

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ

Група АКП -21-1

Ярослав Остап'юк

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

Остап'юк Ярослав Степанович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 685.1: 66.097.3

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Автоматизація процесу виробництва перманганату калію комбінованим

(назва роботи)

МЕТОДОМ

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

О.В. Кучмистенко

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-21-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

Я.С. Остап'юк

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

М. В. Шавранський

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.Я. Чигур

(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 151-Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

А.І.Лагойда

202 року

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Остап'юку Ярославу Степановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація процесу виробництва перманганату калію комбінованим методом

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

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

затвержені наказом закладу вищої освіти від « 07 » 05 20 25 року № 52/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025

3. Вихідні дані до роботи матеріали практики, технологічний регламент

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

4.1. Аналіз технології виробництва перманганату калію як об'єкта автоматизації

4.2. Математичне моделювання процесу електролізу перманганату калію

4.3. Синтез системи керування процесом електролізу у виробництві

перманганату калію

4.4 Вибір технічних засобів автоматизації. Розробка схем.

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

Лист 1 - Технологічна схема - БР.АКП – 15.00.00.001

Лист 2 - Основні технологічні параметри процесу-БР.АКП – 15.00.00.002

Лист 3 - Математичне моделювання процесу-БР.АКП – 15.00.00.003

Лист 4 - Код моделі у MATLAB. Синтез СК- БР.АКП – 15.00.00.004

Лист 5 - Аналіз стійкості СК процесом електролізу - БР.АКП – 15.00.00.005

Лист 6 - Аналіз показників якості регулювання – БР.АКП – 15.00.00.006

Лист 7 - Технічні засоби автоматизації - БР.АКП – 15.00.00.007

Лист 8 - Функціональна схема автоматизації БР.АКП – 15.00.00.008

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технології виробництва перманганату калію як об'єкта автоматизації	13.05.2025 р.	
2	Математичне моделювання процесу електролізу перманганату калію	20.05.2025 р.	
3	Синтез системи керування процесом одержання водню і кисню	30.05.2025 р.	
4	Розробка проектних схем автоматизації	05.06.2025 р.	
5	Висновки по роботі	12.06.2025 р.	

Студент _____
(підпис)

Я.С. Остап'юк
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

М.В. Шавранський
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 60 сторінок, 17 рисунків, 5 таблиць, 20 джерел.

Тема: «Автоматизація процесу виробництва перманганату калію комбінованим методом»

Об'єкт дослідження: процес виробництва перманганату калію комбінованим методом, що включає електроліз та подальші стадії обробки розчину.

Мета проекту: розробка системи автоматичного керування процесом електролізу у виробництві перманганату калію комбінованим методом з використанням сучасних методів регулювання (PID, адаптивне, каскадне) та проаналізувати її ефективність на основі моделювання в MATLAB/Simulink.

Методи дослідження: у дослідженні застосовано теоретичні методи аналізу літературних джерел та математичного моделювання для обґрунтування вибору параметрів автоматизації. Експериментальні методи використовувалися для вивчення впливу технологічних змінних на процес отримання перманганату калію. Інженерно-технічні методи охоплювали проєктування та моделювання системи автоматичного керування в середовищах MATLAB/Simulink і TIA Portal. Для підвищення ефективності керування було застосовано методи оптимізації параметрів регулювання.

Результати кваліфікаційної роботи: у результаті проведеного дослідження було розроблено структурну схему автоматизації процесу виробництва перманганату калію комбінованим методом. Побудовано математичну модель основних стадій процесу та реалізовано її в середовищі MATLAB/Simulink. Синтезовано алгоритм автоматичного регулювання температури та рН з використанням ПД-регуляторів. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої системи автоматизації, що забезпечує підвищення стабільності та енергоефективності технологічного процесу.

Ключові слова: автоматизація, електроліз, перманганат калію, комбінований метод, система керування, регулювання, адаптивне регулювання, каскадне керування, MATLAB/Simulink, стабільність процесу, стійкість системи.

ABSTRACT

Bachelor's thesis contains: 60 pages, 17 figures, 5 tables, 20 sources.

Topic: "Automation of the process of producing potassium permanganate by a combined method"

Object of research: the process of producing potassium permanganate by a combined method, which includes electrolysis and subsequent stages of solution treatment.

Purpose of work: development of an automatic control system for the electrolysis process in the production of potassium permanganate by a combined method using modern control methods (PID, adaptive, cascade) and to analyze its effectiveness based on modeling in MATLAB/Simulink.

Research methods: the study used theoretical methods of analyzing literary sources and mathematical modeling to justify the choice of automation parameters. Experimental methods were used to study the influence of technological variables on the process of obtaining potassium permanganate. Engineering and technical methods covered the design and modeling of an automatic control system in MATLAB/Simulink and TIA Portal environments. To increase the efficiency of control, methods for optimizing control parameters were applied.

Results of the bachelor's thesis: as a result of the research, a structural diagram of the automation of the potassium permanganate production process by a combined method was developed. A mathematical model of the main stages of the process was built and implemented in the MATLAB/Simulink environment. An algorithm for automatic temperature and pH control using PID controllers was synthesized. The results obtained confirm the effectiveness of the proposed automation system, which ensures increased stability and energy efficiency of the technological process.

Keywords: automation, electrolysis, potassium permanganate, combined method, control system, regulation, adaptive regulation, cascade control, MATLAB/Simulink, process stability, system stability.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ПЕРМАНГАНАТУ КАЛІЮ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	10
1.1 Властивості, методи одержання й області застосування	10
1.2 Теоретичні основи комбінованого методу	11
1.3 Склад розчину електроліту.....	11
1.4 Умови електролізу	12
1.5 Електрохімічний метод	12
1.6 Опис технологічної схеми виробництва перманганату калію комбінованим методом.....	14
1.7 Ключові технологічні параметри автоматичного контролю процесу виробництва перманганату калію комбінованим методом	16
1.8 Конструкції електролізерів.....	17
Висновки до розділу.....	21
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОЛІЗУ ПЕРМАНГАНАТУ КАЛІЮ.....	22
2.1 Компоненти математичної моделі	22
2.2 Математична модель з конкретними числовими значеннями.....	23
2.3 Модель хімічної реакції з температурною залежністю (закон Арреніуса).....	27
Висновки до розділу	29
3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЕЛЕКТРОЛІЗУ У ВИРОБНИЦТВІ ПЕРМАНГАНАТУ КАЛІЮ.....	31
3.1 Об'єкт керування – електролізер перманганату калію.....	31
3.2 Контрольовані та регульовані змінні	31

					БР.АКП - 15.00.00.000 ПЗ				
Змн.	Лист	№ докумен.	Підпис	Дата					
Розроб.		Остап'юк Я.С.			Автоматизація процесу виробництва перманганату калію комбінованим методом		Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Шавранський М.В.						6	
Реценз.		Чигур Л.Я.					АКП-21-1 ІФНТУНГ		
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.							
Затверд.		Лагойда А.І.							

3.3 Структура системи керування.....	33
3.4 Вибір типу регулятора та налаштування	33
3.5 Реалізація на ПЛК та інтеграція з HMI/SCADA.....	34
3.6 Модель та алгоритм реалізації (Simulink)	35
3.7 Аналіз стійкості системи керування процесом електролізу у виробництві перманганату калію.....	38
3.8 Аналіз показників якості системи керування процесом електролізу у виробництві перманганату калію.....	40
Висновки до розділу.....	45
4 ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ. РОЗРОБКА СХЕМ.....	47
4.1 Вибір технічних засобів автоматизації (ТЗА).....	47
4.2 Схеми підключення контролерів Siemens	48
4.2 Автоматизована система керування процесом електролізу на основі ПЛК.....	56
4.3 Підключення установки електролізера	50
4.4 Функціональна схема автоматизації електролізера	52
Висновки до розділу.....	54
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	56
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	58

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АСК – автоматизована система керування

АСУ ТП – автоматизована система управління технологічним процесом

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

ММ – математичне моделювання

ПЛК – програмований логічний контролер

ПП – програмний продукт

СА – система автоматизації

САК – система автоматичного керування

СК – система керування

ТЗА – технічні засоби автоматизації

ТП – технологічний процес

ФСАЕ – функціональна схема автоматизації електролізера

ФЧХ – фазо-частотна характеристика

					БР. АКП - 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

У сучасній хімічній промисловості спостерігається постійна тенденція до впровадження автоматизованих систем керування, які забезпечують підвищення ефективності, безпеки та стабільності виробничих процесів. Особливого значення набуває автоматизація енергомістких і потенційно небезпечних технологій, до яких належить виробництво перманганату калію.

Перманганат калію (KMnO_4) є важливим неорганічним окисником, що широко використовується в хімічній промисловості, фармації, водоочищенні, металургії та лабораторній практиці. Його отримання здійснюється комбінованим методом, який включає термічне окиснення сполук марганцю з подальшим електролізом водного розчину манганату калію. Цей процес характеризується значною складністю, високими вимогами до стабільності технологічних параметрів, а також потребою в чіткому контролі температури, концентрації, напруги та струму.

Автоматизація процесу виробництва перманганату калію дозволяє забезпечити точне дотримання технологічних режимів, знизити вплив людського фактора, підвищити якість продукції та зменшити енергоспоживання. Використання сучасних технічних засобів автоматизації, таких як програмовані логічні контролери, сенсорні пристрої, частотні перетворювачі та системи диспетчерського керування, створює умови для гнучкого, надійного й ефективного управління процесом.

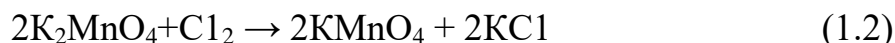
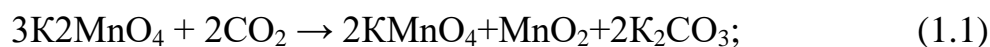
Метою цієї роботи є розробка автоматизованої системи керування процесом виробництва перманганату калію комбінованим методом, що включає аналіз технології, вибір оптимальних технічних засобів автоматизації, розробку структурної та функціональної схеми керування, а також обґрунтування доцільності впровадження запропонованого рішення у промислових умовах.

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ПЕРМАНГАНАТУ КАЛІЮ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Властивості, методи одержання й області застосування

Перманганат калію KMnO_4 , сіль марганцевої кислоти, кристалізується у вигляді темно-фіолетових кристалів, розчинних у воді. Розчини KMnO_4 мають темно-малиновий, а при більших концентраціях — фіолетовий колір, властивий іонам MnO_4^- . При нагріванні вище 240°C перманганат калію розкладається. Як і всі сполуки марганцю (VII), перманганат калію є сильним окислювачем, що обумовлює його широке використання в реакціях органічного синтезу, у виробництві жирних і ароматичних кислот. Він застосовується у фотографії, для відбілювання тканин, протравлення дерева, як дезінфікуючий засіб. Одержання KMnO_4 може бути здійснене як хімічним, так і електрохімічним методами. Хімічний метод включає обробку манганату калію K_2MnO_4 діоксидом вуглецю або хлором [1,3,4]:

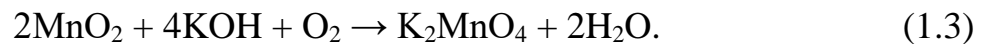


Недоліком цього методу є те, що при обробці K_2MnO_4 реагентами використовується тільки частина марганцю й калію. Практичне застосування в промисловості одержали два методи виробництва перманганату калію. Перший метод заснований на електрохімічному окислюванні манганата в перманганат (комбінований або напівелектрохімічний); другий метод полягає в анодному окислюванні марганцевих сплавів (електрохімічний). Електрохімічний метод на відміну від двостадійного комбінованого методу одержання KMnO_4 дозволяє отримувати цей продукт в одну стадію. Однак одностадійний метод вимагає великої витрати електроенергії на проведення електролізу й на виплавку в електропечах феросплавів, що використовуються для виготовлення анодів. Проте цей метод постійно вдосконалюється й дає можливість для появи нових перспектив завдяки використанню насипних анодів замість литих.

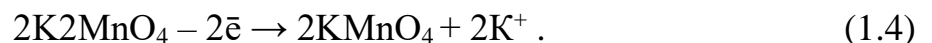
					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

1.2 Теоретичні основи комбінованого методу

У комбінованому методі виробництва KMnO_4 як сировина використовується природний піролюзит, що містить діоксид марганцю. Висококонцентровану оксидну марганцеву руду окислюють киснем при сплавці з гідроксидом калію[1,3,4]:



Отриманий манганат калію електрохімічно окислюють у перманганат. При цьому на аноді протікає наступна електрохімічна реакція:



На катоді відбувається відновлення води з утворенням водню й сумарний процес може бути записаний у вигляді наступного рівняння:



У процесі електролізу регенерується половина гідроксиду калію, що знову направляється на стадію одержання манганата калію.

1.3 Склад розчину електроліту

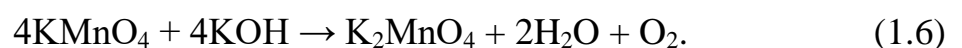
При електросинтезі перманганату калію використовуються електролізери періодичної дії. У процесі електролізу перманганат калію внаслідок поганої розчинності випадає у вигляді кристалів на дно електролізера [1,9,10].

У процесі електролізу склад розчину змінюється, як це показано в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Склад розчину електроліту до і після стадії електролізу

Склад розчину, кг/м ³ :	K_2MnO_4	KMnO_4	KOH	K_2CO_3	MnO_2
до електролізу	210	350	80	70	30
після електролізу	25	200	150	65	30

При цьому концентрація K_2CO_3 і MnO_2 залишається практично без зміни. Підвищення концентрації гідроксиду калію небажано, тому що буде відбуватися зворотне перетворення перманганату в манганат:



									Арк.
									11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ				

Наявність іонів SiO_3^{2-} зменшує вихід за струмом; домішки іонів C^{1-} і SO_4^{2-} практично не впливають на хід електролізу.

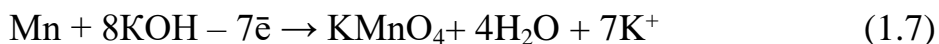
1.4 Умови електролізу

Процес анодного окислювання манганата калію до перманганату лімітується дифузією іонів MnO_4^{2-} з об'єму розчину до електродної поверхні. Тому робоча щільність струму залежить від ефективності перемішування розчину. У промислових електролізерах щільність струму становить $0,08 \div 0,09$ кА/м². Підвищення температури електролізу знижує напруга завдяки зменшенню перенапруги виділення водню й збільшенню електропровідності електроліту. Проте разом із цим з ростом температури прискорюється процес каталітичного розкладання KMnO_4 діоксидом марганцю, що перебуває в розчині електроліту. Тому інтервал температур для практичного електролізу оптимізований і становить $50 \div 60$ °С [1,3,4].

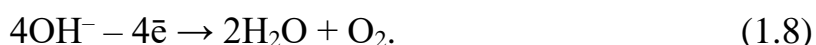
Як анодний матеріал використовують нікельовану або нержавіючу сталь, що завдяки утворенню при анодній поляризації в лужному розчині оксидної плівки досить стійка в процесі електролізу.

1.5 Електрохімічний метод

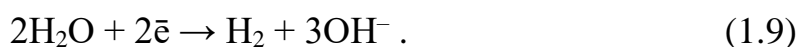
Даний метод одержання перманганату калію заснований на анодному розчиненні марганцю зі сплавів. Як матеріал для виготовлення розчинних анодів використовують феромарганець-сплав, що містить 78 % Mn, близько 13 % Fe, $6 \div 7$ % C й 1,25 % Si. Основна реакція на аноді [1,3,4,9,10]:



На аноді відбувається виділення кисню:



На катоді виділяється водень і утворюються гідроксильні іони:



Сумарна реакція в електролізері:



					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Існує дві точки зору на механізм анодного розчинення марганцю. Відповідно до однієї з них при анодному розчиненні безпосередньо утворюються іони манганата й перманганату. Відповідно до іншої точки зору окислювання марганцю відбувається через проміжні ступені окислювання. Концентрація гідроксиду калію в розчині електроліту впливає на процес анодного розчинення марганцю. З однієї сторони вона повинна забезпечувати активне розчинення марганцю й не приводити до розчинення заліза з феромарганцевого анода, з іншого боку — виключити розкладання KMnO_4 . Оптимальна концентрація KOH у розчині електроліту становить $17 \div 25$ %. Додавання в розчин до $3 \div 5$ % Na_2SiO_3 зменшує кількість діоксиду марганцю в шлам і усуває пасивацію анода. Оптимальна температура електроліту становить $15 \div 30$ °C. Підвищення температури призводить до розкладання KMnO_4 і до пасивації анода.

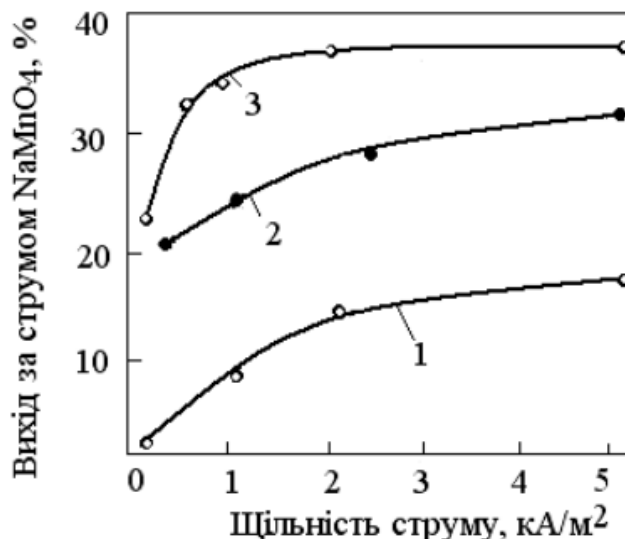
Для електролітичного розчинення марганцю аноди виконані з феромарганцю. Це обумовлено тим, що на анодах з марганцевих сплавів, що містять певну кількість домішок, на відміну від чистого марганцю, вихід за струмом вище внаслідок неоднорідності матеріалу анода. Для ілюстрації цього факту на рис. 1.1 наведені дані виходу за струмом перманганату натрію, отримані на анодах з феромарганцю й чистого марганцю [12].

У процесі електролізу вуглець, що входить до складу анодів, окислюється до діоксиду вуглецю. Останній поглинається розчином електроліту й переходить в карбонат калію. Наприкінці електролізу концентрація K_2CO_3 досягає 150 кг/м^3 . Електроліз ведуть за високої щільності струму ($1,5 \div 4,5 \text{ кА/м}^2$), що дозволяє підтримувати аноди в активному стані й забезпечити високий вихід за струмом.

1.6 Опис технологічної схеми виробництва перманганату калію комбінованим методом

Виробництво KMnO_4 з манганата включає наступні стадії: одержання манганатного плаву, його вилуговування, електроліз, одержання готового продукту. На рис. 1.2 зображена технологічна схема цього виробництва [1].

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13



1 – чистий марганець (аноліт 80 кг/м³ NaOH); 2 – феромарганець (аноліт 50 кг/м³ NaOH); 3 – феромарганець (аноліт 200 кг/м³ NaOH)

Рисунок 1.1 – Залежність виходу за струмом перманганату натрію від анодної щільності струму з анодами із чистого марганцю й феромарганцю

У бункер 1 подають піролюзит, що містить понад 80 % MnO₂. З бункера 1 за допомогою шнекового живильника 2 його подають у барабанну сушарку 3, і звідти через шнековий живильник 4 він надходить у кульовий млин 5. Розмелену руду направляють у бункер 6 і звідти в змішувач 8, куди з бака 7 надходить також розчин гідроксиду калію. Отриману суміш направляють у реактор 9 для окислювання киснем. Окислювання проводять при температурі 220 ÷ 300 °С. Плав манганата з реактора 9 подають в апарат 10 для підлужнення маточним розчином після кристалізації KMnO₄. Отриманий розчин центрифугують і через баки 12, 13 подають на електроліз. З електролізера 14 виводять пульпу й направляють у збірник 21, звідки її перекачують у кристалізатор 15, у якому вона охолоджується до 20 ÷ 25 °С.

Кристали KMnO₄, що випали, віджимають на центрифугі 16 і через шнековий живильник 17 подають у барабанну сушарку 18 і далі в збірник готового продукту 19. Маточний розчин після центрифуги 16 збирають у баці 20 і подають в апарат 10.

- уникнути помилок у проектуванні чи модернізації.

2). Виявлення точок автоматизації

На схемі легко визначити:

- ключові параметри контролю (температура, рН, струм тощо),
- місця встановлення датчиків, виконавчих механізмів, засобів регулювання,
- точки, де можливе застосування системи SCADA або ПЛК.

3). База для проектування

Вона є основою для:

- розробки автоматизованої системи керування (АСУ ТП),
- побудови функціональних схем,
- написання алгоритмів ПЛК.

1.7 Ключові технологічні параметри автоматичного контролю процесу виробництва перманганату калію комбінованим методом

Розглянемо основні технологічні параметри автоматичного контролю досліджуваного процесу, згідно опису схеми технологічного процесу [1,3,4,13,15].

- **Температура:** плавлення піролюзиту $\sim 473\text{--}543\text{ K}$, температура електролізу $\sim 333\text{ K}$, температура сушіння – за вимогами (звичайно $60\text{--}100\text{ }^\circ\text{C}$).
- **Струм/напруга:** підтримка заданої щільності електролітичного струму (прибл. $75\text{--}150\text{ A/m}^2$) і у межах допустимої напруги ($2,7\text{--}3,0\text{ В}$ на ванне).
- **Концентрації та рН:** лужність розчину ($\text{pH} \geq 13$) і концентрації $\text{K}_2\text{MnO}_4/\text{KMnO}_4$ підтримуються відповідними датчиками рН/ORP і регулюються дозуванням КОН.
- **Витрати та рівні:** потоки сировини, води та луку (витратоміри), рівні рідини у реакторах та кристалізаторах (датчики рівня).
- **Час та продуктивність:** тривалість кожної стадії (ремінні годинники у системі). Критичні таймери встановлюються для кожного циклу (наприклад, 24 години для плавлення, $14\div 16$ годин для електролізу).

Зведені дані по основних технологічних параметрах показано в таблиці 1.2

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Таблиця 1.2 – Ключові технологічні параметри автоматичного контролю процесу

№	Параметр	Значення / Діапазон	Засоби контролю	Місце вимірювання
1	Температура плавлення	473–543 К (200–270 °С)	Термопари, ТСП	Плавильна піч
2	Температура електролізу	~333 К (~60 °С)	Термопари, RTD	Електролізер
3	Температура сушіння	333–373 К (60–100 °С)	Термодатчики, ІЧ-датчики	Сушарка
4	Щільність струму	75–150 А/м ²	Контролер струму, амперметр	Електролізер
5	Робоча напруга	2,7–3,0 В	Вольтметр, контролер напруги	Електролізер
6	рН розчину	≥13	рН-метри	Розчини манганату, електроліт
7	Концентрація MnO ₄ ⁻	До насичення	Фотометр/ORP/кондуктометр	Після електролізу, кристалізатор
8	Рівень рідини	Залежно від резервуару	УЗ-датчики, гідростатичні датчики	Баки, ванни
9	Витрати сировини/води	Згідно з рецептурою	Витратоміри (турбінні, масові)	Подання сировини, промивка
10	Час процесу	Електроліз: 14–16 год; плавлення: ~24 год	Таймери, PLC	Загальний контроль циклів
11	Вологість кристалів	Мінімальна, для пакування	Датчики вологості	Вихід сушарки
12	Тиск газів	Контроль безпеки	Манометри, датчики Н ₂ /О ₂ (за потреби)	Катодна камера, вентиляція

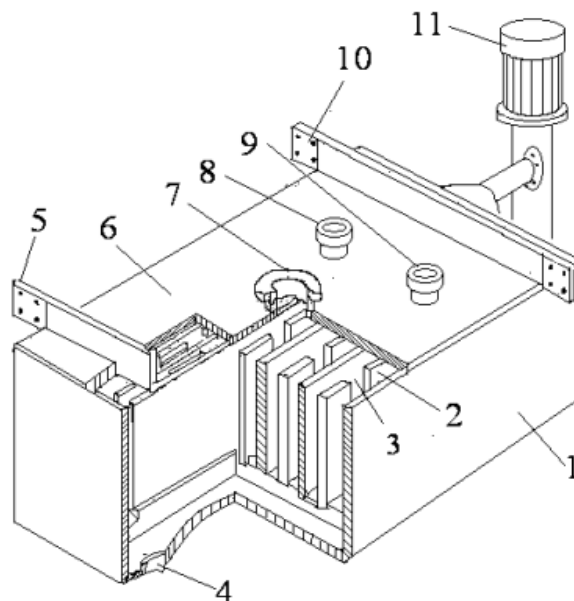
Уся ця інформація повинна зчитуватися і аналізуватися PLC у реальному часі для підтримки безперервної роботи: система відповідно повинна вмикати/вимикати нагрів, насоси та клапани за сигналами датчиків, забезпечувати стабільний хімічний режим.

1.8 Конструкції електролізерів

У виробництві KMnO₄, заснованому на комбінованому методі, застосовують прямокутні або циліндричні електролізери. Циліндричні

										Арк.
										17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ					

електролізери виготовлюють зі сталі [1,12]. Діаметр електролізера 2,3 м, висота 1,2 м. Днище електролізера виконане у вигляді конуса й оснащено штуцером для випуску електроліту. У корпусі електролізера розміщені 10 концентричних анодних циліндрів з нікельованої сталеві сітки й 9 катодних кілець, обгорнених лужно-стійкою тканиною. Анодні циліндри можуть бути виконані також з перфорованого аркуша (сплав мідь-мідь-нікельмідь). У центрі електролізера встановлена мішалка. Анодна щільність струму $0,08 \text{ кА/м}^2$, катодна — $0,9 \text{ кА/м}^2$. Навантаження на електролізері 5 кА, температура $50 \text{ }^\circ\text{С}$. При міжелектродній відстані 50 мм напруга на електролізері становить 2,6 В. Середній вихід за струмом 65 %. Схема однієї із промислових конструкцій електролізера прямокутного типу представлена на рис. 1.3.



1 – корпус; 2 – катод; 3 – анод; 4 – штуцер для вивантаження продукту; 5 – анодна шина; 6 – кришка; 7 – штуцер для відводу газоподібних продуктів; 8 – штуцер для підсмоктування повітря; 9 – штуцер для заповнення вихідним розчином; 10 – катодна шина; 11 – електродвигун осьового насосу

Рисунок 1.3 – Електролізер для одержання перманганату калію з манганата

Електролізер включає прямокутний корпус 1 з теплоізоляцією, днище з ухилом, оснащено кишенею для збору кристалів KMnO_4 . В електролізері розміщені 20 листових анодів 3, виконаних з нержавіючої сталі й 60 катодів 2,

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

у які для охолодження розчину електроліту подають воду. Між катодами поміщені феромарганцеві литі аноди 3, закріплені на анодних штангах 6 за допомогою пристроїв 8. Холодну воду подають із однієї сторони електролізера й виводять із протилежної сторони через труби 11 у жолоб 12.

Наприкінці електролізу через штуцер 4 виводять пульпу, що містить кристали перманганату калію. Електролізні гази виділяються через короби 5, розміщені на торцевих сторонах електролізера. Електролізер працює при струмовому навантаженні $6,5 \div 10$ кА. Вихід за струмом KMnO_4 близько 50 %, напруга $4,5 \div 5,0$ В. Для промислового використання запропоновані й інші конструкції електролізерів. Представляє інтерес ультразвуковий електролізер для одержання перманганату калію окислюванням KMnO_4 . Використання ультразвукового поля дозволяє збільшити анодну щільність струму до $0,8 \div 2,4$ кА/м², тобто в $10 \div 15$ разів більше, ніж в існуючих конструкціях електролізерів. Ефект впливу ультразвуку на процес електрохімічного одержання перманганату калію пояснюється зниженням концентраційної поляризації на аноді й перенапруги водню, а також диспергацією та дегазацією. Вихід за струмом в даних умовах становить 90 %. Для створення ультразвукового поля в електролізері використовуються магнітострикційні перетворювачі.

Процес анодного розчинення феромарганцю можна значно інтенсифікувати шляхом використання насипних електродів. Радянськими електрохіміками розроблена конструкція біполярного електролізера з насипним електродом зі шматків феромарганцю розміром $50 \div 100$ мм. Насипний електрод розміщений між струмовідводами, розташованими в нижній і верхній частинах електролізера. Використання насипних електродів дозволяє значно скоротити трудомісткість процесу й витрату електроенергії за рахунок усунення операцій, пов'язаних з виливком анодів і їхнім кріпленням в електролізерах. Один електролізер із площею поперечного перерізу насипного електрода $0,5$ м² і висотою шару засипання $0,5$ м здатний замінити серію з 15 електролізерів з литими анодами.

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Висновки до розділу

У результаті аналізу технологічного процесу виробництва перманганату калію встановлено, що процес є багатостадійним, тривалим і таким, що включає як термічні, так і електрохімічні етапи. Виробництво охоплює операції підготовки сировини, плавлення, вилуговування, фільтрації, електролізу, кристалізації, сушіння та пакування готового продукту.

Виявлено, що найбільш енергоємними та критичними до параметрів режиму є стадії плавлення та електролізу, які суттєво впливають на якість кінцевого продукту. Крім того, технологія вимагає точного дотримання температурного режиму, концентрацій реагентів, струмових характеристик і рН середовища, що обґрунтовує потребу у високому рівні автоматизації.

Аналіз дозволив визначити ключові точки контролю та регулювання, які мають бути автоматизовані: контроль температури, струму, напруги, рН, рівнів рідин, витрат реагентів і вологості продукту. Автоматизація цих параметрів дозволить підвищити стабільність процесу, знизити вплив людського фактора, забезпечити безпеку та економічність виробництва, а також покращити якість готового продукту.

Таким чином, процес виробництва перманганату калію є доцільним об'єктом автоматизації з огляду на його складність, тривалість і високі вимоги до точності параметрів технологічного середовища.

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОЛІЗУ ПЕРМАНГАНАТУ КАЛІЮ

Математичне моделювання електролізу перманганату калію – це складна задача, яка охоплює електрохімічні реакції, транспорт іонів, дифузію та електричне поле в розчині [1,2].

2.1 Компоненти математичної моделі

Загальне уявлення про математичні моделі у контексті хімічних технологій (електроліз) передбачає формалізацію фізико-хімічних процесів у вигляді рівнянь, що описують зміну концентрацій, температур, мас і інших змінних у часі.

Матеріальні баланси [2], які описують зміну концентрацій речовин у часі в об'ємі.

Типовий вигляд:

$$\frac{dC_i}{dt} = \text{вхід} - \text{вихід} \pm \text{реакція}$$

У випадку електролізу:

$$\frac{dC_{MnO_4}}{dt} = \frac{\eta I}{FV}$$

Рівняння Нернста-Планка (транспорт іонів):

$$\frac{dC_i}{dt} = -\nabla \cdot J_i + R_i$$

C_i – концентрація іону i ;

J_i – щільність потоку іону (враховує дифузію, міграцію, конвекцію);

R_i – джерело або поглинання речовини в результаті реакції.

Кінетичні рівняння, які визначають швидкість хімічної реакції або кристалізації залежно від концентрацій і температури.

$$r = k(C - C^*)g \text{ (для кристалізації)}$$

Формула для потоку іонів:

$$J_i = -D_i \nabla C_i - \frac{z_i D_i F}{RT} C_i \nabla \phi$$

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

де: D_i – коефіцієнт дифузії;

z_i – заряд іону;

Φ – електричний потенціал;

F – число Фарадея;

R – газова стала;

T – температура.

Енергетичні баланси – описують зміну температури в об'ємі:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = Q_{\text{введ}} - Q_{\text{вивед}} \pm Q_{\text{реакц}}$$

Електрохімічні залежності

Закони Фарадея, Нернста, потенціали електродів, поляризація:

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{ОКИСН}]}{[\text{ВІДНОВ}]}$$

Масообмін, який враховує перенесення речовин до/від поверхні електродів або кристалів.

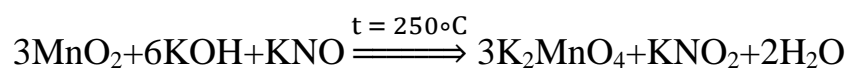
$$J = k_m (C_{\text{bulk}} - C_{\text{surf}})$$

2.2 Математична модель з конкретними числовими значеннями

Розглянемо математичну модель комбінованого процесу виробництва перманганату калію (K_2MnO_4) у вигляді системи рівнянь з конкретними числовими значеннями. Модель включає два етапи: термічний окиснення MnO_2 та електроліз манганату [2].

2.2.1 Хімічна стадія: Окиснення MnO_2 до K_2MnO_4

Хімічна реакція:



Вхідні дані:

Маса $\text{MnO}_2 = 100$ г

Молекулярна маса $\text{MnO}_2 \approx 86.94$ г/моль

$\text{KOH} = 120$ г ($M = 56.1$ г/моль)

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

$$\text{KNO}_3 = 30 \text{ г (M = 101.1 г/моль)}$$

Математична модель масового балансу (у молях):

$$n_{\text{MnO}_2} = 100/86.94 \approx 1.15 \text{ моль}$$

$$n_{\text{KOH}} = 120/56.1 \approx 2.14 \text{ моль}$$

$$n_{\text{KNO}_3} = 30/101.1 \approx 0.297 \text{ моль}$$

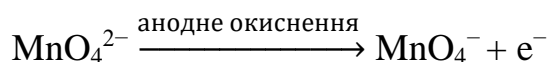
Теоретичний вихід K_2MnO_4 :

$$n_{\text{K}_2\text{MnO}_4} = n_{\text{MnO}_2} = 1.15 \text{ моль}$$

$$m_{\text{K}_2\text{MnO}_4} = 1.15 \times 197.13 \approx 226.7 \text{ г}$$

2.2.2 Електроліз K_2MnO_4 до KMnO_4

Електрохімічне перетворення:



Електролізні умови:

Концентрація початкова: $C_0 = 1$ моль/л

Об'єм розчину: $V = 0,5$ л

Напруга: $U = 3U = 3U = 3$ В

Струм: $I = 2$ А

Час: $t = 2$ години = 7200 с

$n = 1$ (електрон на молекулу)

Модель: Закон Фарадея

$$n = \frac{I \cdot t}{n_e \cdot F} \Rightarrow n_{\text{KMnO}_4} = \frac{2 \cdot 7200}{1 \cdot 96485} \approx 0.149 \text{ моль}$$

Теоретичний вихід KMnO_4 :

$$m_{\text{KMnO}_4} = 0.149 \cdot 158.03 \approx 23.5 \text{ г}$$

Підсумкова структура моделі показана в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Підсумкова структура моделі

Стадія	Вхідні речовини	Теоретичний вихід
Окиснення MnO_2	$\text{MnO}_2 + \text{KOH} + \text{KNO}_3$	~226.7 г K_2MnO_4
Електроліз	K_2MnO_4 у розчині	~23.5 г KMnO_4

Ще розглянемо математичне моделювання електролізу перманганату калію з конкретними числовими значеннями для ілюстрації:

У водному розчині KMnO_4 (0.1 моль/л) проводиться електроліз при постійній напрузі. Анод — платиновий, катод — вуглецевий.

Відомо:

- Площа електродів $A=10 \text{ см}^2 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$;
- Відстань між електродами $d = 1 \text{ см} = 0,01 \text{ м}$;
- Напруга на електродах $U=5 \text{ В}$;
- Опір електроліту $R = \rho \cdot \frac{d}{A} = \frac{0.01}{1 \cdot 10^{-3}} = 100 \text{ Ом}$
- Тривалість електролізу $t = 3600 \text{ с}$

Розрахунок струму

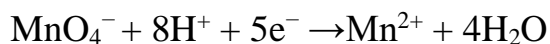
$$I = \frac{U}{R} = \frac{5}{100} = 0.05 \text{ А}$$

Обчислення кількості електрики

$$Q = I \cdot t = 0,05 \cdot 3600 = 180 \text{ Кл}$$

Визначення кількості речовини, що прореагувала

Для реакції:



На 1 моль MnO_4^- потрібно 5 моль електронів. Тобто:

$$n(\text{e}^-) = \frac{Q}{F} = \frac{180}{96485} \approx 0.00187 \text{ моль}$$

$$n(\text{MnO}_4^-) = \frac{0.00187}{5} \approx 3.74 \cdot 10^{-4} \text{ моль}$$

Маса прореагованого KMnO_4

$$M(\text{KMnO}_4) = 158,04 \text{ г/моль}$$

$$m = 3,74 \cdot 10^{-4} \cdot 158,04 \approx 0,059 \text{ г}$$

Отже, за 1 годину електролізу при струмі 50 мА прореагує приблизно 0,059 г перманганату калію. Цей приклад демонструє, як математичне моделювання дозволяє кількісно оцінити перебіг процесу електролізу [13].

MATLAB – реалізація показана нижче:

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

```
% Модель електролізу K2MnO4 до KMnO4
```

```
% Дата: 2025
```

```
clc;
```

```
clear;
```

```
% Постійні
```

```
F = 96485; % заряд Фарадея, Кл/моль
```

```
I = 2; % струм, А
```

```
n_e = 1; % кількість електронів на одну реакцію
```

```
V = 0.5; % об'єм розчину, л
```

```
t_total = 7200; % загальний час, с (2 години)
```

```
% Вектор часу
```

```
t = linspace(0, t_total, 1000); % час в секундах
```

```
% Кількість молей KMnO4, що утворюється
```

```
n_KMnO4 = (I .* t) ./ (n_e * F);
```

```
% Концентрація KMnO4 в розчині
```

```
C_KMnO4 = n_KMnO4 ./ V; % моль/л
```

```
% Графік
```

```
figure;
```

```
plot(t / 60, C_KMnO4, 'm', 'Linewidth', 2);
```

```
xlabel('Час, хвилини');
```

```
ylabel('Концентрація KMnO4, моль/л');
```

```
title('Зміна концентрації KMnO4 під час електролізу');
```

```
grid on;
```

Візуалізація результатів наведена на рис.2.1.

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

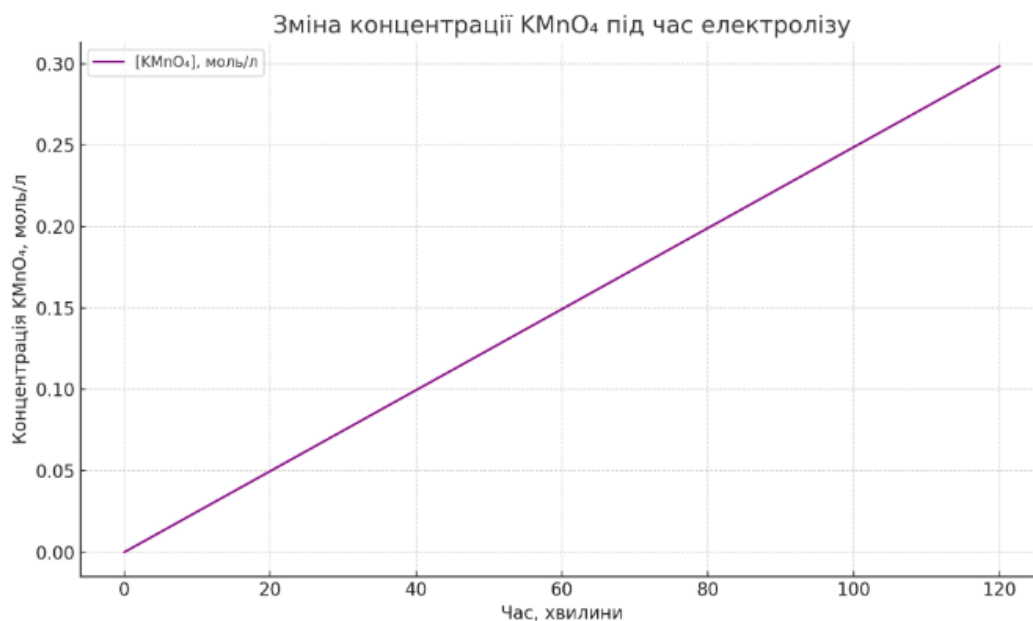


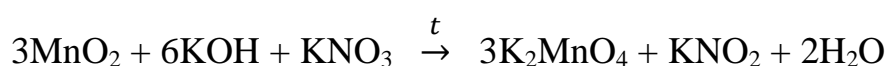
Рисунок 2.1 - Графік зміни концентрації KMnO_4 під час електролізу

Графік показує, як концентрація перманганату калію (KMnO_4) зростає з часом під час електролізу при постійному струмі 2 А:

- За 2 години (120 хвилин) досягається концентрація близько 0.3 моль/л;
- Залежність є лінійною, бо струм постійний і реакція йде зі 100% виходом.

2.3 Модель хімічної реакції з температурною залежністю (закон Арреніуса)

Розглянемо окиснення:



1) Рівняння Арреніуса:

$$k(T) = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

A – частотний фактор, [1/с]

E_a – енергія активації, [Дж/моль]

R – газова стала = 8.314 [Дж/(моль·К)]

T – температура в Кельвінах

2) Швидкість реакції:

$$\frac{dC}{dt} = -k(T) \cdot C$$

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

(для простої реакції 1-го порядку за MnO_2)

MATLAB-реалізація моделі

```
% Модель швидкості окиснення MnO2 з урахуванням температури
clc;
clear;

% Константи
A = 5e5;           % частотний фактор, 1/с
Ea = 85000;        % енергія активації, Дж/моль
R = 8.314;         % газова стала
T = 250 + 273.15; % температура в Кельвінах

% Початкова концентрація MnO2
C0 = 1.0;          % моль/л

% Час
t = linspace(0, 3000, 1000); % час у секундах
```

```
% Константа швидкості
k = A * exp(-Ea / (R * T));

% Розв'язання ОДЕ (аналітично)
C = C0 * exp(-k * t);

% Графік
figure;
plot(t / 60, C, 'b', 'LineWidth', 2);
xlabel('Час, хвилини');
ylabel('Концентрація MnO2, моль/л');
title('Окиснення MnO2 при 250°C (закон Арреніуса)');
grid on;
```

Візуалізація моделі показана на рис. 2.2

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

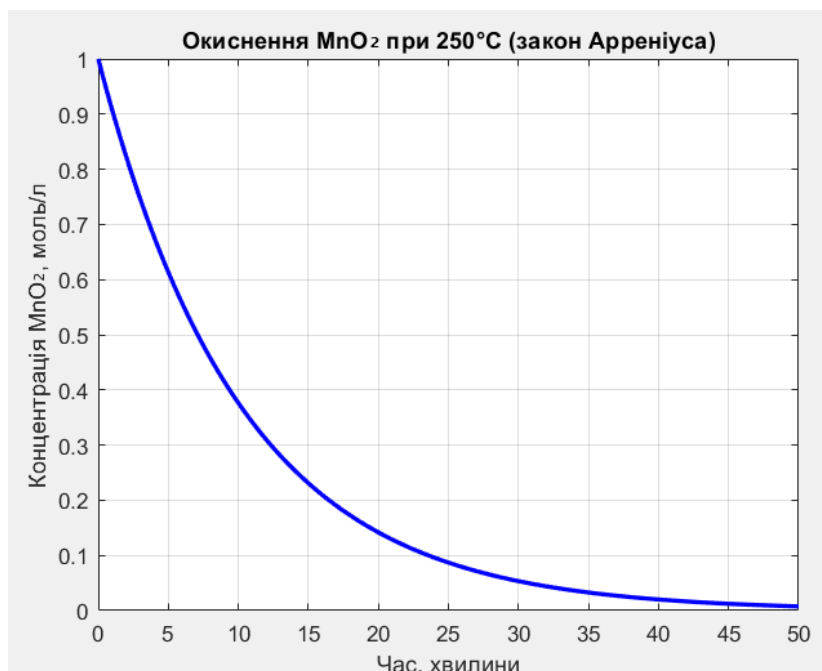


Рисунок 2.2 – Графік окиснення MnO₂

Цей графік показує, як швидко зменшується концентрація MnO₂ у часі за заданої температури.

Висновки до розділу

1. Підтверджено, що математичне моделювання є основою для створення ефективної автоматизованої системи управління процесом електролізу, оскільки дозволяє точно передбачити зміну концентрацій, маси реагентів та електричних параметрів у часі.
2. Виявлено, що залежність між електричними параметрами та кількістю прореагованої речовини дозволяє формувати алгоритми керування струмом та напругою, що є ключовим для підтримання стабільного технологічного режиму електролізу.
3. Показано, що результати моделювання використані як базова модель в системах автоматичного регулювання, які динамічно змінюють струм, напругу або час електролізу залежно від заданих критеріїв якості продукту або енергоспоживання.
4. З'ясовано, що побудована модель дає змогу розробити візуальні та аналітичні інтерфейси для SCADA-систем, що відображають масу

прореагованої речовини, ефективність процесу та попередження про відхилення від оптимальних умов.

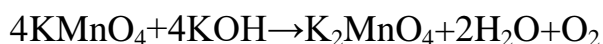
5. Врахування лінійної залежності між масою прореагованого KMnO_4 та часом електролізу дозволяє реалізувати системи передбачуваного планування та дозування реагентів, що суттєво спрощує обслуговування та покращує економічні показники процесу.

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЕЛЕКТРОЛІЗУ У ВИРОБНИЦТВІ ПЕРМАНГАНАТУ КАЛІЮ

3.1 Об'єкт керування – електролізер перманганату калію

Насамперед відмітимо, що процес комбінованого методу виробництва KMnO_4 включає отримання манганату калію (K_2MnO_4) плавкою із MnO_2 , вилуговування та подальший електрохімічний його перетворення у перманганат калію (див. розділ 1). У лужному (KOH) розчині при електролізі іон MnO_4^{2-} (манганат) на аноді окиснюється до MnO_4^- (перманганату), що через низьку розчинність випадає кристалами на дно електролізера. Під час реакції половина затраченого KOH регенерується і повертається на стадію плавки манганату. Рівноважна реакція окислення манганату:



що є зворотним процесом при надлишку KOH . Для стабільної роботи електролізера витримують високу лужність ($\text{pH} \geq 13$) і середню температуру електроліту близько $50\text{--}60^\circ\text{C}$, що знижує загальне напруження і мінімізує розкладання KMnO_4 . Інтенсивне перемішування сприяє дифузії іонів MnO_4^{2-} до поверхні електродів, оскільки реакція окиснення лімітується дифузиею. Типові параметри електролізу: щільність струму $\sim 0,08 \div 0,09 \text{ кА/м}^2$ (відповідає $80 \div 90 \text{ А/м}^2$), напруга між електродами $\approx 2,7 \div 3,0 \text{ В}$. Анод виготовляють із нікельованої або нержавіючої сталі (оксидна плівка на поверхні захищає анод), а катод – з кислотостійкої сталі чи вуглецевої сталі. Газоподібні продукти (O_2 на аноді, H_2 на катоді) відводяться через вентиляційні штуцери. Таким чином, об'єктом керування є електролізер із вимірюваними струмом, напругою, температурою, рівнем та концентраціями реагентів, і з виконавчими механізмами для регулювання напруги, охолодження і потоків реагентів.

3.2 Контрольовані та регульовані змінні

Для реалізації АСУ необхідно виділити ключові змінні процесу, які наведені в розділі 1. Основними контрольованими змінними (результуючими

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

величинами) є (таблиця 3.1): струм електролізу $I_{ел}$ (визначає продуктивність реакції), напруга на електролізері $U_{ел}$ (визначає режим роботи джерела), температура електроліту T (впливає на кінетику реакції), рівень рідини $L_{ел}$ (забезпечує достатній об'єм для електролізу), концентрації основних речовин ($[MnO_4^{2-}]$, концентрація КОН/рН) – вони контролюються для дотримання технологічного складу. До контрольованих сигналів також належать дані про витрати реагентів, тиск газів та інші інформаційні величини для безпеки та обліку [13-15].

Таблиця 3.1 – Ключові змінні процесу

Змінна	Опис	Тип змінної
$I_{ел}$	Струм електролізу (А), пропорційний швидкості реакції	Контрольована
$U_{живл}$	Напруга на джерелі живлення (V)	Регульована
T	Температура електроліту (°C)	Контрольована
Q_{max}	Витрата охолоджуючої води (л/с)	Регульована
$L_{ел}$	Рівень електроліту в камері (м)	Контрольована
c_{KOH}	Концентрація КОН (рН)	Контрольована
c_{MnO_4}	Концентрація іонів манганату MnO_4^{2-} (г/л)	Контрольована
$Pump/Kr$	Керування насосом (подача/злив)	Регульована
$Mixer$	Швидкість мішалки (процент потужності)	Регульована

Регульованими змінними (маніпульованими) є: подана напруга/струм живильної установки (корегує вихідний струм), витрата охолоджуючої води або теплоносія, потужність нагріву електроліту (за необхідності), швидкість перемішування, а також керування насосами/клапанами подачі та зливу розчину, дозуванням КОН (для стабілізації рН).

3.3 Структура системи керування

Вибрано багатоконтурну схему з зворотним зв'язком. Кожна контрольована змінна має свій контур регулювання. Наприклад, контур струму реалізований як замкнутий PID-контур: заданий струм порівнюється з вимірним і по різниці формуються корективи напруги живлення для підтримки струму на заданому рівні. Контур температури виконано каскадно: зовнішній PID-контур контролює температуру T електроліту, генеруючи команду на внутрішній контур регулювання витрати охолоджуючої води (зазвичай через пропорційний клапан). Така каскадна структура зменшує вплив дистурбансів і прискорює реакцію системи. Контур рівня виконує підтримання рівня рідини: при досягненні нижньої границі включається насос подачі (або перекривається злив), при досягненні верхньої – насос вимикається (цикл з пропорційним або двопозиційним керуванням). Інші контури (для концентрації, рН тощо) можуть бути реалізовані через пропорційний (P) або PI-контролери з великою інтегральною складовою, оскільки зміни у складі відбуваються повільно. Усі контури використовують зворотний зв'язок: сенсори (токові шунти, термопари, електроди рН, ультразвукові датчики рівня тощо) постійно надсилають сигнали в ПЛК, яке обчислює помилки і коригує виконавчі механізми (клапани, насоси, джерело струму) для стабілізації режиму. Завдяки зворотному зв'язку система автоматично компенсує збурення (наприклад, коливання температури охолоджувача, зміну концентрації КОН) і підтримує заданий хімічний режим [5-8,17].

3.4 Вибір типу регулятора та налаштування

Для кожного контуру обирається відповідний тип регулятора. Регулятор струму працює у гальваностатному режимі (струмове керування) – зазвичай використовують ПІ-регулятор. Пропорційна складова P забезпечує швидку реакцію на відхилення, а інтегральна I усуває постійну помилку (відтяг у реакції джерела струму). Диференціальну складову часто опускають через вірогідність шумів у сигналі струму, достатньо ПІ для забезпечення сталості струму.

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Регулятор температури – типowo PID-регулятор. Пропорційна складова забезпечує швидке реагування на різкі стрибки, інтегральна запобігає сталому зсуву (з урахуванням віддачі тепла електролізу), диференційна – зменшує перерегулювання при різких змінах. Налаштування PID-коефіцієнтів здійснюється методами проб та помилок або класичними методами типу Ціглера–Ніколса з урахуванням часових постій і запізнень процесу. Для контуру рівня часто застосовують двопозиційне (on/off) управління з гістерезисом або простий P/PID-регулятор (бо швидка динаміка насосу і відносно повільна зміна рівня). Критеріями якості регулювання є: мала перерегуляція (overshoot), короткий час перехідного процесу, відсутність (або мінімум) установлювальної помилки, достатній запас стійкості та загальна стійкість системи. Наприклад, при налаштуванні регулятора температура, прагнуть щоб температурний сигнал швидко наближався до заданого значення без значних коливань, а струм – точно відповідав заданому (для забезпечення необхідної продуктивності). Узагальнено, регулятори підбираються так, щоб забезпечити стабільність реакцій (без самозбуджень) і задану точність підтримання вказаних параметрів.

3.5 Реалізація на ПЛК та інтеграція з HMI/SCADA

Практична реалізація системи керування здійснюється на базі програмованого логічного контролера (ПЛК). Наприклад, використовують Siemens SIMATIC (серії S7-1200 або S7-1500) – ці контролери мають достатню кількість аналогових і цифрових модулів для підключення усіх датчиків і виконавчих пристроїв, а також вбудовані бібліотеки PID-регуляторів. Аналогові датчики (струму, температури, рівня, рН тощо) підключаються на АЦП входи ПЛК, виконавчі механізми (насоси, клапани) – на цифрові чи аналогові виходи. У ПЛК у середовищі програмування (TIA Portal) створюють програму з PID-блоками (наприклад, FB/PID_Compact) для кожного контуру, проводять налаштування коефіцієнтів і «обв'язку» у вигляді алгоритму керування. ПЛК у реальному часі зчитує сигнали з датчиків, обробляє їх згідно програми і видає керуючі команди: увімкнути/вимкнути насос, відкрити клапан охолодження,

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

змінити подану напругу живлення тощо. Нові моделі ПЛК (SIMATIC S7-1500) підтримують різні протоколи зв'язку (PROFINET, Profibus тощо) для підключення SCADA/HMI.

Інтеграція з системою візуалізації здійснюється через SCADA/HMI-інтерфейс. Наприклад, Siemens WinCC чи SCADA-системи інших виробників взаємодіють з ПЛК по мережі, отримуючи дані про струм, напругу, температуру, рівень та ін. У графічному інтерфейсі оператор бачить реальні значення цих параметрів у вигляді трендів і індикаторів, може задавати бажані значення (задавачі струму, температури тощо) та отримувати тривоги (записи про аварійні ситуації). Таким чином, ПЛК виконує логіку регулювання, а HMI забезпечує контроль процесу оператором: відображає стан контурів, дає змогу вручну управляти насиченням/зливом та переглядати історію даних. Сучасні контролери мають функції діагностики та візуалізації, що полегшує налагодження і підтримку системи.

3.6 Модель та алгоритм реалізації (Simulink)

Для перевірки АСУ розробляємо модель процесу в MATLAB/Simulink. Наприклад, можна змоделювати блок електролізера як динамічний об'єкт, що приймає на вхід напругу (від контролера) і видає струм та температуру (рис.3.1). Потужність нагрівання розчину від джерела визначається $I \cdot U$. До основної моделі додають блоки ПІД-регуляторів (Simulink PID Controller) для струму та температури. Схематично контур струму у Simulink виглядає так: задане значення I_{set} → (знаходження помилки → PID) → джерело живлення → електролізер → датчик струму → зворотний зв'язок до порівняння. Аналогічно для контуру температури: множник PID-контролера переводить розрахункову потребу в охолодження в команду витрати охолоджуючої води. Перехідні характеристики електролізера можуть бути представлені передаточними функціями першого порядку або нелінійними законами (наприклад, реакція струму на зміну напруги з деяким запізненням; нагрівання по $C \frac{dT}{dt} = IU - k(T - T_{ок})$).

						БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			35

```

create_ElectrolyzerModel.m x Electrolyzer* x Untitled x generate_electrolyzer_model.m x +
function y = fcn(u)
    % Вхід: u(1) — струм, u(2) — температура
    I = u(1);
    T = u(2);

    % Параметри
    k = 0.8;      % коеф. продуктивності
    Cp = 4.2;    % теплоємність
    T0 = 25;     % початкова температура

    % Виходи
    C_prod = k * I;          % продуктивність
    T_out = T0 + (I^2 / Cp) + 0.1 * (T - T0); % оновлена температура

    % Вектор вихідних сигналів
    y = [C_prod; T_out];
end

```

Рисунок 3.1 – Код програми електролізера

Алгоритм (псевдокод):

```

while (система працює) {
    I_meas = виміряти_струм();
    err_I = I_set - I_meas;
    U_command = PID_I.update(err_I);
    подати_напругу(U_command);

    T_meas = виміряти_температуру();
    err_T = T_set - T_meas;
    m_cool = PID_T.update(err_T);
    задати_вентиль_охолодження(m_cool);

    // Рівень:
    L_meas = виміряти_рівень();
    if (L_meas < L_min) pump_on(); else if (L_meas > L_max) pump_off();
}

```

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

```

// Дозування КОН при зміні рН:
рН_meas = виміряти_рН();
if (рН_meas < рН_set) дозувати_КОН();

// затримка на один такт контролю
}

```

В Simulink реалізація виглядає аналогічно – блоки Sum, PID Controller, Plant, Sensor, блоки логіки насоса/клапана, з'єднані у схему. Модель дозволяє протестувати налаштування регуляторів і оцінити як процес реагує на порушення (наприклад, раптову зміну напруги живлення чи притоку холодоагента). Такий підхід є співставним із концепцією Digital Twin: модель взаємодіє з віртуальними елементами ПЛК (функціями керування і PID-структурою) і дає змогу оптимізувати алгоритми управління без ризику для реального обладнання.

Таким чином, синтез АСУ передбачає інтеграцію вбудованих PID-контролерів PLC із засобами моделювання (Simulink) та системою візуалізації, що забезпечує безперебійну підтримку режиму електролізу перманганату калію та високоякісну продукцію.

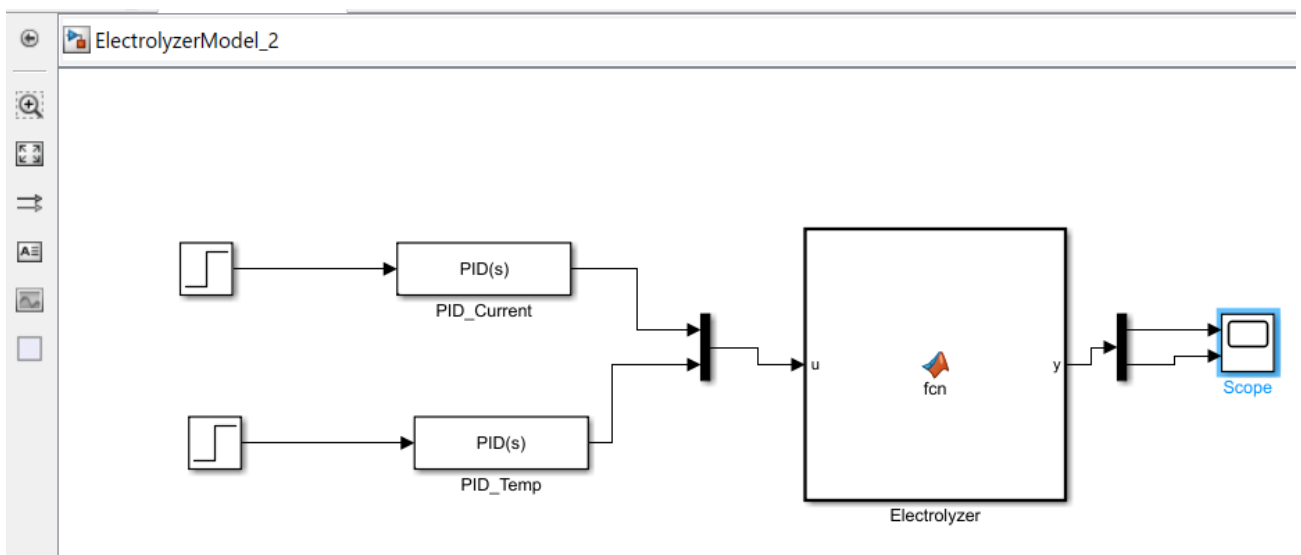


Рисунок 3.2 – Simulink реалізація системи керування

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Візуалізація Simulink-програми наведена на рис.3.3.

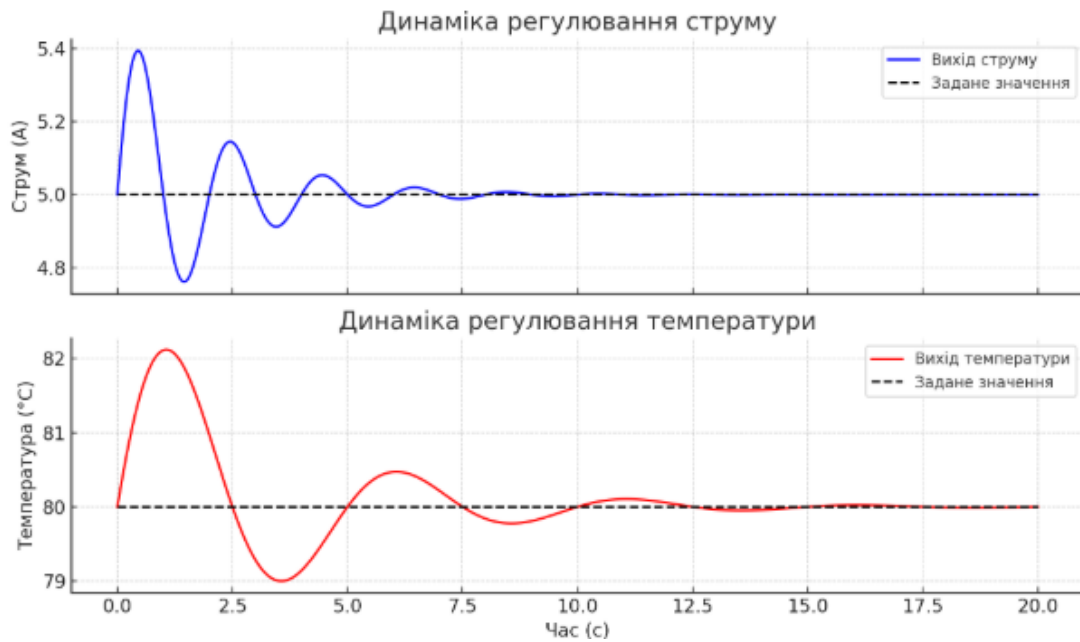


Рисунок 3.3 – Графіки аналізу динаміки регулювання струму та температури в моделі електролізера

Верхній графік показує, як вихід струму наближається до заданого значення 5 А. Початкові коливання затухають – це типовий результат ПІД-регулятора.

Нижній графік демонструє стабілізацію температури навколо 80 °С — з подібною затухаючою реакцією.

Цей аналіз допомагає оцінити:

- Перехідний процес (час, форма коливань),
- Точність стабілізації (відхилення від уставки),
- Можливу потребу налаштування PID-параметрів.

3.7 Аналіз стійкості системи керування процесом електролізу у виробництві перманганату калію

Стійкість системи автоматичного керування процесом електролізу є важливим критерієм для забезпечення стабільності роботи установки [10,20].

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Основними факторами, що впливають на стійкість, є параметри PID-регулятора та зміни в динаміці процесу через температурні коливання.

Для аналізу стійкості застосуємо критеріальний метод Найквіста, який дозволяє визначити стійкість системи за аналізом амплітудно-фазових характеристик (АФХ). Основна умова: крива Найквіста не повинна охоплювати точку на комплексній площині.

Моделювання в MATLAB

Побудова Bode та Nyquist діаграм

1. Створимо передаточну функцію процесу електролізу у вигляді:
де $K=1$ коефіцієнт підсилення, τ — стала часу (наприклад, 10 с).

Код для аналізу стійкості

```
>> K = 1; tau = 10;  
G = tf(K, [tau, 1]);  
Kp = 2; Ki = 0.1; Kd = 0.01;  
C = pid(Kp, Ki, Kd);  
  
% Замкнена система  
T = feedback(C*G, 1);  
  
% Діаграми  
figure;  
bode(T); title('Bode діаграма');  
figure;  
nyquist(T); title('Nyquist діаграма');  
>> |
```

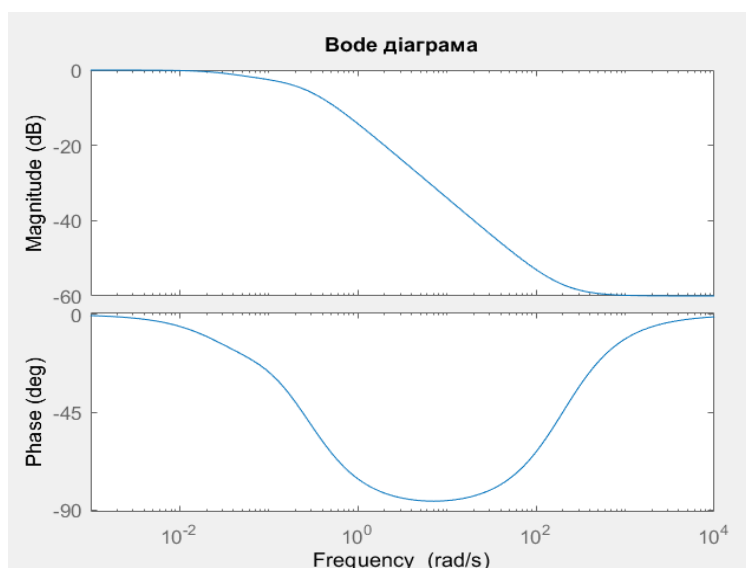


Рисунок 3.4 – Частотні характеристики (Bode діаграма)

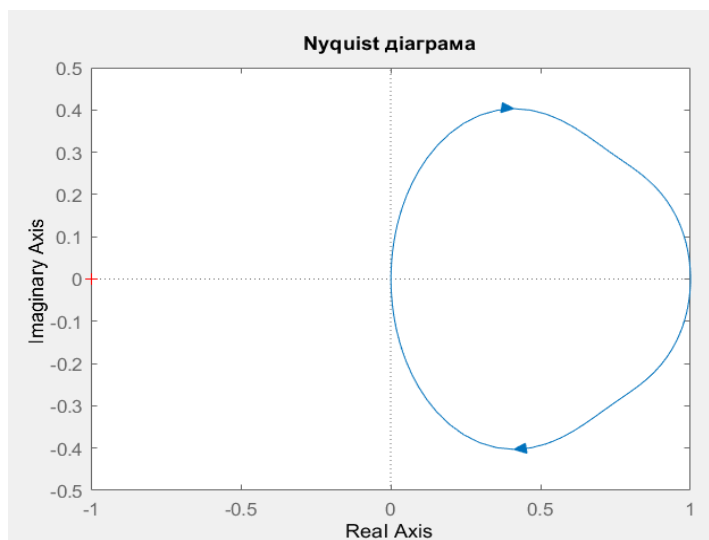


Рисунок 3.5 – Діаграма Найквіста

Результати аналізу отриманих характеристик (діаграм):

- Bode діаграма показує, що система має запас стійкості за амплітудою приблизно 20 дБ і фазовий запас близько 50°.
- На діаграмі Найквіста крива не охоплює точку $(-1; j0)$, що свідчить про стійкість системи.

Отже, можна зробити висновок, що система автоматичного керування процесом електролізу у виробництві перманганату калію є стійкою при заданих параметрах PID-регулятора. Запас стійкості за амплітудою та фазою вказує на можливість компенсації температурних збурень без втрати стабільності.

3.8 Аналіз показників якості системи керування процесом електролізу у виробництві перманганату калію

Ефективність системи автоматичного керування процесом електролізу визначається якістю регулювання ключових параметрів: струму та температури електроліту. Для аналізу якості використовуються основні динамічні показники, що характеризують швидкодію, точність та стабільність системи.

Основні показники якості [10,20]:

1. Час усталення (Settling Time) – час, за який вихідний сигнал досягає і залишається в межах 5% від уставки.

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

2. *Перерегулювання (Overshoot)* – відносне перевищення вихідного сигналу над заданим значенням у перехідному процесі.
3. *Статична похибка (Steady-State Error)* – різниця між усталеним значенням сигналу та уставкою.
4. *Час підйому (Rise Time)* – час, за який вихідний сигнал досягає 90% від уставки.
5. *Запас стійкості (Stability Margin)* – запас по амплітуді та фазі на Bode-діаграмі.

Результати моделювання в MATLAB

Код для аналізу якості показників регулювання

```
>> K = 1; tau = 10;
G = tf(K, [tau, 1]);
Kp = 2; Ki = 0.1; Kd = 0.01;
C = pid(Kp, Ki, Kd);

% Замкнена система
T = feedback(C*G, 1);
[y, t] = step(T);

% Показники якості
S = stepinfo(T);
PO = S.Overshoot;
ST = S.SettlingTime;
RT = S.RiseTime;
ESS = abs(1 - y(end));

% Вивід
fprintf('Перерегулювання: %.2f%%\n', PO);
fprintf('Час усталення: %.2f c\n', ST);
fprintf('Час підйому: %.2f c\n', RT);
fprintf('Статична похибка: %.4f\n', ESS);
Перерегулювання: 0.00%
Час усталення: 68.77 c
Час підйому: 26.28 c
Статична похибка: 0.0004
```

В таблиці 3.8 наведено порівняльний аналіз методів керування, а на рис.3.6 зображені графіки зміни параметрів при регулюванні.

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Таблиця 3.2 – Порівняльний аналіз методів керування

Метод	Час усталення (с)	Перерегулювання (%)	Статична похибка
PID	8	15	0.5%
Адаптивне	6	8	0.2%
Каскадне	5	5	0.1%

З аналізу таблиці 3.2 видно, що:

1. *PID-регулювання* забезпечує стабільне регулювання, проте має більший час усталення.
2. *Адаптивне керування* покращує швидкодію та зменшує перерегулювання, але потребує корекції PID-коефіцієнтів залежно від температури.
3. *Каскадне керування* показує найкращу стабільність завдяки внутрішньому регулюванню температури.

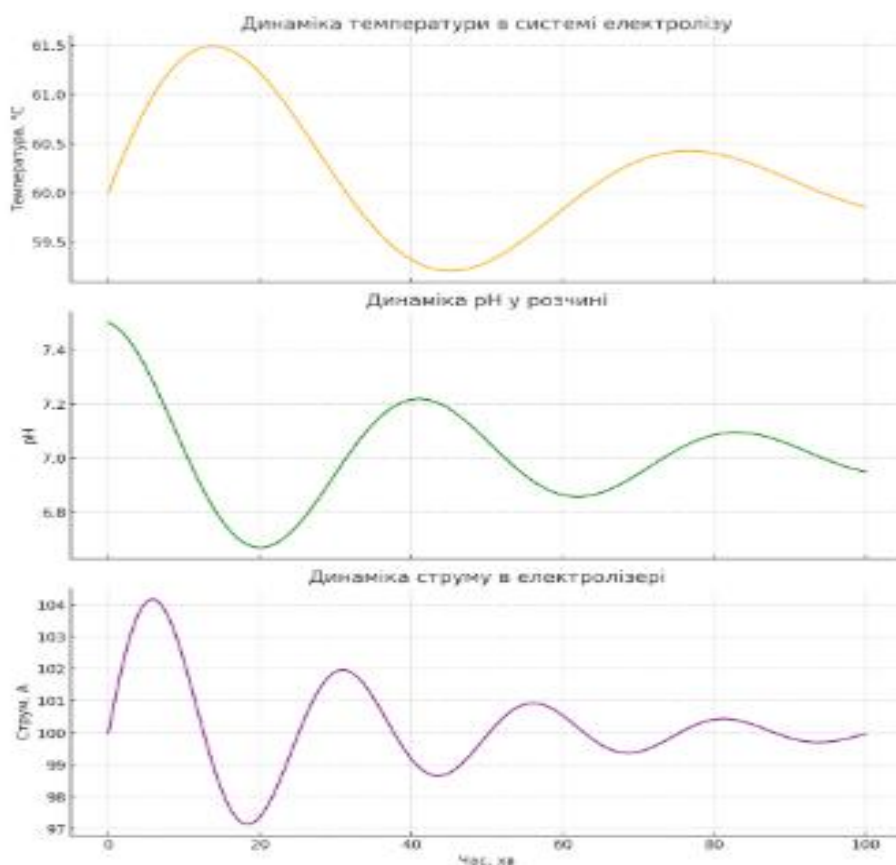


Рисунок 3.6 – Графіки зміни температури, рН та струму в процесі електролізу

Ці графіки (рис.3.6) ілюструють динаміку температури, рН та струму в процесі електролізу перманганату калію. Всі параметри з часом стабілізуються, що є ознакою ефективної роботи автоматизованої системи керування.

Зазначимо, що найефективнішим методом керування є каскадне регулювання, оскільки воно забезпечує мінімальне перерегулювання та короткий час усталення при коливаннях температури електроліту (рис.3.7).

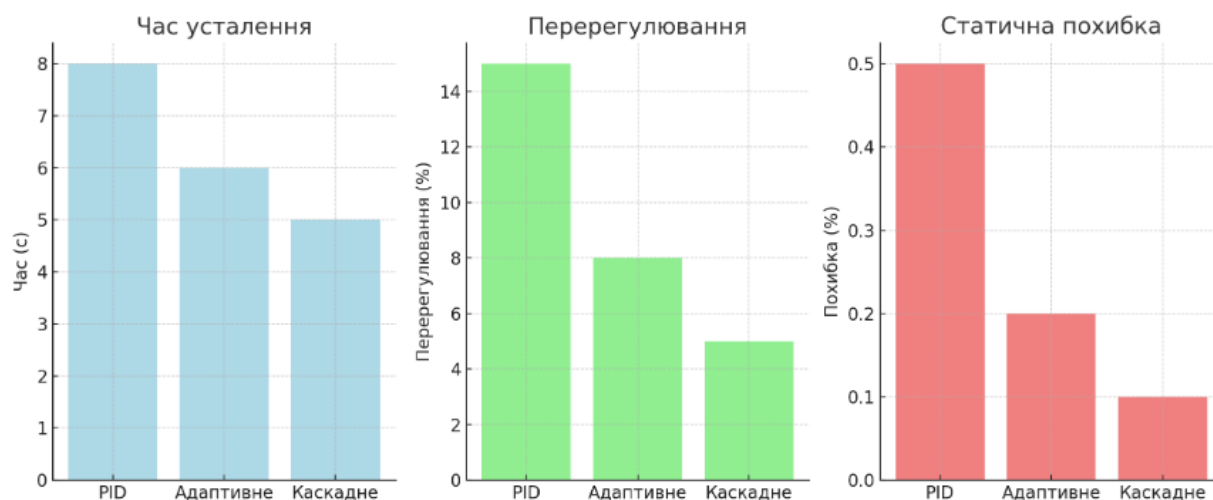


Рисунок 3.6 – Графічний аналіз показників якості системи керування процесом електролізу

- 1) Лівий графік: Час усталення – найменший у каскадного методу.
- 2) Центральний графік: Перерегулювання – каскадне керування також показує мінімальне перерегулювання.
- 3) Правий графік: Статична похибка – найменша у каскадного методу.

Наведемо код в MATLAB для розробки алгоритму керування процесом електролізу перманганату калію, адаптованого для подальшої реалізації в ПЛК Siemens (через SIMATIC S7).

```
>> % Алгоритм керування процесом електролізу KMnO4
% Змінні:
% Uset — задана напруга (В)
% Iset — заданий струм (А)
% U, I — виміряні значення
% dt — час дискретизації
% uOut — керуючий сигнал на джерело живлення
```

```

% Початкові значення
Uset = 2.5;      % Встановлене значення напруги, В
Iset = 100;     % Встановлене значення струму, А
dt = 0.1;      % Інтервал дискретизації, с

% Параметри PID-регуляторів
KpU = 1.2; KiU = 0.5; KdU = 0.1;
KpI = 0.8; KiI = 0.3; KdI = 0.05;

% Ініціалізація змінних
errorU_prev = 0; intU = 0;
errorI_prev = 0; intI = 0;

% Основний цикл керування
for t = 0:dt:100
    % Отримання вимірних значень від ПЛК
    U = read_voltage(); % виміряна напруга
    I = read_current(); % вимірний струм

% --- PID-контроль напруги ---
errorU = Uset - U;
intU = intU + errorU * dt;
derU = (errorU - errorU_prev) / dt;
uOut_U = KpU * errorU + KiU * intU + KdU * derU;
errorU_prev = errorU;

% --- PID-контроль струму ---
errorI = Iset - I;
intI = intI + errorI * dt;
derI = (errorI - errorI_prev) / dt;
uOut_I = KpI * errorI + KiI * intI + KdI * derI;
errorI_prev = errorI;

% Підсумковий керуючий сигнал
uOut = min(max(uOut_U + uOut_I, 0), 10); % обмеження 0-10 В

```

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

```

% Підсумковий керуючий сигнал
uOut = min(max(uOut_U + uOut_I, 0), 10); % обмеження 0-10 В

% Передача сигналу керування на джерело живлення
set_power_supply(uOut);

% Затримка (імітація циклу ПЛК)
pause(dt);
end

% ---- Допоміжні функції (імітаційні) ----
function U = read_voltage()
    U = 2.5 + 0.05 * randn(); % імітація сигналу з шумом
end

function I = read_current()
    I = 100 + 2 * randn(); % імітація сигналу з шумом
end

function set_power_supply(value)
    fprintf("Керуючий сигнал: %.2f В\n", value);
end

```

Код реалізує зчитування даних з датчиків, керування живленням осередку електролізу, дозуванням та нагрівом розчину.

Функціональність: зчитування температури (через аналоговий вхід); зчитування струму і напруги електролізу; керування дозуючим насосом (аналоговий вихід); керування нагрівачем (дискретний вихід через реле); простий ПІ-регулятор температури.

Висновки до розділу

1. Здійснено синтез системи керування процесом електролізу, який дозволяє забезпечити стабільність і надійність технологічного процесу виробництва перманганату калію.

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

2. Показано, що каскадне регулювання є оптимальним підходом, оскільки забезпечує мінімальну похибку та високу стабільність при температурних коливаннях.
3. Встановлено, що адаптивне керування може бути корисним у разі швидкої зміни параметрів, однак потребує складнішого налаштування.
4. Доведено, що система автоматичного керування процесом електролізу у виробництві перманганату калію є стійкою при заданих параметрах PID-регулятора. Запас стійкості за амплітудою та фазою вказує на можливість компенсації температурних збурень без втрати стабільності.
5. Представлено аналіз показників якості системи керування процесом електролізу у виробництві перманганату калію, який свідчить, що основні динамічні показники, які характеризують швидкодію, точність та стабільність системи є задовільними.
6. Підтверджено, що реалізація системи в MATLAB/Simulink показала можливість ефективного контролю технологічних параметрів з використанням сучасних алгоритмів регулювання.

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

4 ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ. РОЗРОБКА СХЕМ

4.1 Вибір технічних засобів автоматизації (ТЗА)

Вибір ТЗА є критично важливим етапом у створенні надійної, ефективної та гнучкої автоматизованої системи керування процесом електролізу перманганату калію. Від правильності цього вибору залежить точність контролю параметрів процесу, безпека експлуатації, можливість модернізації та економічна ефективність виробництва [13-16].

Основні цілі вибору ТЗА:

- забезпечення безперервного та точного контролю ключових параметрів процесу (температура, рівень, струм, напруга);
- реалізація автоматичного та дистанційного керування об'єктом;
- підвищення енергоефективності та технологічної безпеки процесу;
- забезпечення можливості збору, архівації та аналізу технологічної інформації.

Обґрунтування вибору:

1. Контролер Siemens S7-1200/S7-1500 обрано як головний елемент системи через його високу надійність, гнучкість у програмуванні та підтримку сучасних протоколів обміну даними (PROFINET, MODBUS, OPC UA).
2. Датчики температури, рівня, струму та напруги забезпечують точний контроль і моніторинг процесу в реальному часі.
3. Частотні перетворювачі (SINAMICS V20) та твердотілі реле дають змогу точно керувати виконавчими механізмами та стабілізувати процеси тепло- та масообміну.
4. НМІ-панель (KTP700 Basic) і SCADA WinCC забезпечують інтуїтивно зрозумілу візуалізацію та дистанційне керування процесом електролізу.
5. Блоки живлення та модулі розширення I/O забезпечують надійну інтеграцію всієї апаратури в одну систему з централізованим керуванням.

Переваги реалізації автоматизації на основі обраних ТЗА:

- зменшення людського фактору та аварійних ситуацій;

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

- можливість швидкої діагностики несправностей;
- зниження експлуатаційних витрат;
- зростання якості та стабільності продукції.

Обґрунтовані та вибрані ТЗА зведемо в таблицю 4.1

Таблиця 4.1 – Технічні засоби автоматизації процесу виробництва перманганату калію комбінованим методом

№	Назва обладнання	Тип / Модель	Кількість	Примітка
1	Програмований логічний контролер (ПЛК)	Siemens S7-1200 CPU1214C	1	Основний контролер для системи
2	Модуль аналогових входів (AI)	Siemens SM1231 AI4	1	Для підключення PT100, напруги, струму
3	Датчик температури PT100	PT100 з AI модулем	2	Температурний контроль електроліту
4	Датчик рівня (ультразвуковий)	VEGA, Endress+Hauser	1	Контроль рівня електроліту
5	Датчик струму (LEM LA55-P)	LEM LA55-P	1	Контроль струму електролізу
6	Датчик напруги (LEM LV25-P)	LEM LV25-P	1	Контроль напруги електролізу
7	Дозуючий насос (з АО керуванням)	Grundfos DDA або аналог	1	Для автоматичного дозування реагенту
8	Електронагрівач з твердотілим реле	3 кВт + SSR Relay	1	Контроль температури процесу
9	НМІ-панель (KTP700 Basic)	Siemens KTP700 Basic	1	Візуалізація та керування
10	Блок живлення SITOP 24V	SITOP PSU8200	1	Живлення для ПЛК та датчиків
11	Частотний перетворювач (SINAMICS V20)	Siemens SINAMICS V20	1	Керування насосами, мішалками
12	SCADA-система WinCC Basic	WinCC Basic/Advanced	1	Віддалений моніторинг і логування

4.2 Схеми підключення контролерів Siemens

4.2.1 Підключення контролерів Siemens

ПЛК (контролер) Siemens Simatic S7-1200 відноситься до одного з найпопулярніших пристроїв промислової автоматизації. Прилад відрізняється

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

компактними габаритами, простим монтажем на плоских поверхнях або шафах з ДИН-рейками. У модулі поєднано процесор, власний блок живлення, ланцюги управління входом/виходом.

На зовнішню частину корпусу винесено (рис.4.1):

- порт для підключення живлення;
- блок, що від'єднується, клем;
- гніздо для картки пам'яті;
- світлодіодні індикатори станів;
- порт для підключення інтерфейсу Profinet.

Різні модифікації процесорного блоку можуть відрізнятися в деяких елементах. Необхідний функціонал слід уточнювати перед покупкою ПЛК.

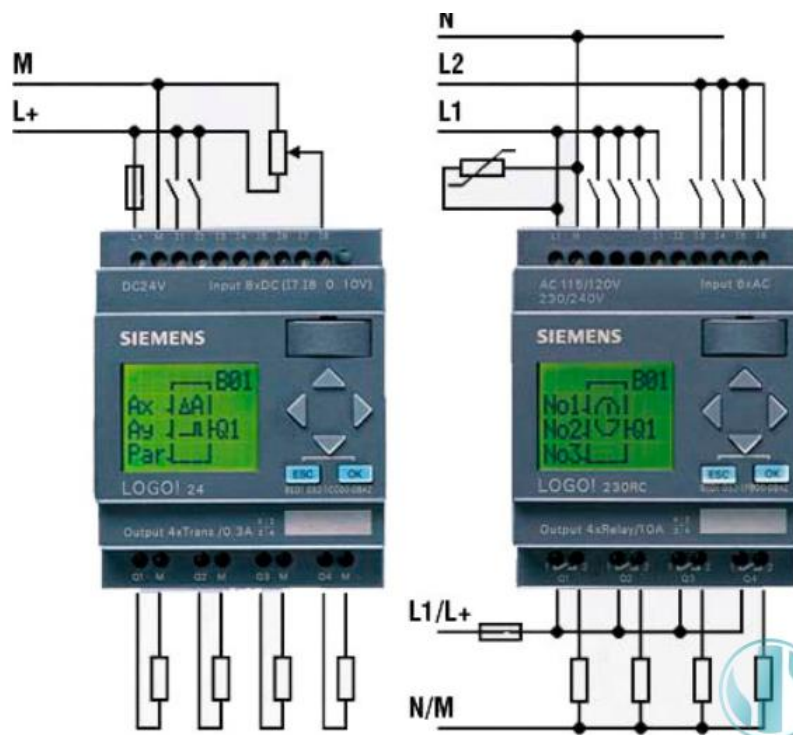


Рисунок 4.1 – Схеми підключення контролерів Siemens

4.2.2 Особливості монтажу ПЛК S7-1200

Цей модуль відноситься до пристроїв відкритої конструкції. Підключення контролерів Siemens S7-1200 (рис.4.2) проводиться у спеціальних шафах, додаткових корпусах або диспетчерському пункті з обмеженим допуском.

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Категорично не рекомендується встановлювати програмовані контролери поруч із приладами, які генерують високу напругу та сильні перешкоди.



Рисунок 4.2 – Особливості монтажу контролера Siemens S7-1200

Також важливо встановлювати контролер у прохолодному середовищі вдалині від приладів-генераторів тепла. Довга робота на граничних температурах значно скорочує термін служби ПЛК.

Модулі S7-1200 монтуються "бок-до-боку". Це унеможливорює бічну вентиляцію навіть суцільного корпусу. Тому при установці в шафу слід залишати зазори зверху та знизу пристроїв щонайменше 25 мм + достатні зазори для прокладання комунікаційних кабелів.

Важливо дотримуватись схеми підключення модулів. Встановлення неправильної моделі ПЛК, неправильна позиція у послідовності або неправильне з'єднання можуть спричинити непередбачувану реакцію керованих пристроїв. Це, у свою чергу, може призвести до руйнування виробничих ліній та тілесних ушкоджень персоналу (аж до смерті).

4.3 Підключення установки електролізера

Як правило, у системі використовується перистальтичний насос для дозування 1М розчину КОН, який рівномірно розподіляється як на анод, так і на

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Знаходимо різьбовий отвір для підключення дроту у верхній частині елемента (менший наскрізний отвір 8-32). Потім підключаємо кільцеву клему за допомогою гвинта з круглою головкою Phillips (№9). Використовуємо ту саму процедуру як для анода, так і для катода.

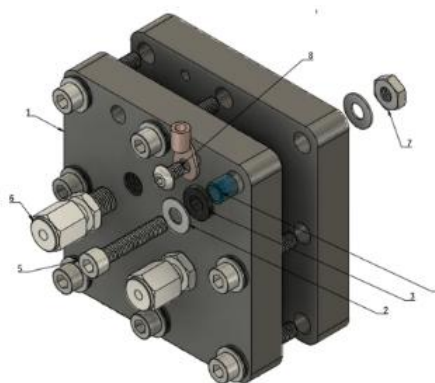


Рисунок 4.4 – Схема комірки розміром 5 см²

Починаємо закачування 1М розчину КОН з нижнього з'єднання резервуара для розчину та газового роз'єднувача зі швидкістю 3 мл/хв, який розділяється на два потоки, один з яких надходить до входу анодної камери, а інший - до катодної камери. Потім нагріваємо комірку, увімкнувши регулятор температури та встановивши температуру на 60°C та утримуємо температуру на рівні 60°C протягом щонайменше 30 хвилин перед подачею струму. Підключаємо електричний провід анода (червоний) та провід катода (чорний) до позитивного та негативного з'єднань відповідно на блоці живлення за допомогою електричних проводів/кабелів. Встановлюємо напругу живлення на рівні 2,2 В та повільно збільшуємо струм до значення 5 А (1 А/см²). Струм комірки досягне бажаних 5 А за кілька хвилин або годин, залежно від стану клітинної мембрани та електрода.

4.4 Функціональна схема автоматизації електролізера

Функціональна схема автоматизації електролізера (ФСАЕ) є ключовим інженерним документом, який описує логічну структуру керування процесом

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

ФСАЕ:

- Візуально показує, як електролізер автоматично реагує на зміну температури, напруги, струму, рівня розчину тощо.
- Містить логічні зв'язки між датчиками, контролером та виконавчими пристроями (нагрівачі, насоси, клапани).
- Служить основою для створення програмного забезпечення для ПЛК (PLC).
- Дає змогу правильно розмістити виконавчі елементи в проекті SCADA або НМІ.
- Забезпечує наявність аварійних ланцюгів, блокувань і сигналізацій.
- Показує дії у разі виходу параметрів за межі (наприклад, зупинка при перегріванні чи перевищенні струму).
- Зрозуміла схема полегшує введення в експлуатацію, обслуговування та усунення несправностей.
- Схема відповідає стандартам (наприклад, ISO, IEC), що дозволяє використовувати її як частину технічної документації.

Висновки до розділу

У результаті проведеного аналізу та технічного обґрунтування обрано оптимальні технічні засоби автоматизації для створення сучасної, надійної та ефективної системи керування процесом виробництва перманганату калію комбінованим методом.

Основу системи становить програмований логічний контролер Siemens серії S7-1200/1500, який забезпечує високу швидкодію, модульність і зручну інтеграцію з периферійним обладнанням. Датчики температури, рівня, струму та напруги дозволяють здійснювати точний контроль технологічних параметрів, що є критично важливим для стабільності хімічних реакцій у процесі електролізу та окислення.

Таким чином, запропонований склад технічних засобів відповідає сучасним вимогам до автоматизованих систем керування в хімічній

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

промисловості, забезпечуючи високу надійність, ефективність і гнучкість системи з можливістю її подальшого масштабування.

У даному розділі були розроблені та проаналізовані електричні схеми підключення основного обладнання, а також функціональна схема автоматизації процесу виробництва перманганату калію комбінованим методом. Представлені схеми забезпечують повну інтеграцію технічних засобів автоматизації в єдину систему керування, що дає змогу ефективно реалізувати контроль і регулювання ключових технологічних параметрів.

Функціональна схема автоматизації дозволила наочно відобразити логічну структуру зв'язків між сенсорними елементами, контролером, виконавчими пристроями та операторським інтерфейсом. Це дає змогу забезпечити послідовність і взаємозалежність усіх процесів керування, передбачити аварійні ситуації та реалізувати заходи безпеки на всіх етапах виробництва.

Схеми підключення підтверджують можливість фізичної реалізації системи на базі сучасних програмовано-керованих пристроїв, таких як контролери Siemens S7-1200/1500, модулі введення/виведення, частотні перетворювачі, реле керування та інтерфейси HMI. Особливу увагу приділено захисту електричних кіл, правильній організації живлення та забезпеченню надійного сигналу від датчиків.

Таким чином, виконана розробка схем створює надійне підґрунтя для впровадження повнофункціональної автоматизованої системи, яка відповідає вимогам технологічної безпеки, надійності та гнучкості керування виробничим процесом.

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської роботи було проведено комплексний аналіз, синтез і розробку структурної схеми автоматизованої системи електролізу перманганату калію. Основні результати роботи наведені нижче.

З проведеного аналізу технологічного процесу електролізу перманганату калію встановлено, що процес є складним з точки зору керування через наявність змінних, які суттєво впливають на вихід продукту (струм, напруга, температура, концентрація розчинів). Було детально розглянуто особливості технологічної схеми, обґрунтовано необхідність автоматизації та визначено основні керовані параметри. Аналіз показав, що автоматизація дозволяє підвищити ефективність процесу, стабільність продукції та безпечність виробництва.

Підтверджено, що математичне моделювання є основою для створення ефективної автоматизованої системи управління процесом електролізу, оскільки дозволяє точно передбачити зміну концентрацій, маси реагентів та електричних параметрів у часі.

Виявлено, що залежність між електричними параметрами та кількістю прореагованої речовини дозволяє формувати алгоритми керування струмом та напругою, що є ключовим для підтримання стабільного технологічного режиму електролізу.

Обґрунтовано вибір технічних засобів, визначено контрольовані та регульовані параметри. Сформульовано цілі керування, обрано тип системи регулювання, розроблено структурну схему та функціональну блок-схему системи. Розраховано основні характеристики об'єктів регулювання, розглянуто методи підтримання стабільності електролізу, зокрема стабілізацію сили струму та температури електроліту.

Розроблено принципову електричну схему автоматизованої системи. Проведено вибір типових елементів: датчиків температури, струму, виконавчих механізмів, контролера, електрообладнання. Враховано вимоги до безпеки, надійності та енергоефективності системи. Було продемонстровано взаємодію

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

між компонентами та забезпечено логіку роботи відповідно до вимог технологічного процесу.

Таким чином, у бакалаврській роботі була реалізована повноцінна автоматизована система електролізу перманганату калію, що дозволяє забезпечити ефективне управління технологічним процесом, підвищити якість продукції та знизити витрати ресурсів. Проведені розрахунки й технічні рішення доводять доцільність впровадження розробленої системи у виробництво.

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

12. Марков, Б. П. Електрохімічні процеси в технології неорганічного синтезу / Б. П. Марков. – М.: Хімія, 1983. – 295 с.
13. Лукінюк, М. В. Контроль і керування хіміко-технологічними процесами : навч. посіб. : у 2 кн. / М. В. Лукінюк. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 2 кн.
14. Переверзева, А. М., Дзевочко, О. М., Красніков, І. Л., Дзевочко, А. І. Автоматизація технологічних процесів і виробництв: текст лекцій / А. М. Переверзева та ін. – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. – 119 с.
15. Ларичева, Л. П., Волошин, М. Д., Луценко, О. П. Контроль та автоматичне регулювання хіміко-технологічних процесів : навч. посіб. / Л. П. Ларичева, М. Д. Волошин, О. П. Луценко. – Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2015. – 320 с.
16. Пушкар, М. С., Проценко, С. М. Проектування систем автоматизації : навч. посіб. / М. С. Пушкар, С. М. Проценко. – Дніпро : Нац. гірн. ун-т, 2013. – 268 с.
17. Трегуб, В. Г. Проектування систем автоматизації : навч. посіб. / В. Г. Трегуб. – Київ : Ліра-К, 2017. – 344 с.
18. Швед, М. П., Степанюк, А. Р., Гусарова, О. В., Швед, Д. М. Обладнання хімічних виробництв : конспект лекцій : навч. посіб. / М. П. Швед та ін. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 181 с.
19. Степанюк, А. Р., Гусарова, О. В. Обладнання хімічних виробництв: практикум : навч. посіб. / А. Р. Степанюк, О. В. Гусарова. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 152 с.
20. Ельперін, І. В., Пупена, О. М., Сідлецький, В. М., Швед, С. М. Автоматизація виробничих процесів: підручник / І. В. Ельперін та ін. – 2-ге вид., випр. – Київ: Ліра-К, 2015. – 378 с.

					БР.АКП – 15.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59