

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

на тему:

«РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧНОЇ»

Виконав: студент групи Акт–22сп
спеціальності 151 «Автоматизація та
комп'ютерно- інтегровані технології».
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Хром'як Я. І.
(прізвище та ініціали)

Керівник: проф. Калахан О. С.
(прізвище та ініціали)

Рецензент: Лакіш О. І.
(прізвище та ініціали)

ДУБЛЯНИ 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Перший (бакалаврський) рівень вищої освіти
Освітня програма **151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
електротехнічних систем
Калахан О.С.
«30» грудня 2022 року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу студенту

Хром'яку Ярославу Івановичу

1. Тема роботи: «Розроблення програмно-апаратного комплексу для автоматизації електрохімічних досліджень за допомогою системи вольтамперометричної».

Керівник роботи Калахан Олег Степанович, д.т.н., професор.
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом по університету від « 30 » грудня 2022 р., №453/к-с

2. Строк подання студентом роботи: 16.06.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: Посібники з експлуатації енергетичного обладнання, періодичні науково-технічні видання («Енергетика», «Фізико-хімічна механіка матеріалів»), ДСТУ 3008:2015, ДСТУ 8303:2015, ДСТУ 3582-2013, законодавча та нормативна база України з питань охорони праці.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Моніторинг та методи оцінки швидкості руйнування конструкційних металів. Методи корозійного моніторингу. Практика електричних досліджень руйнування металів. автоматизація електрохімічних досліджень Програмно-апаратний комплекс для автоматизації досліджень. Узагальнення результатів випробувань. Охорона

праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Оцінка отриманих результатів і кошторисна вартість виконання роботи.

4. Перелік графічного матеріалу: презентація – слайди: графіки, фото, схеми, таблиці.

5. Консультанти з розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4	Городецький І.М., доцент, к.т.н.	30.12.2022 р.	16.06.2023р.

6. Дата видачі завдання 30.12.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ етапу	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Отримання завдання. Вивчення рекомендованої літератури за темою КР, написання аналітичного огляду кваліфікаційної роботи, вивчення об'єкту (<i>I розділ роботи</i>).	30.12.2022р.– 28.01.2023р.	
2.	Написання методичної частини роботи, розроблення перспективного рішення та його обґрунтування (<i>II-III розділи роботи</i>).	29.01 – 20.02.23р	
3.	Розроблення та обґрунтування пропозицій щодо реалізації результатів роботи. Розроблення питань з охорони праці та захисту населення. Написання економічної частини. (<i>IV- IVрозділи роботи</i>).	21.02 – 15.04.23р	
4.	Кінцеве оформлення кваліфікаційної роботи та оформлення ілюстративних матеріалів, таблиць, здача КР на рецензування.	16.04.– 30.05.23р	
5.	Підготовка до захисту в ЕК (написання доповіді). Пробний захист на кафедрі, виправлення зауважень. Завершення кваліфікаційної роботи в цілому	31.05. – 16.06.23р.	

Студент Хром'як Я. І.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи д.т.н., професор Калахан О.С.

(науковий ступінь, вчене звання, підпис, прізвище та ініціали)

УДК 621.921:620.178.16

РЕФЕРАТ

«Розроблення програмно-апаратного комплексу для автоматизації електрохімічних досліджень за допомогою системи вольтамперометричної».

Хром'як Ярослав Іванович. Кваліфікаційна робота першого (бакалаврського) рівня освіти. Кафедра електротехнічних систем. Дубляни, Львівський національний університет природокористування, 2023 р. 55 стор. текст. частини, 9 рис., 3 табл., 14 джерел посилання.

Мета кваліфікаційної роботи: проаналізувати основні методи визначення швидкості руйнування конструкційних металевих сплавів і здійснити заходи щодо автоматизації електрохімічних випробувань.

Проаналізовано методи та методики експериментального визначення корозійних втрат конструкційних сплавів енергетичного призначення,

Модернізовано та комп'ютеризовано систему вольтамперометричну СВА-1БМ, Створено тестову програму налагодження та калібрування управління експериментом, робочу програму проведення електрохімічних досліджень, збільшено ступінь швидкодії потенціостату до 10^{-6} с,.

Програму написано високорівневою мовою програмування C++ у середовищі Borland 5.5. Прикладна програма працює в операційній системі Windows на стаціонарних та портативних комп'ютерах. Для роботи використовується файл графічної системи egavga.bgi. Структурно програма поділяється на три основні частини: ввід початкових даних, цикл вимірювання та вивід результатів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ПОТЕНЦІАЛ КОРОЗІЇ, СТРУМИ КОРОЗІЇ, ПОТЕНЦІОДИНАМІЧНІ КРИВИ.

ЗМІСТ

ВСТУП		7
РОЗДІЛ 1 МОНІТОРИНГ ТА МЕТОДИ ОЦІНКИ ШВИДКОСТІ РУЙНУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МЕТАЛІВ		8
1.1 Методи корозійного моніторингу.....		8
1.2 Природа руйнування металів у середовищах.....		11
1.3 Електричні методи дослідження руйнування металів		14
РОЗДІЛ 2 ПРАКТИКА ЕЛЕКТРИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РУЙНУВАННЯ МЕТАЛІВ		17
2.1 Явище поляризації.....		17
2.2 Застосування потенціостатів, комірки.....		19
2.3 Побудова залежності густини струму поляризації металу від потенціалу (поляризаційні криві).....		21
2.4 Техніка поляризаційних досліджень.....		22
РОЗДІЛ 3 АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ		25
3.1 Техніка лабораторних електрохімічних досліджень...		25
3.2 Програмно-апаратний комплекс для автоматизації досліджень.....		26
3.3 Програмне забезпечення автоматизації вимірювань.....		32
3.3.1 Старт, ввід даних і підготовка процесу вимірювання. Опис алгоритму.....		33
3.3.2 Запис вольт-амперних характеристик.....		34
3.4 Аналіз поляризаційних потенціодинамічних кривих.....		35
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ		38
4.1	Травмонебезпечні ситуації під час виконання робіт.....	38
4.2	Організаційно-технічні рекомендації безпеки.....	40
4.2.1	Захист від шуму та вібрації.....	40

	4.2.2	Розрахунок вентиляції в лабораторії.....	40
	4.2.3	Електробезпека в лабораторії.....	40
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....			44
	5.1	Джерела та види забруднення навколишнього середовища.....	44
	5.2	Охорона атмосфери.....	45
	5.3	Охорона гідросфери.....	46
	5.4	Захист ґрунтів.....	48
РОЗДІЛ 6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОПОЗИЦІЙ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ			50
ВИСНОВКИ.....			53
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....			54

ВСТУП

Україна є однією з найбільш металонасичених держав Європи, але її металофонд за рівнем корозійної захищеності, довговічності та надійності значно поступається рівню, досягнутому у багатьох промислово розвинутих країнах [1 –]. Металургійна промисловість мало випускає корозійно-захищеного прокату (менше 5%), тоді як у США, західноєвропейських країнах, Японії ця цифра для деяких профілів прокату сягає 60% і більше. Основний тягар щодо захисту металоконструкцій від корозії лягає на будівельників, енергетиків, машинобудівників тощо, які недостатньо забезпечені якісними вітчизняними лакофарбовими і полімерними матеріалами, інгібіторами корозії та іншими засобами протикорозійного захисту. Гострим є дефіцит обладнання для якісної підготовки поверхні металу перед нанесенням покриття, здійснення протикорозійного захисту, корозійного контролю; відсутні системи активного корозійного моніторингу в енергетиці, хімічній промисловості. Все це спричиняє значні матеріальні збитки від корозії в різних галузях промисловості.

Особливим аспектом цієї проблеми є корозійно-механічне руйнування металу, що відбувається внаслідок сумісної дії механічних навантажень та корозивних середовищ і спричинює випадки аварійного виходу з ладу трубопроводів, хімічного та енергетичного обладнання, різноманітних місткостей, транспортних засобів та інших об'єктів із важкими екологічними наслідками. Проблема захисту металофонду в Україні відноситься до пріоритетних поряд із енергетичною, екологічною, ресурсозбереженням тощо. Одним із напрямків її розв'язання є суттєве покращення матеріально-технічної бази фундаментальних і прикладних досліджень в галузі корозії і протикорозійного захисту конструкційних матеріалів модернізацією та осучасненням науково-дослідних установок.

РОЗДІЛ І

МОНІТОРИНГ ТА МЕТОДИ ОЦІНКИ ШВИДКОСТІ РУЙНУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МЕТАЛІВ

1.1 Методи корозійного моніторингу

Корозійний моніторинг (від латинського «monitor» – попереджуючий) - *приладовий контроль* певних параметрів корозійного процесу, які повинні знаходитись у заданих межах для одержання інформації про момент, коли необхідно прийняти міри захисту від корозії. Його здійснюють декількома методами [3 – 6].

1) *Вимірювання окисно-відновного потенціалу* [3]. Для його виміру використовують *датчик*, що містить електрод порівняння й електрод з інертного металу, наприклад платини.

2) *Вимір електродного потенціалу* [4]. Електродний потенціал металевої конструкції подає інформацію про те, чи йде корозія. Для виміру електродного потенціалу потрібен *електрод порівняння*. Вимір потенціалів проводять у лабораторних дослідженнях, а також у реальних умовах.

3) *Визначення втрат маси*. Зразки-свідки розміщують у реальну систему й через певний час експозиції визначають втрату маси. Метод простий, не вимагає дорогого устаткування.

4) *Вимір електрохімічного опору*. Зразки, звичайно дротові, розміщують у реальну систему й у ході експонування виміряють їхній електричний опір. Зі зменшенням поперечного перерізу дроту в результаті корозії, електричний опір зростає. Метод дає більш швидкий відгук, чим метод виміру втрат маси.

5) *Визначення поляризаційного опору.* У систему поміщають вимірювальний електрохімічний датчик із електродами з досліджуваного металу. Метод дає швидкий відгук, часто в межах години.

6) *Вимір акустичної емісії.* Метод заснований на тім, що деякі корозійні процеси (наприклад корозійне розтріскування) роблять характерні мікрозвукові сигнали, які можуть реєструватися й подають інформацію про корозію, що йде.

7) *Ультразвукові дослідження.* За допомогою цієї техніки можливо зовні стежити за викликаною корозією зміною товщини стінки, наприклад труби або резервуарів.

Методи оцінки швидкості корозії [4, 5]. Єдиного методу визначення швидкості корозії немає. Найчастіше для кількісної оцінки швидкості корозії металів використовують наступні показники:

- ваговий показник – *зміну маси,*
- глибинний показник – *глибину руйнування,*
- *механічний, об'ємний, тощо.*

Вибір методу оцінки швидкості корозії залежить від характеру руйнування металу. У випадку суцільної корозії можна визначити її швидкість, як втрату маси (Δm) з одиниці поверхні металу (S) за одиницю часу (τ) (ваговий показник):

$$K_m = \Delta m / S \tau$$

Показник зміни маси (K_m) може бути *від'ємним* (K_m^-) (якщо зміна маси зразка зумовлена видаленням продуктів корозії з поверхні металу) або додатним (K_m^+) (якщо продукти корозії залишаються на поверхні і спостерігається приріст маси зразка).

Залежно від швидкості руйнування металу K_t вимірюють у $г/м^2 \cdot год$; $мг/см^2 \cdot добу$; $г/м^2 \cdot рік$ тощо. Недоліком цього показника корозії є неможливість використання його для порівняння швидкості корозії різних

металів, особливо якщо вони сильно відрізняються за густиною. У таких випадках користуються *глибинним показником*.

Глибинний показник швидкості (K_p) – це глибина руйнування металу (в міліметрах) за одиницю часу (рік):

$$K_p = A (K_m / \rho) \text{ (мм/рік), } P$$

де K_m – масовий показник швидкості корозії; ρ - густина металу;

A коефіцієнт, що враховує розмірності K_m і ρ .

Для прикладу, якщо масовий показник швидкості корозії виражений у $\text{г/м}^2 \cdot \text{год}$, а густина – у г/см^3 , то $A = 8,76$. Для приблизної оцінки корозійної тривкості металу використовують десятибальну шкалу корозійної тривкості металів і сплавів (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Десятибальна шкала корозійної тривкості [4]

Група тривкості металів	Глибинний показник корозії, мм/рік	Бали
Надзвичайно стійкі	0,001	1
Дуже стійкі	0,001 – 0,005	2
Стійкі	0,5 – 0,01	3
	0,1 – 0,05	4
	0,05 – 0,1	5
Понижено стійкі	0,1-0,5	6
Малостійкі	0,5-1,0	7
	1,0-5,0	8
	5,0 -10,0	9
Нестійкі	< 10,0	10

Ваговий і глибинний показники не дають точної оцінки місцевої корозії [2 – 7]. У випадку місцевої корозії (наприклад, *щілинної, пітингової, вибіркової*) користуються іншими показниками, наприклад, *механічним*, що характеризує втрату міцності ($K\sigma$) через корозію:

$$K_{\sigma} \sigma = \sigma_0 - \sigma_{-1} / \sigma_0 \cdot 100\%,$$

де σ_0 – межа міцності до корозії; σ_{-1} – межа міцності після корозії, віднесена до початкового перерізу.

Для оцінки швидкості електрохімічної корозії використовують також й інші методи (*об'ємний, вимірювання густини корозійного струму, електроопору тощо.*). Метод вимірювання величини корозійного струму (A) або густини струму (A/cm^2) дає об'єктивні показники швидкості корозії, оскільки ці величини пов'язані (за законом Фарадея) з масою окисненого металу і часом [4, 5]. Швидкість корозії залежить від природи металу і умов експлуатації, зокрема рН середовища і температури. Наприклад, *алюміній* є стійким у нейтральному середовищі, але швидко кородує як у кислому, так і в лужному середовищах. *Залізо* швидко руйнується у кислому середовищі.

1.2 Природа руйнування металів у середовищах

Багато корозійних процесів [3] (термін «*корозія*» походить від латинського слова «*corrodere*» – пожирання, роз'їдання) за своїй природі є електрохімічними, оскільки вони включають реакцію окиснювання:



Під *електрохімічною корозією* розуміють процеси взаємодії металів із електролітами (водою, водяними розчинами солей, кислот, лугів, рідше з неводними електролітами.) [3 – 5]. Процеси електрохімічної корозії протікають *за законами електрохімічної кінетики* [3], коли загальна реакція взаємодії може бути розділена на наступні в значній мірі самостійні, електродні процеси. На рис. 1.1 наведена схема електрохімічного корозійного процесу. Розрізняють корозію з *водневою, кисневою* або *окиснювальною деполаризацією*. Корозія з виділенням водню спостерігається тільки для

металів з досить негативним рівноважним потенціалом - лужних і лужноземельних металів, алюмінію, магнію, цинку, заліза тощо; вона зустрічається переважно в кислих і лужних середовищах.

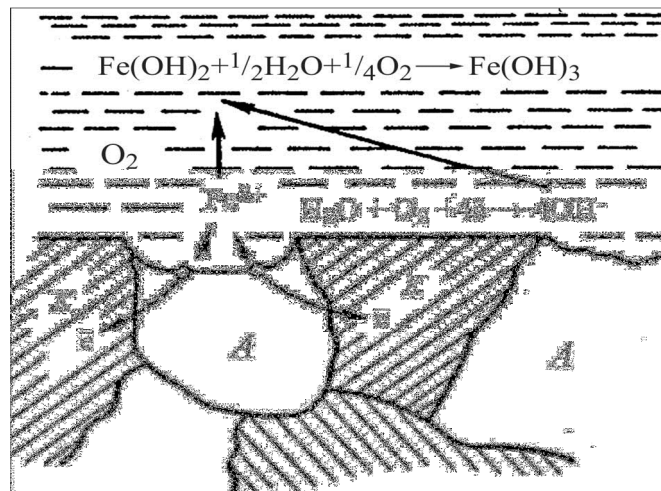


Рисунок 1.1 – Схема електрохімічної корозії заліза.

Киснева деполяризація має місце при контакті з повітрям, найчастіше в нейтральних розчинах (атмосферна, корозія в морській воді уздовж ватерлінії тощо).

Якщо поверхня металу *однорідна (гомогенна)*, то анодна й катодна парціальні реакції розподіляються рівномірно по всіх ділянках поверхні [3–5]. Приклади ідеально гомогенної поверхні - поверхня рідкої амальгами металу; гарної однорідності - відпалена поверхня твердого металу високого ступеню чистоти. На неоднорідній (гетерогенній) поверхні металу, зокрема, що має включення домішок інших металів, можливий нерівномірний розподіл реакцій. На такій поверхні катодні процеси зосереджені головним чином на включеннях, анодні - на основному металі. Такий механізм нагадує роботу короткозамкнених *гальванічних елементів* із просторово розділеними реакціями: на одному електроді розчиняється метал, на іншому виділяється водень.

Диференціація поверхні металу на катодні й анодні ділянки обумовлює відмінності електрохімічних потенціалів і густин гальванічних струмів, тобто приводить до *електрохімічної гетерогенності* [3].

Швидкість корозії може змінюватися в дуже широких межах. У деяких випадках, будучи великою, вона може викликати серйозні ушкодження металу. В інших випадках вона може бути мала й практичної небезпеки не представляти; останнє є результатом загальмованості електродних реакцій.

Ступінь просування корозії як процесу можна виражати через зміну маси матеріалу, глибину прокородованої поверхневої зони, кількістю продуктів корозії. Зміна цих величин за одиницю часу може бути мірою швидкості корозії. Іншою мірою є густина корозійного струму.

Якщо швидкість корозії виражають через густину корозійного струму, то гальмування реакції проявляє себе у вигляді поляризації. Поляризаційні криві електродних реакцій при корозійному процесі показані на прикладі *діаграми Еванса* (потенціал електрода зображується як функція I , рис. 1.3).

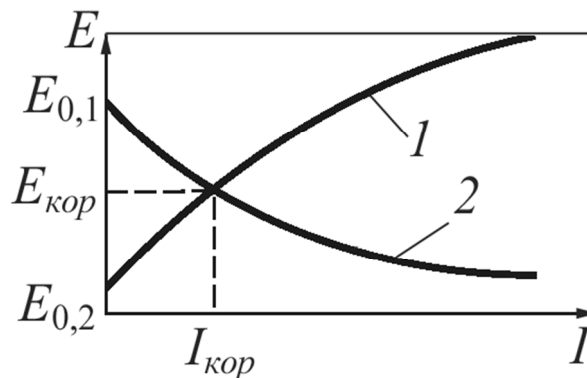


Рисунок 1.2 – Діаграма Еванса

Перетин поляризаційних кривих анодного окиснювання (1) металу, як і протікаючій на ньому катодної реакції (2) дає інформацію про кородуючий метал: $I_{корр}$ – так званий корозійний струм, а $E_{кор}$ – *змішаний потенціал*, так званий *потенціалом вільної корозії*. Останній можна виміряти як електродний потенціал кородуючого металу.

На *діаграмі Штерна* (потенціал зображується як функція Igi , а не як I на *діаграмі Еванса*) в області густин струму, де *концентраційною поляризацією* можна знехтувати, поляризаційні криві найчастіше набувають форму так званих *тафелевих прямих*. Однак, на відміну від *діаграми Еванса*, рівноважні потенціали не розташовуються на перетинанні цих прямих з віссю потенціалів. У такий спосіб можна відрізнити корозійні процеси, що мають в основному *катодний, анодний* або *омічний контроль*. До першого виду корозії відноситься більшість практичних процесів корозії металів в активному стані в морській і річковій воді, у ґрунті, а також корозія в багатьох середовищах хімічної промисловості й ін. Корозія металу з пасивного стану має, навпаки, переважно анодний контроль.

1.3 Електричні методи дослідження руйнування металів

Внаслідок того, що корозія має електрохімічну природу, вимірювання електричних властивостей поверхні розділу метал-корозійне середовище широко використовується при фундаментальних дослідженнях механізму корозії, в заходах по захисту, а також для контролю в експлуатаційних умовах.

Прогрес в цій області став можливий після певних досягнень в експериментальній техніці електрохімічних вимірювань. Широке використання потенціостатичних досліджень і розширення використання серійних потенціостатів визначили бурхливий розвиток електрохімічних досліджень в лабораторіях. Основні відомості про електрохімічну корозію або корозійну стійкість металу можливо отримати за допомогою *електрохімічних досліджень* [3 – 5]. Останні можуть включати визначення

потенціалу корозії й корозійного струму, а також анодних і катодних поляризаційних кривих. Для цієї мети використовують різні методи.

1 *Потенціостатичні дослідження* [5]. Підтримуючи електродний потенціал випробуваного зразка постійним або регулюючи його за певною програмою за допомогою потенціостату, визначають результуючий корозійний струм. Потенціостатичні криві в певних умовах є найбільш повною характеристикою корозійної стійкості металу.

2 *Потенціодинамічні дослідження* [5]. Електродний потенціал зразка змінюють безупинно (або ступінчасто) та одномоментно записують відповідний струм.

3 *Гальваностатичні дослідження*. Через поверхню зразка пропускають струм контрольованої густини й при цьому записують результуючий електродний потенціал.

4 *Дослідження поляризаційного опору* [3]. Поляризаційний опір вимірюють у лінійній області поляризаційної кривої, тобто в безпосередній близькості від потенціалу корозії. Поляризаційний опір є мірою загальмованості корозійного процесу й у даній системі обернено пропорційні струму корозії. Наявні промислові прилади для вимірів поляризаційного опору. Виміри проводять, використовуючи два або три електроди, які змонтовані разом й утворюють вимірювальний датчик. Результат може бути прочитаний безпосередньо на шкалі приладу в одиницях швидкості корозії.

Найбільше поширення знайшов метод поляризаційного опору, розвинутий Стерном та Гірі. Ними було встановлено, що нахил залежності $\Delta E/\Delta I$ в околі потенціалу корозії характеризує опір металу електрохімічній реакції його корозії:

$$\Delta E/\Delta I = R_p = B/I_{cor}, \quad (1.1)$$

або

$$I_{cor} = B/R_p, \quad (1.2)$$

де R_p – поляризаційний опір, визначений при потенціалі, близькому до E_{cor} , B – постійна. Параметр B можна визначити через коефіцієнти Тафеля:

$$B = b_a b_c / [2,3(b_a + b_c)], \quad (1.3)$$

де b_a і b_c – коефіцієнти Тафеля анодної та катодної реакцій відповідно.

Таким чином, визначивши з поляризаційних вимірів поляризаційний опір та коефіцієнти Тафеля, можна встановити струм корозії. Однак це справедливо за умови, що залежність $\Delta E/\Delta I$ лінійна.

Метод електрохімічного імпедансу. Вимір імпедансу на змінному струмі використовують зокрема для дослідження інгібіторів корозії. Одержувані криві подають інформацію про природу електродних реакцій, хоча їх не завжди можна просто інтерпретувати.

Інтенсивний розвиток методу імпедансу отримав в 50-х роках минулого століття головню, як метод дослідження кінетики і механізму електрохімічних процесів [5]. Метод полягає в спектральному аналізі комплексного опору (імпедансу) або провідності (адмітансу) електрохімічної системи метал-середовище при проходженні слабого змінного струму. Як і для методу поляризаційного опору, метод електрохімічного імпедансу коректний за умови наявності лінійного зв'язку між потенціалом і струмом поляризації.

РОЗДІЛ 2

ПРАКТИКА ЕЛЕКТРИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РУЙНУВАННЯ МЕТАЛІВ

2.1 Явище поляризації

Поняття "*швидкість електрохімічної реакції*" потребує пояснення [4]. Швидкість реакції – це кількість перетвореного за одиницю часу реагенту, пропорційна струмові. Значення струму задається ззовні і його можна довільно змінювати від нуля до граничного для даної системи, що забезпечуватиме різну швидкість корозії. Тому фактична швидкість не є показником електродної реакції.

Під час проходження струму виникає *поляризація* електрода – зсув потенціалу від рівноважного його значення. Величина поляризації залежить і від природи реакції, і від густини струму (густина струму – це сила струму, що припадає на одиницю площі поверхні). За однакової густини струму поляризація може бути для одних реакцій велика, для інших – мала.

Поняття "поляризація електрода" має три значення [3]:

1) явище зміни потенціалу електрода під час проходження струму, яке називають поляризацією та позначають грецькою буквою η ;

2) процес, який здійснює експериментатор, змінюючи потенціал шляхом пропускання струму відповідного напрямку та значення;

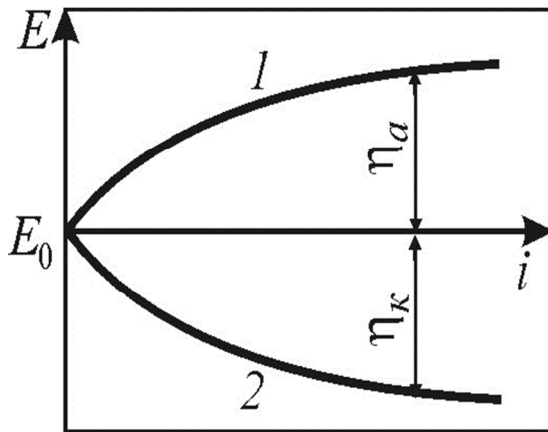
3) кількісне значення зсуву ΔE потенціалу електрода при проходженні струму E_i від рівноважного значення:

$$\Delta E \equiv E_i - E_0, \quad (2.1)$$

де E_i та E_0 – потенціали густини струму (i) та без струму (0).

За анодного струму значення ΔE позитивне, за катодного – від’ємне.

Поляризація анода завжди позитивна, а катода лише негативна (рис. 2.1).



E_0 – рівноважний потенціал;
 η_a – анодна поляризація
 (позитивна);
 η_k – катодна поляризація
 (негативна).

Рисунок 2.1 – Анодна (1) та катодна (2) поляризаційні криві

Таким чином, всю область потенціалів можна розділити на три зони: зони великих значень анодної та катодної поляризації та зону малих значень поляризації (по обидві сторони рівноважного потенціалу).

Коли поляризацію пов’язують з конкретною електродною реакцією, її називають перенапругою. *Перенапруга* – це різниця між потенціалом електрода, через який пропускають струм, та рівноважним потенціалом досліджуваної електродної реакції.

Воднева перенапруга, наприклад, спостерігається під час електролітичного виділення водню за реакцією



а *киснева* – у під час електролітичного виділення кисню за реакцією



Але найчастіше на електроді одночасно протікають дві або більше різних електродних реакцій, наприклад, анодна та катодна.

Зміну електродного потенціалу внаслідок пропускання крізь електрод струму, також необхідно розглядати як поляризацію. Поляризація викликана двома основними чинниками:

1) *концентраційною поляризацією*, обумовленою різницею концентрацій у шарі електроліту поблизу поверхні електрода та об'ємної;

2) *активаційною поляризацією*, яка виникає через ускладнення електродних реакцій.

Активаційна поляризація за її низьких значень прямо пропорційна густині струму, за вищих ($> \sim 30 - 50$ мВ) лінійно залежить від логарифма густини струму, згідно з *рівнянням Тафеля*. Така "напівлогарифмічна" поляризаційна залежність вперше установлена в 1905 р. І. Тафелем та відома в літературі як рівняння Тафеля:

$$|\eta| = a + b \lg i. \quad (2.4)$$

Тому поляризаційні криві (поляризаційні діаграми), як правило, зображають як функцію $\lg i$, отримуючи прямі лінії, так звані *тафелівські прямі*. Поляризаційні діаграми, які називають ще діаграмами Еванса – це графіки залежності потенціалу від логарифма або густини струму. Вперше вони були запропоновані У.Р. Евансом із Кембриджського університету (Англія), який продемонстрував доцільність таких діаграм для прогнозування корозійної поведінки металів.

2.2 Застосування потенціостатів, комірки

Для отримання поляризаційних діаграм [3] беруть досліджуваний електрод ("робочий"), електрод порівняння та допоміжний електрод, як правило платиновий. Електрохімічна комірка, яку широко використовують у корозійних лабораторіях, зображена на рис. 2.4. В комірці розміщено барботер для деаерації розчину або насичення його газом.

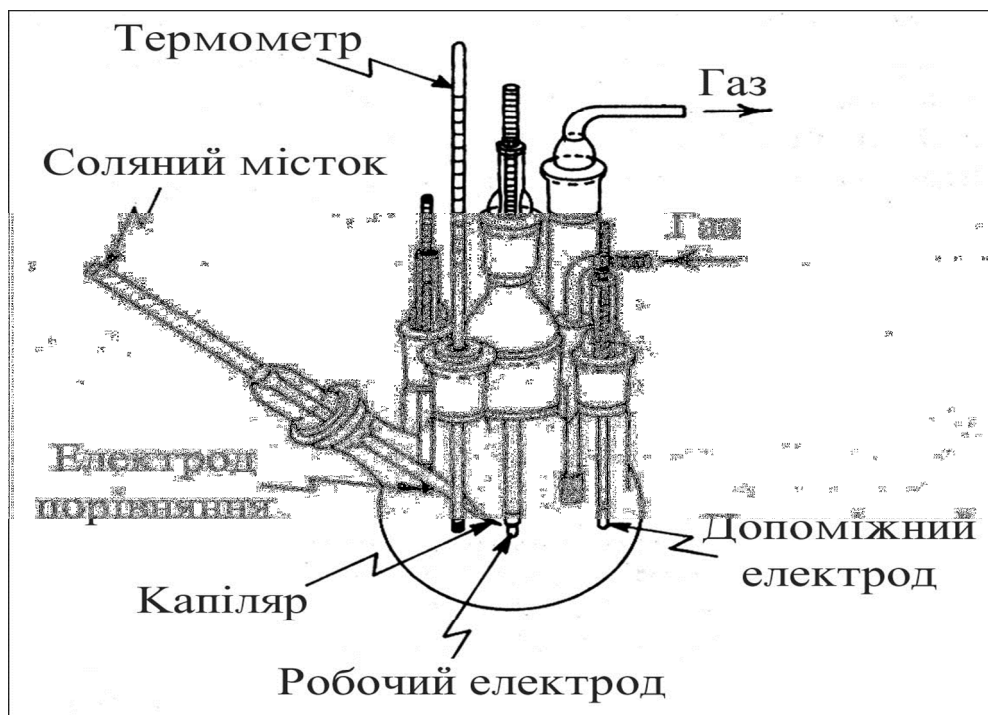


Рисунок 2.4 – Електрохімічна комірка [3]

Електрохімічні комірки, які мають триелектродну систему, містять робочий електрод, електрод порівняння та допоміжний електрод. Робочий електрод – це електрод, який досліджують; електрод порівняння – електрод, щодо якого вимірюють потенціал робочого електрода. Допоміжний електрод утворює з робочим електричне коло, через яке проходить струм поляризації.

Вимірюють за допомогою потенціостата, який автоматично підтримує заданий потенціал робочого електрода, регулюючи струм між ним та допоміжним електродом [4, 5].

Потенціостати забезпечують поляризаційні вимірювання потенціостатичним чи потенціодинамічним та гальваностатичним чи

гальванодинамічним методами електрохімічних процесів, що проходять в системі електрод-електроліт. Їх застосовують для дослідження загальної корозії та схильності до спеціальних її видів; для відпрацювання оптимальних режимів електрохімічних процесів та методів електрохімічного захисту металів від корозійного руйнування; для аналітичних та інших досліджень. Потенціостати дають змогу вимірювати та підтримувати як заданий потенціал, так і струм поляризації робочого електрода, змінювати їх значення ступінчасто або за лінійним законом з різною швидкістю.

2.3 Побудова залежності густини струму поляризації металу від потенціалу (поляризаційні криві)

Для побудови поляризаційних кривих (діаграм) за експериментальними даними, як правило, спочатку визначають потенціал корозії $E_{кор}$ за відсутності зовнішнього струму [4]. Далі анодно або катодно поляризують робочий електрод для побудови однієї з кривих діаграми. Після цього процес поляризації повторюють (зворотною полярністю зовнішнього струму) та будують другу вітку діаграми. Отримавши залежність E від логарифма зовнішнього струму в області позитивніше та негативніше потенціалу корозії, будують повну поляризаційну криву для конкретного металу Me . Якщо електрод поляризовано струмом достатньо високої густини, який зміщує потенціал від $E_{кор}$ на ≈ 100 мВ та більше [5], залежно від напрямку прикладеного струму, поверхня металу повністю працює як анод, або катод. Далі необхідно визначити тафелівські нахили (значення констант) за рівнянням Тафеля (2.4):

$$a = 2,3 \frac{RT}{\alpha F} \lg i_0; \quad b = -2,3 \frac{RT}{\alpha F}, \quad (2.5)$$

де R – газова стала; T – абсолютна температура; F – число Фарадея; i_0 – струм обміну; α – константа.

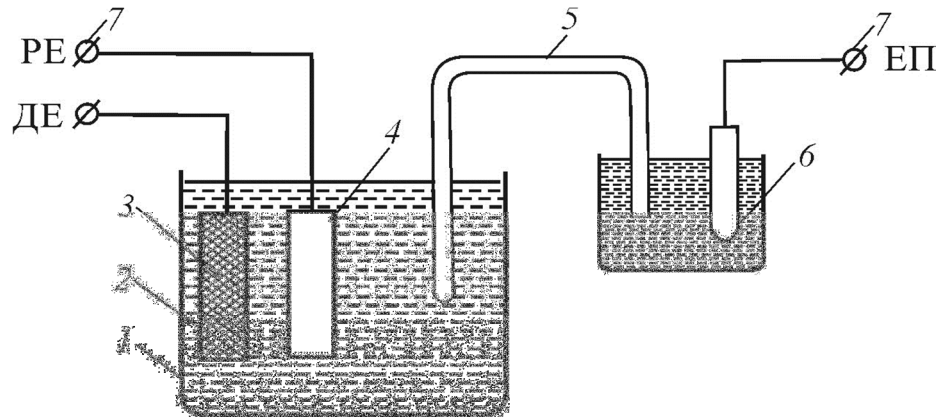
Для платини та паладію $\alpha \approx 2$, для заліза, нікелю, міді, ртуті та інших металів 0,4...0,6. Значення b добре відомі тільки для катодного виділення водню. Більшість з них лежать в межах 0,06...0,12 В. Константа b характеризує ступінь гальмування електрохімічної реакції. Що більше її значення, то сильніше гальмується електрохімічний процес. Якщо для однієї зі складових корозійного процесу (анодного чи катодного) значення цього коефіцієнта є значно більшим за інший, то говорять про переважаючий *анодний* або *катодний* контроль корозії.

Можливий також випадок, коли *опір електроліту* (середовища) настільки високий, що результуючого струму недостатньо для помітної поляризації анодних або катодних ділянок. Тоді маємо *омічний контроль*. Прикладом може бути металева поверхня, покрита пористим ізоляційним шаром. Корозійний струм тут визначається омічним падінням напруги в електроліті, який знаходиться в порах покриття.

2.4 Техніка поляризаційних досліджень

Досліди проводять [5] в електрохімічній комірці (рис. 2.4) за схемою, поданою на рис. 2.5. Допоміжний електрод 3 під'єднують до потенціостата 7 та занурюють у розчин електроліту 2 перед під'єднанням робочого електрода 4. Після складання установки для поляризаційних досліджень (рис. 2.5) в електрохімічну комірку (рис. 2.4) та поз. 1 (рис. 2.5) залити 3 %-й водний

розчин NaCl, виміряти загальний електродний потенціал металу, як описано у досліді 1 лабораторної роботи "Електродні потенціали матеріалів" [4].



1 – комірка поляризаційна; 2 – розчин; 3 – допоміжний електрод (ДЕ); 4 – робочий електрод (РЕ); 5 – соляний місток; 6 – електрод порівняння (ЕП); 7 – відповідні клеми потенціостата.

Рисунок 2.5 – Схема установки для поляризаційних досліджень:

Перед тим, як увімкнути у схему робочий електрод, необхідно заміряти лінійні розміри непокритої лаком ділянки зразка та обчислити його площу. Після експозиції зразка 10–20 хв. у 3 %-му розчині NaCl значення загального електродного потенціалу стабілізується ($E = E_{cm}$). Після цього за допомогою потенціостату подаємо на зразок поляризуючий потенціал ($E_n - E_{cm}$) (комірка увімкнута!). Значення струму поляризації заміряємо міліамперметром, попередньо підключеним до потенціостата.

Потенціал поляризації змінюємо ступінчасто з кроком 10 мВ у бік менших (негативніших) значень (в зону від'ємних потенціалів). Отже, спочатку вивчаємо *особливості катодного процесу*. Силу струму (I_n) на

металевому зразку фіксуємо після поляризації заданим потенціалом протягом 1 хв. Потенціал поляризації змінюємо в межах $|\Delta E| - 150$ мВ.

Аналогічно вивчаємо особливості *анодного процесу*, ступінчасто змінюючи потенціал поляризації в бік більших значень (в зону додатних потенціалів). Крок зміни потенціалу також повинен дорівнювати 10 мВ, $|\Delta E| - 150$ мВ, час експозиції 1 хв. Результати експерименту записуємо до протоколу досліджень (див. таблицю 2.1).

Таблиця 2.1 – Протокол досліджень зміни струму поляризації залежно від величини потенціалу поляризації [5]

К а т о д н и й п р о ц е с			
Метал:		Розчин:	Площа зразка:
Потенціал	$E, \text{ В}$	$E_1 \ E_2 \ E_3 \dots$	E_n
Сила струму	$I_n, \text{ А}$	$I_1 \ I_2 \ I_3 \dots$	I_n
Густина струму*	$i_n, \text{ А/см}^2$	$i_1 \ i_2 \ i_3 \dots$	i_n
Логарифм густини струму	$\lg i_n, \text{ А/см}^2$	$\lg i_1 \ \lg i_2 \ \lg i_3 \dots$	$\lg i$
А н о д н и й п р о ц е с			
Потенціал	$E, \text{ В}$	$E_1 \ E_2 \ E_3 \dots$	E_n
Сила струму	$I_n, \text{ А}$	$I_1 \ I_2 \ I_3 \dots$	I_n
Густина струму*	$i_n, \text{ А/см}^2$	$i_1 \ i_2 \ i_3 \dots$	i_n
Логарифм густини струму	$\lg i_n, \text{ А/см}^2$	$\lg i_1 \ \lg i_2 \ \lg i_3 \dots$	$\lg i_n$

* густина струму $i = I/S$, де S – площа відкритої ділянки металевого зразка.

На основі експериментальних даних будували графіки залежностей:

$E - \lg i_n$ – для катодного процесу (катодна поляризаційна крива),

$E - \lg i_n$ – для анодного процесу (анодна поляризаційна крива).

РОЗДІЛ 3

АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Техніка лабораторних електрохімічних досліджень

Практика корозійних досліджень установила правила, яких необхідно дотримуватися при проведенні експерименту [4, 5]. Ці правила наступні. Зразки металу для досліджень повинні мати точну характеристику (хімічний склад, походження, термічне оброблення, структуру) [7, 8]. Необхідно уникати зразків складної форми, оскільки з них важко усувати продукти корозії при визначенні швидкості руйнування та важко вимірювати їх площу. Зразки повинні бути однаковими для однієї серії випробувань. У випадку необхідності проведення також механічних випробувань, використовують зразки стандартного розміру та форми.

Здебільшого при лабораторних дослідженнях використовують зразки наступних розмірів:

- листові матеріали 25×50 мм;
- циліндричні зразки – діаметр 10...20, висота 40 мм;
- диски – діаметр 30, товщина 5...10 мм.

Для збереження вигідного співвідношення між поверхнею та масою зразка товщина зразка не повинна бути великою. Для прикладу, з пруткового матеріалу діаметром понад 20 мм доцільніше виготовляти зразки у вигляді дисків, аніж циліндричні [7, 8].

Зазначимо, що звичайні корозійні випробування довготривалі. Для скорочення часу застосовують пришвидшені випробування. Для цього

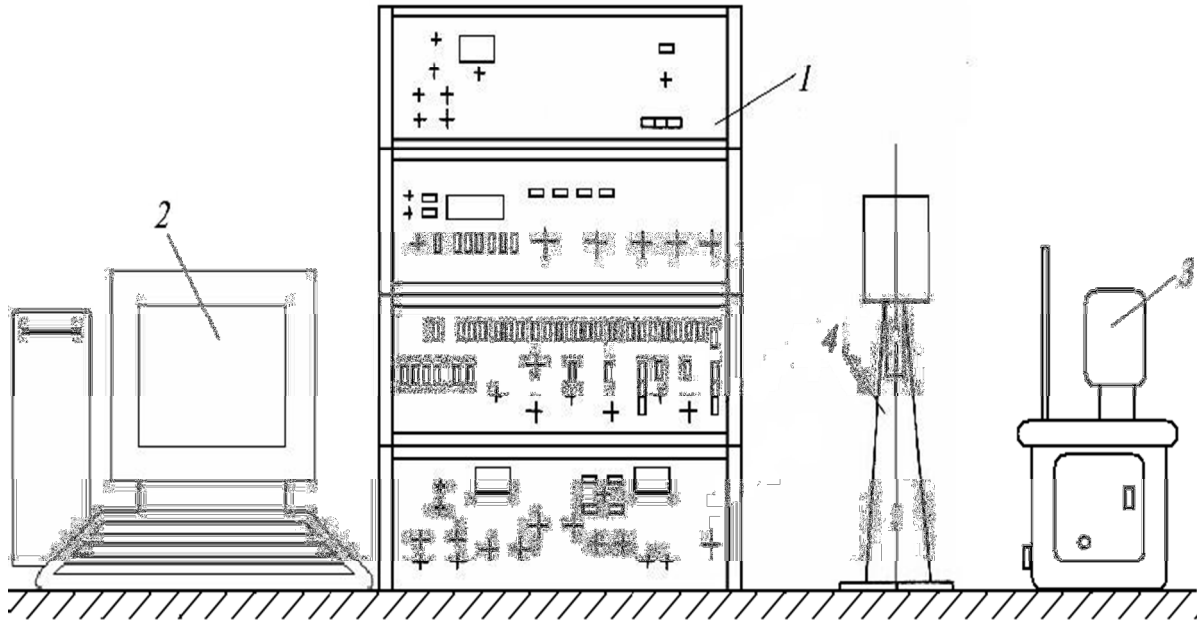
метали випробовують в жорсткіших умовах, аніж реальні умови їх експлуатації. Для пришвидшення дії середовища, залежно від конкретних умов, здійснюють підсилення дії того чи іншого фактору, який пришвидшує корозію. Зокрема добавляють речовини-окиснювачі, продувають повітря, перемішують розчини, підвищують температуру тощо.

У практиці кількісних вимірів корозійного руйнування металів застосовують методи – гравіметричний (ваговий), об'ємний, електрохімічні, електричні, магнітометричні тощо.

3.2 Програмно-апаратний комплекс для автоматизації досліджень

Програмно-апаратний комплекс (ПАК) [6], який призначений для автоматизації електрохімічних досліджень за допомогою системи вольтамперометричної СВА-1БМ (рис. 3.1), включає:

1. – модернізовану установку систему вольт-амперометричну СВА-1БМ промислового виготовлення (1, рис. 3.1);
- 2 – IBM-сумісний комп'ютер 2, з наявним вільним слотом розширення ISA шини передачі даних (рис. 3.1);
- 3 – термостат автономний проточний водяний U3 для забезпечення стабільного температурного режиму проведення дослідів;
- 4 – інтерфейсна спеціалізована плата (рис. 3.2), яка орієнтована на ISA шину, для керування системою вольт-амперометричною СВА-1БМ та для вводу отриманої інформації в комп'ютер;
- 5 – спеціалізоване програмне забезпечення (мова Borland C++), що працює під DOS, яке необхідне для контролю, налагодження системи в цілому та для проведення дослідів за різними режимами.



1 – промислова установка СВА-1БМ; 2 – IBM-сумісний комп'ютер;
3 – термостат U3; 4 – електропривод.

Рисунок 3.1 – Програмно-апаратний комплекс для автоматизації досліджень

Розробниками установки СВА-1БМ передбачено можливість введення результируючих вихідних сигналів струму та напруги при записі вольт-амперних характеристик (ВАХ) за допомогою аналогово-цифрового перетворювача персональної електронної обчислювальної машини (ПЕОМ).

Діапазони вимірюваних струмів корозії в системі СВА-1БМ перемикають в ручному режимі. Тому нами, в канали дискового та кільцевого електродів, введено додаткові вузли для контролю стану перемикачів діапазонів струму та вибору необхідного діапазону в автоматичному режимі.

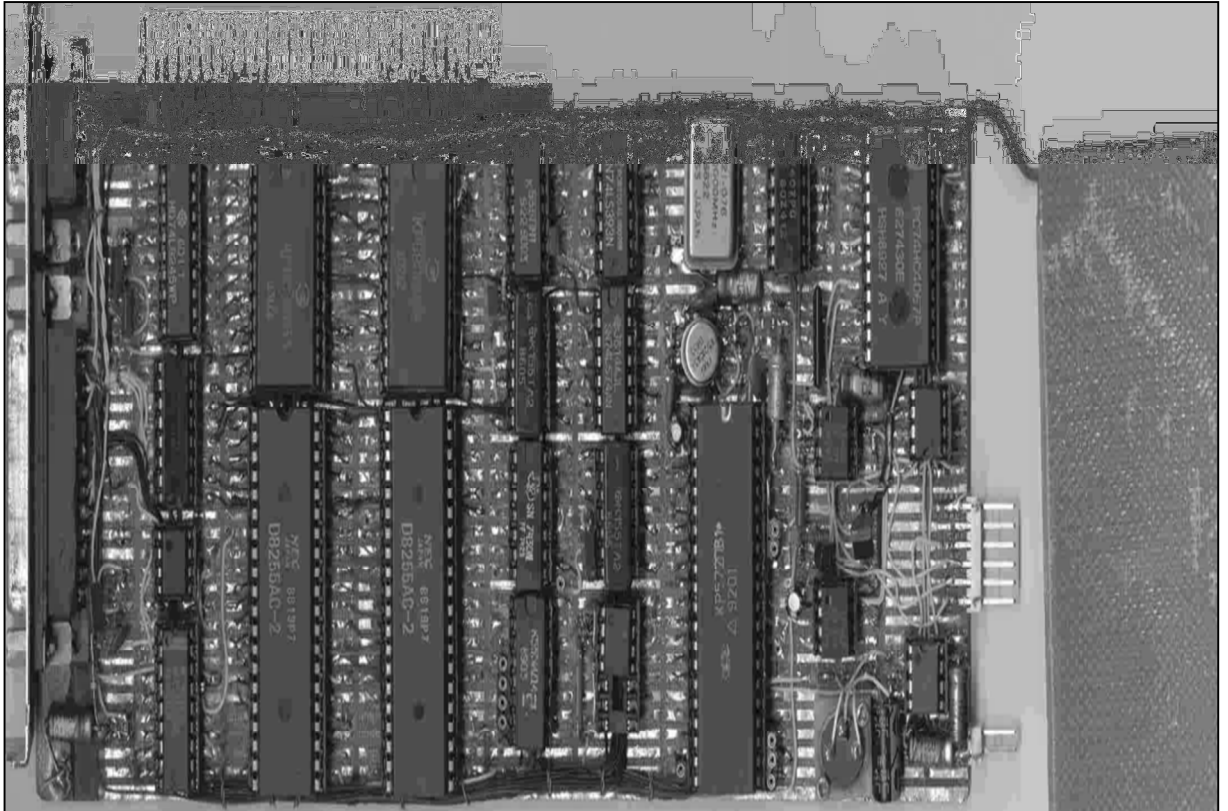


Рисунок 3.2 – Спеціалізована плата інтерфейсу (зовнішній вигляд).

При модернізації комплексу [6], в автономний термостат УЗ, введено два канали вимірювання температури: в термостаті та електрохімічній комірці (зразка). Релейний регулятор температури замінено семісторним із оптично-електронною розв'язкою кола управління.

Зв'язок установки СВА-1БМ та ІВМ-сумісного комп'ютера здійснюється за допомогою спеціалізованої інтерфейсної плати (рис. 3.3).

Блок-схема програмно-апаратного комплексу приведено на рис. 3.4. Обмін інформацією між ПЕОМ та складовими частинами установки СВА-1БМ 10 при роботі керуючих програм здійснюється в рамках протоколу ІСА шини. За платою спеціалізованого інтерфейсу в ІВМ РС зарезервовані адреси від 340Н до 35FH.

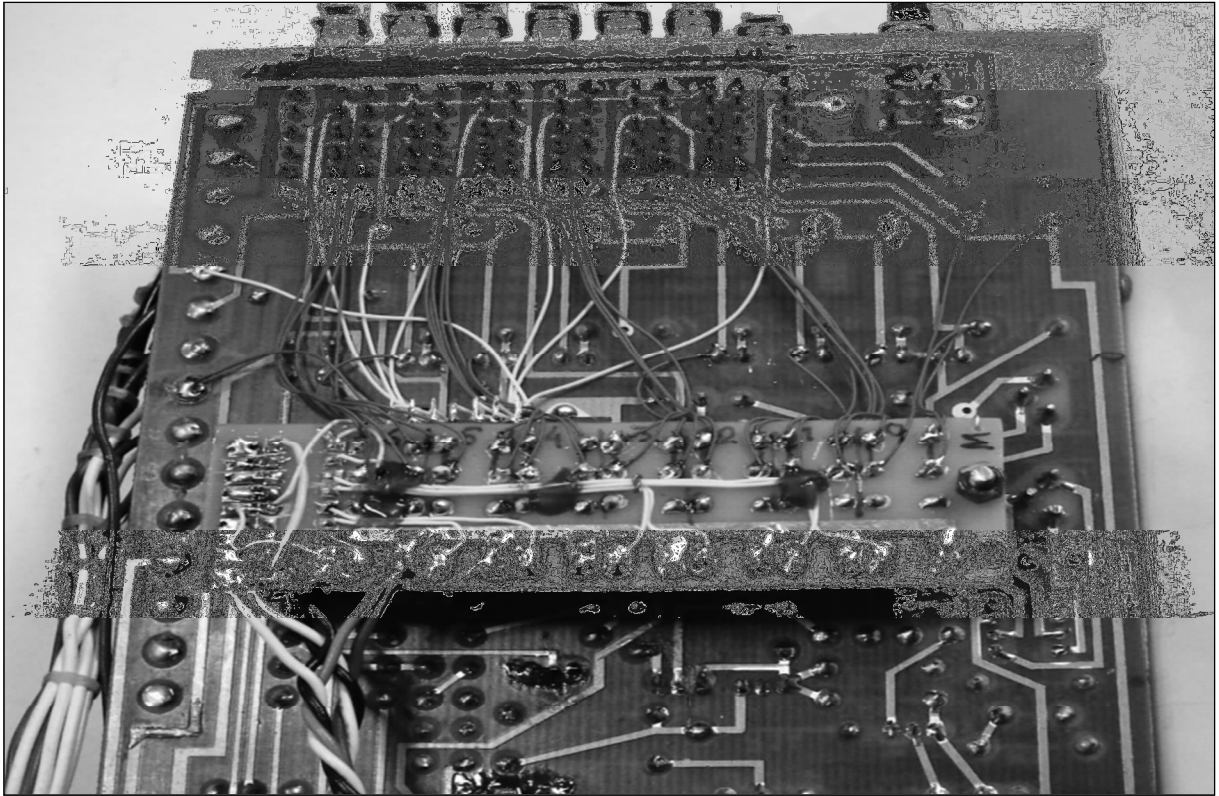


Рисунок 3.3 – Розташування додаткової спеціалізованої інтерфейсної плати з реле в блоці системи СВА-1БМ

Схема дешифратора адрес/команд 2, використовуючи сигнали материнської плати AEN, IORD, IOWR, A2-A9, виробляє сигнал CS0 (адреси 340-35FH), який активує шинний формувач 3 що під'єднаний до каналу даних комп'ютера D0-D7. Спеціальна схема затримки обміну 1, використовуючи сигнал CHRDY, подовжує час обміну з комп'ютером на 1,5 мкс. При цьому формуються подовжені сигнали A0, A1, CS0, WR, RD.

Частина схеми формує спільну для систем інтерфейсу магістраль адрес 4, магістраль команд 5 і магістраль даних 6. Програмований інтервальний таймер 15 типу 580ВИ53 забезпечує відлік системного часу для запису в файл із роздільною здатністю 1 мс. Два канали (0 і 1) програмованого інтервального таймера 9 типу 580ВИ53 використовуються для вимірювання швидкості обертання зразка.

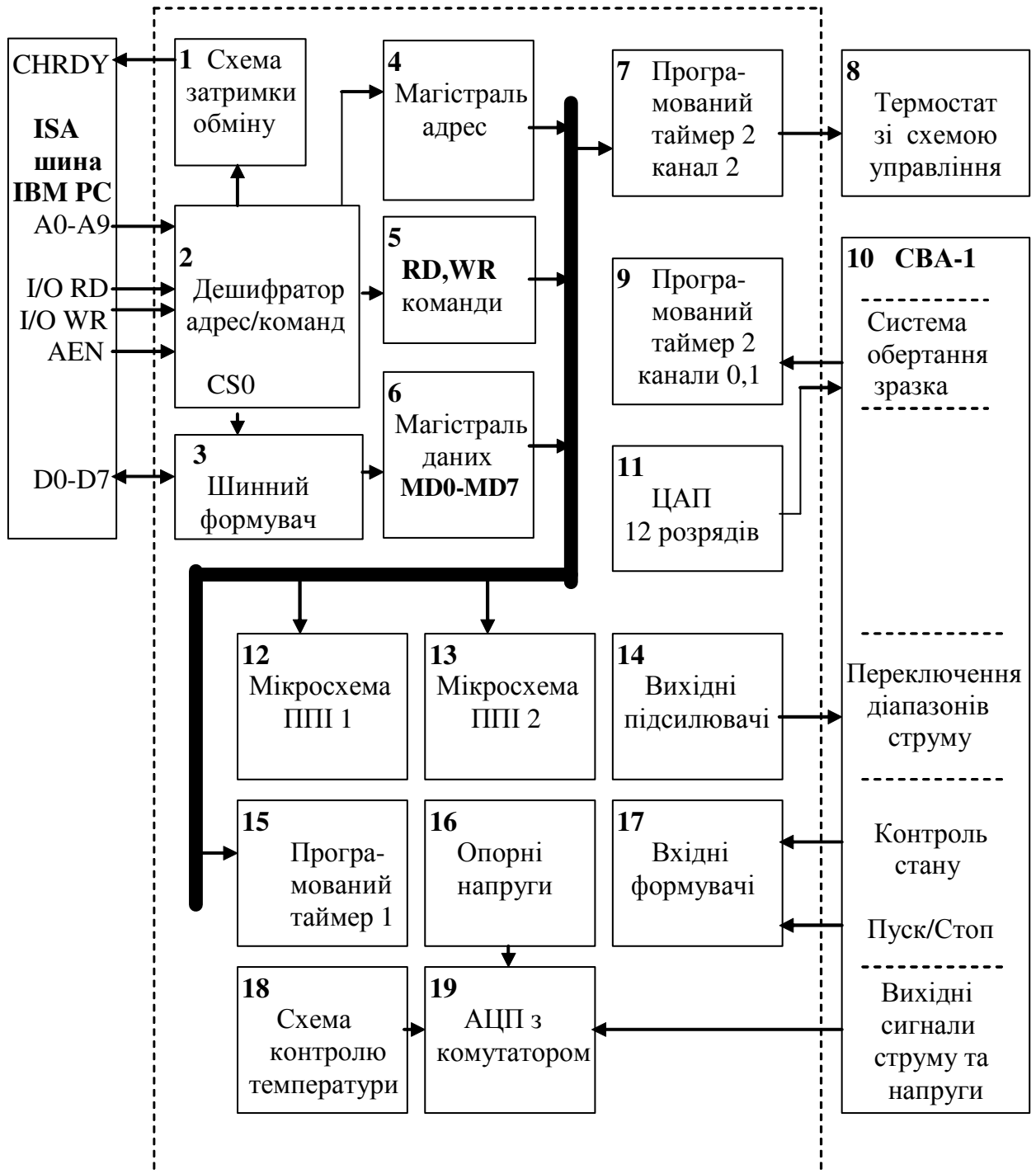


Рисунок 3.4 – Блок-схема програмно-апаратного комплексу модернізованої установки СВА-1БМ.

Величина швидкості обертання зразка задається напругою з виходу цифро-аналогового перетворювача 11. Програмований інтервальний таймер 7

формує імпульси з періодом 10 секунд, тривалість яких визначає час включення нагрівника термостату, і, відповідно, середню потужність нагріву. Тривалість цих імпульсів розраховується в процесі виконання програми, згідно з алгоритмом стабілізації температури.

Основу вимірювальної схеми складає дванадцяти розрядний аналогово-цифровий перетворювач 19, із шістнадцяти каналним вхідним комутатором. На входи комутатора подаються наступні напруги:

канал 0 – 1 опорна напруга +1,24 В;

канал 1 – 2 опорна напруга +2,5 В;

канал 2 – ТП1 зразок – температура зразка;

канал 3 – ТП2 термостат – температура термостату;

канал 4 – U_d – напруга дискового електроду;

канал 5 – I_d – струм дискового електроду;

канал 6 – U_k – напруга кільцевого електроду;

канал 7 – I_k – струм кільцевого електроду;

канал 8 – +5 В IBM;

канал 9 – Вихід ЦАП завдання швидкості обертання;

канал 10 – Зовнішній вхід – напруга нормального елемента;

канали 11-16 – GND - контроль нуля АЦП.

Опорні напруги виробляються спеціальною схемою 16 та використовуються для автоматичного калібрування АЦП. Контроль температури термостата та зразка (два ідентичні два канали) здійснюється терморезисторами та спеціальною нормуючою схемою контролю температури 18.

Вихідні підсилювачі 14 передають необхідні сигнали для перемикання реле автоматичного вибору діапазонів струму в каналах дискового та кільцевого електродів і для керування регулятором термостату. Бітові сигнали контролю стану перемикачів діапазону струмів і сигналів команд Пуск/Стоп поступають в ПЕОМ через формувачі 17.

Схеми та вузли плати інтерфейсу, а саме ЦАП, АЦП, комутатор, схеми однобітових сигналів контролю і сигналів управління зв'язані з внутрішніми магістралями за допомогою мікросхем програмованих паралельних інтерфейсів 12 і 13 типу 580BA55.

Напруги +5 В, +12 В і -12 В, які необхідні для роботи плати спеціалізованого інтерфейсу, поступають від блоку живлення комп'ютера. З допомогою роз'ємів DIN9 і DIN25 схеми інтерфейсної плати кабелями з'єднуються з термостатом, датчиками температури, системою обертання зразка та блоком вимірювання установки СВА-1БМ.

3.3 Програмне забезпечення автоматизації вимірювань

Програма VAX_FMI.EXE [6] призначена для автоматизації вимірювань електричних параметрів металевих зразків на вимірювальному програмно-апаратному комплексі Система вольт-амперометрична СВА-1БМ. Програму написано високорівневою мовою програмування С++ у середовищі Borland 5.5. Прикладна програма працює в операційній системі Windows на стаціонарних та портативних комп'ютерах. Для роботи використовується файл графічної системи egavga.bgi. Структурно програма поділяється на три основні частини: ввід початкових даних, цикл вимірювання та вивід результатів.

Після вводу необхідних даних про зразок та умови вимірювання, оператор має змогу контролювати хід експерименту на екрані монітора. Детальне унаочнення та коментарі уможливають оператору швидке розуміння суті процесу.

Результати вимірювання та їх обчислення записуються в текстовий файл у вигляді таблиці, зручної для роботи в інших редакторах (Excel, Origin

тощо). Можливе роздруковування результатів для представлення їх у вигляді протоколу.

3.3.1 Старт, ввід даних і підготовка процесу вимірювання.

Опис алгоритму. Після запуску програми проходить обов'язкова ініціалізація мікросхем програмованих паралельних інтерфейсів 580ВА55 і програмованих інтервальних таймерів 580ВИ53, що входять до складу спеціалізованої інтерфейсної плати комплексу.

Після ініціалізації відбувається цикл самоконтролю основних вузлів та автокалібрування АЦП за опорними напругами. При цьому контролюється стан внутрішніх регістрів, перевіряється працездатність і калібрування АЦП, працездатність ЦАП завдання обертів, системний таймер і таймери частотоміра. На цей момент робота системи стабілізації температури *заборонена*. При виявленні помилок програма, за командою оператора, припиняє роботу. В протилежному випадку програма переходить у режим очікування вводу початкових даних у головному текстовому меню.

Для виконання однієї з операцій вводиться відповідний символ у латинському регістрі:

w – створити файл для запису даних на диск;

P – умови запису;

S – старт;

D – діагностика;

Налагодження та контроль: *R, A, a, c, z, t, 1-6*;

Esc – завершення роботи.

Дві позиції меню – *Діагностика, Налагодження та Контроль* – використовують тільки зі службовою метою. Тому їх детально тут не описуємо.

В пункті меню *w* – *Створити файл для запису даних на диск*, оператор має можливість вказати ім'я файлу з *автоматичним розширенням .dat* для

збереження результатів вимірювань. Програма відслідковує дублювання назв та інформує оператора.

Для пробних запусків можливо створити *автоматичний файл result.dat*, котрий щораз перезаписується. Запис даних у файл починається після пуску процесу вимірювань у такому форматі: *заголовок*, *колонка*– час від початку; *колонка* – напруга на електроді, *V*; *колонка*– струм електроду, *A*; *колонка* – температура зразка, °C; *колонка*– швидкість обертання, об/хв.

В пункті меню *P – Умови запису* можливо задати та змінити наступні параметри: *S* – площа зразка в см² (*s* – в мм²); *n* – кількість вимірів в одному циклі; *t* – температура зразка, °C; *w* – швидкість обертання, об/хв; *T* – крок зміни при коректуванні температури; *W* – крок зміни при коректуванні швидкості обертання; *N* – крок зміни кількості вимірювань; *d* – вибрати дисковий електрод (*d*), (*κ* – кільцевий); *C* – зміна кольорів; *Esc* – вихід в основне меню.

В кожному пункті меню в кінці стрічки демонструється поточне значення параметра.

3.3.2 Запис вольт-амперних характеристик. Після вибору пункту меню *S – Старт* розпочинається цикл вимірювання. Дисплей переходить у графічний режим роботи на сторінку контролю та завдання обертів і температури. Активізується програмний цикл регулювання температури термостата. Для розрахунків необхідної потужності нагрівника, залежно від розбалансу температури, використовується пропорційно-інтегральний закон. Встановлення температури та частоти обертання досліджуваного зразка, виміряні реальні значення в цифровій і графічній формі відображаються на екрані дисплея.

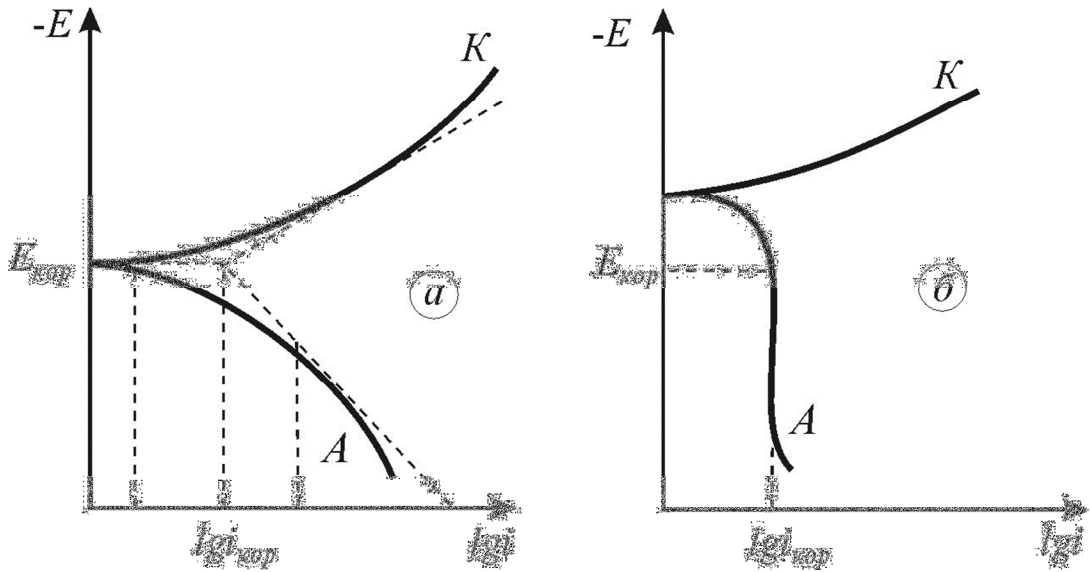
Після виходу термостата на заданий температурний режим система готова для проведення запису вольт-амперних характеристик (ВАХ). Оператор може перейти в інше графічне вікно (вікно ВАХ). При цьому інформація в попередньому вікні оновлюється в тіньовому режимі.

Після запуску установки системи вольт-амперометричної СВА-1БМ в одному зі штатних режимів програма розпочинає накопичення результатів запису ВАХ одночасно відображаючи їх на екрані. Діапазон вимірюваних струмів у вибраному каналі приладу змінюється автоматично.

Наявна можливість у процесі вимірювання переходити з одного вікна в інше. Причому в кожному вікні діють свої локальні меню для зміни (корекції) параметрів процесу. Після завершення запису ВАХ, накопичені дані записують на диск, термостат вимикається, програма переходить у режим очікування нового завдання електричних електрохімічних досліджень. Отримані потенціодинамічні поляризаційні криві (рис. 3.5) аналізували.

3.4 Аналіз поляризаційних потенціодинамічних кривих

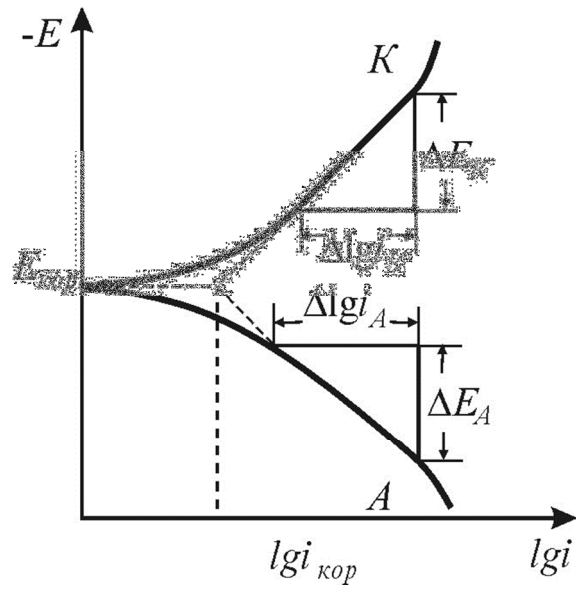
Насамперед, для експериментальних поляризаційних кривих, одержаних у різних середовищах знаходили лінійні ділянки, екстраполювати їх до потенціалу корозії $E_{кор}$ та визначали значення густини струму корозії (рис. 3.5). Порівнюючи значення густин струмів корозії робили висновок про швидкість розчинення (корозії) титанового сплаву та сталі у різних середовищах (табл. 3.3).



a – активно розчиняється; b – знаходиться в пасивному стані (не кородує)

Рисунок 3.5 – Схема визначення густини струму корозії за поляризаційними кривими для металу

По-друге, за схемою, поданою на рис. 3.6, знаходили коефіцієнти рівняння Тафеля ($E = a + b \lg i$) для катодної та анодної віток поляризаційних кривих. Порівнюючи значення $|b|$, робили висновок про ступінь гальмування катодного та анодного процесів (табл. 3.3).



$$b_k = \Delta E_k / (\Delta lgi_k)$$

$$b_a = \Delta E_a / (\Delta lgi_a)$$

Рисунок 3.6 – Схема визначення коефіцієнтів рівняння Тафеля

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Травмонебезпечні ситуації під час виконання робіт

Першочергове завдання охорони праці у лабораторії – звести до мінімуму ймовірність травмувань, захворювань працівників за одночасного забезпечення комфорту та максимальної продуктивності праці [9 – 12]. В лабораторії небезпечний виробничий чинник – виробничий чинник, дія якого на працівника за певних умов приводить до травми або іншого раптового погіршення здоров'я. Шкідливий виробничий фактор – виробничий чинник, дія якого на працюючого за певних умов приводить до захворювання або зниження працездатності.

За охорону праці у лабораторії, згідно нормативних актів, відповідає керівник. Виконання необхідних робіт стосовно організації та контролю дотримання головних вимог щодо охорони праці на робочих місцях, виробничої санітарії забезпечує інженер із охорони праці та протипожежної безпеки.

4.2 Організаційно-технічні рекомендації безпеки праці

4.2.1 Захист від шуму та вібрації. Шум це хаотичне поєднання звуків різної частоти та інтенсивності, а звук це хвильове коливання пружного середовища, за якого виникає надлишковий тиск [9].

За тривалої дії шуму на людину він викликає втому, ослаблення пам'яті та уваги, стає причиною зниження продуктивності праці, виробничого травматизму. Контроль за забезпеченням рівнів шуму здійснюється згідно ДСН 3.3.6.037-99 [9, 10]. У лабораторії знаходиться установка на абразивне зношування, яка викликає шум, при цьому рівень звукового тиску становить 73 дБ. Допустимий рівень шуму в лабораторіях із джерелами шуму становить 75 дБ. В даній лабораторії джерелом вібрації є полірувальна машина. Установка на абразивне зношування при роботі створює незначну вібрацію, яка не шкідлива для здоров'я людини.

Боротьба з шумом і вібраціями полягає в зменшенні рівнів шуму та вібрацій у джерелах, що їх створюють (заміна механізмів ударної дії – безударними, зворотно-поступальних рухів – обертовими з постійною швидкістю, точне зрівноважування механізмів і вузлів, що обертаються, застосування беззвучних металів і неметалевих матеріалів, з'єднання деталей, що співударяються з матеріалами, які мають велике внутрішнє тертя тощо); застосуванні засобів звуко- та віброізоляції (звукоізолюючі кожухи, віброізолювальні фундаменти), а також звуко- та вібропоглинання (покриття внутрішніх поверхонь кожухів звукопоглинальними матеріалами, застосування еластичних прокладок та амортизаторів).

4.2.2 Розрахунок вентиляції в лабораторії. Вентиляційні системи повинні забезпечувати постійну відносну вологість у лабораторії за нормальних умов, підтримувати повітрообмін, який забезпечує відсутність у повітрі отруйних парів, газів, пилу [9].

Проведемо розрахунок штучної вентиляції в лабораторії, прийнявши кратність повітрообміну $k = 4$. Знаходимо продуктивність вентилятора, виходячи з об'єму приміщення та кратності повітрообміну [9]:

$$W_B = V_{\text{від}} \cdot k, \text{ куб. м/год.} \quad (4.1)$$

де $V_{\text{від}}$ – об'єм відділення;

$$V_{\text{від.з}} = 32 \text{ куб.м; } V_{\text{від}} = 184 \text{ куб.м;}$$

k – кратність повітрообміну.

$$W_{вз} = 32 \times 4 = 128 \text{ куб.м / год};$$

$$W_{вк} = 184 \times 4 = 736 \text{ куб.м / год}.$$

Для забезпечення цього вибрано вентилятор серії ЕВР N4 з напором повітря 50 кгс / кв.м; ККД = 0,5.

4.2.3 Електробезпека в лабораторії. Напруга змінного електричного струму, що використовується для живлення установки, небезпечна для життя людини [10]. При її експлуатації необхідно дотримуватися правил техніки безпеки при роботі з електричними установками напругою до 1000 В. Працювати на установці дозволено особам, що вивчили правила техніки безпеки та пройшли відповідний інструктаж. Проведення ревізії, обслуговування та ремонту дозволяється тільки за повного відключення її від мережі живлення. Забороняється працювати на установці за відсутності заземлення.

Технічні засоби електробезпеки включають: ізоляцію струмоведучих частин, захисне заземлення, занулення, захисне вимикання, малу напругу, вирівнювання потенціалів, електричне розділення, компенсацію струмів замикання на землю, загороджувальні пристрої, запобіжну сигналізацію, блокування, знаки безпеки, інші засоби захисту та запобіжні пристрої.

Згідно з ПУЕ всі приміщення, за ступенем небезпечності ураження людини електричним струмом, поділяють на три класи [10]:

1 – без підвищеної небезпеки;

2 – з підвищеною небезпекою;

3 – особливо небезпечні.

Приміщення лабораторії, згідно ПУЕ, відноситься до категорії приміщень без підвищеної небезпеки. Це приміщення, в яких відсутні умови, які створюють підвищену та особливу небезпечність: сухі, без електропровідного пилу, з нормальною температурою та не струмопровідною підлогою.

Ймовірними причинами ураження електричним струмом у лабораторії є дотик до струмоведучих частин, відсутність захисного занулення, несправність електроустановки, заземлення.

Технічні засоби електробезпеки, що застосовуються на робочому місці:

- контроль та профілактика пошкодження ізоляції;
- використання малих напруг;
- електричне та механічне блокування;
- сигналізація та маркування;
- захист від випадкового дотику;
- використання захисних засобів та пристроїв (захисні окуляри, гумові рукавиці, прогумований фартух тощо);
- захист від переходу високої напруги на низьку;
- захисне заземлення;
- подвійна ізоляція;
- захисний розподіл напруг тощо.

Для захисту від ураження електричним струмом користуються також засобами індивідуального захисту [10]: діелектричними рукавицями, монтерськими засобами з ізолюючими ручками, діелектричними ботами, гумовими підстилками, ізолюючими підставками.

Як приклад захисту від ураження електричним струмом наведемо розрахунок заземлення. Необхідні дані для розрахунку [9]:

- ґрунт – глина;
- питомий опір глини в місці спорудження заземлювача – 40 ом·м;
- тип вертикального заземлювача – кутникова сталь;
- ширина полки кутникової сталі – 0,05 м;
- довжина вертикального заземлювача – 2,5 м;
- глибина розташування заземлювача в ґрунті – 0,8 м;
- віддаль між заземлювачами – 5,0 м;
- ширина сталеві смуги горизонтального заземлювача – 0,04 м;

–потужність трансформатора до 1 кв, $s = 53\text{кВА}$.

Вибираємо нормований опір заземлення ($r_{\text{норм}} = 10 \text{ ом}$).

Питомий опір глини [9]:

$$\rho_{pz} = \psi \rho_z; \rho_{pz} = 1,3 \cdot 40 = 52 \text{ Ом}\cdot\text{м},$$

де ψ – коефіцієнт сезонності;

ρ_z – питомий опір глини в місці спорудження заземлювача.

Опір розтікання струму в землі одного заземлювача R_g забитого на глибину 0,8 м від поверхні землі:

$$R_g = \rho_{pz} / 2 \cdot \pi \cdot l \cdot (\ln(2 \cdot l / d) + 0,5 \ln(4 \cdot t + l) / (4 \cdot t - l)), \quad (4.2)$$

де ρ_{pz} – розрахунковий питомий опір ґрунту, Ом·м;

l – довжина заземлювача, м;

d – діаметр заземлювача, м (для кутникової сталі $d = 0,96 \cdot b = 0,96 \cdot 0,05 = 0,048$ м).

t – відстань від поверхні землі до середини заземлювача, м;

$$t = h + 0,5 \cdot l = 0,8 + 0,5 \cdot 2,5 = 2,05 \text{ м}. \quad (4.3)$$

Звідси:

$$R_g = 52 / 2 \cdot 3,14 \cdot 2,5 \cdot (\ln(2 \cdot 2,5 / 0,048) + 0,5 \ln(4 \cdot 2,05 + 2,5) / (4 \cdot 2,05 - 2,5)) = 25,3 \text{ Ом}.$$

Приблизна чисельність заземлювачів:

$$n' = R_g / R_{\text{норм}} = 25,3 / 10 = 2,53 \quad (4.4)$$

Коефіцієнт використання заземлювачів при η_g

$$k = a / l = 5 / 2,5 = 2 \quad (4.5)$$

Число заземлювачів n' з врахуванням η_6

$$n' = R_a / R_{0,норм} \eta_6 = 25,3 / 10 \cdot 0,76 = 4 \text{ м} \quad (4.6)$$

Довжина смуги

$$L = a \cdot (n' - 1) = 5 \cdot 3 = 15 \text{ м} \quad (4.7)$$

Опір смугового заземлювача R_z закладеного на глибину h від поверхні землі:

$$R_z = \rho_{pz} \cdot (\ln(2 \cdot L^2 / b \cdot h)) / 2 \cdot \pi \cdot L \quad (4.8)$$

де L – довжина горизонтального заземлювача, м; b – ширина смуги, м;
 h – глибина розташування горизонтального заземлювача, м.

$$R_z = 25,3 \cdot (\ln(2 \cdot 15^2 / 0,04 \cdot 0,8)) / 2 \cdot 3,14 \cdot 15 = 2,37 \text{ Ом.}$$

Загальний опір заземлюючого пристрою

$$R_3 = R_6 \cdot R_z / n R_z \eta_6 + R_6 \eta_2 \quad (4.9)$$

де η_6 – коефіцієнт використання полоси.

$$R_3 = 25,3 \cdot 2,37 / (2,53 \cdot 2,37 \cdot 0,76 + 25,3 \cdot 0,45) = 3,76 \text{ Ом.}$$

Отже, заземлюючий пристрій складається з 24 заземлюючих штирів довжиною 2,5 м, розташованих у контурі. Відстань між штирями 5 м. Загальний опір заземлюючого пристрою 3,76 Ом, що задовольняє вимоги ПУЕ 1.7.654 і ГОСТ 12.2.007-75 [9], які встановлюють допустимий опір заземлення не більше 10 Ом.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

5.1 Джерела і види забруднення навколишнього середовищ

Господарська діяльність людини, пошкодження та виснаження природних ресурсів, стали причиною порушення усталеного природного кругообігу речовин та енергетичних потоків, порушення динамічної рівноваги біосфери [11, 12]. Виробнича діяльність підприємства пов'язана з шкідливим впливом на довкілля. Можна виділити наступні види забруднень, які утворюються внаслідок виробничо-господарської діяльності підприємства:

- 1) фізичні забруднення – це зміни теплових, фізичних, радіаційних, світлових полів, гравітаційних сил, а також шуми, вібрації. Виробнича діяльність майстерні характеризується незначними фізичними забрудненнями;
- 2) механічні забруднення – це тверді частки та предмети, викинуті в зовнішнє середовище. Для виробничої майстерні механічними забрудненнями є пил, зола, залишки металобрухту;
- 3) хімічні забруднення – це тверді, газоподібні та рідкі речовини, хімічні елементи та сполуки штучного походження, що надходять у біосферу. Виробнича діяльність майстерні супроводжується хімічним забрудненням оточуючого середовища паливо-мастильними матеріалами, окисами вуглецю, мийними засобами, парами розчинників та фарб;

4) біологічні забруднення – це нові мікроорганізми, шкідливі хвороботворні бактерії та віруси, що з'являються внаслідок діяльності людини. Для виробничої майстерні цей вид забруднень не характерний.

5.2 Охорона атмосфери

На даному етапі розвитку людства, коли можливості самоочищення атмосфери вичерпано, важливе значення серед природоохоронних заходів має охорона атмосферного повітря. Адже щорічно по всій Україні в атмосферу виділяється близько 17 млн. тон шкідливих речовин, тобто по 300 кг на кожну людину. Забруднення повітря є причиною глобальних змін клімату, шкідливого впливу на здоров'я людей, особливо на легеневу та серцево-судинні системи.

Основними джерелами забруднення атмосферного повітря є продукти горіння органічних енергоносіїв (вугілля, нафти, газу), а також викидні гази автотранспорту.

Для охорони атмосферного повітря слід збільшувати коефіцієнти корисної дії енергетичних установок, економити електроенергію, вдосконалювати засоби очищення.

Для очищення повітря від газових домішок використовують адсорбцію рідиною, адсорбцію твердою речовиною та каталітичне перетворення.

Найпоширенішим методом є адсорбція, яка ґрунтується на здатності дрібнодисперсних речовин (активоване вугілля, силікагелі, неоліти, порувате скло) вловлювати в газах за певних умов ті чи інші шкідливі компоненти. Щоб очистити гази від твердих домішок, їх пропускають через спеціальну камеру, де за допомогою гравітаційних, інерційних чи електростатичних сил частинки відкидаються з газового потоку.

Важливе значення для охорони атмосферного повітря має своєчасне та якісне регулювання дизельної паливної апаратури та систем живлення тракторів та автомобілів, озеленення території підприємства.

Протягом лютого працівники хімічної лабораторії КП «Адміністративно-технічне управління» обстежили стан с. Ожидів яке нещодавно зазнало фосфорної аварії. Вимірювання проводилися на визначення забруднення атмосферного повітря викидами від автотранспорту. Відтак, повітря досліджувалось на вміст оксиду вуглецю, оксиду азоту, діоксиду азоту та сірчистого ангідриду на висоті 1,5 – 1,6 м.

У результаті проведених замірів, на усіх обстежених перехрестях були зафіксовані перевищення максимально разової гранично допустимої концентрації оксиду вуглецю (в 1,1 – 2,3 рази) та діоксиду азоту (в 1,2 – 2,7 рази). Концентрації оксиду азоту та сірчистого ангідриду виявились у межах норми на усіх обстежених ділянках.

5.3 Охорона гідросфери

Основним джерелом забруднення гідросфери є стічні води ремонтного підприємства, які містять залишки мийних розчинів, паливо-мастильних матеріалів, частки механічних забруднень тощо [11, 12].

Найбільш розповсюдженими забрудненнями водних джерел є нітрити (до 2ГДК – гранично-допустимих концентрацій), феноли (до 16ГДК) і нафтопродукти (до 10ГДК), сполуки міді (до 11ГДК), цинку (до 10ГДК), марганцю (до 50ГДК). Колі-індекс води десятків малих рік України сягає від 2 до 20 тисяч. Вплив антропогенного фактора на вміст азоту в загальному змісті мінерального азоту в поверхневих водах деяких рік складає 92%.

До природних джерел забруднення відносять дуже мінералізовані підземні або морські води, які можуть проникати у продуктивний прісний водоносний горизонт при експлуатації водозабірних споруд

З метою зменшення шкідливого впливу на довкілля стічні води слід очищати, використовуючи локальні очисні споруди. Тут очищення від конкретних шкідливих речовин здійснюється простіше, дешевше та ефективніше.

Для очищення стічних вод використовують механічні, механіко-хімічні, хімічні, фізико-хімічні та біохімічні методи.

Метод механічного очищення полягає в механічному вилученні із стічних вод нерозчинних домішок за допомогою флотаційних і фільтраційних установок, решіток, сит, жировловлювачів, нафтовловлювачів та вловлювачів піщаних фракцій. Цим способом з промислових стічних вод можна вилучити до 95% нерозчинних домішок.

Для повного очищення води на наступному етапі рекомендують використовувати хімічні методи: коагуляцію, флокуляцію, адсорбцію, іонний обмін, електроліз, екстракцію, озонування, термічний метод. За допомогою адсорбції з стічних вод вилучають переважно органічні сполуки. Як адсорбент використовують активоване вугілля. Екстракція використовується для вилучення із стічних вод фенолів і жирних кислот за допомогою обробки їх різними органічними розчинниками, які не змішуються з водою. Речовини, що містяться в стічних водах, переходять в екстрагент, який відокремлюють відстоюванням.

За результатами спостережень, що проводяться в двох створах ріки, якість її води по ряду показників: хлоридів, сульфатів, амонію сольового, нітритів, нітратів, цинку, свинцю відповідає вимогам, встановленим до водойм рибогосподарського та культурно-побутового водокористування. Вміст БСК5, ХСК, фосфатів, нафтопродуктів, заліза та важких металів (Cr, Mn, Ni, Cd, Co) перевищує нормативи рибогосподарських ГДК в 2– 6 разів.

5.4 Захист ґрунтів

Земельні ресурси, ґрунтовий покрив належать до вирішальних чинників існування біосфери нашої планети. Земля відіграє найважливішу загально біосферну роль і є фундаментальною основою функціонування атмосфери, гідросфери, рослинного та тваринного світу, а також людського суспільства. В аграрному секторі земля – головний засіб виробництва, найважливіша складова ресурсної бази землеробства, а тому її охорона потребує особливої уваги.

У виробничій діяльності майстерні ґрунти забруднюються мастилами та паливом. Тому з метою запобігання забрудненню земель слід використовувати спеціальні посудини для збору відпрацьованого масла для подальшої регенерації, застосовувати спеціальні закриті методи заправки техніки паливо-мастильними матеріалами, надавати належну увагу правилам зберігання цих матеріалів.

Серйозні проблеми для навколишнього середовища виникають у зв'язку із застосуванням в сільському господарстві мінеральних добрив. Внесені на поля, вони лише частково поглинаються рослинами. Значна кількість азоту і фосфору потрапляє в ґрунті і підземні води, а з них мігрує до рік і озер. Найбільше їх накопичується в слабопротічних водоймах. Однак ведення інтенсивного сільського господарства без застосування добрив неможливе, бо нереально було б підтримувати і збільшувати родючість ґрунтів. Тому важливо знати деякі властивості основних видів добрив.

Азот особливо необхідний для формування нових клітин, тому його найактивніше поглинають молоді рослини. В залежності від забезпеченості ґрунту поживними речовинами і сільськогосподарської культури на поля вносять від 100 до 300 кг/га. Надлишок азоту небажаний, бо він зумовлює надмірний ріст вегетативних органів та погіршує якість рослинної продукції.

Він особливо небезпечний в нітратній формі, бо може бути причиною отруєння організмів. Частина азоту випаровується в атмосферу у вигляді газоподібних сполук, забруднюючи ними повітря.

Значна частина фосфорних добрив також не поглинається рослинами. Незважаючи на низьку розчинність фосфорних добрив та їх слабку міграційну здатність, все ж головні геохімічні напрями їх глобального кругообігу спрямовані у бік озер, гирл рік, морів і шельфів океану. В малих водоймах сполуки фосфору сприяють евтрофікації (протуханню) озер. У карбонатних ґрунтах, де рухомість фосфору особливо низька, може мати місце їх зафосфачування. Однак основна проблема полягає у вичерпності ресурсів фосфору, що веде до порушення необхідного співвідношення N : P : K (бажане співвідношення — у межах від 1:1:1 до 1: 2 : 2,5).

Дуже важливим елементом живлення є калій. Використовують калійні добрива різного складу. Найчастіше вносять хлорид калію. Проте його застосування веде до нагромадження у ґрунті іону хлору, який є шкідливим для багатьох сільськогосподарських культур. Наприклад, у картоплі він зумовлює водянистість.

РОЗДІЛ 6

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОПОЗИЦІЙ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У кваліфікаційній роботі здійснено вибір устаткування [13, 14] для виконання оцінки вольтамперометричними електрохімічними методами. Для електрохімічних досліджень використано установку привідною частиною якої є двигун РД-09, який живиться від напруги змінного струму 127 В. Потужність двигуна 15 Вт. Для вимірювання електродного потенціалу E використовували блок високоомного вольтметра потенціостату, який передбачає запис у часі реєстрованого сигналу за допомогою само пишучого мікроампер вольтметра. При здійсненні такої оцінки доцільно використовувати трансформатори, які прості за конструкцією, мають малі розміри та високий ККД (до 90%). Крім того, витрати електроенергії трансформаторами в 2 рази менші порівняно з генераторами.

В лабораторії споживання електроенергії за рік складає близько $W=700\,000$ кВт·год. На теперішній час вартість 1 кВт·год. становить $C=2,73$ грн.

Вартість спожитої електроенергії в рік визначаємо за виразом:

$$B = W \cdot C. \quad (5.1)$$

Підставляємо значення у вираз (5.1) та отримуємо:

$$B = 700\,000 \cdot 2,73 = 1\,911\,000 \text{ грн.}$$

За величини коефіцієнта потужності 0,87 нараховується надбавка у розмірі 2% при оплаті за електроенергію. Це складає:

$$H = 1\,911\,000 \cdot 0,02 = 38\,220 \text{ грн.}$$

Якщо вибір устаткування вибрано вірно та обґрунтовано, значення коефіцієнта потужності буде на належному рівні, надбавку платити не потрібно. Кошти за недотримання величини коефіцієнта потужності можливо зекономити. Тому доцільно для підтримання необхідної величини коефіцієнта потужності використати систему автоматичного керування.

Вартість пропонованої системи автоматичного керування коефіцієнта потужності складає:

- конденсаторні батареї 5 кВАр (8 шт) – 6 800 грн;
- контактори для комутації на 5 кВАр (8 шт – 7 600 грн;
- контролер для компенсації реактивної потужності 9 860 грн.

Сумарна вартість пристрою компенсації складе:

$$K = 6\,800 + 7\,600 + 9\,860 = 24\,260 \text{ грн.}$$

Експлуатаційні витрати становлять приблизно 30% від вартості обладнання:

$$Ve = 0,3 K. \tag{5.2}$$

$$Ve = 0,3 * 24\,260 = 7\,278 \text{ грн.}$$

Значення терміну окупності визначаємо як відношення суми капітальних вкладень та експлуатаційних витрат до заощаджених коштів:

$$T = (K + Ve) / H. \tag{5.3}$$

$$T = (24\,260 + 7\,278) / 38\,220 = 0,83 \text{ року.}$$

Зведемо розраховані значення у таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Техніко-економічні показники

Показник	Значення
Кількість спожитої електроенергії, кВт·год/рік	700 000
Вартість 1 кВт·год, грн.	2,73
Вартість спожитої електроенергії в рік, грн.	1 911 000
Значення коефіцієнта потужності, до компенсації	0,87
Надбавка, при платі за електроенергію, %	2
грн.	38 220
Вартість системи компенсації, грн.	24 260
Значення коефіцієнта потужності, після компенсації	0,92
Експлуатаційні витрати, грн	7 278
Термін окупності, років	0,83

ВИСНОВКИ

1 Модернізовано та комп'ютеризовано систему вольтамперометричну СВА-1БМ,

2 Створено тестову програму налагодження та калібрування управління експериментом, робочу програму проведення електрохімічних досліджень, збільшено ступінь швидкодії потенціостату до 10^{-6} с.

3 Програма написана високорівневою мовою програмування C++ у середовищі Borland 5.5. Прикладна програма працює в операційній системі Windows на стаціонарних та портативних комп'ютерах. Для роботи використовується файл графічної системи egavga.bgi. Структурно програма поділяється на три основні частини: ввід початкових даних, цикл вимірювання та вивід результатів.

4 Після вводу необхідних даних про зразок та умови вимірювання, оператор має змогу контролювати хід експерименту на екрані монітора. Детальне унаочнення та коментарі уможливають оператору швидке розуміння суті процесу.

5 Запропоновано заходи щодо охорони довкілля, покращення виробничої санітарії та безпечних умов праці в виробничих приміщеннях. Показано, що для покращення екологічного стану слід розробити екологічний паспорт підприємства. Здійснено техніко-економічне обґрунтування запропонованого технічного рішення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1 Попович В., Кондир А., Плешаков Е. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: Практикум: Навч. посібник. Львів: Світ, 2009. 552 с.
- 2 Попович В. В., Попович В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Підручник. Львів: Папуга, 2003. 464 с.
- 3 Антропов Л. І. Теоретична електрохімія. К. : Либідь, 1993. 544 с.
- 4 Похмурський В. І., Калахан О. С. Методи корозійних досліджень. Електродні потенціали металів. Методичні вказівки до лабораторних робіт. Львів. Наук. товариство ім. Шевченка. 2002. 12 с.
- 5 Похмурський В. І., Калахан О. С. Методи корозійних досліджень. Поляризація та швидкість корозії. Методичні вказівки до лабораторних робіт. Львів. Наук. товариство ім. Шевченка. 2002. 13 с.
- 6 Калахан О. С., Савицький Г. В. Програмно-апаратний комплекс для автоматизації електрохімічних досліджень. «Обчислювальні методи і системи перетворення інформації», зб. праць н-т конф. Львів, 7-8 жовтня 2010. Львів : ФМІ НАНУ, 2010, 280 с. (С. 199 – 202).
- 7 Технологія конструкційних матеріалів: Підручник для ВНЗ / За ред. М.А. Сологуба. Київ: Вища шк., 2002. 374 с.
- 8 Кондир А. І., Паздрій І. П., Пелех М. П., Швачко С. Г. Лабораторний практикум з технології конструкційних матеріалів та матеріалознавства: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт. Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2006. 76 с.
- 9 Лехман С. Д., Рубльов В. І., Рябцев Б. І. Запобігання аварійності і травматизму у сільському господарстві: навч. посібник. Київ: Урожай, 1993. 270с.

10 Гряник Г. М., Лехман С. Д., Бутко Д. А. Охорона праці. К.: Урожай, 1994. 272 с.

11 Бутко Д. А., Луценков В. Л., Лехман С. Д. Практикум з охорони праці. К.: Урожай, 1995. 144 с.

12 Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Мельников О. В. Основи охорони праці. Львів: Афіша, 1999. 347 с.

13 Руснак П. П., Андрійчук В. Г., Ільєнко А. А. Економіка підприємства: навч. посібник. Біла Церква, 2003. 256 с.

14 Марченко В. Методика визначення показників економічної ефективності використання комплексів машин та машинно-тракторного парку. Збірник наук. пр. НАУ. Механізац. с.г. вир-ва. Т.ХІV. 2003. С.189-194.