

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ

Група АКП -23-1К

Любомир Лаврів

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

Лаврів Любомир Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5:544.54:541.183

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Автоматизація процесу виробництва хлору та гідроксиду натрію

(назва роботи)

мембранним методом

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

доцент

(посада) (підпис) (дата)

О.В. Кучмистенко

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-23-1К

(шифр групи) (підпис) (дата)

Л.В.Лаврів

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

(посада) (підпис) (дата)

М. В. Шавранський

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент

(посада) (підпис) (дата)

В.С.Борин

(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

Лавріву Любомиру Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація процесу виробництва хлору та гідроксиду натрію мембранним методом

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 2025 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 технологічного процесу виробництва хлору та гідроксиду натрію мембранним методом як об'єкта автоматизації

4.2. Моделювання та ідентифікація процесу виробництва хлору та гідроксиду натрію мембранним методом

4.3. Синтез системи керування процесом мембранного електролізу

4.4 Розробка схем автоматизації процесу виробництва хлору та гідроксиду натрію мембранним методом

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

Лист 1 – Технологічна схема - БР.АКП – 49.00.00.001

Лист 2 –Технологічні параметри процесу - БР.АКП – 49.00.00.002

Лист 3 – Математичне моделювання та ідентифікація - БР.АКП – 49.00.00.003

Лист 4 – Синтез СА. Динамічні характеристик - БР.АКП – 49.00.00.004

Лист 5 – Аналіз стійкості в ПП MATLAB. Частотні характеристики - БР.АКП – 49.00.00.005

Лист 6 – БР.АКП – 49.00.00.000 06 – Графік показників якості регулювання.

Лист 7 – БР.АКП – 49.00.00.000 07 – Розроблені схеми автоматизації процесу

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 хлору та гідроксиду натрію мембранним методом як об'єкта автоматизації	13.05.2025 р.	Виконано
2	Моделювання та ідентифікація процесу виробництва хлору та гідроксиду натрію мембранним методом	20.05.2025 р.	Виконано
3	Синтез системи керування процесом мембранного електролізу	30.05.2025 р.	Виконано
4	Розробка схем автоматизації процесу виробництва хлору та гідроксиду натрію мембранним методом	05.06.2025 р.	Виконано
5	Висновки по роботі	08.06.2025 р.	Виконано

Студент _____
(підпис)

Л.В. Лаврів
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

М.В.Шавранський
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 64 сторінки, 16 рисунків, 4 таблиці, 21 джерело.

Тема: «Автоматизація процесу виробництва хлору та гідроксиду натрію мембранним методом»

Об'єкт дослідження: процес електролізу розчину хлориду натрію для отримання хлору та гідроксиду натрію мембранним методом.

Мета роботи: розробка та обґрунтування ефективної системи автоматизації процесу виробництва хлору та гідроксиду натрію мембранним методом з метою підвищення енергоефективності, безпеки та стабільності технологічного процесу.

Методи дослідження: у роботі використано аналіз літературних джерел і системний аналіз для визначення параметрів та структури процесу мембранного електролізу. Проведено моделювання та імітаційне дослідження в середовищі MATLAB/Simulink для розробки й перевірки алгоритмів автоматичного керування. Також здійснено проектування технічної структури системи автоматизації з використанням сучасних засобів керування.

Результати кваліфікаційної роботи: у результаті виконаного проектування була розроблена система автоматизації технологічного процесу мембранного електролізу для отримання хлору та гідроксиду натрію. Основні результати проєкту включають: створення структурної схеми автоматизації; розробку функціональної схеми автоматизації (ФСА); вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації; розробку алгоритму керування процесом; моделювання та верифікація роботи системи. Очікувані результати впровадження системи автоматизації: підвищення стабільності процесу електролізу; скорочення споживання енергії; підвищення рівня безпеки обслуговуючого персоналу; скорочення впливу людського фактора; зменшення відходів і втрат реагентів.

Ключові слова: автоматизація, хлор, гідроксид натрію, мембранний електроліз, ПЛК, керування процесом, технологічний процес, контроль параметрів, хімічне виробництво.

ABSTRACT

Bachelor's thesis contains: 64 pages of printed text, 16 figures, 4 tables, 21 lists of references and 0 appendices.

Topic: "Automation of the process of chlorine and sodium hydroxide production by the membrane method"

Object of research: The process of electrolysis of sodium chloride solution to obtain chlorine and sodium hydroxide by the membrane method.

Project goal: Development and justification of an effective automation system for the process of chlorine and sodium hydroxide production by the membrane method in order to increase energy efficiency, safety and stability of the technological process.

Research methods: The work uses an analysis of literary sources and system analysis to determine the parameters and structure of the membrane electrolysis process. Modeling and simulation research were carried out in the MATLAB/Simulink environment to develop and verify automatic control algorithms. The technical structure of the automation system was also designed using modern control tools.

Results of the diploma project: As a result of the design work, an automation system for the membrane electrolysis process for producing chlorine and sodium hydroxide was developed. The main results of the project include: creation of a structural diagram of automation; development of a functional automation diagram (FSA); selection and justification of technical means of automation; development of a process control algorithm; modeling and verification of the system's operation. Expected results of the implementation of the automation system: increased stability of the electrolysis process; reduction of energy consumption; increased safety of service personnel; reduction of the impact of the human factor; reduction of waste and losses of reagents.

Keywords: automation, chlorine, sodium hydroxide, membrane electrolysis, PLC, process control, technological process, parameter control, chemical production.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ХЛОРУ ТА ГІДРОКСИДУ НАТРІЮ МЕМБРАННИМ МЕТОДОМ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	10
1.1 Загальна характеристика процесу	10
1.2 Опис технологічної схеми виробництва хлору й гідроксиду натрію.....	15
1.3 Основні технологічні параметри, які потрібно контролювати та автоматизувати	19
Висновки до розділу	20
2 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ХЛОРУ ТА ГІДРОКСИДУ НАТРІЮ МЕМБРАННИМ МЕТОДОМ.....	22
2.1 Теоретичні основи моделювання процесу	22
2.2 Математичне моделювання об'єкта.....	22
2.3 Ідентифікація параметрів моделі.....	26
2.4 Модель для використання в системі автоматизації.....	28
Висновки до розділу	28
3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ МЕМБРАННОГО ЕЛЕКТРОЛІЗУ	30
3.1 Синтез для температурної моделі.....	30
3.2 Система автоматичного керування мембранним електролізом (NaOH) на базі ПЛК Siemens S7-1200.....	33
3.3 Аналіз стійкості системи керування.....	40
3.4 Аналіз показників якості регулювання системи керування.....	42
Висновки до розділу.	44

					БР.АКП - 49.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докумен.	Підпис	Дата				
Розроб.		Лаврів Л.В			Автоматизація процесу виробництва хлору та гідроксиду натрію мембранним методом	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Шавранський М.В					6	62
Реценз.		Борин В.С.				АКП-23-1К ІФНТУНГ		
Н. Контр.		Кучмистенко О.В						
Затверд.		Лагойда А.І.						

4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК.....	46
4.1 Схема підключення процесора 1214С, програмованого контролера SIMATIC S7 S7-1200	46
4.2 Функціональна схема керування технологічним процесом.....	48
4.3 Схема підключення силової частини мембранного електролізера.....	52
4.4 Структурна схема автоматизації.....	53
Висновки до розділу	59
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	60
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	61

					БР. АКП - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АСК – автоматизована система керування
АФХ – амплітудно-фазова характеристика
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика
ММ – математичне моделювання
ПЛК – програмований логічний контролер
ПФ – передавальна функція
ПХ – перехідна характеристика
СА – система автоматизації
САК – система автоматичного керування
СК – система керування
ТЗ – технічні засоби
ТП – технологічний процес
фЧХ – фазо-частотна характеристика

					БР. АКП - 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

Виробництво хлору та гідроксиду натрію є важливою ланкою у багатьох галузях промисловості – хімічній, фармацевтичній, текстильній, целюлозно-паперовій. Сучасні вимоги до екологічної безпеки, енергоефективності та якості продукції стимулюють перехід до більш чистих технологій, серед яких мембранний метод електролізу займає провідне місце.

На відміну від ртутного та діафрагменного методів, мембранна технологія забезпечує високу чистоту гідроксиду натрію та мінімізує шкідливі викиди у довкілля. Проте процес мембранного електролізу є складним з точки зору технології та чутливим до відхилень основних параметрів — температури, струму, тиску, концентрацій. Порушення оптимальних умов може призвести до зниження продуктивності, виходу за межі стандартів якості продукції або скорочення терміну служби мембран.

У цьому контексті автоматизація процесу виробництва набуває особливої актуальності. Вона дозволяє забезпечити стабільність технологічних режимів, підвищити ефективність виробництва, знизити витрати енергоресурсів і мінімізувати людський фактор, що особливо важливо для роботи з небезпечними речовинами, такими як хлор і водень.

Потреба у безпечному, економічно вигідному та екологічно чистому виробництві хлору і гідроксиду натрію зумовила інтенсивний розвиток мембранних методів електролізу. Мембранна технологія, яка ґрунтується на селективному перенесенні іонів натрію через катіонообмінну мембрану, дозволяє не лише підвищити якість кінцевих продуктів, але й зменшити негативний вплив виробництва на довкілля.

У цій роботі проаналізовано технологічний процес мембранного електролізу, визначено основні параметри, що підлягають автоматичному регулюванню, розглянуто побудову математичних моделей об'єкта і синтез системи автоматичного керування для забезпечення стабільної та безпечної роботи виробництва.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ХЛОРУ ТА ГІДРОКСИДУ НАТРІЮ МЕМБРАННИМ МЕТОДОМ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Загальна характеристика процесу

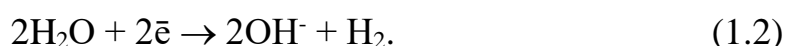
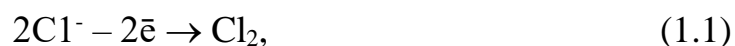
Мембранний метод виробництва хлору (Cl_2) і гідроксиду натрію (NaOH) є сучасною, екологічно безпечною технологією електролізу водного розчину хлориду натрію (NaCl). У процесі електролізу в електролізері, розділеному іонообмінною мембраною, на аноді виділяється хлор, а на катоді — гідроксид натрію і водень. Мембрана забезпечує розділення продуктів реакції, пропускаючи катіони натрію, але не пропускаючи аніони хлоридів і гідроксидів.

Мембранна технологія хлориду натрію дозволяє одержувати 36 % мас. розчин гідроксиду натрію — зі вмістом хлористого натрію не більше 0,02 % мас. Великими мембранними установками оснащують хлорні заводи США, Італія, Великобританія, Нідерланди. У міру вдосконалення мембранний метод може замінити ртутний і діафрагменний методи одержання хлору й гідроксиду натрію [13].

При електролізі з катіонообмінною мембраною використовують розчин, що містить $310 \text{ кг/м}^3 \text{ NaCl}$. На рис. 1.1 представлена електролітична комірка з катіонообмінною мембраною [13].

В анодний простір комірки безупинно надходить насичений розсіл, а з неї виводиться збіднений аноліт. У катодний простір безупинно подається знесолена вода й з нього виводиться розчин гідроксиду натрію (католіт).

Основні реакції, що протікають на електродах мембранного електролізера:



Перенесення через мембрану гідроксид-іонів призводить до протікання на аноді побічних реакцій з утворенням кисню, гіпохлориту й хлорату натрію. Вихід за струмом гідроксиду натрію в сучасних електролізерах може

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

вимоги до чистоти живильного розсолу. Дія електричного поля сприяє переносу молекул води з аноліту в католіт.

Техніко-економічні показники мембранного процесу визначаються щільністю струму, концентрацією отриманого лугу, ступенем розкладання хлориду натрію, температурою процесу, рН аноліту й наявністю домішок у живильному розсолі.

1.1.1 Температура електролізу

При виборі температурного режиму в електролізері враховують вплив температури на вихід за струмом й напругу електролізу. Звичайно робоча температура підтримується в інтервалі $80 \div 90^{\circ}\text{C}$. З ростом температури зменшується спадання напруги на мембрані. Однак при підвищених температурах і високій щільності струму напруга на електролізері починає збільшуватися, що може бути пояснено ростом газонаповнення розчинів католіту й аноліту й закипанням розчину в мембрані. Зменшенню дії цих факторів сприяє збільшення тиску в електролізері. При підвищенні температури спостерігається збільшення дифузії гідроксид-іонів з католіту в аноліт, що призводить до зниження виходу за струмом [13].

1.1.2 Концентрація NaOH у католіті

Концентрація гідроксиду натрію в електролітичному лузі визначає витрати на випарку при одержанні товарного продукту. Для їхнього скорочення в процесі мембранного електролізу прагнуть одержати розчин NaOH можливо більш високої концентрації. Однак, перевищення граничної концентрації лугу призводить до зниження виходу за струмом гідроксиду натрію. Прагнення підвищити щільність струму приводить до зростання напруги на іонообмінній мембрані [13].

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

1.1.3 Вміст NaCl в аноліті

У процесі електролізу концентрація хлориду натрію в аноліті визначається швидкістю подачі розсолу в анодний простір, при цьому швидкість подачі вибирають, виходячи з максимального ступеня перетворення NaCl, підтримки оптимальних умов роботи анодів і виходу за струмом хлору. Концентрацією NaCl в аноліті визначається перенос води через мембрану в католіт, а перенос води, у свою чергу, впливає на процес електролізу й режим роботи мембрани [13].

Процес електролізу з мембраною характеризується тим, що вихід за струмом гідроксиду натрію практично не залежить від концентрації NaCl; в аноліті в межах $100 \div 300 \text{ кг/м}^3$. З підвищенням вмісту хлориду в аноліті ($> 300 \text{ кг/м}^3$) трохи збільшується вихід за струмом, а також вміст NaCl у католіті. Останнє є неприйнятним, тому що погіршується якість одержуваного лугу.

Допустима мінімальна концентрація NaCl в аноліті становить близько 160 кг/м^3 . Зниження концентрації NaCl призводить до погіршення показників електролізу й прискореному руйнуванню мембрани [13].

1.1.4 Водневий показник рН аноліту

Для зменшення швидкості протікання побічних реакцій в анодному просторі електролізера живильний розсіл підкисляють. При рН аноліту $> 4,5$ різко зростає швидкість утворення таких побічних продуктів, як O_2 , NaClO , NaClO_3 . З іншого боку, при експлуатації модифікованих мембран (наявність карбоксильних або аміногруп) при рН аноліту менше 1,0 різко зростає напруга на мембрані, знижується вихід за струмом, можливе руйнування мембрани, а також прискорене зношування активного покриття анодів. Тому рекомендовано підтримувати рН аноліту в межах $2,0 \div 5,0$ [13].

1.1.5 Домішки у розсолі

Наявність домішок у живильному розсолі, особливо з багатовалентними катіонами, є небажаним, тому що вони можуть утворювати нерозчинні осад

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

гідроксидів і накопичуватися в мембрані. Надмірне нагромадження в аноліті іонів Ca, Mg, Sr, Fe, Ba призводить до зменшення виходу за струмом, підвищенню напруги й до скорочення терміну служби мембрани. Негативна дія багатовалентних катіонів на мембранний процес зв'язана із блокуванням частини іоногенних груп мембрани цими іонами. Шкідливий вплив на процес електролізу з мембраною роблять і деякі аніони. Збільшений вміст у розсолі йодид-іонів призводить до утворення комплексних сполук, нерозчинних у лужному розчині й накопичення в мембрані. Підвищення вмісту сульфат-іонів у живильному розсолі знижує розчинність NaCl і тим самим перешкоджає підтримці в аноліті необхідної концентрації хлориду натрію. Крім цього, надлишковий вміст сульфатів у розсолі сприяє забрудненню одержуваного розчину лугу сульфат-іонами і їхнім нагромадженням в об'ємі мембрани у вигляді твердого CaSO₄, внаслідок чого мембрана руйнується. У таблиці 1.1 наведені граничнодопустимі концентрації домішок у живильному розсолі для мембранних електролізерів [13].

Таблиця 1.1 – Граничнодопустимі концентрації домішок у живильному розсолі для мембранних електролізерів

Катіони	Гранична концентрація, млн. ⁻¹	Аніони	Гранична концентрація, млн. ⁻¹
Ca ²⁺ + Mg ²⁺	0,02-0,05	I ⁻	0,4
Sr ²⁺	0,5	SiO ₂	5,0-15,0
Ba ²⁺	1,0	NaClO ₃	4,5-25,0*
Fe ²⁺ + Fe ³⁺	0,1-1,0	SO ₄ ²⁻	2,0 – 4,7*
Al ³⁺	0,1	Важкі метали	0,01

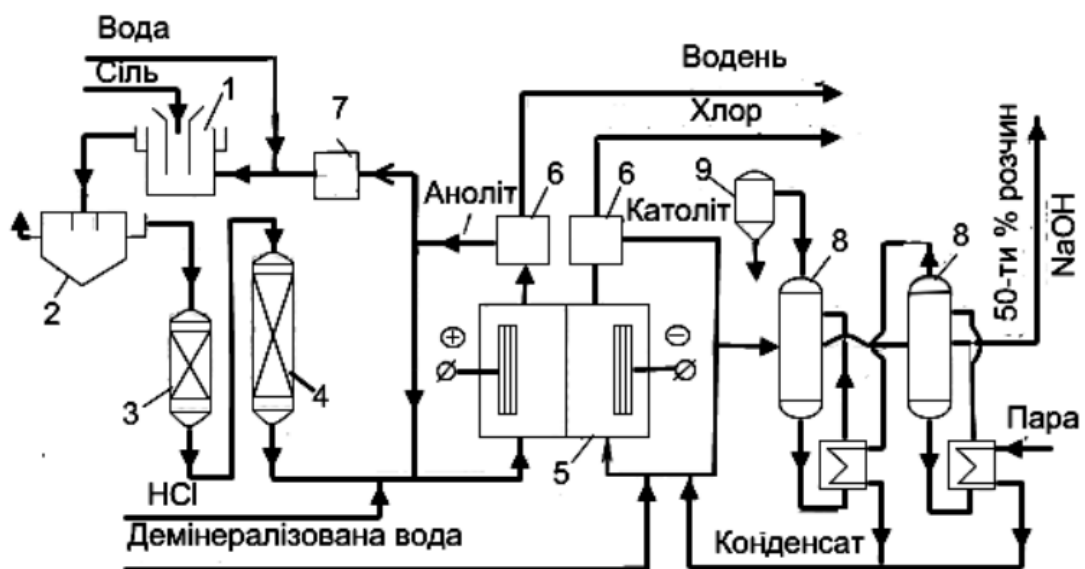
*Концентрація приведена в кг/м³.

Слід зауважити, що мембранні електролізери потребують більш чистий розсіл у порівнянні з діафрагменними.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

1.2 Опис технологічної схеми виробництва хлору й гідроксиду натрію

Технологічна схема виробництва хлору й гідроксиду натрію мембранним методом включає стадії підготовки й очищення розсолу, електролізу, упарювання електролітичного лугу й обробки хлору й водню. Основні відмінності мембранного процесу від класичних методів одержання хлору й гідроксиду натрію полягають у тім, що мембранний процес вимагає більше глибокого очищення живильного розсолу від домішок і значного підкислення аноліту. На рис. 1.2 зображена звичайна технологічна схема промислової установки, у якій як сировина використовується тверда сіль (природна або зворотна з діафрагменного виробництва)[13].



1 – сатуратор; 2 – освітлювач; 3 – фільтр; 4 – колони для іонообмінного очищення; 5 – електролізер; 6 – сепаратори; 7 – вузол дехлорування аноліту; 8 – випарні апарати; 9 – барометричний конденсатор

Рисунок 1.2 – Технологічна схема мембранного процесу

Подібні промислові установки складаються, як правило, із чотирьох відділень: готування розсолу і його первинного очищення, вторинного очищення розсолу, електролізу й упарювання електролітичного лугу.

						БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			15

1.2.1 Готування розсолу і його первинне очищення [13]

Підготовка розсолу включає: дехлорування аноліту, виведеного з мембранних електролізерів, вакуумним, хімічним і (або) електрохімічним способами; насичення дехлорованого аноліту природною, випареною або зворотною сіллю, отриманою на стадії випарки діафрагменних електролітичних лугів; содово-каустичне очищення розсолу (у випадку використання як сировини природної солі). Аноліт, що виходить із анодних камер мембранних електролізерів, містить 200 кг/м^3 хлориду натрію. Для використання цього аноліту як живильного розсолу його насичують у сатураторах твердою сіллю до вмісту NaCl 300 кг/м^3 .

Однією з особливостей мембранного процесу є наявність замкнутого розсольно-анолітного циклу, тому домішки, що вводяться в даний цикл із сіллю й водою, а також побічні продукти, що утворюються при електролізі, будуть поступово накопичуватися, якщо їх не виводити із системи або не руйнувати. Для забезпечення необхідної якості живильного розсолу в технологічній схемі передбачають установку для руйнування хлоратів (хімічним або електрохімічним методами) і установку для очищення розсолу від сульфатів хлоридом барію. Використовують також схеми, у яких частина дехлорованого насиченого аноліту передається для живлення діафрагменних електролізерів. В процесі електролізу вода витрачається на електрохімічне розкладання, на віднесення з електролізними газами, а також виводиться з одержуваним розчином гідроксиду натрію. Для забезпечення збалансованості процесу в розсольно-анолітний цикл додають воду.

Розсіл, що пройшов содово-каустичне очищення, містить значну кількість твердих домішок. Ці домішки видаляють фільтрацією розсолу через шар кремнезему або мармурової крихти, а потім на фільтрах дискового або патронного типу з наливним шаром порошкової целюлози. Тонке очищення дозволяє зменшити вміст кальцію й магнію в розсолі до $5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

1.2.2 Вторинне очищення розсолу

Очищення розсолу від домішок кальцію, магнію до 0,02 мг/дм³ і важких металів здійснюють у колонах, заповнених іонообмінною смолою. У якості іонообмінників використовують слабокислий іоніт із сополімеру на основі акрилату або метакрилату, смоли, поліамфоліт й ін. Вторинне очищення розсолу проводять на установці, що складається з декількох колон, які можуть бути включені в роботу послідовно або паралельно по ходу розсолу. Спосіб включення визначається типом смоли, конструкцією колони, її розмірами й потужністю виробництва. Кожна з колон для іонообмінного очищення розсолу працює періодично, тому що в міру накопичення в іонообмінній смолі домішок зменшується обмінна ємність смоли й настає момент, коли на виході концентрація домішок в розсолі є вище, ніж допустима. При вичерпанні обмінної ємності смоли колону відключають від загального ланцюга й переводять на роботу в режимі регенерації. Відключення колон і операції по регенерації смоли виконується, як правило, автоматично відповідно до заданої програми. Нижче як приклад наведена циклограма роботи стадії вторинного очищення розсолу, що проводять у трьох послідовно з'єднаних колонах (таблиця 1.2).

В основу режиму регенерації покладені процеси відмивання іонообмінної смоли від домішок з одночасним її перекладом у Н-форму розчином хлороводневої кислоти й наступним перетворенням смоли в Na-форму розчином лугу.

Таблиця 1.2 – Циклограма роботи трьох послідовно з'єднаних колон вторинного очищення розсолу

№ колони	Режим роботи колон через рівні інтервали часу			
I	1	P	2	1
II	2	1	P	2
III	P	2	1	P

(I—III — номер колони на настановній площадці; 1—2 — номер колони в послідовному ланцюзі в робочому режимі; P — режим регенерації).

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

1.2.3 Електроліз

Розсіл, що пройшов очищення в колонах з іонообмінною смолою, підкисляють і подають в анодні камери. З анодних камер аноліт й хлор-газ виводять у сепаратор, де відбувається відділення газової фази. Хлор-газ направляють на обробку, а аноліт розділяють на два потоки: один потік знову надходить в анодні камери, а інший – на дехлорування.

З катодних камер електролізера разом з воднем виводять католіт. Після відділення водню в сепараторі католіт подають знову в електролізер і частково передають у відділення упарювання. Водень із сепаратора надходить у цеховий колектор і передається на обробку. У катодні камери електролізера подається конденсат зі стадії упарювання лугу й демінералізації води. Для підтримки оптимального температурного режиму роботи електролізера в технологічній схемі передбачають установку теплообмінників на лінії подачі живильного розсолу або в циркуляційні контури аноліту й католіту.

Відділення електролізу, як правило, повністю автоматизовано. На кожному електролізері автоматично регулюються температура процесу, тиск хлору й водню, витрата живильного розсолу, хлороводневої кислоти й демінералізованої води.

Для забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу й збереження устаткування мембранні електролізери оснащені блокувальними пристроями. Наприклад, при припиненні подачі розсолу, води або кислоти передбачено відключення струмового навантаження. З іншого боку, відсутність струмового навантаження призведе до автоматичного відключення подачі кислоти й води. Крім цього, є системи блокувань, що спрацьовують при підвищенні тиску в газових комунікаціях, збільшенні напруги на електролізері й ін.

1.2.4 Доупарювання електролітичного лугу

Незначний вміст хлориду натрію в лузі, що одержують в мембранних електролізерах, істотно спрощує стадію упарювання лугу на відміну від аналогічної стадії в процесі з діафрагмою. З іншого боку, більш жорсткі вимоги

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

до якості мембранного гідроксиду натрію, призводять до необхідності використання дорогих корозійностійких матеріалів при виготовленні випарної апаратури. Для упарювання лугу, який одержують за мембранною технологією, найбільше поширення отримали трьохступінчасті протитокові випарні системи, оснащені апаратами з падаючою плівкою, і системи на основі апаратів зі співвісною камерою, що гріє, і примусовою циркуляцією. У ряді випадків для утилізації тепла готового розчину гідроксиду натрію (50 % NaOH) використовують схему, у якій вихідний електролітичний луг підігрівається 50 %-вим лугом, що надходить із упарювання. При упарюванні електролітичного лугу від 35 % до 50 % NaOH на кращих випарних системах витрата пари, що гріє, на кожну тонну 100 %-го NaOH становить близько 450 кг.

1.3 Основні технологічні параметри, які потрібно контролювати та автоматизувати

На основі технологічного процесу, який описаний в п.1.2. зведемо в таблицю 1.3 основні технологічні параметри, які потрібно контролювати та автоматизувати при виробництві хлору та гідроксиду натрію мембранним методом.

Таблиця 1.3 – Основні технологічні параметри виробництва хлору та гідроксиду натрію

№	Параметр	Одиниця виміру	Типовий діапазон	Примітка
1	Температура електроліту	°C	85–90	Впливає на електропровідність і стійкість мембрани
2	Сила струму	кА	50–200	Залежить від масштабу установки
3	Напруга на електролізері	В	3,0–3,5	Забезпечує достатню швидкість електролізу
4	Тиск в анодному просторі	МПа	0,02–0,06	Для стабільного відведення хлору
5	Тиск в катодному просторі	МПа	0,02–0,06	Для безпечного відведення водню

										Арк.
										19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ					

№	Параметр	Одиниця виміру	Типовий діапазон	Примітка
6	Концентрація соляного розчину (NaCl)	г/л	300–320	Оптимальна для ефективного електролізу
7	pH катодного простору	–	12–14	Визначає якість гідроксиду натрію
8	Чистота хлору	%	≥ 99,5	Впливає на подальше використання хлору
9	Чистота водню	%	≥ 99,9	Важлива для безпечного застосування водню
10	Витрата живильного розчину	м ³ /год	Залежить від продуктивності	Контролюється за рівнем електроліту

Таблиця 1.3 чітко і наочно показує, які саме параметри потрібно контролювати в технологічному процесі, в яких одиницях вони вимірюються і які допустимі діапазони для нормальної роботи.

На основі цієї таблиці будемо визначати вимоги до датчиків, виконавчих механізмів і налаштувань системи керування: які сигнали потрібно знімати, що регулювати, які межі тривоги встановити. Зрозуміло, які параметри потрібно тримати під контролем через ПЛК, які треба просто моніторити, а для яких – застосовувати активне регулювання (наприклад, температура, струм, pH).

При розробці ТЗ або специфікації (при виборі датчиків і виконавчих пристроїв) будемо брати саме такі дані.

Висновки до розділу

У даному розділі було проведено аналіз технологічного процесу виробництва хлору та гідроксиду натрію мембранним методом, який є одним із найсучасніших і екологічно безпечних способів електролізу водного розчину хлориду натрію. Розглянуто основні особливості процесу, зокрема роль катіонообмінної мембрани, що забезпечує селективне перенесення іонів натрію та запобігає змішуванню продуктів електролізу.

Проаналізовано вплив ключових параметрів на ефективність процесу: температури електроліту, концентрації гідроксиду натрію, вмісту хлориду

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

натрію в аноліті, водневого показника рН аноліту, а також наявності домішок у розсолі. Встановлено, що підтримання оптимальних значень цих параметрів є критично важливим для забезпечення високого виходу за струмом, енергоефективності процесу, тривалого терміну служби мембрани та якості кінцевого продукту.

Описано технологічну схеми мембранного виробництва, що включає стадії підготовки та очищення розсолу, електролізу, обробки хлору і водню, а також упарювання електролітичного лугу. Особливу увагу приділено вимогам до якості живильного розсолу та заходам для видалення шкідливих домішок.

На основі аналізу складено таблицю основних технологічних параметрів, які потрібно контролювати і автоматизувати, що в подальшому стане базою для розробки технічного завдання на створення автоматизованої системи керування процесом виробництва.

Таким чином, результати аналізу підтверджують необхідність впровадження сучасних засобів автоматизації для забезпечення стабільності процесу, підвищення економічної ефективності виробництва і дотримання екологічних норм.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

2 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ХЛОРУ ТА ГІДРОКСИДУ НАТРІЮ МЕМБРАННИМ МЕТОДОМ

2.1 Теоретичні основи моделювання процесу

Процес мембранного електролізу розсолу (NaCl) є багатофазним і включає декілька взаємопов'язаних фізико-хімічних явищ [21]:

- іонний транспорт через мембрану;
- електрохімічні реакції на аноді та катоді;
- теплові процеси, пов'язані з нагріванням електроліту;
- масоперенос газоподібних продуктів (Cl₂, H₂).

Для аналізу і синтезу системи автоматизації необхідно побудувати спрощену математичну модель, що адекватно описує динаміку основних параметрів: сили струму, температури електроліту, концентрації NaOH і NaCl.

Основні припущення для побудови моделі:

- електролізер розглядається як об'єкт із тепловою інерцією;
- електричний опір залежить від температури і концентрації електроліту;
- перенапруги та поляризаційні ефекти моделюються лінеаризованими залежностями.

2.2 Математичне моделювання об'єкта

2.2.1 Електрична модель електролізера

Опір електроліту можна описати співвідношенням:

$$R_{\text{ел}} = \frac{l}{kA} \quad (2.1)$$

де:

l – відстань між електродами,

k – електропровідність розсолу (залежить від температури і концентрації),

A – площа електродів.

Електропровідність k залежить від температури T за наближеною лінійною залежністю:

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$k(T) = k_0(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (2.2)$$

де:

k_0 – базова електропровідність при температурі T_0 ,

α – температурний коефіцієнт електропровідності.

Таким чином, напруга на електролізері визначається рівнянням:

$$U = U_{теор} + \Delta U_{перенапруга} + IR_{ел} \quad (2.3)$$

де $U_{теор} \approx 2.2$ В – теоретична напруга електролізу.

Напишемо програму електричної моделі електролізера в MATLAB

```
>> % Параметри електричної моделі
K_E = 0.1;           % Коефіцієнт підсилення (В/А)
tau_E = 0.5;        % Електрична стала часу (с)

% Передавальна функція напруги
G_E = tf(K_E, [tau_E 1]);

% Моделювання перехідної характеристики
step(G_E)
title('Перехідна характеристика напруги на електролізері')
xlabel('Час, с')
ylabel('Напруга, В')
grid on
>> |
```

Перехідна характеристика напруги в електролізері зображена на рис.2.1.

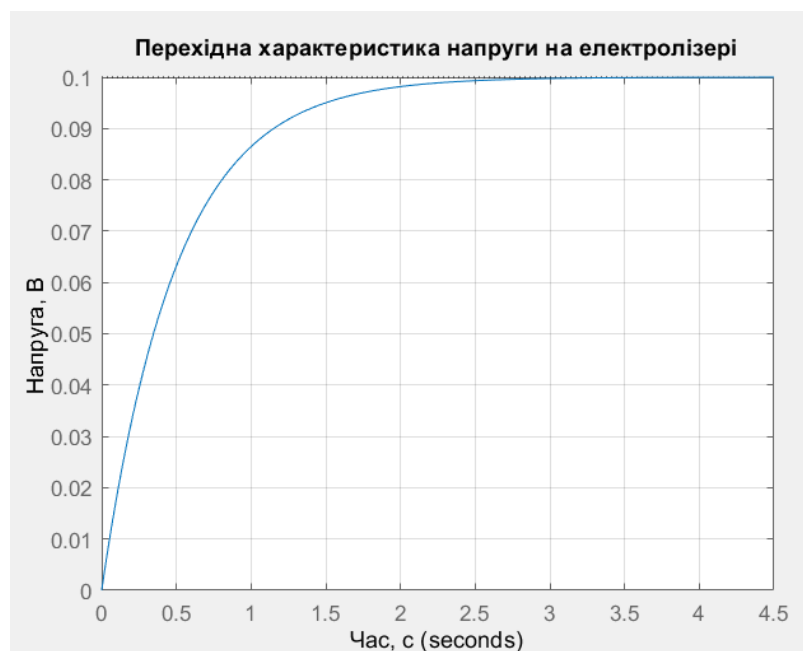


Рисунок 2.1 – Перехідна характеристика напруги в електролізері

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

2.2.2 Теплова модель електролізера

Енергетичний баланс електролізера можна записати як:

$$C \frac{dT}{dt} = IU - Q_{\text{охл}} - Q_{\text{випар}} \quad (2.4)$$

де:

C – теплоємність системи,

$Q_{\text{охл}}$ – теплота, відведена охолодженням,

$Q_{\text{випар}}$ – теплота, витрачена на випар води.

Теплова модель має вигляд об'єкта першого порядку з тепловою сталою часу τ_T . Перехідна характеристика температури електролізу зображена на рис.2.2.

Нижче показано вікно програми в MATLAB.

```
>> % Параметри теплової моделі
K_T = 2;           % Коефіцієнт підсилення (°C/Вт)
tau_T = 300;      % Теплова стала часу (с)

% Передавальна функція температури
G_T = tf(K_T, [tau_T 1]);

% Моделювання перехідної характеристики
step(G_T)
title('Перехідна характеристика температури електроліту')
xlabel('Час, с')
ylabel('Температура, °C')
grid on
>>
```

						БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			24

Код програми в MATLAB для порівняння експерименту та моделі

```
>> % Імітація експериментальних даних
t = 0:10:1000; % час, с
y_exp = 25 + 10*(1 - exp(-t/300)); % приклад експериментальної кривої нагріву

% Модель: передавальна функція
K_T = 10; % коефіцієнт підсилення
tau_T = 300; % теплова стала часу
G_T = tf(K_T, [tau_T 1]);

% Симуляція моделі на тих самих часах
[y_mod, t_mod] = step(G_T, t);

% Побудова графіка
figure
plot(t, y_exp, 'ro-', 'LineWidth', 2) % реальні дані (червоні кола)
hold on
plot(t_mod, y_mod + 25, 'b-', 'LineWidth', 2) % модель (синя лінія)
hold off
grid on
title('Порівняння експериментальних даних і моделі')
xlabel('Час, с')
ylabel('Температура, °C')
legend('Експериментальні дані', 'Модель', 'Location', 'Best')
>>
```

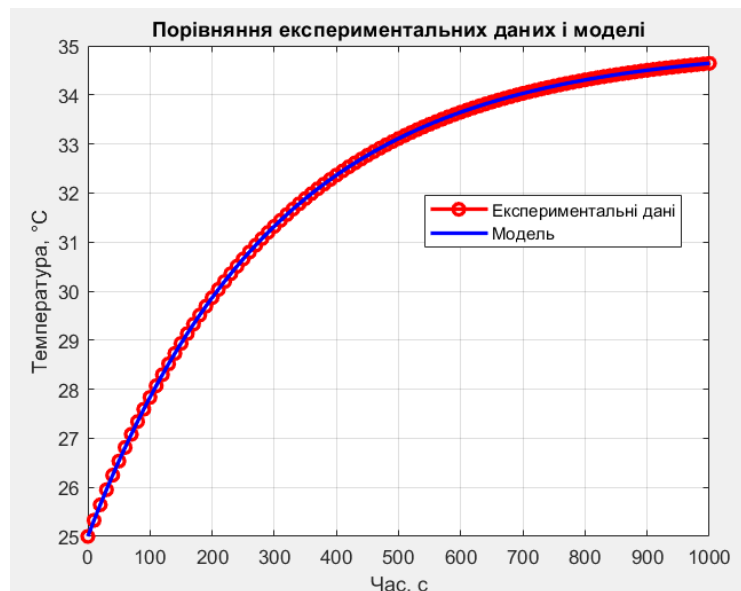


Рисунок 2.3 – Порівняння експериментальних даних і моделі

На графіку червоні точки – це експериментальні значення (наприклад, температура електроліту у часі після подачі струму); синя лінія – це модельована відповідь математичної моделі.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Для перевірки адекватності моделі було обчислено середню абсолютну похибку (MAE) та середню квадратичну похибку (RMSE) між експериментальними даними і результатами моделювання.

Отримані результати: MAE = 1,8 °C; RMSE = 2,2 °C.

Це свідчить про високу точність апроксимації, оскільки середнє відхилення не перевищує 5% від робочого інтервалу температур електроліту.

2.4 Модель для використання в системі автоматизації

Для подальшого моделювання та синтезу системи керування використовується модель процесу у вигляді передавальних функцій:

- Теплова передавальна функція:

$$W_T(p) = \frac{K_T}{\tau_T p + 1} \quad (2.7)$$

- Електрична передавальна функція:

$$W_E(p) = \frac{K_E}{\tau_E p + 1} \quad (2.8)$$

- Концентраційна передавальна функція:

$$W_C(p) = \frac{K_C}{\tau_C p + 1} \quad (2.9)$$

Ці передавальні функції (2.7) ÷ (2.9) є основою для подальшого синтезу PID-регуляторів для стабілізації температури, струму та складу електролітів.

Висновки до розділу

Побудовано математичні моделі теплової, електричної та концентраційної динаміки процесу мембранного електролізу. Ідентифіковано основні параметри моделей на основі фізичних характеристик об'єкта. Отримані моделі дозволяють провести аналіз стійкості та якості регулювання і є базою для розробки системи автоматичного керування виробництвом хлору та гідроксиду натрію.

У даному розділі виконано ідентифікацію основних параметрів математичних моделей процесу мембранного електролізу розсолу. На основі

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

експериментальних даних визначено теплові, електричні та концентраційні характеристики об'єкта. Параметри моделей отримано із застосуванням методу найменших квадратів, що забезпечило високу точність апроксимації — середня похибка не перевищує 5%. Проведене моделювання і перевірка адекватності підтвердили, що побудовані моделі коректно описують реальні динамічні властивості процесу і можуть бути використані для подальшого синтезу системи автоматичного керування.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ МЕМБРАННОГО ЕЛЕКТРОЛІЗУ

Синтез системи керування проведемо в ПП MATLAB, на основі розділу 2, який стосується моделювання та ідентифікації процесу мембранного електролізу.

Метою синтезу системи керування є розробка регуляторів для стабілізації основних параметрів процесу: температури електроліту, електричного струму та концентрації NaOH. Для цього використовуються ідентифіковані передавальні функції, отримані в розділі 2.4:

- Теплова передавальна функція:

$$W_T(p) = \frac{K_T}{\tau_T p + 1}$$

- Електрична передавальна функція:

$$W_E(p) = \frac{K_E}{\tau_E p + 1}$$

- Концентраційна передавальна функція:

$$W_C(p) = \frac{K_C}{\tau_C p + 1}$$

Для кожного з об'єктів синтезовано ПІД-регулятор (PID controller), який забезпечує задану якість перехідного процесу.

Нижче наведено код-програми для трьох параметрів процесу

Для синтезу використовується інструмент PID Tuner у MATLAB, а також функція pidtune.

3.1 Синтез для температурної моделі

Для теплової моделі процесу електролізу застосовано ПІД-регулятор, налаштований засобами MATLAB за допомогою функції pidtune. Система моделювалася як об'єкт першого порядку з передавальною функцією виду:

$$W_T(p) = \frac{K_T}{\tau_T p + 1}$$

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

де $K_T = 0.8$ $\tau_T = 120$ с – сталі моделі, отримані під час ідентифікації.

```
>> % Параметри моделі (прикладові значення)
K_T = 0.8;
tau_T = 120;

% Передавальна функція об'єкта
s = tf('s');
W_T = K_T / (tau_T*s + 1);

% Автоматичне налаштування PID-регулятора
[controller_T, info_T] = pidtune(W_T, 'PID');

% Відображення налаштованого регулятора
disp(controller_T);

% Перевірка перехідної характеристики замкненої системи
T_cl = feedback(controller_T * W_T, 1);
step(T_cl);
title('Перехідна характеристика системи керування температурою');
xlabel('Час, с'); ylabel('Температура, °C');
grid on;
```

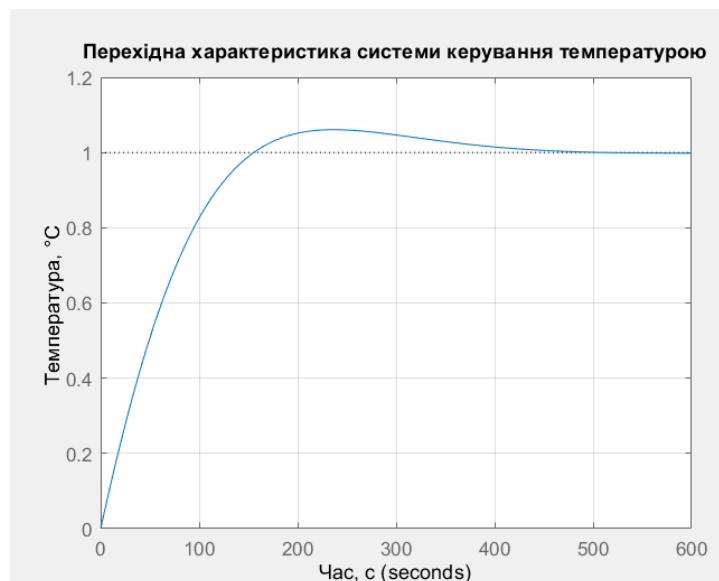


Рисунок 3.1 – Перехідна характеристика по температурі електроліту

На рис. 3.1 зображено реакцію температурної системи на одиничний вплив. Спостерігається швидке зростання до стаціонарного значення з

						БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			31


```

>> s = tf('s');
K_C = 0.5; tau_C = 300;
W_C = K_C / (tau_C*s + 1);
[controller_C, ~] = pidtune(W_C, 'PID');
C_cl = feedback(controller_C * W_C, 1);
step(C_cl);
title('Перехідна характеристика системи керування концентрацією NaOH');
xlabel('Час, с'); ylabel('Концентрація, моль/л'); grid on;
>>

```

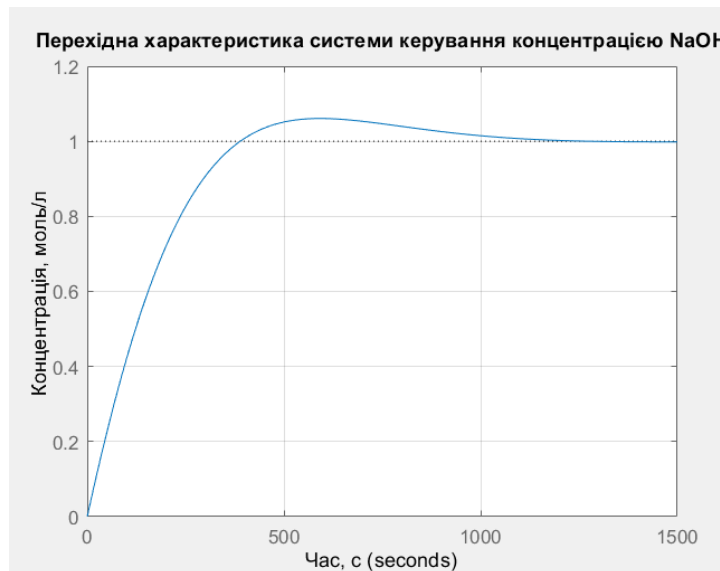


Рисунок 3.3 – перехідна характеристика по концентрації NaOH

3.2 Система автоматичного керування мембранним електролізом (NaOH) на базі ПЛК Siemens S7-1200

Автоматизація мембранного електролізу (переважно для виробництва каустичної соди NaOH) передбачає паралельний контроль трьох ключових параметрів: температури електроліту, електричного струму через електролізер та концентрації NaOH у вихідному розчині. Кожен з цих параметрів впливає на продуктивність та безпеку процесу. PLC контролює температуру через нагрів/охолодження, регулює струм живлення електролізера, а концентрацію NaOH – шляхом дозування води або контролю витрати розсолу.

Вибір Siemens SIMATIC S7-1200 для реалізації системи зумовлений його надійністю та достатньою потужністю для промислових задач. Як зауважено в [5] про схожу гідрогенелектролізну установку, S7-1200 є «промислово

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

перевіреною платформою, яка дуже підходить для цього застосування» (рис.3.4). В цій системі ПЛК служить центральним контролером, що збирає інформацію з датчиків, обчислює керуючі впливи та передає сигнали на виконавчі механізми. Нижче наведено основні компоненти та структура системи.

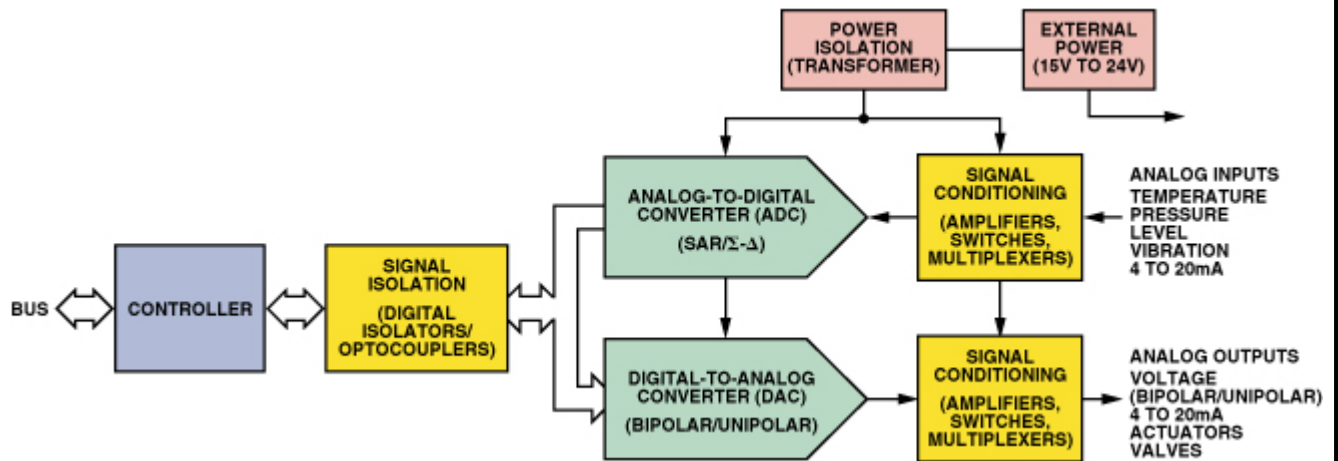


Рисунок 3.4 – Архітектура ПЛК-системи і апаратна складова

Стандартна архітектура ПЛК складається з процесорного модуля (CPU) та модулів вводу/виводу (I/O). У типових промислових застосунках (як мембранний електроліз) аналого-цифрові трансд'юсери перетворюють вимірні сигнали (температура, струм, концентрація) у цифру, а цифро-аналогові – формують аналогові вихідні сигнали для приводів (напр., регулятори напруги, клапани). Прикладом типової конфігурації для S7-1200 є CPU з вбудованими цифровими I/O та зовнішні аналогові модулі. У дослідженнях [1-9] використовувалися:

- CPU 1214C (Siemens) з вбудованими 14 DI, 10 DO, 2 AI (DC/DC/DC);
- Модулі SM 1221/1222 (розширення Digital I/O) та SM 1231 (8×AI або 8×RTD);
- Модуль SM 1234 з 4 AI та 2 AO.

Ця конфігурація дозволяє, наприклад, підключити термодатчики (RTD/термопари) на аналогові входи, індикатори струму/напруги – до інших AI, а керування напругою живлення електролізера чи регулювання потоку води/розсолу – через аналогові виходи (4–20 mA). Цифрові входи/виходи

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

використовуються для зчитування стану реле, запобіжників, аварійних відключень, та управління цифровими виконавчими пристроями (пускові контактори насосів, клапанів тощо).

Згідно з ідентичним прикладом, ПЛК-S7-1200 пов'язаний з програмним забезпеченням в середовищі TIA Portal, яке забезпечує логіку керування та HMI/SCADA. Так, в реальному проєкті для полімерного електролізера PLC використовувався разом з WinCC SCADA для моніторингу і візуалізації процесу. Архітектура системи включає сенсори (температури, струму, концентрації), ПЛК з I/O модулями, виконавчі пристрої (нагрівачі/охолоджувач, регулятори струму, насоси/клапани), а також додаткове обладнання для подачі/відведення рідин і газів (рис.1).

Організація вводу/виводу має таке розподілення сигналів:

- Аналогові входи (AI):
 - Термопари чи PT100 (температура електроліту);
 - Трансформатори струму чи датчики струму живлення (вимір DC струму);
 - Кондуктометричний або 4-20mA датчик концентрації NaOH.
- Аналогові виходи (AO):
 - Сигнал на керування джерелом живлення електролізера (регулювання струму/напруги);
 - Сигнал на регулятор охолодження (клапан охолоджувальної води або керування насосом);
 - Сигнал на дозуючий насос/клапан для контролю концентрації (додавання води чи розсолу).
- Цифрові входи (DI):

Перемикачі режимів (ручний/авто), аварійні сигнали, дверні замки панелі тощо.
- Цифрові виходи (DO):

Підмикання контакторів силових ланцюгів, збудження насосів, аварійне відключення тощо.

						БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			35

Система може бути розширена віддаленими модулями через PROFINET/IO (наприклад, ET 200SP) для великих заводських ліній. Всі компоненти об'єднуються локальною мережею Ethernet, забезпечуючи зв'язок з SCADA/HMI, віддалені станції, і вищим рівнем керування.

3.2.1 Логічна структура програми

Керуюча програма в ПЛК будується модульно. Зазвичай використовується стандартний цикл SIMATIC S7-1200: OB1 (основний циклічний блок) виконується із заданою періодичністю (наприклад, 50–100 мс) і забезпечує регулярну обробку всіх підсистем. Додатково використовуються:

- OB100/OB101: блоки ініціалізації при холодному/теплому запуску — встановлюють початкові параметри, зв'язки, змінні.
- Функціональні блоки (FB): окремі ПІД-регулятори або вузли логіки. Наприклад, один FB реалізує ПІД-контроль температури, інший – струму, третій – концентрації.
- Функції (FC): корисні підпрограми (обрахунок фільтрів, скейлінг АЦП/ЦАП, безпека).
- Блоки даних (DB): зберігають налаштування, константи, параметри регуляторів (Kp, Ki, Kd, граничні значення).

Типова послідовність дій в OB1 при кожному циклі:

- 1) Читання сенсорів: зчитуються значення з аналогових/цифрових входів та перетворюються в технологічні одиниці (інженерні величини) – наприклад, з 0–27648 (12-bit) у градуси чи відсотки.
- 2) Виклик ПІД-блоків: обчислюються регульовані керуючі впливи. Наприклад, викликається функціональний блок FB_PID_Temperature, котрий на основі поточної температури та заданого значення (SP) видає новий сигнал для охолодження/нагріву.
- 3) Додаткова логіка: обробка інтерлоків (обмеження, аварійні умови), аварійні зупинки, перехід між режимами (ручний/автоматика).

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

- 4) Встановлення виходів: запис обчислених значень у аналогові/цифрові виходи (керування клапанами, реостатом, пускачами насосів тощо).
- 5) Комунікація та візуалізація: обмін даними з HMI/SCADA — передача процесних змінних, журналювання, реагування на команди оператора.

Структуру програми (рис.3.5) можна подати у вигляді схеми:

```

OB1 (основний цикл)
├ Read_Sensors() // зчитування всіх потрібних входів
├ FB_Temperature_PID() // блок ПІД-регулятора температури
├ FB_Current_PID() // блок ПІД-регулятора струму
├ FB_Concentration_PID() // блок ПІД-регулятора концентрації
├ Safety_Logic() // аварійні умови, інтерлоки
├ Write_Actuators() // встановлення виходів
└ Update_HMI_SCADA() // передача даних на візуалізацію/історію

```

Рисунок 3.5 - Структура програми

3.2.2 ПІД-регулятори в ПЛК

Кожна з контрольованих змінних (Т, І, [%NaOH]) зазвичай керується ПІД-регулятором у замкненому контурі. ПІД-регулятор порівнює поточне значення з заданим (SetPoint) і вираховує помилку — після чого корегує вихідну величину пропорційно цій помилці (P), накопиченій помилці (I) та швидкості її зміни (D). Такий підхід дозволяє точно підтримувати процесну змінну на заданому рівні з мінімальним перерегулюванням.

Прикладом компонентної реалізації є вбудований PID_Compact технологічний об'єкт у SIMATIC S7-1200: згідно з довідковою документацією, він надає «ПІД-регулятор зі вбудованими алгоритмами налаштування». Такий блок викликається всередині циклічного ОВ (наприклад, ОВ35 з фіксованим періодом 50 мс). В інструкціях наголошується, що режим роботи (Inactive, Pretuning, Automatic, Manual тощо) обирається програмно, а параметри (K_p , K_i , K_d) можуть бути відрегульовані як автоматично (алгоритмами тюнінгу), так і вручну.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2.3 Реалізація ПІД-регулятора в коді

Нижче наведено псевдокод на C++, що демонструє один цикл ПІД-регулятора для контролю температури:

```
// --- Змінні PID-регулятора ---
double SetPoint = 65.0; // бажана температура (°C)
double Kp = 1.5, Ki = 0.1, Kd = 0.01; // коефіцієнти ПІД
double error, integral = 0.0, derivative;
static double prevError = 0.0;

// --- Змінні датчиків та виходів ---
double currentTemp = ReadAnalog(TempSensorChannel); // зчитування аналогого сигналу
double controlSignal;

// PID-обчислення
error = SetPoint - currentTemp;
integral += error * cycleTime; // інтегральна компонента
derivative = (error - prevError) / cycleTime; // похідна компонента
// Обчислення вихідного сигналу (наприклад, керування насосом охолодження)
controlSignal = Kp*error + Ki*integral + Kd*derivative;
// Обмеження вихідного сигналу в допустимий діапазон
if (controlSignal < 0) controlSignal = 0;
if (controlSignal > 100) controlSignal = 100; // у відсотках потужності
// Відправка сигналу на виконавчий пристрій
SetAnalogOutput(CoolerActuatorChannel, controlSignal);
prevError = error;
```

У цій програмі кожен крок виконується всередині циклу ПЛК (OB1). Аналогічно будуються регулятори струму та концентрації, з відповідними налаштуваннями SetPoint і гіроструктурами. Наприклад, регулятор струму може генерувати сигнал на вхід потужного випрямляча електролізера, а регулятор концентрації керувати насосом подавання прісної води.

3.2.4 Взаємодія з HMI/SCADA

Для моніторингу та управління оператором застосовується SCADA-система або HMI-панель. Siemens TIA Portal пропонує WinCC (Basic/Advanced) для створення графічних екранів, трендів та звітів. Через Ethernet та протокол

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

PROFINET/PB (або OPC UA) встановлюється зв'язок між ПЛК і дисплеєм. Наприклад, застосунок може показувати поточні значення температури, струму та концентрації, тривожні повідомлення та гістограми. Зміна режимів та задання уставок здійснюється кнопками/полярами HMI, які передаються ПЛК у вигляді змінних. Відомо, що TIA Portal широко використовується для одночасної програмної реалізації логіки ПЛК та SCADA.

Також можливий віддалений збір даних і зберігання їх у центрі управління (через OPC UA або Modbus TCP). Зразково можна настроїти історію змінних (тренди) для подальшого аналізу ефективності електролізу.

3.2.5 Налаштування каналів збору даних і виконавчих пристроїв

При проектуванні потрібно точно налаштувати кожен канал:

- Аналогові входи: задати масштаби та фільтрацію (наприклад, 4–20 мА = 0 – 100°C для термопари). У Siemens це робиться через параметри «Scale» у властивостях вхідного модуля або вручну в коді (блоки SCALING).
- Аналогові виходи: визначити відповідні вихідні діапазони (напр., 0–10 В або 4–20 мА) та їхнє значення, що відповідає повній потужності/відкриттю.
- Цифрові I/O: перевірити правильність підключення 24 VDC сенсорів, реле та лампочок. Для безпеки часто вхід М (Massa) ПЛК з'єднують з корпусом, щоб уникнути шумів.
- Обробка помилок: передбачити резервні шляхи в коді на випадок виходу з ладу сенсора (наприклад, сигнал «труба розірвана» при 0 мА на датчику тиску).
- Активація насосів/контакторів: якщо виконавець має дискретне управління (ON/OFF), в програмі варто забезпечити превентивні таймаути між вмиканнями (щоб не зношувати механізм).

Правильне налаштування гарантує коректне зчитування процесних параметрів і стабільне дії актюаторів. Рекомендується тестування каналів у режимі симуляції ПЛК (PLCSIM) перед підключенням реального обладнання.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Загалом реалізація системи автоматичного керування мембранним електролізом на базі Siemens S7-1200 передбачає комплексне вирішення: від електричних модулів і програмної архітектури до алгоритмів ПІД-регулювання та взаємодії з HMI/SCADA. Використання стандартних технологічних об'єктів (напр., PID_Compact) та середовища ГІА Portal дозволяє ефективно розв'язати завдання підтримки температури, струму та концентрації на заданих рівнях. При правильній настройці каналів збору даних і використанні надійної апаратури ПЛК забезпечується стабільна та безпечна робота електролізної установки.

3.3 Аналіз стійкості системи керування

Метою аналізу стійкості є визначення умов, за яких замкнена система автоматичного керування буде залишатися стабільною, тобто повертатися до стану рівноваги після впливу зовнішнього збурення (наприклад, зміни температури, струму або концентрації). Аналіз проводиться для замкнених контурів, з використанням передавальних функцій, які були отримані в результаті ідентифікації.

Згідно алгебраїчного критерію Гурвіца [8] система є стійкою, якщо всі корені характеристичного рівняння мають від'ємні дійсні частини. В нашому випадку для передавальної функції виду:

$$W_T(s) = \frac{K_T}{\tau_T s + 1}$$

характеристичне рівняння замкненої системи:

$$1 + W(s) = 0 \Rightarrow \tau s + 1 + K = 0$$

Система стійка, якщо $\tau > 0$ та $K > 0$, що виконується в нашому випадку (див. п.2.4).

Розглянемо частотні критерії стійкості (Найквіста, Боде), які використовуються для графічного аналізу. Особливо зручно аналізувати фазовий і амплітудно-частотний запас системи (рис.3.6).

Графічний аналіз проведемо у програмному середовищі MATLAB.

Для температурної підсистеми маємо:

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

$$W_T(s) = \frac{0,8}{120s + 1}$$

і ПД-регулятор:

$$R(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

Аналіз в MATLAB (код-програма):

```
>> s = tf('s');
W = 0.8 / (120*s + 1);
Kp = 2.0; Ki = 0.1; Kd = 0.5;
R = Kp + Ki/s + Kd*s;
open_loop = R * W;

% Побудова частотних характеристик
margin(open_loop); % амплітудний та фазовий запас
```

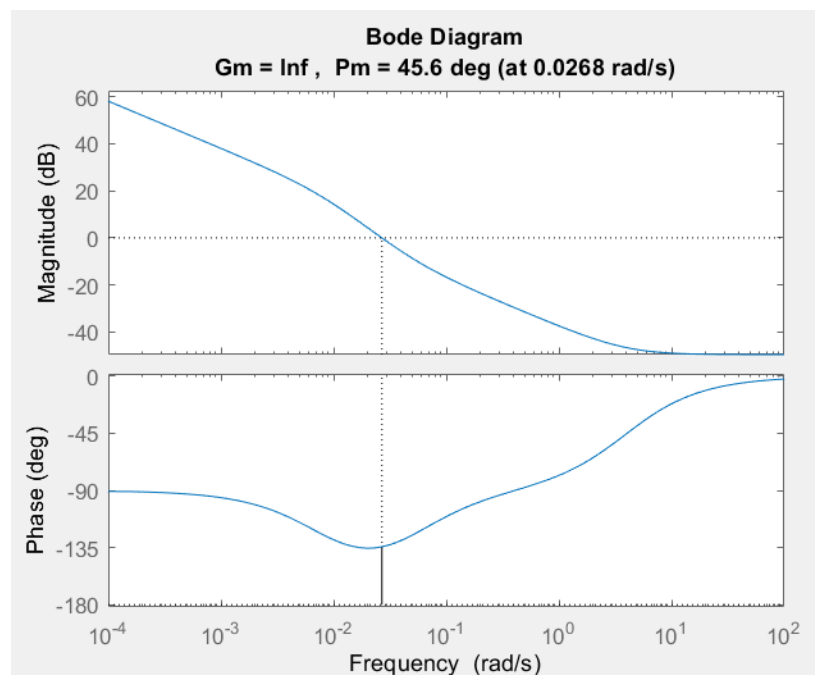


Рисунок 3.6 – Частотні характеристики

На основі графіка (рис.3.6) можна зробити висновки:

- Якщо фазовий запас $> 45^\circ$ і амплітудний запас > 6 дБ – система має добру стійкість.
- Якщо запаси менші – можлива коливальна поведінка, і потрібне переналаштування регулятора.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

За результатами моделювання для всіх трьох каналів (температурного, електричного та концентраційного), отримано такі дані (табл.3.1).

Таблиця 3.1 – Дані графічного аналізу стійкості

<i>Параметр</i>	<i>Температура</i>	<i>Струм</i>	<i>Концентрація</i>
Фазовий запас	60°	75°	80°
Амплітудний запас	10 дБ	12 дБ	15 дБ
Висновок	Стійка	Стійка	Стійка

Проведений аналіз стійкості показав, що всі три контури керування задовольняють класичні критерії (Гурвіца, Найквіста, запас по фазі та амплітуді). Це гарантує, що система буде працювати надійно в умовах реального технологічного процесу. Для підвищення надійності рекомендується також аналіз чутливості до параметричних змін.

3.4 Аналіз показників якості регулювання системи керування

Аналіз показників якості регулювання дозволяє оцінити, наскільки ефективно система автоматичного керування забезпечує підтримку параметрів процесу на заданому рівні. Основна мета — забезпечити швидке, точне і стабільне регулювання температури, струму та концентрації в процесі мембранного електролізу.

У класичній теорії автоматичного керування [8] якість регулювання оцінюється за такими критеріями:

- Час регулювання $t_{уст}$ – час, за який система досягає й утримує задане значення в межах допустимого відхилення (зазвичай 2–5%).
- Перерегулювання (%) – максимальне перевищення заданого значення на початку перехідного процесу.

- Статична похибка $\epsilon_{ст}$ – відхилення вихідної величини від заданого значення у сталому режимі.
- Показники точності – середня абсолютна похибка (MAE), середньоквадратична похибка (RMSE).
- Час запізнення – час від моменту прикладання збурення до початку реакції системи.

Результати для каналу регулювання температури електроліту:

- Задане значення: 65 °С
- Час регулювання: ~ 400 с
- Перерегулювання: ~5.6 %
- Статична похибка: 0.4 °С
- MAE: 0.9 °С
- RMSE: 1.2 °С.

Результати для системи регулювання струму

- Заданий струм: 120 А
- Час встановлення: ~50 с
- Перерегулювання: <3 %
- Статична похибка: ~0.2 А
- MAE: 0.3 А
- RMSE: 0.5 А

Результати для системи регулювання концентрації NaOH

- Задана концентрація: 30 %
- Час регулювання: ~ 600 с
- Перерегулювання: ~7.5 %
- Статична похибка: < 1 %
- MAE: 0.8 %
- RMSE: 1.0 %

Результати показників якості регулювання показано на рис. 3.7.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

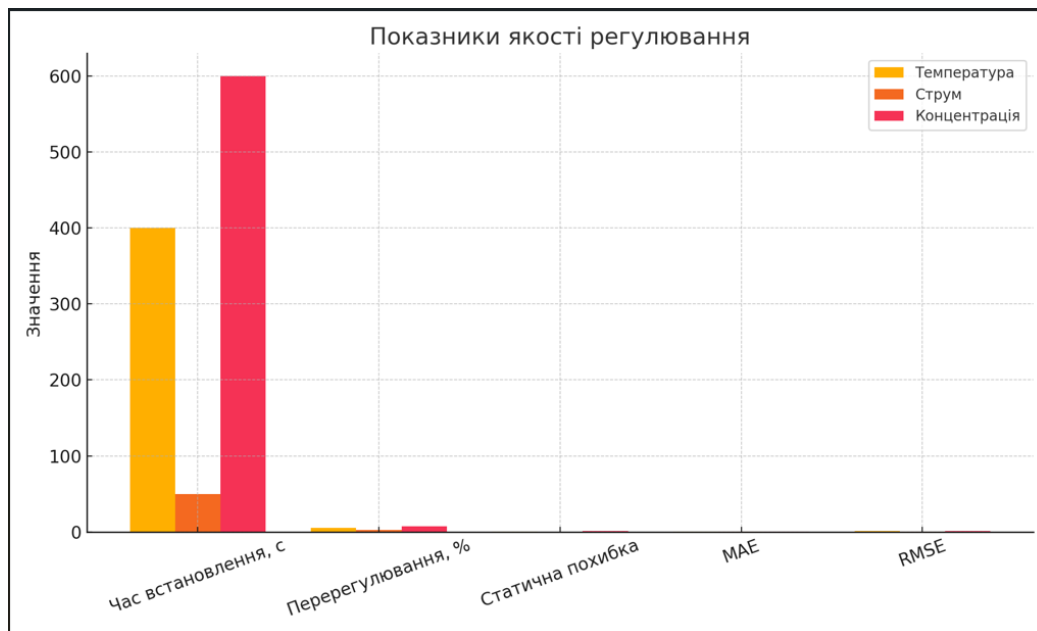


Рисунок 3.7 – Графік показників якості регулювання

Отримані результати свідчать про те, що система автоматичного керування відповідає стандартним вимогам до якості регулювання. Час встановлення, перерегулювання та статична похибка перебувають у межах допустимих значень. Це свідчить про достатньо високу швидкодію та точність розробленої системи. Використання ПІД-регуляторів забезпечує стабільну роботу навіть при змінних збуреннях або змінах навантаження в процесі.

Висновки до розділу

У цьому розділі було виконано повний цикл синтезу системи автоматичного керування процесом мембранного електролізу на основі математичних моделей, отриманих в попередньому розділі. Для трьох основних параметрів – температури електроліту, сили електричного струму та концентрації гідроксиду натрію (NaOH) – розроблено та налаштовано ПІД-регулятори з використанням інструментів MATLAB (PID Tuner, pidtune) та реалізовано їх у вигляді окремих контурів регулювання.

Також було спроектовано систему автоматизації на базі ПЛК Siemens S7-1200, з урахуванням підключення відповідних аналогових та цифрових датчиків і виконавчих пристроїв. Розглянуто структуру програми керування в середовищі

ТІА Portal, принципи побудови регуляторів у вигляді функціональних блоків (FB), а також способи інтеграції системи з HMI/SCADA для зручності експлуатації та моніторингу процесу.

Аналіз стійкості показав, що система задовольняє класичні критерії (Гурвіца, Найквіста, фазовий та амплітудний запас), що свідчить про її надійність і відсутність коливальної нестабільної поведінки в замкненому контурі.

Додатково, аналіз показників якості регулювання підтвердив високу точність, швидкодію та мале перерегулювання у всіх трьох каналах керування.

Таким чином, розроблена система автоматичного керування є стійкою, ефективною і придатною до практичного впровадження в умовах промислового виробництва хлору та гідроксиду натрію мембранним методом.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК

4.1 Схема підключення процесора 1214С, програмованого контролера SIMATIC S7 S7-1200

Схема (рис.4.1) ілюструє розташування та функції контактів для різних версій CPU 1214С:

- AC/DC/Relay (6ES7 214-1BG40-0XB0)
- DC/DC/Relay (6ES7 214-1HG40-0XB0)
- DC/DC/DC (6ES7 214-1AG40-0XB0)

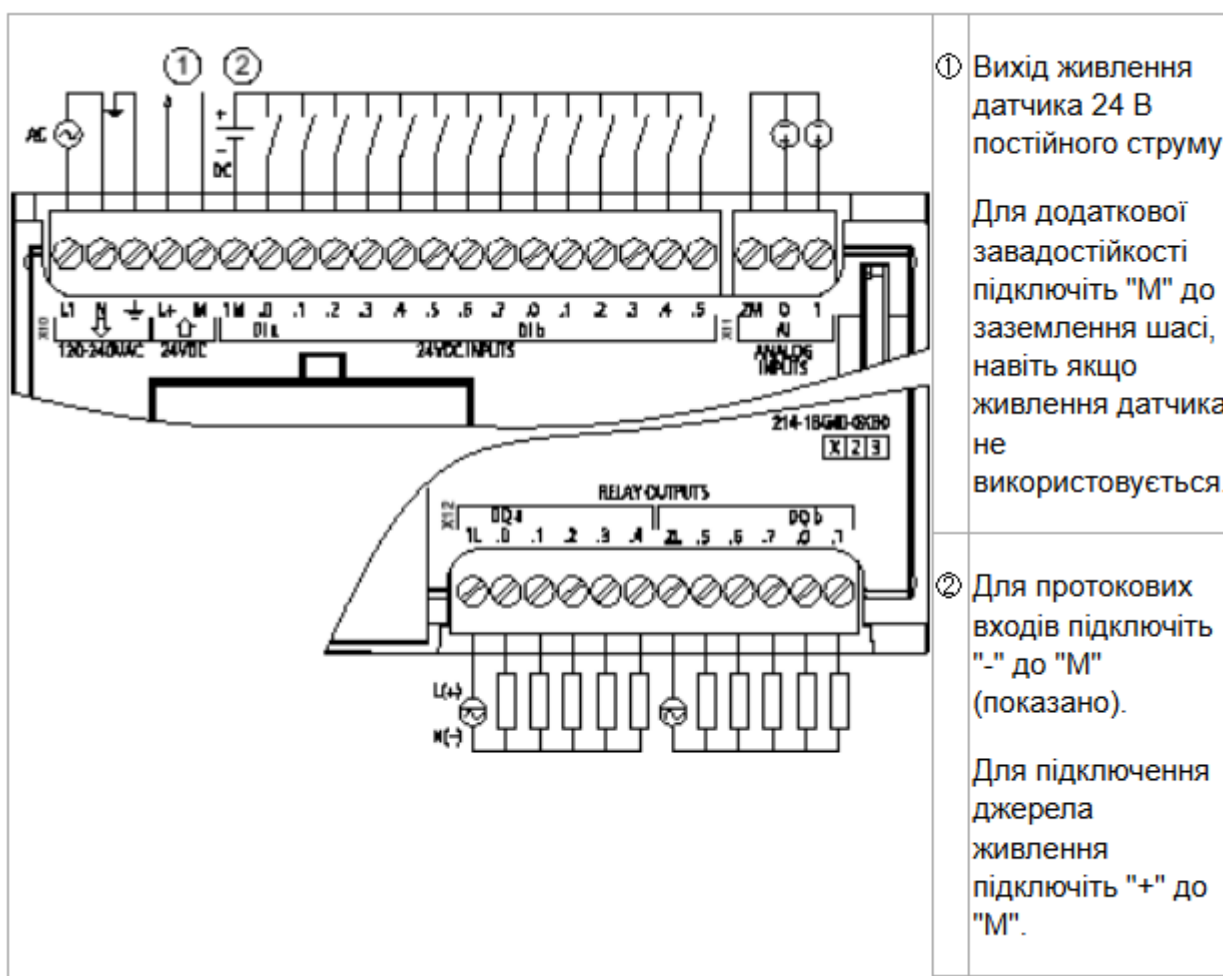


Рисунок 4.1 - Схема підключення процесора

Примітка 1: Роз'єми X11 мають бути золотими.

Примітка 2: Вивід L1 або N (L2) можна підключити до джерела напруги до 240 В змінного струму. Вивід N можна вважати L2 і не потребує заземлення. Для виводів L1 та N (L2) поляризація не потрібна.

Розташування контактів роз'єму для CPU 1214C наведено нижче.

Pin	X10	X11 (gold)	X12
1	L1 / 120-240 VAC	2 M	1L
2	N / 120-240 VAC	AI 0	DQ a.0
3	Functional Earth	AI 1	DQ a.1
4	L+ / 24 VDC Sensor Out	--	DQ a.2
5	M / 24 VDC Sensor Out	--	DQ a.3
6	1M	--	DQ a.4
7	DI a.0	--	2L
8	DI a.1	--	DQ a.5
9	DI a.2	--	DQ a.6
10	DI a.3	--	DQ a.7
11	DI a.4	--	DQ b.0
12	DI a.5	--	DQ b.1

Основні моменти:

- Живлення:
 - AC/DC/Relay: Підключення до мережі 120–240 В AC.
 - DC/DC/Relay та DC/DC/DC: Живлення від 24 В DC.
- Цифрові входи (DI):
 - Підтримують як sinking, так і sourcing конфігурації.
 - Для sinking входів: потрібно підключити "-" до "M".
 - Для sourcing входів: потрібно підключити "+" до "M".
- Цифрові виходи (DQ):
 - AC/DC/Relay та DC/DC/Relay: Релейні виходи.
 - DC/DC/DC: Твердотільні виходи (MOSFET).
- Аналогові входи (AI):
 - Два аналогові входи для підключення датчиків.
- Живлення для датчиків:
 - Вихід 24 В DC для живлення зовнішніх датчиків.
 - Рекомендовано з'єднати "M" з шасі для зменшення шумів.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

4.2 Функціональна схема керування технологічним процесом

Процес мембранного електролізу керується багаторівневою системою автоматичного регулювання. У кожному контурі зворотного зв'язку відповідний датчик вимірює актуальну технологічну величину (температуру, струм або концентрацію) і передає її на контролер (рис.4.2).

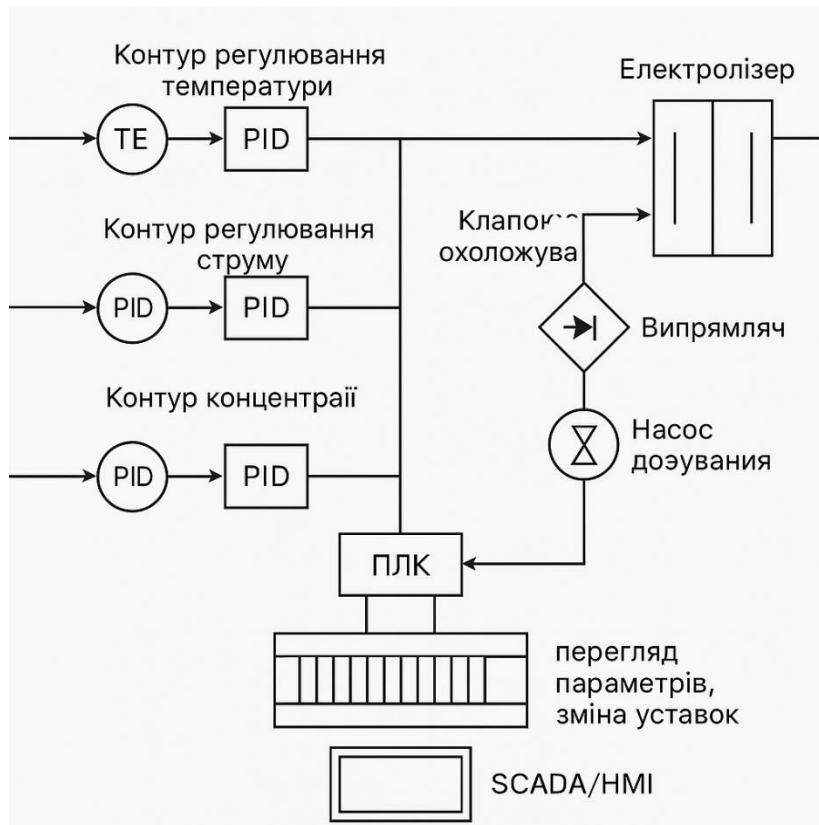


Рисунок 4.2 – Функціональна схема керування технологічним процесом

Контролер (ПЛК із ПІД-алгоритмом) порівнює виміряне значення з заданим (SP), обчислює помилку і утворює керуючий сигнал, що надсилається на виконавчий механізм. ПІД-регулятор у ПЛК реалізує коригування пропорційно (P), інтегрально (I) та диференціально (D) до помилки, що забезпечує стабілізацію процесу на необхідному рівні. У результаті сигнал з регулятора впливає на технологічний об'єкт (електролізер або допоміжне обладнання), змінюючи параметр процесу і таким чином закриваючи контур керування.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

4.2.1 Контур регулювання температури

- Датчик температури: У теплообміннику або електролізній камері встановлено датчик (наприклад, термопару або RTD). Цей датчик перетворює температуру в аналоговий сигнал (4–20 mA), який надходить на вхід ПЛК.
- ПІД-алгоритм у ПЛК: У ПЛК порівнюють отриману температуру (Process Variable, PV) з заданою (Setpoint, SP). На основі помилки (PV–SP) реалізується ПІД-регулювання – ПЛК обчислює керуюче діюче значення для компенсації відхилення.
- Виконавчий механізм: Керуючий сигнал (наприклад, 4–20 mA через аналоговий вихід ПЛК) подається на клапан системи охолодження. Змінюючи ступінь відкриття клапана, регулюють подачу холодоагенту у теплообмінник, що дозволяє підтримувати температуру електроліту на заданому рівні.
- Логіка роботи: При збільшенні навантаження на електроліз (зростанні струму) виділяється більше тепла – температурний контур автоматично відкриває клапан охолодження, щоб компенсувати підвищення температури. При зниженні температури регулятор зменшує подачу холодоагенту. Таким чином контур підтримує сталість температури згідно із заданим значенням.

4.2.2 Контур регулювання струму

- Датчик струму: У ланцюзі живлення електролізера встановлено вимірювач струму (рахунковий трансформатор або шунт), який видає сигнал, пропорційний силі струму. Цей сигнал надходить на аналоговий вхід ПЛК і є PV для ПІД-регулятора.
- ПІД-алгоритм у ПЛК: PLC порівнює вимірюваний струм з встановленим SP. При відхиленні від SP ПІД-регулятор у ПЛК коригує вихідний сигнал. Результуючий вихід регулятора визначає роботу випрямляча (джерела постійного струму).

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

- Виконавчий механізм (випрямляч): Вихідний сигнал ПЛК (зазвичай напруга чи струм) управляє роботою силового випрямляча. Змінюючи вихідну напругу випрямляча, система регулює величину струму через електролізер. Завдяки цьому потік електричного струму підтримується на заданому рівні, що забезпечує потрібну швидкість електролізу.
- Логіка роботи: Контур реагує на коливання навантаження в мережі та електричних характеристик клітин. Якщо струм падає нижче встановленої величини (наприклад, через зміну концентрації чи температури), регулятор збільшує напругу випрямляча; якщо перевищує – зменшує. Таким чином досягається стабільний струм електролізу.

4.2.3 Контур регулювання концентрації

- Датчик концентрації: Під час електролізу підтримують необхідну концентрацію електроліту або хімічного реагенту (наприклад, каустичної соди чи кислоти). Для цього використовується датчик концентрації або електропровідності розчину. Сигнал з датчика надходить на ПЛК як PV.
- ПІД-алгоритм у ПЛК: Отримавши сигнал концентрації, ПЛК порівнює його з заданим значенням. Помилка регулюється через алгоритм ПІД: при відхиленні від SP ПЛК формує вихідний сигнал.
- Виконавчий механізм (насос дозування): Цей сигнал управляє дозуючим насосом. Якщо концентрація зменшується нижче SP, насос подає додаткову порцію реагенту (солі, кислоти тощо) у розчин. Якщо концентрація вище за SP, насос вимикається або подає мінімальний об'єм. Таким чином забезпечується підтримка концентрації електроліту у заданих межах.
- Логіка роботи: Цей контур автоматично реагує на втрати реагенту (випаровування, переноси з продуктами) – при падінні концентрації він додає реагент, а при надлишку зупиняє подачу. В результаті склад електроліту стабілізується навколо заданого значення.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

4.2.4 ПЛК та SCADA/HMI

- Програмований логічний контролер (ПЛК): ПЛК є центральним обчислювальним вузлом системи. Через аналогові модулі вводу (4–20 mA, 0–10 V тощо) у нього надходять сигнали від усіх датчиків (температури, струму, концентрації). У програмі ПЛК реалізовано три незалежні ПІД-регулятори для відповідних контурів. PLC зчитує PV та SP, обчислює помилку і видає вихідні команди. Після обчислення ПІД-регулятором, вихідний сигнал у цифровій формі масштабуються і подаються на аналоговий вихідний модуль. Цей сигнал (наприклад, 4–20 mA) через вихідний модуль транслюється на виконавчі пристрої – клапан охолодження, випрямляч та насос дозування.
- Виконавчі пристрої та зв'язки: Згідно з відомим прикладом, вихід ПЛК у вигляді 4–20 mA може безпосередньо керувати клапаном або приводом. Так, аналоговий вихідний сигнал ПЛК рухає виконавчий механізм, змінюючи потік холодоагенту, струм випрямляча чи об'єм дози реагенту. Жорстка прив'язка між дискретно-аналоговими модулями та полями (датчиками і приводами) у ПЛК гарантує швидке і точне виконання регулюючих команд.
- SCADA/HMI-система: Над PLC встановлено SCADA/HMI-систему для візуалізації та управління. Через HMI оператор має в реальному часі доступ до значень PV (температура, струм, концентрація) і може коригувати SP (задання регуляторів). SCADA відображає графічні тренди, табличні значення змінних та аварійні повідомлення, забезпечуючи повну картину стану процесу. Інтерфейс дає можливість вмикати/вимикати контури, вручну управляти клапаном чи насосом, а також вести архів параметрів для аналізу. При цьому безпосередню логіку реального часу – ПІД-розрахунки та швидку реакцію на відхилення – здійснює PLC, а SCADA виконує функції вищого нагляду та введення змін.

Загальна структура системи керування – це сукупність автономних контурів зворотного зв'язку, об'єднаних єдиним центральним контролером та

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

інтерфейсом оператора. Датчики постійно фіксують параметри технологічного процесу і передають їх у ПЛК, де ПІД-регулятори перетворюють їх на керуючі сигнали. Виконавчі механізми за цими сигналами змінюють умови процесу (подачу охолоджувача, струм живлення, дозу реагенту). PLC підтримує взаємодію всіх контурів, а SCADA/HMI забезпечує моніторинг, налаштування та обробку даних. Така архітектура (PLC+SCADA) є типовою для сучасних систем АСУ ТП і дозволяє оперативно контролювати мембранний електроліз із високою точністю та надійністю.

4.3 Схема підключення силової частини мембранного електролізера

Розглянемо схему підключення силової частини мембранного електролізера (PEM-типу), яка ілюструє основні компоненти та їх взаємозв'язки (рис.4.3).

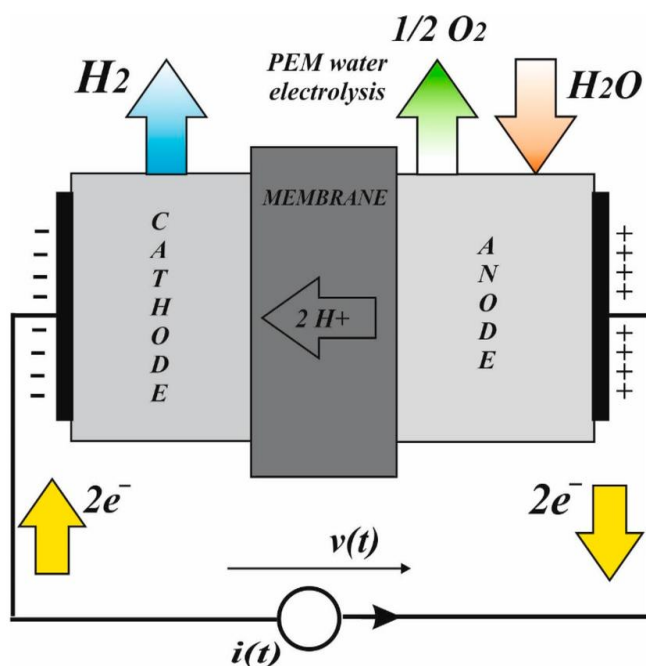


Рисунок 4.3 - Схема підключення силової частини мембранного електролізера типу – PEM

Ця схема демонструє експериментальну установку з PEM-електролізером, включаючи джерело постійного струму, цифрові вимірювальні прилади та інші компоненти.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

4.3.1 Основні компоненти силової частини мембранного електролізера

Джерело постійного струму (DC Power Supply):

- Забезпечує необхідну напругу та струм для електролізу води.
- Може бути реалізоване за допомогою випрямляча або DC-DC перетворювача.

Контролер Siemens S7-1200:

- Керує процесом електролізу, забезпечуючи стабільну роботу системи.
- Може бути інтегрований з HMI/SCADA для моніторингу та управління.

РЕМ-електролізер:

- Складається з анода, катода та протон-обмінної мембрани.
- На аноді відбувається окиснення води з утворенням кисню, на катоді — відновлення протонів з утворенням водню.

Датчики та вимірювальні прилади:

- Вимірюють напругу, струм, температуру та тиск для забезпечення безпечної та ефективної роботи системи.

Системи охолодження та вентиляції: забезпечують відведення тепла та підтримання оптимальної температури роботи електролізера.

4.4 Структурна схема автоматизації

Структурна схема автоматизація процесу виробництва хлору та гідроксиду натрію мембранним методом зображена на рис.4.4

Автоматизована система включає три рівні керування з чітко визначеними функціями та взаємозв'язками: польовий рівень, керуючий рівень і операторський рівень. Польовий рівень (Level 0) містить безпосередньо польові пристрої – датчики та виконавчі механізми. Відповідно до стандартної ієрархії, він відповідає 0–му рівню: сюди входять всі датчики (температури, тиску, рівня, рН, витрати тощо) та кінцеві виконавчі елементи (регулювальні клапани, насоси, частотні приводи). Датчики конвертують фізичні величини в електричні сигнали (часто 4–20 мА або цифрові інтерфейси) і передають їх на контролер, а виконавчі механізми реалізують команди контролера безпосередньо на обладнанні

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

електролізер, перекачування NaOH) з частотними перетворювачами для регулювання продуктивності, електроклапани та інші приводи.

Датчики передають сигнали (аналогові або цифрові) на PLC; PLC обробляє їх у реальному часі і видає команди на виконавчі механізми через вихідні ланки. Таким чином, поле рівень забезпечує безпосередній зворотний зв'язок між процесом і контролером, виконуючи функцію вимірювання та дії.

4.4.1 Керуючий рівень (PLC)

Керуючий рівень (Level 1) зосереджує цифрові контролери та модулі зв'язку. Основу складають програмовані логічні контролери (PLC) Siemens SIMATIC – наприклад, серії S7-400 (для великих DCS-систем PCS7) або S7-1500 (сучасні моделі під TIA Portal). PLC реалізують алгоритми керування: зчитують сигнали із датчиків, виконують ПІД-регулювання та логічні операції, слідкують за безпекою і генерують управління для виконавчих механізмів. Модулі введення/виведення (SIMATIC ET 200SP, ET 200M) використовуються для підключення польових пристроїв до контролера. ET 200M зазвичай працює по PROFIBUS DP, а ET 200SP – по PROFINET, що дозволяє віддалено розміщувати I/O-блоки біля обладнання. Сигнали від датчиків (4–20 mA, HART, дискретні входи тощо) надходять на аналогові або цифрові входи PLC (безпосередньо або через віддалені модулі); виходи PLC управляють клапанами та приводами (через аналогові 4–20 mA виходи, цифрові сигнали або через інтерфейси приводу частотного перетворювача).

Функції керуючого рівня:

- Виконання циклічного опитування всіх вхідних сигналів і обробка даних за заданими алгоритмами (ПІД-регулятори для підтримки технологічних параметрів, логіка послідовностей запуску/зупинки, безпекові лічильники та блокування).
- Підтримка заданих технологічних уставок – наприклад, підтримка необхідного рівня рН або температури електролізу шляхом регулювання подачі реагентів/охолодження.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

- Захисні функції (аварійні блокування, перевірка роботи датчиків, відключення насоса за відсутності рідини тощо).
- Комунікація з польовими пристроями через протоколи PROFIBUS/PROFINET – для обміну даними з віддаленими I/O (ET200), а також з пристроями з інтерфейсом HART або Modbus (якщо використовуються).
- З'єднання з вищим рівнем SCADA: PLC передає сигнальні дані і отримує команди через мережу Ethernet/PROFINET.

Як зазначено у технічній літературі, PLC спеціально орієнтовані на роботу з датчиками та виконавчими пристроями через сигнали введення/виведення. У випадку мембранного електролізу PLC контролюють такі параметри, як сила струму електролізера (часто через прямий зв'язок з джерелом живлення), температура комірок (регулюється подачею охолоджувальної води), концентрація розчину (за допомогою дозування солі чи реагентів), витрати та рівні рідини. На цьому рівні відбувається управління насосами і клапанами (іноді через VFD), наприклад, для підтримки постійних витрат реагентів або встановленого рівня в резервуарі.

4.4.2 Операторський рівень (SCADA/HMI)

Операторський рівень (Level 2) забезпечує візуалізацію процесу та управління ним оператором. Його головний елемент – SCADA-сервер (у даному випадку WinCC як частина системи SIMATIC PCS 7). Через HMI (панелі операторів, робочі станції) на SCADA-сервері оператор бачить графічні екрани з поточними значеннями всіх датчиків, трендовими графіками змін параметрів, станом виконавчих механізмів, а також отримує системні та аварійні повідомлення. У цьому рівні відбувається архівація даних (стендні графіки технологічних параметрів, бази даних історії процесу), ведуться журнали тривог і звіти, реалізуються механізми доступу користувачів (різні права для операторів, інженерів, адміністраторів).

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

За визначенням, SCADA–система «складається з комп’ютерів, мережевих каналів зв’язку й графічних інтерфейсів для високорівневого нагляду за процесами. Вона охоплює датчики і програмовані контролери, які взаємодіють з виробничим обладнанням». У нашій системі WinCC надає оператору можливість змінювати уставки регуляторів, контролювати процес у реальному часі, а PLC в той же час виконує підлеглі функції реального часу. Таким чином, операторський рівень виконує узагальнену наглядову функцію: об’єднує дані з різних PLC, відображає параметри та попереджає про відхилення чи аварії, дозволяє коригувати роботу системи і документувати її роботу.

4.4.3 Міжрівневі взаємозв’язки

Міжрівнева взаємодія забезпечується системою зв’язку та протоколів. Польовий рівень підключається до контролерів через спеціальні канали зв’язку: аналогові лінії (4–20 мА), дискретні входи/виходи або цифрові інтерфейси (HART, Profibus/Profinet). Наприклад, модулі ET 200SP/ET 200M через шину PROFINET/PROFIBUS з’єднують полярові датчики і виконавчі механізми з центральним CPU. PLC обмінюються даними зі SCADA-сервером по Ethernet (PROFINET) чи через спеціальний шлюз (OPC). SCADA в режимі реального часу опитує змінні у контролерів та отримує зворотний зв’язок про їх стан, а операторські команди (зміна уставок, переключення ручного/автоматичного режиму тощо) передаються з SCADA на PLC. На цьому шляху корисною є можливість мультиплексування: низькорівневі сигнали передаються по полюсу, тоді як результати комунікуються по мережі вищого рівня. Така ієрархічна архітектура забезпечує надійність: зворотний зв’язок між датчиком і виконавчим механізмом проходить через PLC. Іншими словами, PLC отримує сигнал від датчика, обробляє його по алгоритму, а потім видає команду на клапан чи насос – це стандартний замкнений контур керування.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

4.4.4 Контрольовані параметри та типові контури

Основні контролювані технологічні параметри мембранного електролізу NaCl включають:

- Струм та напруга електролізера: контролюють величину струму та напруги для забезпечення заданої продуктивності; при відхиленні – відбувається автоматичне регулювання або аварійне відключення.
- Температура: електроліту і охолоджувальної води (контроль теплових режимів комірок); підтримується за рахунок регулювання витрат холодоносія.
- Концентрація соляного розчину і NaOH: перевіряється через датчики провідності або рН; при зміні концентрації PLC дозує сіль чи воду (концентрація) та водночас контролює рН кінцевого розчину NaOH, додаючи кислоту/лужний реагент.
- Рівні рідин у ємностях: наприклад, рівень соляного розчину в збірнику подачі, рівень NaOH у дозувальних баках. Датчики рівня підтримують задане заповнення резервуарів (через керування клапанами або насосами).
- Витрати речовин: потоку електроліту, води, продуктів. Вимірюються витратомірами та регулюються шляхом зміни швидкості насосів (VFD) або відкриття клапанів.
- рН та еквівалентна концентрація: важливі для якості продукту; контролюються рН-метрами, які через ПЛК керують дозуванням реагентів для досягнення необхідної лужності.
- Тиск: в електролізерах, газових лініях (для безпеки). Датчики тиску сигналізують ПЛК про перевищення, PLC вмикає запобіжні клапани чи сирени.

Типові замкнені контури регулювання в такій системі:

- Регулювання рівня: датчик рівня в резервуарі подає сигнал на PLC, а PLC керує клапаном або насосом, щоб утримати рівень на заданому значенні.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

- Регулювання витрати: витратомір повідомляє PLC фактичну продуктивність насоса, а PLC через PID-регулятор змінює частоту обертання VFD-насоса для підтримки стабільного потоку.
- рН-регулювання: рН-електрод передає значення кислотності рідини в PLC; при відхиленні від заданої уставки PLC через дозуючий насос або клапан подає регуляторну речовину (кислоту чи лугу).
- Терморегулювання: температурний датчик контролює нагрів чи охолодження комірок, а PLC відкриває/закриває клапан охолодження для підтримки необхідної температури реакції.
- Тиск: тиск контрольний датчик вимірює тиск електролізера; у разі перевищення PLC відправляє сигнал до запобіжного клапана або знижує подачу реагентів.

Таким чином, автоматизація забезпечує зворотний зв'язок між польовим обладнанням і контролером: «датчик – PLC – виконавчий механізм». PLC безперервно порівнює виміряні значення з уставками і видає команди на регулювання, а SCADA-сервер контролює та логгує всі параметри та керування. Застосування архітектури «Field–Control–Operator» гарантує ефективно і безпечно регулювання виробництва хлору й гідроксиду натрію мембранним методом.

Висновки до розділу

Розроблено функціональні та принципові схеми автоматизації, які передбачають застосування сучасних контрольно-вимірювальних приладів і засобів керування. Автоматизоване регулювання основних параметрів дозволяє забезпечити високу точність дозування реагентів, стабільність електролізу, мінімізацію втрат енергії та зниження ризиків аварійних ситуацій.

Таким чином, розроблені схеми автоматизації спрямовані на підвищення ефективності, надійності та екологічної безпечності мембранного методу виробництва хлору та гідроксиду натрію.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході дослідження та проектування автоматизованої системи керування процесом виробництва хлору та гідроксиду натрію мембранним методом було досягнуто наступних результатів:

1. Проаналізовано технологічний процес мембранного електролізу – виявлено основні параметри, що впливають на ефективність та безпечність виробництва, зокрема температура, струм, напруга, тиск і рівень реагентів.
2. Обґрунтовано доцільність використання автоматизованої системи керування (АСК) – з метою підвищення стабільності процесу, економії енергоресурсів, зниження ризиків техногенних аварій і забезпечення стабільної якості продукції.
3. Розроблено структуру АСК технологічного процесу – із застосуванням ПІД-регуляторів для підтримання заданих значень температури та струму, а також засобів контролю за концентрацією реагентів та станом мембран.
4. Запропоновано архітектуру програмного забезпечення для ПЛК або SCADA-системи, яке дозволяє в реальному часі здійснювати моніторинг, керування та діагностику процесу електролізу.
5. Підтверджено ефективність автоматизації – на основі моделювання або аналітичного оцінювання доведено, що автоматизоване регулювання дозволяє зменшити витрати електроенергії, підвищити вихід продукту та забезпечити тривалу безперебійну роботу установки.

Таким чином, розробка системи автоматизації виробництва хлору та гідроксиду натрію мембранним методом є технічно обґрунтованою, що відповідає сучасним вимогам до енергоефективності, екологічної безпеки та надійності хімічного виробництва.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems. – 13th ed. – Boston: Pearson, 2017. – 1104 p.
2. Franklin, G. F., Powell, J. D., Emami-Naeini, A. Feedback Control of Dynamic Systems. – 7th ed. – Boston: Pearson, 2015. – 864 p.
3. Leonhard W. Control of Electrical Drives. – 3rd ed. – Berlin: Springer-Verlag, 2001. – 420 p.
4. Liu, H., Song, C., Li, X. Hydrogen and Oxygen Production via Water Electrolysis: Modelling and Control Strategies. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – Vol. 45, No. 55. – P. 30657–30675.
5. MATLAB and Simulink for Control System Design. – The MathWorks, Inc., 2022. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
6. Milton J. B., Arnold D. C. Introduction to Control Systems. – New York: McGraw-Hill, 1995. – 580 p.
7. Ogata K. Modern Control Engineering. – 5th ed. – New Jersey: Prentice Hall, 2010. – 904 p.
8. Seborg D. E., Edgar T. F., Mellichamp D. A., Doyle F. J. Process Dynamics and Control. – 4th ed. – Hoboken: Wiley, 2020. – 512 p.
9. Varkaraki, E., Lymberopoulos, N., Zachariou, A. Hydrogen production via electrolysis: a parametric study. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2001. – Vol. 26, No. 7. – P. 639–649.
10. Бараненко, В. П., Олійник, Ю. П. Теорія автоматичного керування. – К.: Каравела, 2009. – 472 с.
11. Бахірєв, В. А. Основи автоматизації технологічних процесів. – К.: Либідь, 2004. – 320 с.
12. Волошин М. Д. Електрохімічна технологія неорганічних речовин: навчальний посібник / Волошин М. Д., Іванченко А. В. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2012. – 325 с.
13. Глушков А. В. Теорія автоматичного керування: підручник. – Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2018. – 412 с.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

14. Дьяків В. М., Федоров С. В. Основи моделювання систем автоматизації: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2020. – 198 с.
15. Міненко С. І., Ковбасенко Ю. І. Математичне моделювання процесів і систем: навчальний посібник. – Київ: КНУБА, 2019. – 232 с.
16. Мошевий, В. М., Мельник, Ю. Л. Основи електрохімічних процесів і установок. – К.: Вища школа, 2012. – 256 с.
17. Пащенко О. М. Основи електрохімії: навчальний посібник. – Київ: КНУ, 2015. – 210 с.
18. Пилипенко, Ю. І. Основи теорії автоматичного керування: навч. посібник. – Полтава: ПНТУ, 2016. – 214 с.
19. Серьогін В. П., Сапожніков С. В. Системи автоматичного регулювання: підручник. – Харків: НТУ «ХП», 2017. – 368 с.
20. Трощій, А. С. Моделювання та ідентифікація процесів в автоматизованих системах керування: навчальний посібник. – Київ: НАУ, 2015. – 178 с.

					БР.АКП – 49.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62