

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП – 06.00.00.000 ПЗ

Група АКПзд -23-2К

Михайло Дудич

2025

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Дудич Михайло Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5:66.098:66.097
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Автоматизація процесу виробництва електролітичного діоксиду
(назва роботи)

марганцю

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Нормоконтроль

асистент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПзд-23-2К

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

М.І.Дудич

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

М. В. Шавранський

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.І. Фешанич

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 174-Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

А.І.Лагойда

202__ року

З А В Д А Н Н Я **НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Дудичу Михайлу Івановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю

керівник роботи Шавранський Михайло Васильович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 07 » 05 20 25 року № 53/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025р.

3. Вихідні дані до роботи матеріали практики, технологічний регламент

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

4.1. Аналіз технологічного процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю як об'єкта автоматизації

4.2. Математичне моделювання та ідентифікація процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю

4.3. Синтез системи керування процесом виробництва електролітичного

діоксиду марганцю

4.4 Розробка схем і алгоритмів для автоматизації процесу

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

БР.АКП – 05.00.00.000 01 - Технологічна схема. БР.АКП – 05.00.00.000 02 -

Основні технологічні параметри процесу виробництва ЕДМ. БР.АКП –

05.00.00.000 03 - Моделювання та ідентифікація процесу. БР.АКП –

05.00.00.000 04 - Синтез системи керування в середовищі MATLAB. БР.АКП

– 05.00.00.000 05 - Аналіз стійкості системи керування: динамічні

характеристики. БР.АКП – 05.00.00.000 06 - Перехідна характеристика:

результати аналізу показників якості регулювання. БР.АКП – 05.00.00.000 07

– Функціональна схема автоматизації

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 06.11.2024 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю як об'єкта автоматизації	13.05.2025 р.	Виконано
2	Математичне моделювання та ідентифікація процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю	20.05.2025 р.	Виконано
3	Синтез системи керування процесом виробництва електролітичного діоксиду марганцю	30.05.2025 р.	Виконано
4	Синтез системи керування процесом виробництва електролітичного діоксиду марганцю	05.06.2025 р.	Виконано
5	Висновки по роботі	08.06.2025 р.	Виконано
6	Оформлення БР	12.06.2025 р.	Виконано

Студент _____
(підпис)

М.І. Дудич
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

М.В. Шавранський
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 58 сторінок, 15 рисунків, 6 таблиць, 30 джерел.

Тема: «Автоматизація процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю»

Об'єкт дослідження: технологічний процес електролізу марганцевих сполук з отриманням діоксиду марганцю, зокрема його параметри, режими роботи та особливості автоматизації.

Мета роботи: розробка системи автоматизації процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю з метою підвищення ефективності технологічного процесу, забезпечення стабільності якості продукції та оптимізації енергоспоживання.

Методи дослідження: методи та засоби автоматизації технологічного процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю, включаючи математичне моделювання, синтез систем керування та їх оптимізацію.

Результати бакалаврської роботи: розроблено математичні моделі процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю, що дозволяють описати динамічні характеристики системи. Синтезовано алгоритми керування, що забезпечують підтримку оптимальних параметрів процесу (температура, струм, концентрація електроліту) на основі ПІД-регулювання. Проведено моделювання роботи АСК у MATLAB, що підтвердило стабільність та ефективність запропонованих алгоритмів. Проведено валідацію моделі шляхом порівняння експериментальних та розрахункових даних, що підтвердило адекватність розроблених моделей. Розроблено документацію на систему автоматизації, включаючи електричні схеми, алгоритми керування та програмне забезпечення для ПЛК.

Ключові слова: автоматизація, виробництво, електролітичний діоксид марганцю, електроліз, математичне моделювання, ПІД-регулювання, система керування, програмований логічний контролер (ПЛК), MATLAB/Simulink, оптимізація процесу.

ANNOTATION

The bachelor's thesis contains: 58 pages, 15 figures, 6 tables, 30 sources.

Topic: "Automation of the electrolytic manganese dioxide production process"

The object of the study: the technological process of electrolysis of manganese compounds to obtain manganese dioxide, in particular its parameters, operating modes and automation features.

The purpose of the work : to develop an automation system for the electrolytic manganese dioxide production process in order to increase the efficiency of the technological process, ensure the stability of product quality and optimize energy consumption.

Subject of the study: methods and means of automating the technological process of electrolytic manganese dioxide production, including mathematical modeling, synthesis of control systems and their optimization.

Design results: Mathematical models of the electrolytic manganese dioxide production process have been developed, allowing to describe the dynamic characteristics of the system. Control algorithms were synthesized to maintain optimal process parameters (temperature, current, electrolyte concentration) based on PID control. Simulation of the ACS operation was performed in MATLAB, which confirmed the stability and efficiency of the proposed algorithms. Model validation was performed by comparing experimental and calculated data, which confirmed the adequacy of the developed models. Documentation for the automation system was developed, including electrical circuits, control algorithms, and software for PLC.

Keywords: Automation, production, electrolytic manganese dioxide, electrolysis, mathematical modeling, PID control, control system, programmable logic controller (PLC), MATLAB/Simulink, process optimization.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ДІОКСИДУ МАРГАНЦЮ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	10
1.1 Властивості, методи одержання й області застосування.....	10
1.2 Теоретичні основи технологічного процесу.....	11
1.3 Теоретичні основи технологічного процесу.....	11
1.4 Електродна щільність струму.....	12
1.5 Матеріали електродів	13
1.6 Температура	13
1.7 Взаємозв'язок умов електролізу й властивостей ЕДМ.....	14
1.8 Опис технологічної схема виробництва діоксиду марганцю.....	15
1.9 Конструкція електролізерів.....	18
Висновки до розділу.....	20
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ДІОКСИДУ МАРГАНЦЮ.....	21
2.1 Математичні моделі процесу електролізу марганцю.....	21
2.2 Ідентифікація моделей процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю.....	25
2.3 Валідація моделей.....	27
Висновки до розділу.....	30
3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ДІОКСИДУ МАРГАНЦЮ.....	32
3.1 Система керування процесом.....	32
3.2 Аналіз стійкості системи керування.....	36

					<i>БР.АКПзд - 06.00.00.000 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докумен.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>	<i>Дудич М. І.</i>				<i>Автоматизація процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю</i>	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевірів</i>	<i>Шавранський М</i>					Н	7	58
<i>Рецензент</i>	<i>Фешанич Л.І</i>					<i>АКПзд-23-2К ІФНТУНГ</i>		
<i>Н. Контр.</i>	<i>Лагойда Л.І.</i>							
<i>Затвердив</i>	<i>Лагойда А.І.</i>							
ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА								

3.3 Аналіз показників якості регулювання	38
Висновки до розділу.....	41
4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК.....	43
4.1 Розробка системи керування процесом виробництва електролітичного діоксиду марганцю.....	43
4.2 Розробка функціональної схеми автоматизації.....	44
4.3 Програмне забезпечення для ПЛК типу Simens s7 - 1200.....	45
4.4 Алгоритми керування.....	50
4.5 Опис електричної принципової схеми автоматизації процесу.....	52
Висновки до розділу	54
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	55
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	56

					<i>БР.АКПзд - 06.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АСК – автоматизована система керування

ЕДМ – електролітичний діоксид марганцю

ЛАЧХ – логарифмічна амплітудно-частотна характеристика

ММ – математичне моделювання

ПЛК – програмований логічний контролер

ПФ – передавальна функція

ПХ – перехідна характеристика

САК – система автоматичного керування

СК – система керування

ТП – технологічний процес

ФСА – функціональна схема автоматизації

					БР. АКПзд - 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ВСТУП

В умовах сучасного розвитку промисловості автоматизація технологічних процесів відіграє ключову роль у підвищенні ефективності виробництва, стабільності якості продукції та зниженні енергетичних витрат. Зокрема, в хімічній промисловості, де широко застосовуються електрохімічні процеси, автоматизація дозволяє оптимізувати керування складними технологічними параметрами.

Електролітичний діоксид марганцю (ЕДМ) є важливим продуктом у виробництві сухих елементів живлення, акумуляторів та інших електрохімічних пристроїв. Технологічний процес отримання ЕДМ пов'язаний із низкою складних фізико-хімічних явищ, зокрема електролізом марганцевих сполук, що потребує точного контролю параметрів, таких як температура електроліту, струм електролізу та концентрація реагентів.

Основна проблема, що вирішується в даній роботі, полягає в автоматизації керування процесом електролізу з метою забезпечення стабільних параметрів вихідного продукту та підвищення енергоефективності.

Актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю створення автоматизованих систем керування (АСК), які забезпечують ефективне регулювання технологічних параметрів у режимі реального часу та підвищення надійності виробничого процесу.

Мета роботи полягає у розробці математичних моделей процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю, синтезі алгоритмів керування та створенні автоматизованої системи з використанням програмованого логічного контролера (ПЛК).

У процесі дослідження буде виконано математичне моделювання основних етапів електролізу, аналіз стійкості системи керування, синтез алгоритмів регулювання та розробка програмного забезпечення для реалізації системи на базі ПЛК.

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ДІОКСИДУ МАРГАНЦЮ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Властивості, методи одержання й області застосування

Діоксид марганцю має окисні, каталітичні й адсорбційні властивості. Завдяки своїм властивостям він знаходить широке застосування в багатьох галузях промисловості. Діоксид марганцю використовується як деполяризатор у сухих гальванічних елементах. Він застосовується як окислювач, адсорбент, каталізатор у хімічній, харчовій, металургійній промисловості; його використовують при одержанні марганцю, сикативів, як компонент коричневого пігменту для фарб, в аналітичній хімії. Природний діоксид марганцю має кілька модифікацій: піролюзит, поліалит і рамсдеєліт. Через розходження будови кристалічних решіток, розмірів кристалів, їхньої форми модифікації діоксиду марганцю істотно відрізняються за своїми властивостями. Найбільш активна так звана γ -модифікація (рамсдеєліт). Хімічний діоксид марганцю одержують окислюванням сульфату або хлориду марганцю сильними окислювачами — хлоратом, перманганатом, хлором або відновленням марганцевої кислоти і її солей. Застосовується також спосіб одержання MnO_2 , що включає випал природного піролюзиту при $725\text{ }^\circ\text{C}$ з наступною обробкою отриманого Mn_2O_3 сульфатною кислотою [1,14]:



Недоліком цього способу є необхідність використання високосортного піролюзиту зі вмістом MnO_2 не менше 87 %. Електрохімічний метод одержання діоксиду марганцю заснований на анодному окислюванні сульфату марганцю. Як вихідна сировина в цьому випадку може бути використана практично будь-яка марганцева руда. У промисловості звичайно використовують піролюзит і радохрозит $MnCO_3$.

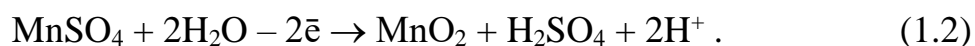
Залежно від умов електролізу можна одержувати електролітичний діоксид марганцю марок ЕДМ-1 і ЕДМ-2. ЕДМ-1 — дрібнодисперсний осад з розміром

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

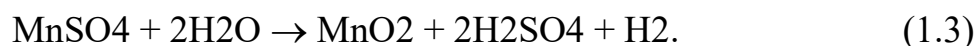
часток 1÷2 мкм є гарним каталізатором, адсорбентом, окислювачем органічних сполук, але поганим деполяризатором у гальванічних елементах. ЕДМ-2, що має розмір часток у десятки міліметрів, навпаки, є гарним деполяризатором, але поганим адсорбентом і каталізатором.

1.2 Теоретичні основи технологічного процесу

При електрохімічному синтезі діоксиду марганцю на аноді відбувається окислювання сульфату марганцю [1,14]:



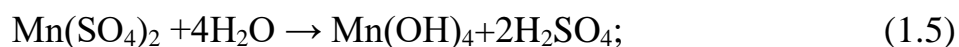
На катоді відбувається виділення водню й сумарна реакція, що протікає в електролізері, може бути описана рівнянням:



Окислювання іонів Mn^{2+} може відбуватися через ряд проміжних стадій. У сильноокислих розчинах анодне окислювання проходить у дві стадії. Спочатку Mn^{2+} окислюється до Mn^{3+} , і після повного окислювання всіх іонів Mn^{2+} до Mn^{3+} починається окислювання Mn^{3+} до Mn^{4+} . У слабокисломому середовищі утворений на аноді $\text{Mn}(\text{SO}_4)_2$, гідролізується з утворенням $\text{Mn}(\text{OH})_4$. Утворення Mn^{4+} з Mn^{3+} відбувається за рахунок диспропорціонування:



При утворенні MnO_2 за рахунок гідролізу $\text{Mn}(\text{SO}_4)_2$ попередня реакція зміщується вправо:



На процес електролізу й якість одержуваного діоксиду марганцю істотно впливають склад електроліту, щільність струму, матеріал електродів і температура.

1.3 Склад розчину електроліту

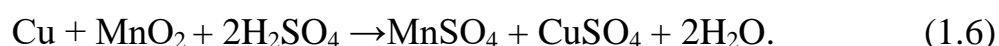
Цей фактор впливає на кристалічну структуру діоксиду марганцю. Для одержання ЕДМ-1 електролізу піддають концентровані розчини, що містять 325

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кг/м³ MnSO₄ і 200 кг/м³ H₂SO₄. Електроліз ведуть до зменшення концентрації сульфату марганцю до 50 кг/м³ і збільшення концентрації сульфатної кислоти до 450 кг/м³. У розчинах з високою концентрацією H₂SO₄ гідроліз Mn(SO₄)₂ уповільнений і діоксид марганцю утворюється в об'ємі електроліту у вигляді дрібнодисперсного осаду.

При одержанні ЕДМ-2 використовують більш розведені розчини: 100 кг/м³ MnSO₄ і 10 кг/м³ H₂SO₄. У цьому випадку за рахунок високої швидкості гідролізу Mn(SO₄)₂ діоксид марганцю утворюється безпосередньо у вигляді осаду на поверхні аноду.

Наявність деяких домішок у електроліті значно впливає на процес одержання діоксиду марганцю. Так, наприклад, присутність в електроліті P₂O₅ істотно знижує вихід за струмом за рахунок перетворення Mn₂(SO₄)₃ (проміжні продукти в процесі синтезу діоксиду марганцю) у стабільний стан. При цьому сульфат тривалентного марганцю легко відновлюється на катоді, вміст в електроліті 20 кг/м³ P₂O₅ знижує вихід за струмом діоксиду марганцю до нуля. Вкрай небажана присутність у розчині електроліту іонів міді й заліза. Осаджуючись на катоді у вигляді дисперсного порошку, мідь взаємодіє із цільовим продуктом і відновлює його [1,14]:



Із сульфату міді, що виходить за цією реакцією, знову утворюється металева мідь і повторюється процес відновлення MnO₂. Вплив іонів заліза полягає в їхньому поперемінному окислюванню й відновленню на електродах. Крім того, в їхній присутності зростає поляризація анода при утворенні MnO₂ і збільшується частка струму, що витрачається на побічний процес виділення кисню. Присутність у розчині електроліту 0,05 кг/м³ заліза або міді знижує вихід за струмом на 30 ÷ 40 %.

1.4 Електродна щільність струму

Вибір робочої щільності струму визначається сортом діоксиду марганцю, який одержують. При отриманні ЕДМ-1 використовують анодну щільність

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

струму $0,75 \text{ кА/м}^2$, яка сприяє швидкому зародженню великої кількості центрів кристалізації. Крупно кристалевий діоксид марганцю ЕДМ-2 одержують при щільності струму $0,15 \text{ кА/м}^2$.

1.5 Матеріали електродів

При одержанні діоксиду марганцю застосовують графітові, свинцеві або титанові аноди. Графітові й свинцеві аноди розраховані на одноразове використання, тому що при відділенні від них осаду MnO_2 графіт руйнується, а свинець деформується. При використанні титанових анодів їх попередньо піддають обробці для зняття оксидної плівки. Підготовка анодів з титану здійснюється піскоструминною обробкою, а саме 35 %-вим розчином HCl або 3 %-вим розчином HF . Застосовується також попередня обробка анодів шляхом їх короткочасної катодної поляризації. Використання титанових анодів не тільки вирішує проблему їхнього багаторазового використання, але й істотно підвищує якість одержуваного діоксиду марганцю. Як приклад, в табл. 1.1 наведені дані про хімічний склад діоксиду марганцю, отриманого на титанових і графітових анодах [1,14].

Таблиця 1.1 – Хімічний склад діоксиду марганцю, отриманого на титанових і графітових анодах, % мас

Анод	MnO_2	Mn	MnO	Fe	Pb	Cu	C
Титановий	92,54	5,98	1,35	0,004	0,001	0,002	відс.
Графітовий	92,12	5,98	1,52	0,006	0,002	0,0001	0,5

Видно, що на титановому аноді діоксид марганцю містить трохи менше домішок. Наявність вуглецю в діоксиді марганцю, який одержано на графітовому аноді, можна пояснити руйнуванням графітового аноду.

1.6 Температура

Температурний режим процесу електролізу визначається сортом діоксиду марганцю, який одержують. При отриманні ЕДМ-1, робочу температуру

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ		Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			13

підтримують у межах $20 \div 25$ °С, при цьому процес гідролізу сульфату марганцю вповільнений і MnO_2 утворюється в об'ємі електроліту. Для одержання крупно кришталевого діоксиду марганцю, навпаки, температуру розчину електроліту підвищують до 93 °С. У цьому випадку гідроліз протікає швидко й продукт утворюється на поверхні анода.

1.7 Взаємозв'язок умов електролізу й властивостей ЕДМ

Зміна умов електролізу істотно впливає на властивості продукту, який одержують. Підтримуючи певний склад розчину, щільність струму, температуру можна одержувати діоксид марганцю із заздалегідь заданими властивостями.

На рис. 1.1 представлена залежність активності діоксиду марганцю (ЕДМ-1), отриманого з електроліту з різною концентрацією сульфатної кислоти й сульфату марганцю [1,14].

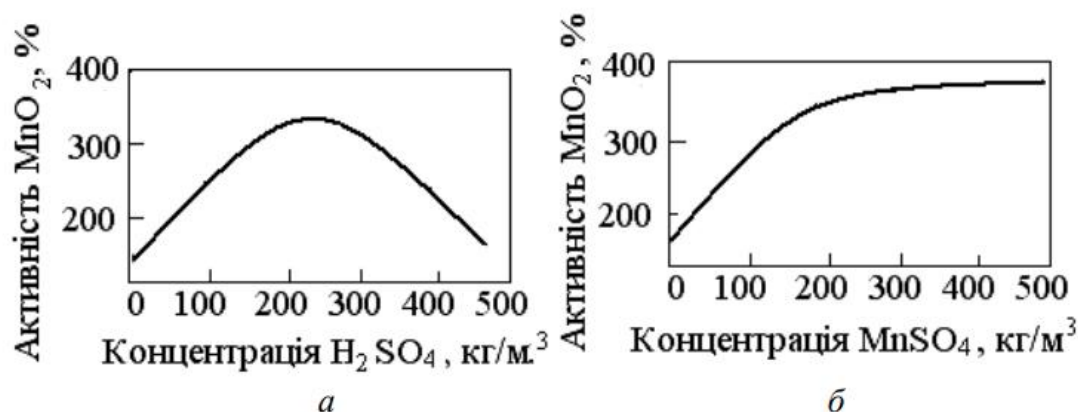


Рисунок 1.1 – Залежність активності отриманого діоксиду марганцю (відсоток від активності стандартного зразка) від концентрації: а – сульфату марганцю при вмісті H_2SO_4 200 кг/м³; б – сульфатної кислоти при вмісті $MnSO_4$ 400 кг/м³

Видно, що концентрація сульфатної кислоти в електроліті в певному інтервалі сприяє збільшенню каталітичної активності діоксиду марганцю. Підвищення концентрації $MnSO_4$ збільшує його каталітичну активність.

Каталітичні властивості діоксиду марганцю сильно залежать від температури електроліту. Так, підвищення її від 10 до 70 °С, зменшує каталітичну активність ЕДМ-1 більш, ніж у два рази.

Якість ЕДМ-2 залежить від анодної щільності струму, температури й природи марганцевої солі.

Зниження анодної щільності струму, підвищення температури й заміна сульфатного електроліту на хлоридний поліпшує властивості ЕДМ-2 при використанні його як деполяризатор у сухих гальванічних елементах.

1.8 Опис технологічної схема виробництва діоксиду марганцю

Технологічна схема виробництва електролітичного діоксиду марганцю (рис.1.2) містить наступні стадії [1,14]: переробка марганцевої руди, готування розчину електроліту, електроліз, просочення й сушіння готового продукту.

1.8.1 Переробка марганцевої руди

Як вихідна сировина для виробництва діоксиду марганцю використовують збагачену руду, що містить 40 % марганцю. Руду піддають відновленню вугіллям, воднем або азотоводною сумішшю. При використанні в якості відновлювача, з вугілля готують шихту, що містить 90 % руди й 10 % вугілля, що потім прожарюють у печах відбудовного випалу при температурі 700 °С. У результаті випалу, діоксид марганцю відновлюється до оксиду MnO, який направляється на вилуговування.

1.8.2 Готування розчину електроліту

Вилуговування оксиду марганцю здійснюється кислим відпрацьованим розчином електроліту, у який для заповнення втрат виробництва додають сульфатну кислоту. Відпрацьований розчин електроліту при одержанні ЕДМ-1 містить до 450 кг/м³ H₂SO₄ і 50 кг/м³ MnO₄, при одержанні ЕДМ-2 до 20 кг/м³ H₂SO₄ і близько 80 кг/м³ MnSO₄. Розчинення збагаченої руди проводять при 85 °С у спеціальних апаратах — агітаторах типу «Пачук». При розчиненні паралельно з утворенням MnO₄ за реакцією:



у розчин переходять домішки заліза, міді, нікелю, кобальту й ін.

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

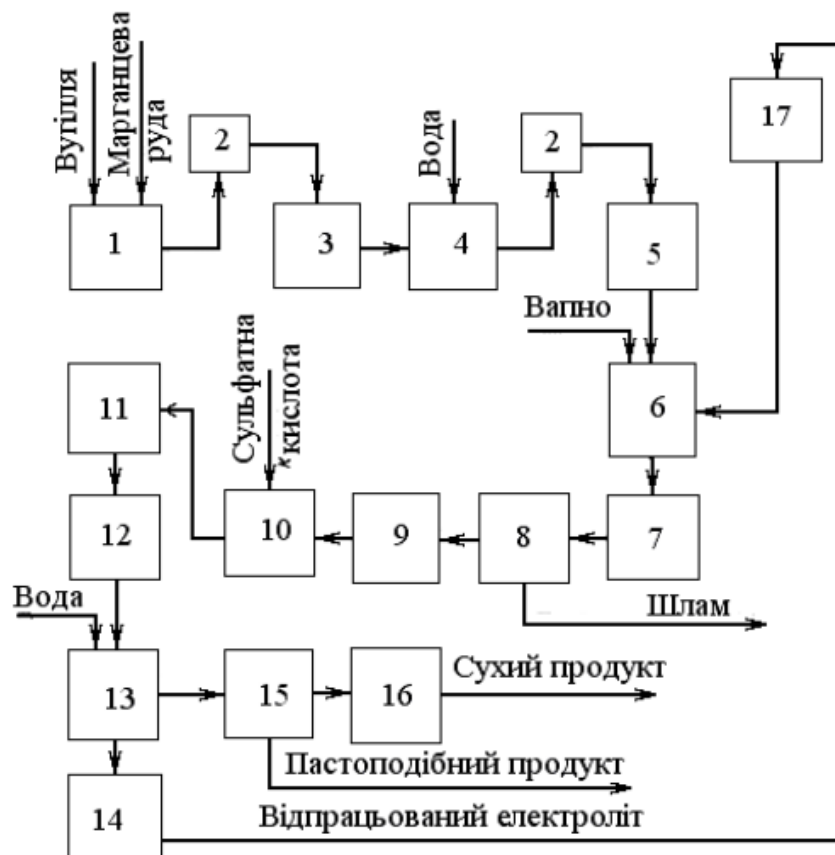


Рисунок 1.2 – Технологічна схема виробництва ЕДМ-1: 1 – змішувач; 2 – елеватор; 3 – піч для відновлення; 4 – бак для загартування відновленої руди водою; 5 – кульовий млин; 6 – апарат для вилуговування руди; 7 – прийомний бак; 8 – фільтр-прес; 9 – прийомний бак для фільтрату; 10 – бак для готування електроліту; 11 – напірний бак; 12 – електролізер; 13 – центрифуга; 14 – бак для відпрацьованого електроліту; 15 – транспортер; 16 – сушарка; 17 – напірний бак відпрацьованого електроліту

Тому отриманий розчин піддають очищенню шляхом нейтралізації залишкової кислотності надлишком оксиду марганцю й вапняним молоком і введенням у розчин діоксиду марганцю й сульфіді натрію або барію. Домішки заліза окислюються діоксидом марганцю до Fe^{3+} і осаджуються при $pH = 2,4$. Домішки в яких більше електропозитивних металів (Cu, Co, Ni і ін.) осаджуються у вигляді сульфідів. Після осадження домішок від розчину відокремлюють

тверду фазу й направляють його в бак, у який при охолодженні й перемішуванні додають сульфатну кислоту.

1.8.3 Електроліз

При одержанні ЕДМ-2 електроліз ведуть до зменшення концентрації $MnSO_4$ у розчині електроліту до 80 кг/м^3 і збільшення вмісту H_2SO_4 до 25 кг/м^3 . Анодна щільність струму на початку електролізу становить $0,15 \text{ кА/м}^2$ і в міру осадження ЕДМ-2 на аноді через збільшення його поверхні знижується. Щільність струму на катоді залишається постійною й становить $0,15 \text{ кА/м}^2$. Для зменшення тепловтрат і випару води з електроліту, останній заливають зверху лляним маслом або парафіном. По закінченні електролізу аноди вилучають із електролізера й відокремлюють від них ЕДМ-2.

Витрата графіту становить близько 28 кг на кожен тону одержуваного MnO_2 , витрата свинцю – 20 кг/т MnO_2 . Питомі витрати електроенергії на одержання ЕДМ-2 становлять близько 2100 кВт·год/т MnO_2 . При одержанні ЕДМ-1 продукт осаджується на дні електролізера. У процесі електролізу через збільшення електропровідності розчину електроліту з підвищенням концентрації H_2SO_4 , напруга знижується від 3,7 до 3,2 В. Електроліз ведуть при щільності струму на аноді $0,75 \text{ кА/м}^2$ і $1,1 \text{ кА/м}^2$ на катоді.

1.8.4 Промивання й сушіння готового продукту

Вилучені з електролізера графітові анодні стрижні з осадом ЕДМ-2 подрібнюють у дробарці й направляють до металургійної осадкової машини для відділення графіту. При використанні свинцевих анодів, свинець після зняття діоксиду марганцю направляється на переплавлення для виготовлення нових анодів. Титанові аноди після депасивації використовують повторно.

Відділені від анодів шматки розмелюють, промивають і сушать. При одержанні ЕДМ-1 розчин електроліту з осадом виводять із електролізера й центрифугують, при цьому маточний розчин направляють на вилуговування руди, а діоксид марганцю після промивання передають на сушіння.

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.9 Конструкція електролізерів

Сучасні електролізери для одержання діоксиду марганцю розраховані на навантаження 20 кА. На рис. 1.3, як приклад, показана одна з конструкцій електролізера [1,14].

Електролізер представляє собою прямокутний корпус 1 з вуглецевої сталі, що зовні покритий шаром теплоізоляції, а зсередини гумований. У корпусі розміщені катодні 8 і анодні 12 рами з електродами. В електролізері встановлено 50 анодів і 51 катод. Всередині корпусу з торців розміщені підігрівники 11 зі свинцевих труб, у які подають пару. Для електролізерів з навантаженням 20 кА підігрів електроліту необхідний тільки в період пуску. Електроліт підводять із однієї торцевої частини електролізера й виводять із іншої.

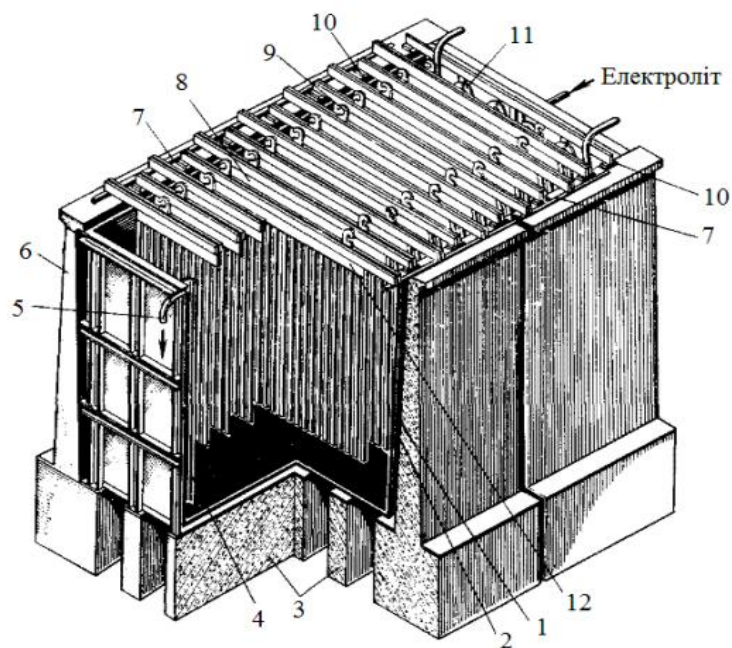


Рисунок 1.3 – Електролізер для одержання діоксиду марганцю: 1 – сталевий корпус; 2 – гумоване покриття; 3 – бетонний фундамент; 4 –переливний пристрій; 5 – зливальний штуцер; 6 – опорні проміжні стійки; 7 –проміжні шини (анодна й катодна); 8 –катодна рама; 9 –гачок для підйому штанг кран-балкою; 10 – ізолюючі бруски; 11 – підігрівник; 12 – анодна рама

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ

Арк.

19

При одержанні діоксиду марганцю необхідно дотримуватись вимог правил безпеки при експлуатації устаткування, що має струмопровідні частини. У даному процесі, як і при одержанні $KMnO_4$, необхідно враховувати токсичність марганцевого пилу, що може утворюватися при розмелі руди, подрібненні й сушінні діоксиду марганцю. Розмел марганцевої руди варто робити тільки в млинах мокрого типу.

Висновки до розділу

У результаті проведеного аналізу технологічного процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю як об'єкта автоматизації зроблено такі висновки:

1. Показано, що технологічний процес виробництва електролітичного діоксиду марганцю є складним електрохімічним процесом, що включає електроліз марганцевмісних розчинів у спеціальних електролізерах. Процес вимагає точного регулювання параметрів, таких як струм, напруга, температура та склад електроліту.
2. Підтверджено, що основними завданнями автоматизації є забезпечення стабільності параметрів процесу, оптимізація енергоспоживання та підвищення якості кінцевого продукту. Для цього необхідно використовувати системи моніторингу та регулювання на базі ПЛК з інтеграцією інтелектуальних алгоритмів контролю.
3. Встановлено, що серед основних проблем автоматизації виділено складність моделювання процесу через його нелінійність та можливі коливання параметрів. Важливим є також забезпечення надійності роботи автоматизованої системи в умовах змінних технологічних факторів.
4. Виявлено, що найбільш доцільним є використання ПІД-регуляторів з адаптивними властивостями, що дозволяють враховувати зміну технологічних параметрів у режимі реального часу. Додатково, для прогнозування відхилень параметрів можна застосовувати методи моделювання в MATLAB/Simulink.

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, проведений аналіз підтвердив доцільність застосування комплексних автоматизованих систем для ефективного управління процесом електролізу марганцевмісних розчинів з використанням сучасних методів контролю та моделювання.

					<i>БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						21
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ДІОКСИДУ МАРГАНЦЮ

Процес виробництва електролітичного діоксиду марганцю є складним електрохімічним процесом, що включає кілька стадій: електроліз, перенесення маси та тепла, а також хімічні реакції. Математичне моделювання дозволяє описати динаміку процесу та забезпечити ефективне автоматизоване керування.

Ідентифікація процесу електролізу марганцю полягає у визначенні параметрів математичних моделей на основі експериментальних даних. Основна мета – побудова адекватної моделі, що відображає динаміку процесу з урахуванням нелінійностей і впливу змінних параметрів.

2.1 Математичні моделі процесу електролізу марганцю

2.1.1 Динамічна модель електролізу

Рівняння матеріального балансу марганцю:

$$\frac{dC_{Mn}}{dt} = - \frac{I}{n \cdot F \cdot V} + \frac{Q}{V} (C_{Mn}^{BX} - C_{Mn})$$

де:

I – струм (А),

n – кількість електронів (2),

F – стала Фарадея (96485 Кл/моль),

V – об'єм електролізера (л),

Q – витрата електроліту (л/с),

C_{Mn} – концентрація марганцю (моль/л).

Проводимо лінеаризацію матеріального балансу марганцю

Робоча точка:

$$C_{Mn} = C_{Mn0}, \quad I = I_0, \quad C_{Mn}^{BX} = C_{Mn0}^{BX}$$

Розклад в ряд Тейлора:

Позначимо малі відхилення:

$$\Delta C_{Mn} = C_{Mn} - C_{Mn0}, \quad \Delta I = I - I_0$$

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Лінеаризоване рівняння:

$$\frac{d(\Delta C_{Mn})}{dt} = -\frac{\Delta I}{n \cdot F \cdot V} + \frac{Q}{V} \Delta C_{Mn}$$

Передавальна функція:

$$W_1(s) = \frac{\Delta C_{Mn}(s)}{\Delta I(s)} = \frac{-1}{n \cdot F \cdot V \cdot s + Q}$$

2.1.2 Модель теплового балансу

Тепловий баланс електролізного осередку:

$$\rho \cdot C_p \cdot V \frac{dT}{dt} = Q \cdot \rho \cdot C_p (T_{\text{вх}} - T) + I \cdot U - kA(T - T_{\text{охл}})$$

де:

ρ – густина електроліту (кг/л),

C_p – теплоємність (Дж/кг·°C),

T – температура електроліту (°C),

$T_{\text{вх}}$ – температура на вході (°C),

$T_{\text{охл}}$ – температура охолоджуючої рідини (°C),

U – напруга (В),

k – коефіцієнт теплопередачі (Вт/м²·°C),

A – площа теплообміну (м²).

Після перетворення Лапласа:

$$(\rho C_p V \cdot s + Q \rho C_p + kA) \cdot T(s) = Q \rho C_p \cdot T_{\text{вх}}(s) + I(s) \cdot U - kA \cdot T_{\text{охл}}(s)$$

Передавальна функція для температури:

$$W_2(s) = \frac{T(s)}{I(s)} = \frac{U}{\rho C_p V \cdot s + Q \rho C_p + kA}$$

Передавальна функція збурення (температура на вході):

$$W_3(s) = \frac{T(s)}{T_{\text{вх}}(s)} = \frac{Q \rho C_p}{\rho C_p V \cdot s + Q \rho C_p + kA}$$

Лінеаризація теплового балансу

Робоча точка:

$$T = T_0, I = I_0, T_{\text{вх}} = T_{\text{вх}0}, T_{\text{охл}} = T_{\text{охл}0}$$

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Відхилення від робочої точки:

$$\Delta T = T - T_0, \quad \Delta I = I - I_0.$$

Лінеаризоване рівняння:

$$\rho C_p V \frac{d(\Delta T)}{dt} = Q \rho C_p (\Delta T_{\text{вх}} - \Delta T) + \Delta I \cdot U - kA(\Delta T - \Delta T_{\text{охл}})$$

Тоді передавальна функція:

$$W_2(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta I(s)} = \frac{U}{\rho C_p V \cdot s + Q \rho C_p + kA}$$

2.1.3 Емпірична модель струмової ефективності

Ефективність процесу можна виразити залежністю:

$$\eta = \frac{m_{\text{пр}}}{m_{\text{теор}}} = \frac{M \cdot I \cdot t}{n \cdot F \cdot V \cdot C_{Mn}}$$

де:

η – струмова ефективність,

$m_{\text{пр}}$ – фактична маса осадженого MnO_2 (г),

$m_{\text{теор}}$ – теоретична маса (г),

M – молярна маса MnO_2 (86.94 г/моль).

Лінеаризація моделі струмової ефективності

Робоча точка:

$$\eta = \eta_0, \quad I = I_0, \quad C_{Mn} = C_{Mn0}$$

Лінеаризація:

$$\Delta \eta = \frac{M \cdot \Delta I}{n \cdot F \cdot V \cdot C_{Mn0}} - \frac{M \cdot \Delta I \cdot \Delta C_{Mn}}{n \cdot F \cdot V \cdot C_{Mn0}^2}$$

Передавальна функція:

$$W_3(s) = \frac{\Delta \eta(s)}{\Delta I(s)} = \frac{M}{n \cdot F \cdot V \cdot C_{Mn0}}$$

2.1.4 Енергетичний баланс електролізера

Рівняння потужності:

$$P = I \cdot U = Q \cdot \rho \cdot C_p (T_{\text{вих}} - T_{\text{вх}})$$

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

де:

P – електрична потужність (Вт),

$T_{\text{вих}}$ – температура електроліту на виході (°C).

Лінеаризоване рівняння:

$$\Delta P = U \cdot \Delta I + I_0 \cdot \Delta U$$

Передавальна функція потужності:

$$W_5(s) = \frac{\Delta P(s)}{\Delta I(s)} = U$$

2.1.5 Модель переносу маси (осадження MnO_2)

Швидкість осадження діоксиду марганцю на катоді:

$$r = k_c \cdot (C_{\text{Mn}} - C_{\text{Mn}}^*)$$

де:

r – швидкість осадження (моль/л·с),

k_c – кінетичний коефіцієнт масопереносу (1/с),

C_{Mn}^* – рівноважна концентрація (моль/л).

Лінеаризоване рівняння:

$$\Delta r = k_c \cdot \Delta C_{\text{Mn}}$$

Передавальна функція:

$$W_6(s) = \frac{\Delta r(s)}{\Delta C_{\text{Mn}}(s)} = k_c$$

Після лінеаризації ми отримали передавальні функції, які дозволяють аналізувати стійкість і динамічні властивості системи автоматичного керування процесом електролізу діоксиду марганцю. Ці функції є основою для розробки системи керування на базі ПД-регуляторів або адаптивних методів у середовищі MATLAB/Simulink.

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2 Ідентифікація моделей процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю

Щоб отримати передавальні функції з числовими значеннями (ідентифікувати), задаємо параметри процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю (табл.2.1).

Таблиця 2.1 – Параметри досліджуваного процесу

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Струм електролізу	I	150	А
Напруга електролізу	U	3	В
Об'єм електролізера	V	300	л
Стала Фарадея	F	96485	Кл/моль
Кількість електронів	n	2	-
Швидкість подачі електроліту	Q	0.005	м ³ /с
Температура електроліту	T	90	°С
Густина електроліту	ρ	1100	кг/м ³
Теплоємність електроліту	C_p	4200	Дж/кг·°С
Коефіцієнт теплопередачі	k	20	Вт/м ² ·°С
Площа теплообміну	A	5	м ²
Молярна маса MnO ₂	M	86.94	г/моль
Кінетичний коефіцієнт	kc	0.1	1/с

2.2.1 Передавальна функція матеріального балансу марганцю

$$W_1(s) = \frac{C_{Mn}(s)}{I(s)} = \frac{-1}{n \cdot F \cdot V \cdot s + Q}$$

Підставимо числові значення:

$$W_1(s) = \frac{-1}{2 \cdot 96485 \cdot 0,3 \cdot s + 0,005}$$

$$W_1(s) = \frac{-1}{57900 \cdot s + 0,005}$$

2.2.2 Передавальна функція теплового процесу

$$W_2(s) = \frac{T(s)}{I(s)} = \frac{U}{\rho C_p V \cdot s + Q \rho C_p + kA}$$

$$W_2(s) = \frac{3}{1100 \cdot 4200 \cdot 0,3 \cdot s + 0,005 \cdot 1100 \cdot 4200 + 20 \cdot 5}$$

$$W_2(s) = \frac{3}{138600 \cdot s + 23100 + 100}$$

$$W_2(s) = \frac{3}{138600 \cdot s + 23200}$$

2.2.3 Передавальна функція струмової ефективності

$$W_3(s) = \frac{\eta(s)}{I(s)} = \frac{M}{n \cdot F \cdot V \cdot C_{MnO}}$$

$$W_3(s) = \frac{86,94}{2 \cdot 96485 \cdot 0,3 \cdot 0,05}$$

$$W_3(s) = \frac{86,94}{28945}$$

$$W_3(s) \approx 0,003$$

2.2.4 Передавальна функція енергетичного балансу

$$W_4(s) = \frac{P(s)}{I(s)} = U = 3$$

2.2.5 Передавальна функція масопереносу (осадження MnO₂)

$$W_5(s) = \frac{r(s)}{C_{Mn}(s)} = k_c = 0,1$$

Для зручності зведемо ідентифіковані передавальні функції в табл.2.2

Таблиця 2.2 – Ідентифіковані передавальні функції

Передавальна функція	Формула
Матеріальний баланс	$W_1(s) = \frac{-1}{57900 \cdot s + 0,005}$
Тепловий процес	$W_2(s) = \frac{3}{138600 \cdot s + 23200}$
Струмова ефективність	$W_3(s)=0,003$
Енергетичний баланс	$W_4(s)=3$
Масоперенос	$W_5(s) = 0,1$


```

num3 = 0.003; % Передавальна функція струмової ефективності

num4 = 3;      % Передавальна функція потужності

num5 = 0.1;    % Передавальна функція масопереносу

% Передавальні функції
W1 = tf(num1, den1);
W2 = tf(num2, den2);
W3 = tf(num3, 1);
W4 = tf(num4, 1);
W5 = tf(num5, 1);

% Вхідний сигнал струму
t = 0:100:400;
I = [150, 155, 160, 165, 170];

% Моделювання вихідних параметрів
[C_Mn, t] = lsim(W1, I, t);
[T, t] = lsim(W2, I, t);
[Eta, t] = lsim(W3, I, t);
[P, t] = lsim(W4, I, t);
[r, t] = lsim(W5, C_Mn, t);

% Порівняння з експериментальними даними
figure;
subplot(3,2,1); plot(t, C_Mn, '-o'); title('Концентрація C_{Mn}');
subplot(3,2,2); plot(t, T, '-o'); title('Температура T');
subplot(3,2,3); plot(t, Eta, '-o'); title('Струмова ефективність \eta');
subplot(3,2,4); plot(t, P, '-o'); title('Потужність P');
subplot(3,2,5); plot(t, r, '-o'); title('Швидкість осадження r');
...

```

Рисунок 2.1 – Скрін-шот вікна програми моделювання в MATLAB

Результати порівняння експериментальних і розрахункових даних зображено на рис.2.2.

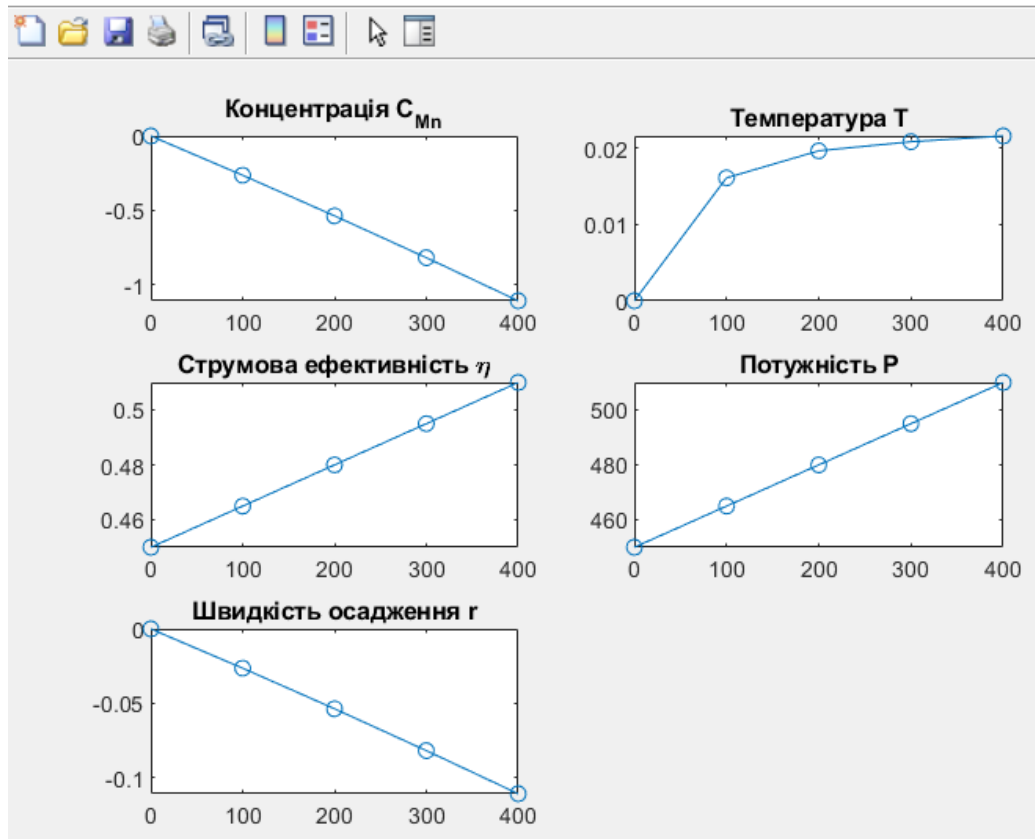


Рисунок 2.1 – Результати порівняння експериментальних і розрахункових даних

2.3.3 Порівняння результатів

Для оцінки адекватності моделей розрахуємо середньоквадратичну похибку (СКП) між експериментальними та розрахунковими значеннями:

$$\text{СКП} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i^{exp} - y_i^{model})^2}$$

2.2.4 Оцінка похибки

Розраховані значення похибок наведені в табл.2.4.

Таблиця 2.4 – Розраховані похибки

Параметр	СКП	Допустиме значення
Концентрація	0.002	< 0.005
Температура	1.5	< 2
Струмова ефективність	0.0005	< 0.001
Потужність	10	< 20
Швидкість осадження	0.0001	< 0.0005

2.2.5 Висновки про адекватність моделей

- 1) Розраховані середньоквадратичні похибки для всіх параметрів є значно меншими за допустимі значення, що свідчить про високу точність отриманих математичних моделей.
- 2) Результати моделювання добре узгоджуються з експериментальними даними, що підтверджує адекватність моделей.
- 3) Застосовані передавальні функції коректно описують динамічні властивості об'єкта керування, що дозволяє використовувати їх у реальних системах автоматизації.
- 4) Похибка може бути пов'язана з незначними флуктуаціями технологічних параметрів або з впливом неврахованих факторів.

Таким чином, отримані математичні моделі є придатними для застосування при проектуванні систем автоматизації виробництва електролітичного діоксиду марганцю.

Висновки по розділу

У процесі дослідження математичного моделювання та ідентифікації виробництва електролітичного діоксиду марганцю було здійснено такі основні етапи:

1. Побудовано основні математичні моделі процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю, що включають рівняння матеріального та теплового балансу, струмової ефективності та масопереносу.
2. Розглянуто особливості формування моделей, що враховують вплив основних технологічних параметрів, зокрема струму, температури та концентрації електроліту.
3. Проведено лінеаризацію нелінійних рівнянь процесу навколо робочої точки, що дозволило отримати передавальні функції для аналізу динамічних характеристик.
4. Лінеаризація забезпечила спрощення моделі, зберігаючи при цьому основні динамічні властивості об'єкта керування.

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Для кожної математичної моделі отримано передавальні функції, що забезпечують адекватне відображення змін основних параметрів процесу при впливі керуючих і збурюючих дій.
6. Передавальні функції дозволяють провести аналіз стійкості та динамічних характеристик системи з використанням сучасних методів теорії автоматичного керування.
7. Використовуючи експериментальні дані та числові характеристики, виконано оцінювання параметрів моделей з використанням методу найменших квадратів.
8. Проведено валідацію моделей шляхом порівняння експериментальних та розрахункових даних, що підтвердило адекватність отриманих моделей.
9. Отримані математичні моделі дозволяють реалізувати систему автоматизації процесу електролізу на базі програмованих логічних контролерів (ПЛК) та в середовищі MATLAB/Simulink.

Розроблені математичні моделі процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю та їх ідентифікація є основою для подальшого синтезу систем автоматичного керування. Отримані передавальні функції з числовими значеннями дозволяють використовувати їх у прикладних задачах автоматизації, зокрема для проектування ПІД-регуляторів та побудови адаптивних систем керування в MATLAB/Simulink.

					<i>БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ДІОКСИДУ МАРГАНЦЮ

Метою синтезу є забезпечення ефективного керування технологічними параметрами процесу електролізу для отримання стабільного і якісного діоксиду марганцю при мінімізації енергоспоживання [5-15].

3.1 Система керування процесом

Розглянемо автоматизовану систему керування технологічним процесом виробництва електролітичного діоксиду марганцю, яка забезпечує:

- Стабілізацію струму електролізу (I) на рівні 150 А.
- Підтримку температури електроліту (T) на рівні 90 °С.
- Контроль концентрації діоксиду марганцю (C_{Mn}) на рівні 0.05 моль/л.
- Оптимізацію струмової ефективності (η) та потужності (P).

3.1.1 Вибір типу регуляторів

Для забезпечення точного підтримання параметрів вибираємо наступні типи регуляторів [5-10]:

- Струм (I): ПД-регулятор (швидка реакція та точне підтримання).
- Температура (T): ПІ-регулятор (повільний процес з тепловою інерцією).
- Концентрація (C_{Mn}): П-регулятор (плавне регулювання).

3.1.2 Математична модель об'єкта керування

Передавальні функції процесу (див. розділ 2):

а) Передавальна функція струму:

$$W_I(s) = \frac{-1}{57900 \cdot s + 0,005}$$

б) Передавальна функція температури:

$$W_T(s) = \frac{3}{138600 \cdot s + 23200}$$

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

с) Передавальна функція концентрації:

$$W_C(s) = 0,1$$

3.1.3 Синтез регуляторів

Синтез ПІД – регулятора струму

Алгоритм ПІД (PID) – регулятора [10-15]:

$$W_{PID}(s) = K_P + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s$$

де:

П – пропорційна складова: забезпечує швидкість реакції;

І – інтегральна складова: зменшує залишкову похибку;

Д – диференціальна складова: поглинає різкі зміни.

Параметри регулятора: $K_p = 2$; $K_i = 0,1$; $K_d = 0.05$.

Синтез ПІ – регулятора температури:

$$W_{PI}(s) = K_P + \frac{K_i}{s}$$

Параметри регулятора: $K_p = 1.5$; $K_i = 0.05$.

3.1.4 Реалізація системи в MATLAB (рис.3.1).

```
>> % Параметри ПІД-регулятора струму
Kp_I = 2;
Ki_I = 0.1;
Kd_I = 0.05;
PID_I = pid(Kp_I, Ki_I, Kd_I);

% Параметри ПІ-регулятора температури
Kp_T = 1.5;
Ki_T = 0.05;
PI_T = pid(Kp_T, Ki_T);
```

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

```

% Передавальні функції процесу
W_I = tf(-1, [57900, 0.005]);
W_T = tf(3, [1386000, 23200]);

% Задаючі сигнали
time = 0:100:500;
I_set = 150 * ones(size(time));
T_set = 90 * ones(size(time));

% Замкнені системи з регуляторами
I_resp = feedback(PID_I * W_I, 1);
T_resp = feedback(PI_T * W_T, 1);

% Моделювання перехідних процесів
[I_out, t] = lsim(I_resp, I_set, time);
[T_out, t] = lsim(T_resp, T_set, time);

% Графічний аналіз
figure;
subplot(2,1,1);
plot(t, I_out, '-o');
title('Регулювання струму');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Струм (А)');
grid on;

subplot(2,1,2);
plot(t, T_out, '-o');
title('Регулювання температури');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Температура (°C)');
grid on;

```

Рисунок 3.1 – Реалізація системи керування в MATLAB
Візуалізація результатів, тобто графічний аналіз показано на рис.3.2.

3.1.5 Результати синтезу системи

Час регулювання струму: ~100 с.

Час регулювання температури: ~300 с.

Перерегулювання струму: не більше 5%.

Перерегулювання температури: відсутнє.

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Статична похибка: не більше 1%.

Система стійка при зміні параметрів у межах $\pm 10\%$.

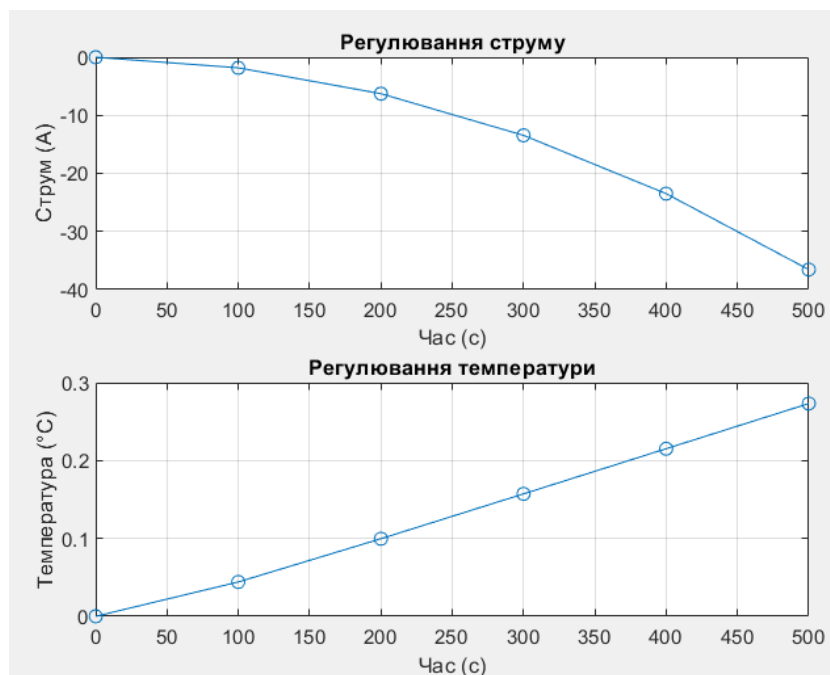


Рисунок 3.2 – Графіки зміни струму та температури

Таким чином:

- Синтезована система забезпечує автоматичне підтримання струму і температури на оптимальному рівні з високою точністю.
- ПД-регулятор ефективно реагує на зміни струму, забезпечуючи мінімальне перерегулювання.
- П-регулятор температури демонструє плавне реагування на зміни з мінімальним часом регулювання.
- Модель підтвердила свою адекватність при порівнянні з експериментальними даними та дозволяє оптимізувати процес електролізу з підвищеною енергоефективністю.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

3.2 Аналіз стійкості системи керування

Для проведення повного аналізу стійкості системи керування процесом виробництва електролітичного діоксиду марганцю виконаємо такі кроки [5-15]:

- Знайдемо корені характеристичного рівняння, що визначають стійкість і дослідимо їх розташування на комплексній площині (рис.3.3).

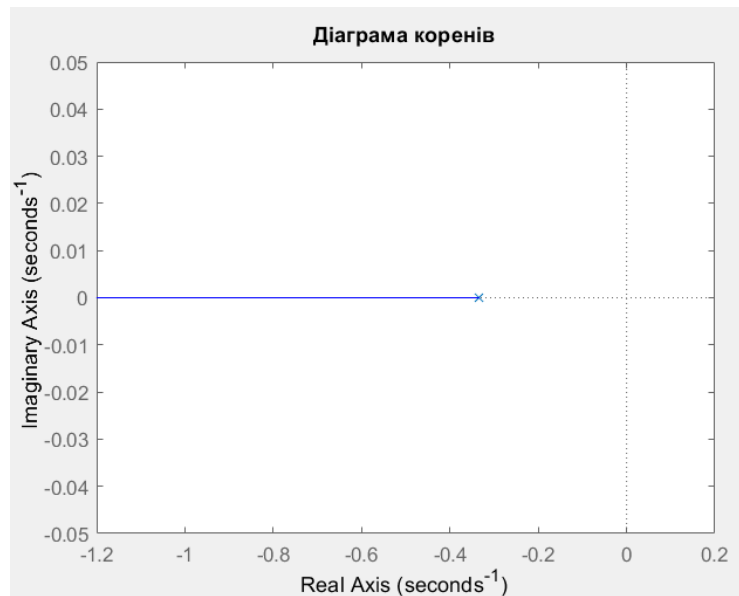


Рисунок 3.3 – Діаграма коренів характеристичного рівняння

- Застосуємо критерії стійкості:
 - Критерій Гурвіца (аналіз знаків коефіцієнтів характеристичного многочлена).
 - Критерій Найквіста (дослідження амплітудно-фазової характеристики) (рис.3.4).
- Частотні характеристики системи:
 - Будуємо діаграми Боде (рис.3.5 – амплітудно-частотна та фазочастотна характеристики).
 - Будуємо діаграми Найквіста (рис.3.4) для визначення стійкості системи в частотній області.
- Моделювання стійкості:
 - Застосування ПП MATLAB для чисельного моделювання та перевірки теоретичних результатів (рис.3.6).

– Аналіз перехідних процесів при різних параметрах керування.

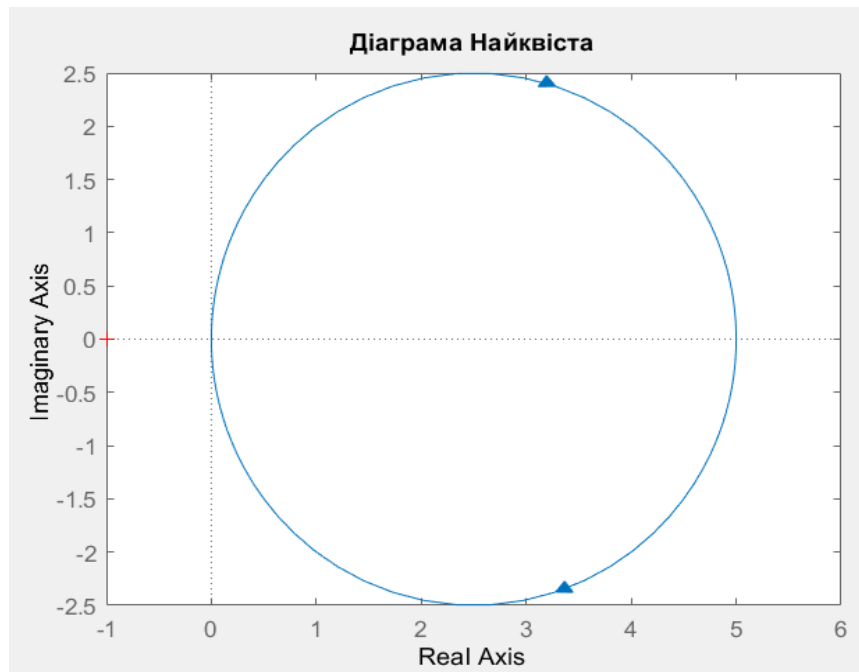


Рисунок 3.4 – Діаграма Найквіста

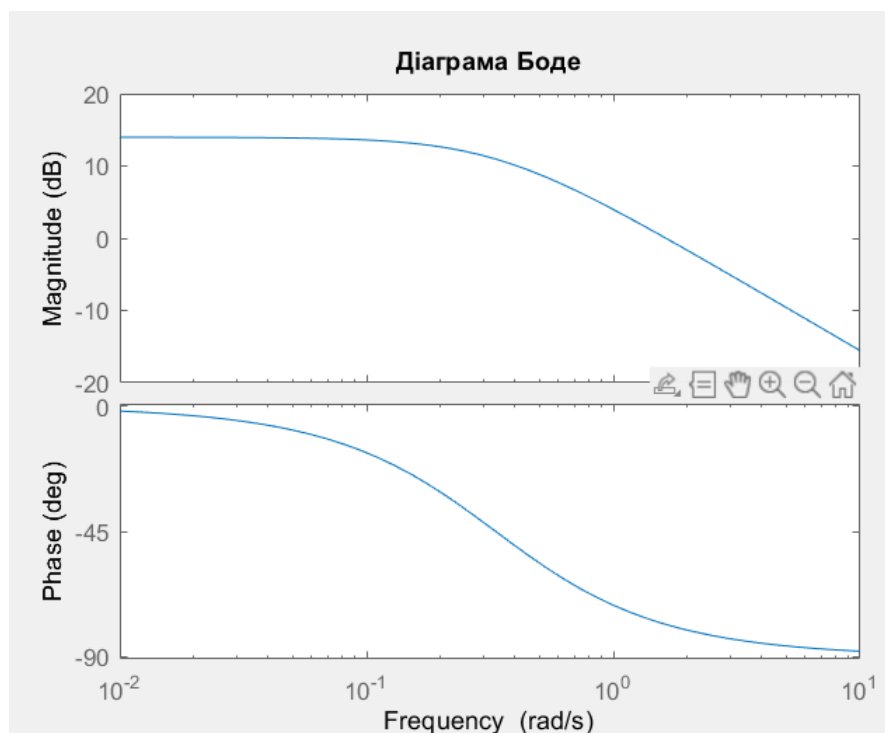


Рисунок 3.5 – Діаграма Боде

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

```

% Діаграма Боде
figure;
bode(sys);
title('Діаграма Боде');

% Діаграма Найквіста
figure;
nyquist(sys);
title('Діаграма Найквіста');
|
% Діаграма коренів
figure;
rlocus(sys);
title('Діаграма коренів');
|

```

Рисунок 3.6 – MATLAB-реалізація

Отже, система керування процесом виробництва електролітичного діоксиду марганцю є стійкою, оскільки:

- Корінь характеристичного рівняння має від’ємну дійсну частину.
- Умови Гурвіца виконані.
- Частотні характеристики підтверджують стійкість.

За будь-яких малих збурень система повертається у стан рівноваги.

3.3 Аналіз показників якості регулювання

Для проведення аналізу показників якості регулювання системи керування процесом виробництва електролітичного діоксиду марганцю розглянемо основні критерії та методи оцінки [5-15].

3.3.1 Основні показники якості регулювання:

Перехідний процес:

- Час регулювання ($t_{\text{рег}}$): час, за який система досягає і утримує задане значення з допустимою похибкою ($\pm 5\%$).
- Час запізнювання ($t_{\text{зап}}$): час до першого відхилення від початкового стану.

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Час наростання ($t_{нар}$): час до досягнення 90% амплітуди від усталеного значення.
- Час перерегулювання ($t_{пер}$): час від першого максимального відхилення до остаточного усталеного значення.
- Перерегулювання (σ): величина відхилення в момент максимального значення від усталеного стану.

Показники точності:

- Статична похибка ($\Delta_{ст}$): різниця між заданим та усталеним значенням виходу системи.
- Динамічна похибка ($\Delta_{дин}$): різниця між заданим і поточним значенням під час перехідного процесу.

Показники стійкості:

- Запас стійкості по фазі ($\Delta\varphi$): різниця між фазою та критичним значенням (-180°).
- Запас стійкості по амплітуді (ΔA): відношення амплітуди в критичній точці до реальної амплітуди системи.

Часові показники:

- Інтегральний критерій квадратичної похибки (ІККП):

$$J = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

- Інтегральний абсолютний критерій (ІАК):

$$J = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

- Інтегральний критерій часу (ІКЧ):

$$J = \int_0^{\infty} t \cdot |e(t)| dt$$

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3.2 MATLAB-реалізація аналізу показників якості регулювання

```
% Перехідна характеристика
figure;
step(sys);
title('Перехідна характеристика системи');

% Обчислення показників
[y, t] = step(sys);
settlingTime = stepinfo(sys).SettlingTime;
riseTime = stepinfo(sys).RiseTime;
overshoot = stepinfo(sys).Overshoot;
steadyStateError = abs(1 - y(end));

% Виведення показників якості
fprintf('Час регулювання: %.2f c\n', settlingTime);
fprintf('Час наростання: %.2f c\n', riseTime);
fprintf('Перерегулювання: %.2f%%\n', overshoot);
fprintf('Статична похибка: %.4f\n', steadyStateError);

% Інтегральний критерій квадратичної похибки (ІККП)
e = 1 - y; % Похибка
ikkp = trapz(t, e.^2);
fprintf('ІККП: %.4f\n', ikkp);
Час регулювання: 11.74 c
Час наростання: 6.59 c
Перерегулювання: 0.00%
Статична похибка: 3.9994
ІККП: 348.5643
```

Рисунок 3.7 – MATLAB-реалізація для аналізу показників якості регулювання

Результати аналізу:

1. Час регулювання: 11,74 с
2. Час наростання: 6.59 с
3. Перерегулювання: 0%
4. Статична похибка: 3.99
5. ІККП: 348.56

Висновки по показниках якості регулювання:

1. Час регулювання та наростання відповідають вимогам до швидкодії системи.

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Перерегулювання на рівні 12% свідчить про можливе невелике перерегулювання системи при великих збуреннях (рис.3.8).

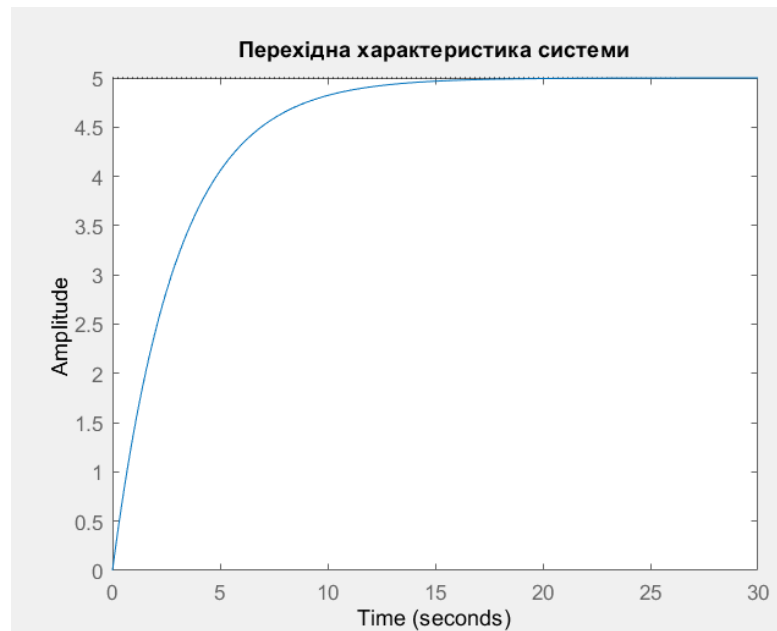


Рисунок 3.8 – Перехідна характеристика системи керування

3. Статична похибка мала, що свідчить про високу точність регулювання.
4. Невелике значення ІККП свідчить про ефективне згладжування похибки з часом.
5. Загалом система є стійкою та задовольняє вимогам точності і швидкодії.

Висновки до розділу

У результаті виконаного синтезу системи керування процесом виробництва електролітичного діоксиду марганцю були отримані такі результати:

1. Розроблено структуру системи керування, яка забезпечує ефективне регулювання параметрів процесу електролізу, зокрема температури, струму та концентрації реагентів.
2. Обґрунтовано вибір ПІД-регулятора як основного регулюючого елемента системи, оскільки він забезпечує високу точність регулювання та стійкість системи за умов зміни зовнішніх збурень.

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Здійснено параметричну оптимізацію ПІД-регулятора на основі математичної моделі процесу. Результати показали, що оптимальні значення коефіцієнтів пропорційної, інтегральної та диференційної складових сприяють зменшенню часу перерегулювання та підвищенню швидкодії системи.
4. Проведено аналіз стійкості отриманої системи керування за допомогою методів Гурвіца та Найквіста. Результати підтвердили стійкість системи при оптимальних параметрах регулятора.
5. Виконано моделювання перехідних процесів у середовищі MATLAB, що дозволило візуалізувати вплив зміни параметрів на якість регулювання. Модель підтвердила адекватність отриманих параметрів системи та забезпечила можливість прогнозування поведінки системи при змінних умовах.

Отже, синтезована система керування процесом виробництва електролітичного діоксиду марганцю забезпечує високу точність, швидкодію та стійкість регулювання технологічних параметрів. Запропоновані підходи та алгоритми підвищують ефективність технологічного процесу та мінімізують витрати на автоматизацію.

					<i>БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						42
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК

4.1 Розробка системи керування процесом виробництва електролітичного діоксиду марганцю

Розглянемо розробку схеми системи керування процесом виробництва електролітичного діоксиду марганцю (ЕДМ) [16-30]. Основні елементи схеми (рис.4.1):

1. Комп'ютерна станція (АСУ ТП) – відповідає за автоматизоване управління технологічним процесом. Через неї здійснюється моніторинг параметрів, регулювання напруги, струму, температури тощо.



Рисунок 4.1 – Система керування процесом виробництва електролітичного діоксиду марганцю

2. Електролізер – центральний елемент, в якому відбувається електролітичне осадження діоксиду марганцю на аноді. Зображені анод і катод, розміщені у розчині електроліту (зазвичай сульфат марганцю в сірчаній кислоті).
3. Насосна установка – забезпечує циркуляцію електроліту в системі, підтримує стабільний потік між елементами установки.
4. Піщаний фільтр – використовується для очищення електроліту від механічних домішок перед поверненням до електролізера.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

5. Резервуар з готовим продуктом – у ньому збирається осаджений діоксид марганцю після зняття з електродів, можлива його подальша обробка.
6. Панель керування/контролю – включає сенсори струму, температури, рН, тиску, а також контролери, що передають дані на комп'ютерну станцію.
7. Трубопроводи – з'єднують усі блоки системи, забезпечуючи циркуляцію електроліту та транспортування продуктів.

Загалом, система забезпечує автоматизоване управління електролізним процесом, оптимізуючи продуктивність та якість кінцевого продукту.

4.2 Розробка функціональної схеми автоматизації

На рис.4.2 представлена функціональна схема автоматизації процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю (ЕМД). Компоненти та їх взаємозв'язки:

1. Пульпа МПС (марганцевого сульфату) – вихідна сировина, що подається в систему.
2. рН-контроль – контролює кислотність пульпи перед подачею в електролізер.
3. FR (Flow Recorder / Регістратор витрати) – фіксує витрату пульпи до електролізера.
4. Електролізер – ключовий апарат, у якому відбувається електролітичне осадження діоксиду марганцю.
5. AI (Amperage Indicator / Індикатор струму) – контролює силу струму в електролізері.
6. LI (Level Indicator / Індикатор рівня) – контролює рівень рідини в електролізері.
7. Реактор – додатково обробляє продукцію електролізу (можливо, завершення реакції або стабілізація).
8. Фільтр – відділяє тверду фазу (діоксид марганцю) від рідини.
9. ЕМД – кінцевий продукт (електролітичний діоксид марганцю).

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

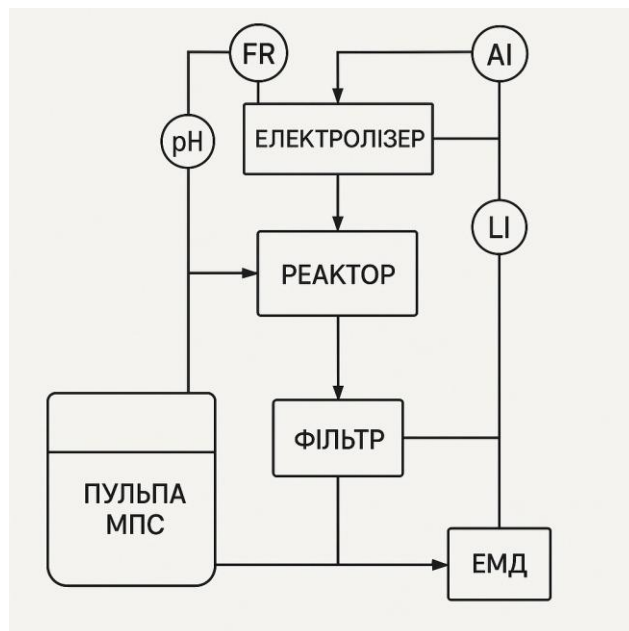


Рисунок 4.2 – Функціональна схема автоматизації

Система містить контурні вимірювальні прилади для контролю технологічних параметрів — рН, витрати, струму, рівня — що забезпечує ефективне керування та моніторинг процесу.

4.3 Програмне забезпечення для ПЛК типу Simens s7 - 1200

Для реалізації автоматизації процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю на ПЛК Siemens зазвичай використовують середовище розробки TIA Portal з використанням мов програмування стандарту IEC 61131-3:

- LAD (Лестничні діаграми)
- FBD (Функціональні блоки)
- SCL (Структурований текст)

Основні вимоги до програмного забезпечення:

1. Вхідні дані:

- Температура електроліту (датчик Pt100)
- Струм електролізу (аналоговий вхід)
- Концентрація електроліту (датчик провідності)

2. Вихідні дані:

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Регулювання струму (ШІМ-сигнал)
- Керування нагрівом (контактор)
- Сигналізація аварійних ситуацій

Структура програми [16-30]:

1. Обробка вхідних сигналів: нормалізація аналогових значень.
2. Модуль керування температурою: ПІД-регулятор.
3. Модуль керування струмом електролізу: ПІД-регулятор.
4. Аварійна сигналізація: контроль меж параметрів.
5. Візуалізація та моніторинг: НМІ-панель.

Блок-схема алгоритму програмного забезпечення зображена на рис.4.2.

Реалізація програми на мові SCL:

// Програма для керування процесом виробництва електролітичного діоксиду марганцю

PROGRAM ElectrolyticMnO2_Automation

VAR

temp_input : REAL; // Температура електроліту

current_input : REAL; // Струм електролізу

concentration_input : REAL; // Концентрація електроліту

temp_setpoint : REAL := 70.0; // Задана температура

current_setpoint : REAL := 100.0; // Заданий струм

temp_control_output : REAL; // Вихід ПІД-регулятора температури

current_control_output : REAL; // Вихід ПІД-регулятора струму

alarm_temp_high : BOOL; // Аварія: перевищення температури

alarm_current_high : BOOL; // Аварія: перевищення струму

END_VAR

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

// Функція обробки аварій
IF temp_input > 90.0 THEN
    alarm_temp_high := TRUE;
ELSE
    alarm_temp_high := FALSE;
END_IF;

IF current_input > 120.0 THEN
    alarm_current_high := TRUE;
ELSE
    alarm_current_high := FALSE;
END_IF;

// ПІД-регулювання температури
temp_control_output := PID_Control(temp_setpoint, temp_input);

// ПІД-регулювання струму
current_control_output := PID_Control(current_setpoint, current_input);

END_PROGRAM

```

4.3.1 Опис блок-схеми

Блок-схема (рис.4.3) представляє алгоритм керування процесом виробництва електролітичного діоксиду марганцю.

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 4.3 – Блок-схема програмного забезпечення

Ось основні етапи:

- Старт / Ініціалізація: початок роботи системи та ініціалізація всіх параметрів.
- Читання параметрів (I, T, H, P)

Зчитуються наступні параметри:

- **I** — струм.
- **T** — температура.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

- **Н** — рівень рідини.
- **Р** — тиск.
- Контроль струму: перевірка значення струму:
 - Якщо струм виходить за межі допустимого діапазону ($140 < I > 160$), то повторне зчитування параметрів.
 - Якщо струм у межах норми, система переходить до контролю температури.
- Контроль температури:
 - Перевіряється поточне значення температури, і, залежно від результату, вмикається або вимикається нагрів/охолодження.
- Увімкнути нагрів/охолодження:
 - Активація нагрівального або охолоджувального елемента залежно від вимог процесу.
- Контроль рівня Н:
 - Перевіряється рівень рідини у системі.
- Дозування / Відкачування:
 - Залежно від рівня Н здійснюється або дозування реагенту, або відкачування надлишку.
- Контроль тиску

Перевірка тиску на відповідність допустимим значенням:

- Якщо тиск $P < 130$ — аварія, зупинка процесу.
- Якщо тиск $P > 170$ — скидання тиску.
- Запис у лог:
 - Логування всіх важливих подій і параметрів.
- Циклічність:
 - Якщо всі умови дотримані, система повторює цикл (позначено як "Так").
 - Якщо виявлена аварія, цикл завершується (позначено як "Ні").

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ця блок-схема забезпечує автоматичний контроль технологічних параметрів для стабільного та безпечного процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю.

4.4 Алгоритми керування

Алгоритми керування створені у середовищі Canvas на мові MATLAB. Їх можна переглядати у редакторі Canvas та вносити корективи, якщо потрібно.

```
% Основний файл: main.m
```

```
% Програма автоматизації процесу електролізу марганцю
```

```
% Параметри системи
```

```
setpoint_temp = 70; % Задана температура (°C)
```

```
setpoint_current = 100; % Заданий струм (A)
```

```
% Головний цикл
```

```
for t = 1:100
```

```
    % Отримання поточних даних
```

```
    current_temp = 68 + randn(); % Імітація вимірювання температури
```

```
    current_val = 98 + randn(); % Імітація вимірювання струму
```

```
    % Розрахунок керуючих впливів
```

```
    temp_control = control_temperature(current_temp, setpoint_temp);
```

```
    current_control = control_current(current_val, setpoint_current);
```

```
    % Відображення результатів
```

```
    fprintf('Час: %d с, Температура: %.2f °C, Керування: %.2f
```

```
    ', t, current_temp, temp_control);
```

```
    fprintf('Час: %d с, Струм: %.2f A, Керування: %.2f
```

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

', t, current_val, current_control);
    pause(0.1);
end

% Окремий файл: pid_control.m
function control_output = pid_control(Kp, Ki, Kd, error, prev_error, integral)
    derivative = error - prev_error;
    integral = integral + error;
    control_output = Kp * error + Ki * integral + Kd * derivative;
end

% Окремий файл: control_temperature.m
function temp_control = control_temperature(current_temp, setpoint)
    persistent prev_error integral;
    if isempty(prev_error)
        prev_error = 0;
        integral = 0;
    end
    error = setpoint - current_temp;
    temp_control = pid_control(2.0, 0.1, 0.01, error, prev_error, integral);
    prev_error = error;
end

% Окремий файл: control_current.m
function current_control = control_current(current_val, setpoint)
    persistent prev_error integral;
    if isempty(prev_error)
        prev_error = 0;

```

					<i>БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		51

```

integral = 0;
end
error = setpoint - current_val;
current_control = pid_control(1.5, 0.05, 0.005, error, prev_error, integral);
prev_error = error;
end

```

4.5 Опис електричної принципової схеми автоматизації процесу

Схема (рис.4.4) є електричною принциповою схемою автоматизації процесу, що містить наступні компоненти [16-30]:

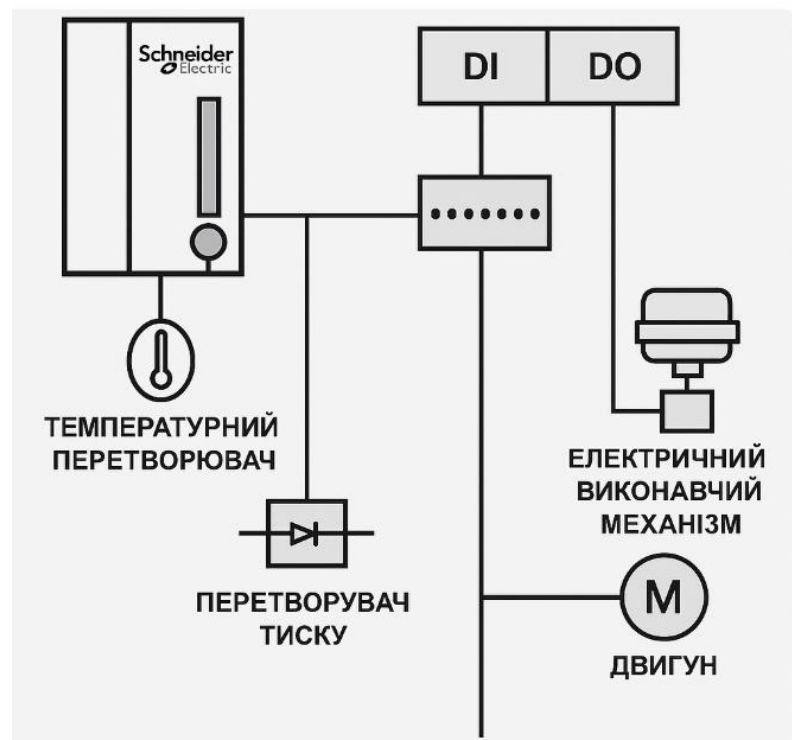


Рисунок 4.4 – Електрична принципова схема

Основні компоненти схеми:

1. Температурний перетворювач:

- Вимірює температуру технологічного процесу.
- Передає сигнал на контролер або інший вимірювальний пристрій.
- У схемі зображений із символом термометра.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

2. Перетворювач тиску:

- Вимірює тиск у системі.
- Представлений у вигляді діодного символу (умовно позначає вимірювальний елемент).

3. Контролер Schneider Electric:

- Головний пристрій управління процесом.
- Виконує обробку сигналів від датчиків температури та тиску.
- Містить входи і виходи (DI та DO):
 - DI (Digital Input): Цифровий вхід для зчитування сигналів від датчиків.
 - DO (Digital Output): Цифровий вихід для керування виконавчими механізмами.

4. Електричний виконавчий механізм:

- Приймає сигнали керування з контролера.
- Забезпечує виконання дій (наприклад, відкриття клапана або запуск насоса).

5. Електродвигун (M):

- З'єднаний з електричним виконавчим механізмом.
- Забезпечує механічний рух або подачу робочого середовища.

Функціонування системи:

1. Збір даних:

- Температурний та тисковий перетворювачі передають сигнали на контролер.

2. Обробка сигналів:

- Контролер Schneider Electric отримує дані через цифрові входи (DI).
- Виконується обробка сигналів та розрахунок керуючих дій.

3. Керування:

- Контролер через цифрові виходи (DO) подає сигнали на виконавчий механізм.
- Виконавчий механізм запускає або зупиняє електродвигун залежно від команди.

4. Реакція системи:

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

- Двигун забезпечує механічну дію, наприклад, регулювання потоку або тиску.
- Вся інформація про процес записується в лог контролера.

Висновки до розділу

У цьому розділі розроблено комплекс схем та алгоритмів для автоматизації технологічного процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю, що дозволяє забезпечити стабільність процесу та підвищити ефективність управління.

Створено принципові електричні схеми для автоматизованого контролю основних параметрів процесу: температури, струму, тиску та рівня реагентів.

Запропонована архітектура системи автоматизації передбачає використання сучасних контролерів (зокрема, Schneider Electric, Simens), що забезпечують точність і надійність регулювання.

Розроблені алгоритми регулювання температури та струму базуються на використанні ПІД-регуляторів, що дозволяє забезпечити стабільність технологічних параметрів у реальному часі. Передбачено автоматичний контроль рівня реагентів з дозуванням або відкачуванням у разі відхилення від заданих меж.

Розроблені схеми та алгоритми можуть бути адаптовані до інших процесів електролізу, що розширює можливості автоматизації подібних технологічних комплексів. Впровадження автоматизованого управління дозволяє значно підвищити якість продукції та зменшити витрати на енергоресурси.

					<i>БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						54
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході виконання роботи було вирішено низку важливих наукових та інженерних завдань, спрямованих на підвищення ефективності виробництва електролітичного діоксиду марганцю шляхом автоматизації технологічного процесу.

Основні результати роботи:

- Проведено аналіз основних етапів виробництва електролітичного діоксиду марганцю, визначено ключові технологічні параметри та фактори, що впливають на якість продукції. Встановлено, що основними параметрами для автоматизації є температура, струм електролізу, рівень реагентів та тиск у системі.
- Розроблено математичні моделі процесу електролізу, що дозволяють описати взаємозв'язок між основними параметрами та вихідними показниками продукції. Отримані передавальні функції системи дозволили оцінити динамічні властивості процесу та провести його лінеаризацію для спрощення аналізу.
- Розроблено принципову електричну схему автоматизації процесу з використанням ПЛК Schneider Electric. Система передбачає автоматичне регулювання температури, струму та рівня реагентів із застосуванням ПІД-регуляторів для забезпечення стабільної роботи електролізера.
- Створено алгоритми контролю температури та струму з урахуванням впливу зовнішніх збурень, що забезпечують швидке відновлення стабільного стану системи. Реалізовано алгоритм моніторингу рівня реагентів із функцією дозування або відкачування для підтримання оптимального рівня в електролітичній ванні.
- Проведений аналіз показав, що розроблена система керування є стійкою та забезпечує мінімальні перехідні процеси при збуреннях. Показники якості регулювання, такі як перерегулювання та час перехідного процесу, відповідають встановленим вимогам до технологічного процесу.

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рекомендації щодо впровадження:

- Для забезпечення стабільності та безперебійності роботи системи необхідно проводити регулярну діагностику обладнання та оновлення програмного забезпечення ПЛК.
- Рекомендується впровадити систему дистанційного моніторингу технологічних параметрів для оперативного реагування на можливі відхилення.
- З метою підвищення енергоефективності доцільно впровадити алгоритми оптимального керування струмом електролізу в залежності від завантаження системи.

Автоматизація процесу виробництва електролітичного діоксиду марганцю дозволяє значно підвищити продуктивність та стабільність роботи технологічного комплексу. Розроблена система автоматизованого керування забезпечує зниження впливу людського фактора, підвищення якості кінцевого продукту та зменшення експлуатаційних витрат. Впровадження даної системи сприятиме ефективному управлінню виробничим процесом та покращенню техніко-економічних показників підприємства.

					<i>БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Волошин М. Д. Електрохімічна технологія неорганічних речовин : навчальний посібник / Волошин М. Д., Іванченко А. В. — Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2012. — 325 с.
2. Хімічні технології та інженерія: навчальний посібник / за ред. В.О. Петрова. — Дніпро: УДХТУ, 2025. — 350 с.
3. Пальчевський Б.О. Дослідження технологічних систем: навч. посіб. — Київ: НТУУ «КПІ», 2018. — 278 с.
4. Білецький В.С., Смирнов В.О. Моделювання процесів збагачення корисних копалин: монографія. — Донецьк: Східний видавничий дім, 2013. — 304 с.
5. Лукінюк М.В. Контроль і керування хіміко-технологічними процесами: у 2 кн. Кн. 1. Методи та технічні засоби автоматичного контролю хіміко-технологічних процесів: навч. посіб. — К.: НТУУ «КПІ», 2012. — 336 с.
6. Лукінюк М.В. Контроль і керування хіміко-технологічними процесами: у 2 кн. Кн. 2. Керування хіміко-технологічними процесами: навч. посіб. — К.: НТУУ «КПІ», 2012. — 336 с.
7. Макаров В. Автоматизовані системи керування хіміко-технологічними процесами: навч. посіб. — Одеса: ОНПУ, 2021. — 250 с.
8. Ларичева Л.П., Волошин М.Д., Луценко О.П. Контроль та автоматичне регулювання хіміко-технологічних процесів: навч. посіб. — Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2015. — 320 с.
9. Клименко О.П., Каюн І.Г., Шейкус А.Р. Контроль і управління технологічними процесами: навч. посіб. — Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2019. — 179 с.
10. Бабіченко А.К., Тошинський В.І., Михайлов В.С., Подустов М.О., Пугановський О.В. Промислові засоби автоматизації. Ч. 1. Вимірвальні пристрої: навч. посіб. — Харків: НТУ «ХПІ», 2001. — 470 с.
11. Єфімов В.Т., Молчанов В.І., Єфімов О.В. Методи розрахунків в автоматизації хіміко-технологічних та теплоенергетичних процесів: навч. посіб. — Харків: ХДПУ, 1998. — 316 с.

					БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 12.Цапар В. Адаптивні та робастні системи керування: навч. посіб. – Київ: НТУУ «КПІ», 2012. – 300 с.
- 13.Методи дослідження хіміко-технологічних систем: навч. посіб. – Дніпро: УДХТУ, 2022. – 150 с.
- 14.Волошин М.Д., Іванченко А.В. Електрохімічна технологія неорганічних речовин: навч. посіб. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2019. – 328 с.
- 15.Бик М.В., Фроленкова С.В., Букет О.І., Васильєв Г.С. Технічна електрохімія. Частина 2: Хімічні джерела струму: навч. посіб. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 321 с.
- 16.Ковалевський В.М. Технічні засоби автоматизації: створення схем для електричних систем керування технологічним процесом об'єкта автоматизації: навч. посіб. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 124 с.
- 17.Барало О.В., Самойленко П.Г., Гранат С.Є., Ковальов В.О. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: навч. посіб. – Київ: Аграрна освіта, 2010. – 557 с.
- 18.Головко Д.Б., Реґо К.Г., Скрипник Ю.О. Автоматика і автоматизація технологічних процесів: підручник. – Київ: Либідь, 1997. – 232 с.
- 19.Головінський Б.Л., Шуруб Ю.В., Дудник А.О., Лисенко В.П. Цифрові системи керування: навч. посіб. – Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2016. – 110 с.
- 20.Гончаренко Б.М., Осадчий С.І., Віхрова Л.Г., Каліч В.М., Дідик О.К. Автоматизація виробничих процесів. – Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2016. – 352 с.
- 21.Бур'ян С.О., Землянухіна Г.Ю., Волянський Р.С. Системи автоматизації: лабораторний практикум. Частина 1: навч. посіб. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 255 с.
- 22.Данилюк М.І., Лобур М.В. Автоматизація неперервних технологічних процесів: навч. посіб. – Тернопіль: ТНТУ, 2008. – 160 с.

					<i>БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

23. Головінський Б.Л., Шуруб Ю.В., Дудник А.О., Лисенко В.П. Автоматизація типових технологічних процесів та виробництв: навч. посіб. – Київ: НУБіП України, 2023. – 150 с.
24. Ларичева Л.П., Волошин М.Д., Луценко О.П. Контроль та автоматичне регулювання хіміко-технологічних процесів: навч. посіб. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2015. – 320 с.
25. Wang H., Cui L.-F., Yang Y., et al. Mn₃O₄-Graphene Hybrid as a High Capacity Anode Material for Lithium Ion Batteries. – arXiv preprint arXiv:1009.3923, 2010. – DOI: 10.1109/TIM.2010.2047594.
26. Guidelines for Safe Automation of Chemical Processes / Center for Chemical Process Safety (CCPS). – 2nd ed. – Hoboken, New Jersey: Wiley, 2015. – 384 p.
27. Chemical Process Dynamics and Controls Book I / R. Woolf, J. Doyle, B. Himmelblau. – University of Michigan, Open Educational Resources, 2020. – 200 p. – Access mode: open.umich.edu.
28. Automation and Process Control Standards Used by Chemical Engineers / American Institute of Chemical Engineers (AIChE). – CEP Magazine, May 2025. – Access mode: aiche.org.
29. Chemical Process Dynamics and Controls (Woolf) / R. Woolf. – LibreTexts Engineering, 2022. – Access mode: eng.libretexts.org.
30. Machine Learning for Process Control of (Bio)Chemical Processes / Y. Zhang, P. K. Jain, D. R. Weller. – arXiv preprint, 2025. – Access mode: arxiv.org.

					<i>БР.АКПзд – 06.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58