

Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет імені Івана Франка

Л. М. Бойчишин, О. М. Герцик

**ОСНОВИ
ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ІМПЕДАНСНОЇ
СПЕКТРОСКОПІЇ: ВІД ЕЛЕКТРОДНОЇ
ПОЛЯРИЗАЦІЇ ДО ЕКВІВАЛЕНТНИХ СХЕМ**

Навчальний посібник

Львів
2025

УДК [544.6:543.42](075.8)

Б 72

Рецензенти:

д-р. хім. наук, зав. відділу фізико-хімії іонних систем **К. Д. Першина**
(Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського, м. Київ);

д-р. хім. наук, проф., зав. кафедри хімії та фізики **М. В. Мороз**
(Національний університет водного господарства і природокористування,
м. Рівне);

канд. техн. наук, доц. кафедри прикладної фізики і наноматеріалознавства
О. В. Балабан
(Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів)

Рекомендовано до друку

*Вченою радою Львівського національного університету імені Івана Франка.
Протокол № 88/9 від 24 вересня 2025 року*

Бойчишин Л. М.

Б 72

Основи електрохімічної імпедансної спектроскопії: від електродної поляризації до еквівалентних схем: навч. посібник / Л. М. Бойчишин, О. М. Герцик. – Львів : ЛНУ ім. Івана Франка, 2025. – 160 с.

ISBN 978-617-10-0943-1.

Розглянуто загальні питання, які стосуються електрохімічної імпедансної спектроскопії. Окремі розділи присвячені конкретним питанням, що стосуються основних принципів методу, моделей еквівалентних схем та їх застосування, а також оцінки отриманих параметрів.

Для науковців, аспірантів, студентів хімічних і фізичних спеціальностей вищих навчальних закладів та наукових установ.

УДК [544.6:543.42](075.8)

ISBN 978-617-10-0943-1

© Бойчишин Л. М., Герцик О. М., 2025
© Львівський національний університет
імені Івана Франка, 2025

ЗМІСТ

Список скорочень і перекладів.....	6
ВСТУП.....	7
Розділ 1. ОСНОВИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ІМПЕДАНСНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ.....	9
1.1. Теорія кіл змінного струму та подання комплексних значень імпедансу.....	10
1.2. Фізична електрохімія та еквівалентні елементи електричного кола	21
1.3. Загальні моделі еквівалентних схем	29
1.4. Вилучення параметрів моделі з даних.....	39
Розділ 2. ЕЛЕКТРОХІМІЧНА ІМПЕДАНСНА СПЕКТРОСКОПІЯ: ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ.....	45
2.1. Принципи вимірювання EIS	45
2.2. Подання даних.....	48
Розділ 3. ЕЛЕКТРОХІМІЧНА ІМПЕДАНСНА СПЕКТРОСКОПІЯ: ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА	51
3.1. Електрохімічна комірка.....	51
3.2. Двоелектродна комірка.....	51
3.3. Триелектродна комірка.....	52
3.4. Чотириелектродна комірка.....	53
3.5. Експериментальні параметри.....	53
3.6. Налаштування приладу: потенціостатичний чи гальваностатичний режим	53
3.7. Налаштування приладу: параметри або налаштування аналізатора частотних характеристик (FRA)	56
Розділ 4. ЕЛЕКТРОХІМІЧНА ІМПЕДАНСНА СПЕКТРОСКОПІЯ: АНАЛІЗ ДАНИХ	59
4.1. Моделі еквівалентних схем.....	59
4.2. Резистор, R	59
4.3. Омичний опір, R_{Ω}	61
4.4. Поляризаційний опір, R_p	61

4.5. Конденсатор, C	62
4.6. ПЕШ, C_{DL}	63
4.7. Ємність покриття, C_c	64
4.8. Котушка індуктивності, L	64
4.9. Елемент постійної фази, Q (або CPE)	66
4.10. Моделювання дифузії в електрохімічних системах	68
 Розділ 5. ЕЛЕКТРОХІМІЧНА ІМПЕДАНСНА СПЕКТРОСКОПІЯ: МОДЕЛІ ЕКВІВАЛЕНТНИХ СХЕМ	80
5.1. Модель 1 – послідовно з'єднані резистор і конденсатор	80
5.2. Модель 2 – послідовно з'єднані резистор, конденсатор і котушка індуктивності	81
5.3. Модель 3 – паралельне з'єднання резистора та конденсатора (найпростіший приклад схеми Рендлса)	82
5.4. Модель 4 – змішаний кінетичний і дифузійний контроль	84
5.5. Модель 5 – два послідовно з'єднаних контури	85
5.6. Модель 6 – приклад складної схеми	86
 Розділ 6. ЕЛЕКТРОХІМІЧНА ІМПЕДАНСНА СПЕКТРОСКОПІЯ: ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ	89
6.1. Визначення коефіцієнтів пропорційності для даних	89
6.2. Без урахування коефіцієнтів пропорційності	89
6.3. Пропорційне нормування	90
6.4. Нормування за модулем	90
6.5. Початкове припущення	90
6.6. Неунікальність схемних моделей	92
 Розділ 7. ЕЛЕКТРОХІМІЧНА ІМПЕДАНСНА СПЕКТРОСКОПІЯ: ВИМІРЮВАННЯ НЕОБРОБЛЕНИХ СИГНАЛІВ В ЕІС	95
7.1. Експериментальні умови для достовірного вимірювання ЕІС	95
7.2. Можливі тести для перевірки достовірності даних ЕІС	97
7.3. Переваги запису необроблених даних в ЕІС	98
7.4. Графік залежності змінного струму від часу	100
7.5. Графік роздільної здатності проти часу	101
7.6. Фігури Ліссажу	103

Розділ 8. ПІДБІР ДАНИХ ЕІС – ЯК ОТРИМАТИ ХОРОШІ ПОЧАТКОВІ ЗНАЧЕННЯ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СХЕМИ	106
8.1. Умови проведення експерименту.....	108
8.2. Стаціонарний робочий електрод	109
8.3. Початкові параметри	111
8.4. Підбір даних з розрахованими початковими значеннями	118
8.5. Робочий електрод обертання	120
8.6. Початкові значення інших елементів і схем	125
8.7. Висновки та остаточні пропозиції щодо узгодження даних ЕІС	141
Розділ 9. ВИМІРЮВАННЯ ЕІС НА КОМЕРЦІЙНІЙ БАТАРЕЇ	143
Розділ 10. АНАЛІЗ МОТТА-ШОТТКІ. ВИКОРИСТАННЯ ЕІС ДЛЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ЗАСТОСУВАНЬ	148
СЛОВНИК ТЕРМІНІВ	155
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	157
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК.....	159

Навчальне видання

**Бойчишин Лідія Михайлівна,
Герцик Оксана Миронівна**

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ІМПЕДАНСНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ: ВІД ЕЛЕКТРОДНОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ДО ЕКВІВАЛЕНТНИХ СХЕМ

Навчальний посібник

Комп'ютерна верстка *Л. Семенович*
Редактор *Н. Плиса*

Формат 70x100/16. Умовн. друк. арк. 12,9. Тираж 50 прим.

Видавець та виготовлювач:

Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Університетська, 1, м. Львів, 79000.

СВІДОЦТВО
про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції.
Серія ДК № 3059 від 13.12.2007 р.