування сенсорів і алгоритми комп'ютерної обробки даних калібрування. Встановлено універсальні залежності між сигналом сенсора та питомою електропровідністю.

Ключові слова: кондуктометричні сенсори, питома електропровідність, калібрування сенсорів, автоматизоване управління, концентрація електролітів, енергетичне обладнання.

Вступ. Досліджено особливості роботи кондуктометричних сенсорів, що застосовуються для визначення концентрації речовин у рідких провідних середовищах [1]. Актуальність теми зумовлена широким використанням таких сенсорів у системах керування промисловими процесами, транспортними системами, медицині, екологічному моніторингу, харчовій та фармацевтичній галузях.

Мета дослідження — визначити оптимальні умови калібрування та математичної обробки даних для підвищення точності вимірювань.

Основу калібрувального процесу становить поступове розведення калібрувального розчину дистильованою водою з подальшим вимірюванням електричного опору, що реєструється в робочій зоні сенсора — області з найвищою концентрацією електричного поля [5]. Отримані експериментальні дані обробляються в табличному процесорі Excel

Ц и т у в а н н я: Кошель М.Д., Кошель С.А. Визначення параметрів кондуктометричних сенсорів для автоматизованого управління енергетичним обладнанням. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2025. № 4. С. 10—16. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2025.04.010>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

із перетворенням первинних значень опору в значення питомої електропровідності, а потім — концентрації за допомогою довідкових таблиць [2—4]. Описано фізичні основи формування сигналу сенсора, пов'язані з рухливістю іонів, розмірами їх сольватних оболонок та іншими параметрами. Навіть у випадках, коли склад середовища точно невідомий, сигнал сенсора може бути інформативним для прийняття рішень в автоматизованих системах керування. Кондуктометричні сенсори вирізняються високою чутливістю, простою конструкцією та можливістю автоматизації, завдяки чому вони є ефективним інструментом для моніторингу середовищ різного складу, навіть якщо немає точних даних про їхній хімічний склад.

Характеристики кондуктометричних сенсорів. Зв'язок між електропровідністю середовища і концентрацією іонофору визначається за законом Ома для найпростішої форми провідника з довжиною L і поперечним перерізом S :

$$R = L / (S \cdot \kappa), \quad (1)$$

де $L / S = K_S$ — константа сенсора; κ — питома електропровідність. Звідси впливають розмірність константи K_S — см^{-1} і можливість її наближеної попередньої оцінки за параметрами геометричної форми робочого простору сенсора. З рівняння (1) за даними калібрування обчислюється константа сенсора:

$$K_S = 1 / (R \cdot \kappa). \quad (2)$$

Визначення K_S за даними калібрування дає величини, що залежать від виду калібрувальної речовини. З формальної точки зору, значення K_S було б константою, якби існувала універсальна залежність між питомою електропровідністю κ та сигналом сенсора R . Насправді ж така залежність є складнішою і варіює для різних розчинів. Тому промислові сенсори супроводжуються значенням цієї константи і зазначенням умов застосування.

Кінцева мета кондуктометричного аналізу — визначення концентрації аналізованої речовини. Розрахунок концентрації з виміряного опору здійснюється за допомогою апроксимації довідкових даних про залежність питомої електропровідності (κ) від концентрації (C) речовини в розчині:

$$C = A^n \cdot \kappa + B^{n-1} \cdot \kappa + \dots + C \cdot \kappa + D. \quad (3)$$

Конкретна форма рівняння обирається окремо для кожної окремої речовини.

Експериментальна частина. Досліди проводили з водними розчинами NaOH, для яких наявні точні довідкові дані. Використовували проточний сенсор КСН-25, розроблений для занурювального режиму роботи. Схема конструкції сенсора та його зовнішній вигляд показані на рис. 1 і 2.

Сенсори розрізняються за розмірами робочої області та формою електродів. Сенсор підключено до кондуктометра, який перетворює сигнал у цифрову форму. Дані передаються або на дисплей, або в комп'ютер для оброблення швидких динамічних процесів за відповідними алгоритмами. Прилад на частоті 4 кГц генерує на двоелектродний сенсор імпульсний струм змінного напрямку. Наявність знакозмінного струму гарантує відсутність електрохімічних процесів на електродах і дає можливість використовувати

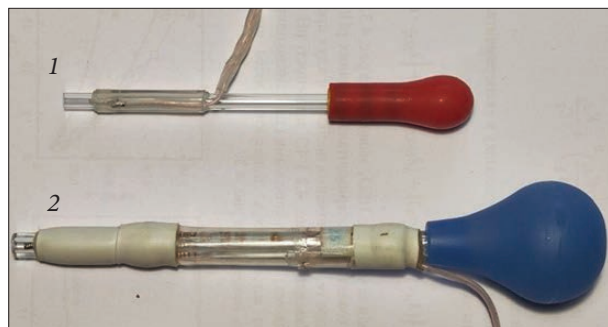


Рис. 1. Зовнішній вигляд сенсорів КСН-25 (1) та КСН-26 (2)

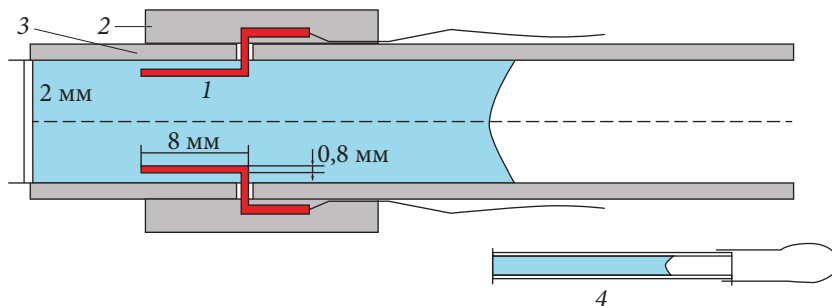


Рис. 2. Конструкція сенсора КСН-25: 1 — платинові електроди; 2 — прозорий полімерний ізолятор; 3 — скляна трубка (внутрішній діаметр 2 мм); 4 — загальний вигляд із дозувальним пристроєм

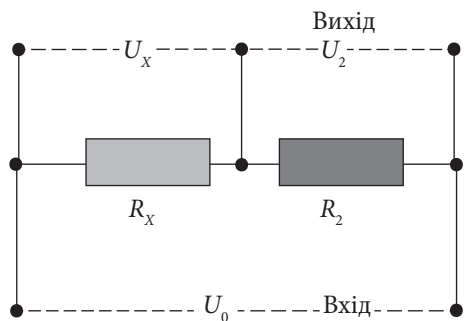


Рис. 3. Двоелектродна схема вимірювання опору розчину: R_x — опір розчину між електродами сенсора; R_2 — постійний резистор, 677 Ом; U_2 — напруга на постійному резисторі; U_x — напруга на електродах сенсора; U_0 — загальна напруга 5 В, що формується реєструвальним пристроєм

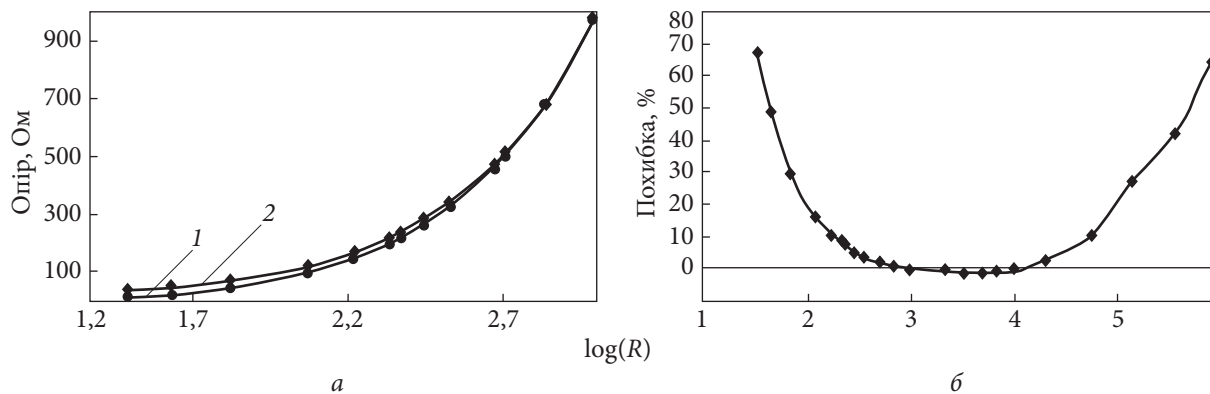


Рис. 4. Залежності: а — реального опору (1) і показань сенсора (2); б — похибки вимірювань від $\log(R)$

Рис. 5. Порівняння експериментальної та теоретичної залежності питомої електропровідності (κ) від концентрації (C)

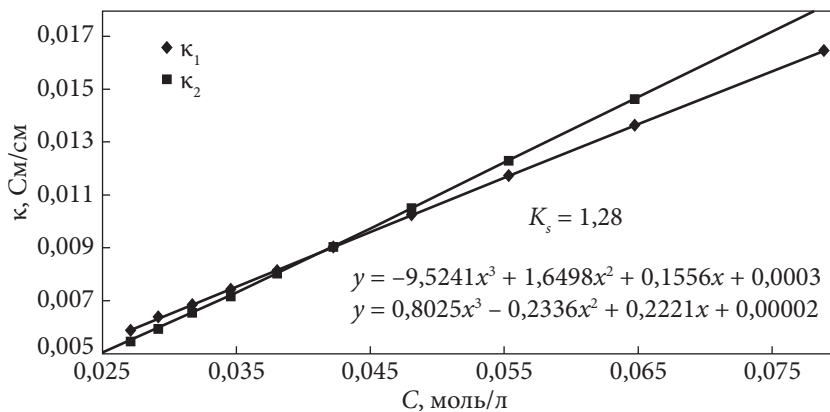


Рис. 6. Залежність умовної константи сенсора (K_s) від електричного опору розчину (R)

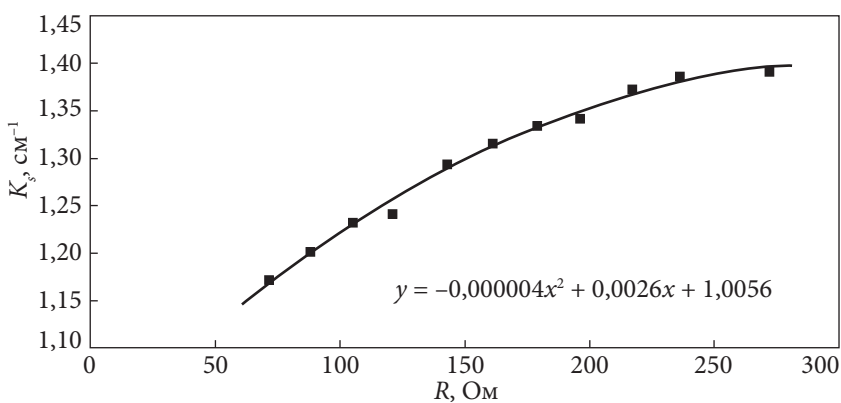
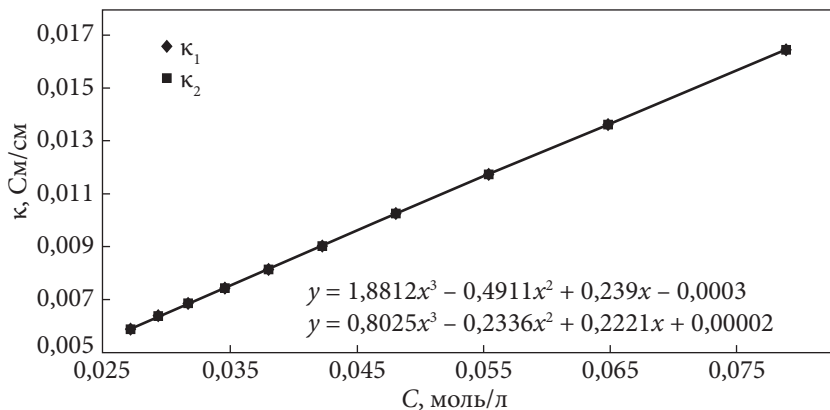


Рис. 7. Порівняння теоретичної і вимірної питомої електропровідності (κ) з урахуванням апроксимації константи сенсора



найпростішу двоелектродну схему сенсора (рис. 3). А за частоти 4 кГц практично повністю відсутні поляризаційні явища на електродах (концентраційна поляризація, поява поляризаційної ємності, поляризаційного опору). Наслідком цього є усунення відповідної похибки щодо опору.

Процесор кондуктометра формує напругу $U_0 = 5 \pm 0,005$ В у вигляді послідовності однакових пар прямокутних імпульсів з протилежними полярностями. Імпульсний струм проходить через подільник напруги, що складається з опору розчину в камері сенсора і

опору постійного резистора R_2 . У позитивному імпульсі струму вимірюється падіння напруги на резисторі R_x і за його значенням встановлена в процесор програма обчислює величину опору розчину в робочій камері сенсора. Усі проточні сенсори виготовлені у скляних трубках і працюють у розчинах із довільними концентраціями.

Розглянемо тепер кількісні характеристики сенсора і техніку їх використання. При цьому беремо до уваги, що точність вимірювань визначається резистором $R_2 = 671$ Ом у схемі кондуктометра. У цій схемі похибка показань не перевищує $\pm 2\%$, якщо $R = 200 \div 6000$ Ом, $(\log(R) = 2,7 \div 4,1)$, що впливає з графіків, зображених на рис. 4.

Калібрування сенсорів виконували на модельному розчині NaOH. Найточніші результати отримують у розведених розчинах (від 0,1 М), для яких наявні загальноприйняті довідкові дані. Завдяки низьким концентраціям табличні функції питомої ($\kappa = f(C)$) та еквівалентної ($\lambda = f(C)$) електропровідності [1] апроксимуються поліномом третього ступеня, що забезпечує найбільшу точність порівняння дослідних та довідкових даних за нахилом $d\lambda/dC$ та $d\kappa/dC$.

Також для зниження похибки в довідкові дані еквівалентної електропровідності важливо вносити поправку на температуру. В середньому така поправка становить $\pm 2\%$ на 1°C , але для підвищення точності потрібно визначати форму залежності еквівалентної електропровідності від температури для кожної окремої вимірюваної речовини.

Виконання роботи та обговорення результатів. Визначення всіх характеристик сенсорів виконували в процесі калібрування. Для цього спочатку готували розчин еталонної речовини з точно визначеною концентрацією C_0 , і шляхом його поступового розведення дистильованою водою отримували серію $1-N$ розчинів з концентраціями, що зменшуються в інтервалі $C_0 - C_N$. У кожному розчині вимірювали опір $R_0 - R_N$, після чого за рівнянням (2) розраховували питому електропровідність розчину, підбираючи умовне значення K_s так, щоб отримана функція розведення максимально наблизилася до довідкової [2].

На рис. 5 можна бачити, що кут нахилу вимірюваної кривої відрізняється від теоретичної. Це обумовлено тим, що між параметром “константа сенсора” і електричним опором розчину є деяка залежність. Форму залежності K_s від опору наведено на рис. 6. Графік на рис. 5 дає початкове значення K_s суміщенням дослідних ліній апроксимації і табличних довідкових даних.

Для обчислень у широкому діапазоні концентрацій область вимірювань розділяють на піддіапазони, в кожному з яких використовують окреме рівняння апроксимації.

На рис. 6 показано кінцевий результат калібрування — залежність умовної константи сенсора від опору вимірюваного розчину. Як можна бачити з графіка, форма залежності K_s від R є нелінійною і описується рівнянням апроксимації у формі полінома другого ступеня:

$$K_s = A \cdot R^2 + B \cdot R + C. \quad (4)$$

Коефіцієнти A, B, C у рівнянні (4) можна вважати кінцевим результатом калібрування.

Тепер, якщо замість константи сенсора для розрахунку питомої електропровідності (див. рис. 5) використовувати рівняння апроксимації (4) з визначеними під час калібрування коефіцієнтами A, B, C , кут нахилу вимірюваної кривої зміниться і майже точно збігатиметься з кривою з довідника (рис. 7).

Висновки. Вивчено закономірності процесів, які мають місце під час калібрування кондуктометричних сенсорів у рідинних середовищах. Встановлено, що розроблені нами кондуктометричні сенсори серії КСН-25 придатні для використання в системах управління різними об'єктами промисловості і транспорту з метою забезпечення надійності їх функціонування. Експериментальними результатами і теоретичними розрахунками доведено, що константа сенсора є параметром, який залежить не лише від конструкції самого сенсора, а також від концентрації досліджуваного розчину, тому для досягнення найбільшої точності вимірювань константу сенсора необхідно розраховувати під час кожного вимірювання опору досліджуваного розчину за допомогою рівняння апроксимації, коефіцієнти для якого визначаються в процесі калібрування.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Kirichek R., Koucheryavy A. Internet of Things Laboratory test bed. New Delhi: Springer, 2016. 485 p. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2580-5_44
2. Справочник химика. Т. 3. Химическое равновесие и кинетика, свойства растворов. Электродные процессы: Никольский Б.П. (ред.). 2-е изд. Москва, Ленинград: Химия, 1965. 1005 с.
3. International critical tables of numerical data, physics, chemistry and technology: Washburn E.W. (Ed.). Norwich, New York: Knovel, 2003. Vol. 6. 511 p.
4. Zoski C.G. Handbook of electrochemistry. Las Cruces, New Mexico, USA: Elsevier, 2007. 935 p.
5. Кошель Н.Д., Смирнова Е.В., Кошель С.А. Исследование обменных процессов в ионитах в электрических полях методом компьютерной резистометрии. Часть 2. Методы и техника. *Электронная обработка материалов*. 2018. 54, № 5. С. 56—67. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1464855>
6. ДСТУ 9020:2020 Метрологія. Кондуктометри і аналізатори рідин кондуктометричні. Методика повірки. Київ, 2020.

Надійшла до редакції 14.04.2025

REFERENCES

1. Kirichek, R. & Koucheryavy, A. (2016). Internet of Things Laboratory test bed. New Delhi: Springer. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2580-5_44
2. Nikolskii, B. P. (Ed.). (1965). Chemist's handbook. Vol. 3. Chemical equilibrium and kinetics, properties of solutions. Electrode processes. 2nd ed. Moscow, Leningrad: Khimia (in Russian).
3. Washburn, E. W. (Ed.). (2003). International critical tables of numerical data, physics, chemistry and technology. Vol. 6. Norwich, New York: Knovel.
4. Zoski, C. G. (2007). Handbook of electrochemistry. Las Cruces, New Mexico, USA: Elsevier.
5. Koshel, N. D., Smirnova, E. V. & Koshel, S. A. (2018). Study of exchange processes in ionites in electric fields by computerized resistometry. Part 2. Methods and technique. *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, 54, No. 5, pp. 56-67 (in Russian). <https://doi.org/10.5281/zenodo.1464855>
6. DSTU 9020:2020 Metrology. Conductometers and conductometric liquid analyzers. Verification methods, Kyiv, 2020 (in Ukrainian).

Received 14.04.2025

M.D. Koshel, <https://orcid.org/0000-0001-6979-7546>

S.A. Koshel, <https://orcid.org/0009-0002-7859-5262>

Institute of Transport Systems and Technologies of the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

E-mail: kkknd@ua.fm, S.A.Koshel@nas.gov.ua

DETERMINATION OF CONDUCTOMETRIC SENSOR PARAMETERS FOR AUTOMATIC CONTROL OF POWER EQUIPMENT

The study establishes patterns in the processes of determining the operational characteristics of conductometric sensors designed for automatic control of power equipment by measuring the specific electrical conductivity and concentration of the electrolyte solution under conditions of uncertainty and non-stationarity of environmental parameters. The sensor calibration technique and algorithms for computer processing of calibration data are described. Universal dependencies between the sensor signal and specific electrical conductivity have been determined.

Keywords: *conductometric sensors, specific electrical conductivity, sensor calibration, automated control, electrolyte concentration, power equipment.*