

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

БР.АКП – 05.00.00.000 ПЗ

Група АКПзд -23-2К

**Іван Гузіновський**

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

**Гузіновський Іван Степанович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5:66.081.63:004.9

(індекс)

## БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Автоматизація технології хлоридів лужних металів в

(назва роботи)

діфрагменному електролізері

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

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

### Нормоконтроль

асистент

Л.І. Лагойда

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

### Здобувач освітнього ступеня

АКПзд-23-2К

І.С.Гузіновський

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

### Науковий керівник

доцент

М. В. Шавранський

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

### Рецензент

доцент

Л.І. Фешанич

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

### Допущено до захисту

### Завідувач кафедри

доцент

А.І. Лагойда

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

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

## **ЗАВДАННЯ** **НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Гузіновському Івану Степановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація технології хлоридів лужних металів в діафрагменному електролізері

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 № 53/8

2. Строк подання студентом роботи

13.06.2025р.

3. Вихідні дані до роботи матеріали практики, технологічний регламент

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

4.1. Аналіз технологічного процесу електролізу хлоридів лужних металів як об'єкта автоматизації

4.2. Моделювання процесу електролізу хлоридів лужних металів

4.3. Дослідження моделі процесу отримання хлоридів лужних металів в

діафрагменному електролізері

4.4 Розробка схем і алгоритмів для автоматизації процесу

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

БР. АКПзд – 05.00.00.000 01 – Принципова технологічна схема.

БР.АКПзд – 05.00.00.000 02 – Основні технологічні параметри процесу

електролізу. БР.АКПзд – 05.00.00.000 03 – Моделювання процесу. БР. АКПзд

– 05.00.00.000 04 – Дослідження моделі процесу. БР. АКПзд – 05.00.00.000 05

– Аналіз стійкості системи керування: динамічні характеристики. БР. АКПзд

– 05.00.00.000 06 – Аналізу показників якості регулювання. БР. АКПзд –

05.00.00.000 07 – Схема підключення. БР.АКПзд – 05.00.00.000 08 –

Функціональна схема автоматизації

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2024 р

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу електролізу хлоридів лужних металів як об'єкта автоматизації	13.05.2025 р.	Виконано
2	Моделювання процесу електролізу хлоридів лужних металів	20.05.2025 р.	Виконано
3	Дослідження моделі процесу отримання хлоридів лужних металів в діафрагменному електролізері	30.05.2025 р.	Виконано
4	Розробка схем і алгоритмів для автоматизації процесу	05.06.2025 р.	Виконано
5	Висновки по роботі	08.06.2025 р.	Виконано
6	Оформлення БР	12.06.2025 р.	Виконано

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

І.С. Гузіновський  
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

М.В. Шавранський  
(ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 67 сторінок, 18 рисунків, 6 таблиць, 17 джерел.

*Тема:* «Автоматизація технології хлоридів лужних металів в діафрагменному електролізері»

*Об'єкт дослідження:* технологічний процес електролізу хлоридів лужних металів у діафрагменному електролізері, а також система автоматичного керування цим процесом. Це включає керування такими параметрами, як температура, струм, концентрація електроліту та рівень рідини в камерах.

*Мета роботи:* розробка ефективної системи автоматизованого керування процесом електролізу хлоридів лужних металів у діафрагменному електролізері, яка забезпечить стабільність технологічних параметрів, підвищення енергоефективності та якості кінцевої продукції.

*Методи дослідження:* у роботі використано теоретичні методи аналізу літературних джерел і математичного моделювання процесу діафрагменного електролізу хлоридів лужних металів. Застосовано системний підхід до структурування об'єкта автоматизації та визначення основних параметрів керування. Для перевірки ефективності алгоритмів керування проведено імітаційне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink. Також використано методи аналізу динаміки системи під впливом зовнішніх збурень.

*Результати бакалаврської роботи:* у результаті виконання роботи отримано математичну модель процесу електролізу хлоридів лужних металів у діафрагменному електролізері. Розроблено структурну схему автоматизованої системи керування з регулюванням температури та електричного струму. Проведено імітаційне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink, яке підтвердило працездатність запропонованої системи. Отримані результати свідчать про ефективність застосування ПІД-регуляторів для стабілізації технологічних параметрів.

**Ключові слова:** автоматизація, електроліз, хлориди лужних металів, діафрагменний електролізер, ПІД-регулятор, математичне моделювання, Simulink, ПЛК, система керування, контроль температури, струм, технічний процес, хімічне виробництво.

## ANNOTATION

Bachelor's thesis contains: 67 pages, 18 figures, 6 tables, 17 sources.

*Topic:* "Automation of the technology of alkali metal chlorides in a diaphragm electrolyzer"

*Object of research:* technological process of electrolysis of alkali metal chlorides in a diaphragm electrolyzer, as well as a system for automatic control of this process. This includes control of such parameters as temperature, current, electrolyte concentration and liquid level in the chambers.

*Purpose of work:* development of an effective automated control system for the electrolysis process of alkali metal chlorides in a diaphragm electrolyzer, which will ensure the stability of technological parameters, increase energy efficiency and quality of the final product.

*Research methods:* the work uses theoretical methods of analysis of literary sources and mathematical modeling of the process of diaphragm electrolysis of alkali metal chlorides. A systematic approach was applied to structuring the automation object and determining the main control parameters. To verify the effectiveness of the control algorithms, simulation modeling was carried out in the MATLAB/Simulink environment. Methods for analyzing the dynamics of the system under the influence of external disturbances were also used.

*Results of the bachelor's thesis:* as a result of the work, a mathematical model of the process of electrolysis of alkali metal chlorides in a diaphragm electrolyzer was obtained. A structural diagram of an automated control system with temperature and electric current control was developed. Simulation modeling was carried out in the MATLAB/Simulink environment, which confirmed the operability of the proposed system. The results obtained indicate the effectiveness of the use of PID controllers for stabilizing technological parameters.

**Keywords:** automation, electrolysis, alkali metal chlorides, diaphragm electrolyzer, PID controller, mathematical modeling, Simulink, PLC, control system, temperature control, current, technical process, chemical production.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....</b>	<b>8</b>
<b>ВСТУП .....</b>	<b>9</b>
<b>1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОЛІЗУ ХЛОРИДІВ ЛУЖНИХ МЕТАЛІВ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ.....</b>	<b>10</b>
1.1 Властивості та застосування хлору й гідроксидів натрію та калію.....	10
1.2 Сировина для одержання хлору й гідроксидів натрію та калію.....	12
1.3 Опис технологічної схеми електролізу хлоридів лужних металів.....	13
1.4 Готування й очищення розсолу.....	17
1.5 Виготовлення діафрагм.....	21
1.6 Конструкції електролізерів.....	23
Висновки до розділу.....	27
<b>2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОЛІЗУ ХЛОРИДІВ ЛУЖНИХ МЕТАЛІВ.....</b>	<b>28</b>
2.1 Теоретичні основи процесу електролізу хлоридів лужних металів.....	28
2.2 Розрахунок матеріального балансу відділення електролізу хлористого натрію.....	37
2.3 Матеріальний баланс електролізера.....	40
Висновки до розділу.....	43
<b>3 ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ХЛОРИДІВ ЛУЖНИХ МЕТАЛІВ В ДІАФРАГМЕННОМУ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРІ.....</b>	<b>44</b>
3.1 Математична модель діафрагменного електролізера.....	32
3.2 Передавальні функції системи автоматизації.....	46
3.3 Аналіз стійкості системи керування електролізу хлоридів лужних металів у діафрагменному електролізері .....	50
3.4 Аналіз показників якості системи автоматизації електролізу хлоридів лужних металів.....	53

					<i>БР.АКПзд - 05.00.00.000 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докумен.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>	<i>Гузіновський І</i>				<i>Автоматизація технології хлоридів лужних металів в діафрагменному електролізері</i>	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевірів</i>	<i>Шавранський М</i>					<b>Н</b>	<b>6</b>	<b>67</b>
<i>Рецензент</i>	<i>Фешанич Л.І</i>					<i>АКПзд-23-2К</i>		
<i>Н. Контр.</i>	<i>Лагойда Л.І.</i>					<i>ІФНТУНГ</i>		
<i>Затвердив</i>	<i>Лагойда А.І.</i>							

Висновки до розділу.....	55
<b>4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК.....</b>	<b>57</b>
4.1 Алгоритм схеми підключення ПЛК Siemens S7-1200.....	57
4.2 Опис схеми підключення електролізера та ПЛК.....	58
Висновки до розділу.....	63
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>65</b>
<b>ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>66</b>

					<i>БР.АКПзд - 05.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						7
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АСК – автоматизована система керування

ЛАЧХ – логарифмічна амплітудно-частотна характеристика

ММ – математичне моделювання

ПАА – поліакриламід

ПЛК – програмований логічний контролер

ПП – програмний продукт

ПФ – передавальна функція

ПХ – перехідна характеристика

САК – система автоматичного керування

СК – система керування

ТП – технологічний процес

ФСА – функціональна схема автоматизації

					<i>БР. АКПзд - 05.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

## ВСТУП

Сучасна хімічна промисловість характеризується високими вимогами до ефективності, надійності та екологічної безпеки технологічних процесів. Одним із ключових напрямів удосконалення виробництва є автоматизація, яка забезпечує стабільну якість продукції, зниження витрат енергії та сировини, а також підвищення рівня технологічної безпеки. Особливе значення це має для процесів електролізу, зокрема — для отримання хлоридів лужних металів, які широко використовуються у хімічній, металургійній та фармацевтичній галузях.

Діафрагменні електролізери забезпечують розділення катодної та анодної камер, що дозволяє запобігти змішуванню продуктів електролізу та покращує чистоту кінцевої речовини. Проте ефективність такого процесу значною мірою залежить від точного регулювання параметрів, зокрема температури, струму та концентрації реагентів. Це створює об'єктивну необхідність у розробці та впровадженні систем автоматизованого керування, які забезпечують безперервний моніторинг і оптимізацію умов електролізу.

Метою цієї роботи є розробка алгоритмів автоматичного керування процесом електролізу хлоридів лужних металів у діафрагменному електролізері з урахуванням технологічних особливостей процесу, а також побудова відповідної моделі для перевірки ефективності запропонованих рішень. У роботі розглядаються принципи побудови систем автоматизації, методи PID-регулювання та підходи до моделювання в середовищі MATLAB/Simulink, а також питання інтеграції з програмованими логічними контролерами (ПЛК) для практичного впровадження.

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОЛІЗУ ХЛОРИДІВ ЛУЖНИХ МЕТАЛІВ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

## 1.1 Властивості та застосування хлору й гідроксидів натрію та калію

Хлор при нормальних умовах – це газ жовто-зеленого кольору з задушливим запахом. Рідкий хлор – прозора рідина бурштинового (янтарного) кольору. При атмосферному тиску і температурі  $-34,05\text{ }^{\circ}\text{C}$  хлор переходить у рідкий стан, а при температурі  $-101,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  – замерзає [1].

При охолодженні водного розчину хлору або вологого газоподібного хлору до температури нижче, ніж  $9,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , утворюються жовті кристали гідрату хлору  $\text{Cl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ .

При взаємодії хлору із солями амонію чи аміаком утворюється трихлорид азоту  $\text{NCl}_3$ , який є вибуховою речовиною. Суміш хлору з воднем, при вмісті останнього від 5,8 до 88,5 % об., вибухонебезпечна. Гранично допустима концентрація (ГДК) хлору у виробничих приміщеннях складає  $1\text{ мг/м}^3$ . Газоподібний хлор у невеликих концентраціях подразливо діє на верхні дихальні шляхи і слизисті оболонки очей, при підвищених концентраціях може викликати набряк легень і загальне отруєння організму. Так, при вмісті в повітрі  $3\text{ г/м}^3$  хлору, кілька вдихів приводять до летального результату.

Розчини гідроксидів натрію і калію прозорі чи фарбовані у залежності від вмісту домішок, без запаху, можуть містити хлориди, сульфати і карбонати лужних металів. При попаданні на шкіру і слизисті оболонки очей викликають хімічні опіки. Гранично допустима концентрація аерозолів 100 %-го  $\text{NaOH}$   $0,5\text{ мг/м}^3$ .

Водень, що може попадати в атмосферу виробничого приміщення через зливальний пристрій діафрагменних електролізерів і кінцеві частини (кишені) електролізерів із ртутним катодом, несе туман розчину електроліту і тому володіє слабким подразливим впливом.

Для одержання розчинів гідроксидів лужних металів і хлору та водню використовують електроліз водних розчинів хлоридів натрію чи калію.

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Існують три основних електрохімічних способи виробництва цих продуктів, що відрізняються технологічною схемою і конструкцією електролізерів. У першому способі застосовують електролізери з катодом зі сталеві сітки чи перфорованого отворами тонкого сталевого листа і фільтруючою діафрагмою, що розділяє катодний та анодний простори. В другому способі використовують електролізери з ртутним (амальгамним) катодом. У третьому — електролізери зі сталевими сітчастими або листовими катодами і поділяючої катодний та анодний простори катіонообмінною мембраною.

Аноди в першому і другому способах виготовляють з титанового листа чи сітки зі спеціальним покриттям поверхні з оксидів металів, які прискорюють анодну реакцію. Іноді, особливо в електролізерах із ртутним катодом, аноди роблять із графіту. У електролізерах з іонообмінними мембранами застосовують металеві електроди.

Для електролізу хлористоводневої кислоти використовують електроди з графіту та діафрагму з полівінілхлориду.

Хлор як побічний продукт утворюється при виробництві натрію і магнію електролізом розплаву хлоридів металів.

Хлор використовують у виробництві полімерів і розчинників, хімічних засобів захисту рослин, органічних і неорганічних дезінфікуючих засобів, каталізаторів хлорорганічного синтезу, напівпровідників, синтетичних миючих засобів, барвників, пластифікаторів. Він застосовується в целюлозно-паперовій промисловості для відбілювання, у гірничорудній – для хлорування руд, у кольоровій металургії – у процесах очищення розчинів і виділення з них коштовних компонентів, у комунальному господарстві – для знезаражування питної води та стічних вод. Хлор рідинний вищого ґатунку містить об'ємну частку  $Cl_2$  не менше 99,8 %, води не більше 0,01 % мас, трьоххлористого азоту не більше 0,002 % мас. і осаду не більше 0,015 % мас. Споживачам рідинний хлор доставляють в спеціально обладнаних залізних цистернах, контейнерах ємністю

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

800 дм<sup>3</sup> , балонах малого та середнього об'єму. Транспортується рідинний хлор залізничним, водним та автомобільним транспортом.

Розчини гідроксидів лужних металів необхідні для одержання синтетичних волокон, пластичних мас, миючих засобів, добрив. Чисті розчини гідроксиду калію використовують для заповнення акумуляторних батарей. Хлор після скраплення може транспортуватися на будь-які відстані залізничними цистернами, контейнерами й у балонах [1].

Водень використовують, як правило, на місці виробництва в процесах гідрування органічних продуктів, синтезу хлориду водню, для одержання водяної пари. Споживачам доставляють концентровані (42÷50 %) розчини гідроксидів натрію і калію.

Потреби в хлорі і розчинах гідроксидів лужних металів постійно зростають, тим самим викликаючи розширення виробництва цих продуктів і обумовлює необхідність удосконалювання технології їх одержання.

## **1.2 Сировина для одержання хлору й гідроксидів натрію та калію**

Сировиною хлориду натрію є: тверда кам'яна сіль та озерна сіль, що знаходиться в соляних озерах у вигляді донних відкладень. Як сировину можливо використовувати природні підземні розсоли, а також морську чи океанську воду. Сировинним джерелом хлориду калію є мінерали сильвініт  $KCl \cdot NaCl$  і карналіт  $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$ . При виділенні із сильвініту хлориду калію залишається хлорид натрію, що теж може служити сировиною для одержання розчинів гідроксиду натрію.

Для одержання розчину хлориду лужного металу привізну озерну сіль або добути шахтним способом кам'яну сіль розчиняють у наземних розчинниках.

У ряді випадків сирий розсіл виготовляють під землею, розчиняючи кам'яну сіль. Для цього в спеціально пробурену шпару насосом подають воду для розчинення хлориду натрію, який виводять на поверхню.

					<i>БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Для одержання розчину хлориду калію, очищеного від хлориду натрію, використовують різну розчинність хлоридів калію і натрію в залежності від температури (рис. 1.1).

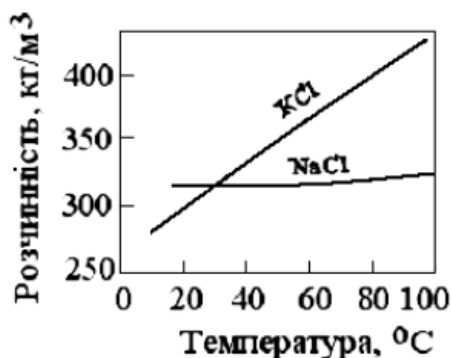


Рисунок 1.1 – Залежність розчинності хлоридів натрію і калію від температури

Видно, що розчинність хлориду калію менша ніж хлориду натрію при температурі нижче 25 °C, а при більш високій температурі навпаки. Тому сильвініт розчиняють при температурі близько 100 °C, фільтрують, очищаючи від суспензій, охолоджують, осаджуючи кристали хлориду калію, що відокремлюють від маточника, сушать і використовують надалі для готування розчину хлориду калію.

### 1.3 Опис технологічної схеми електролізу хлоридів лужних металів

Технологічна схема діафрагменного одержання гідроксидів натрію або калію, хлору й водню включає стадії підготовки сировини, електролізу, обробки продуктів електролізу й доведення їх до товарного виду.

Принципова технологічна схема одержання гідроксиду натрію, хлору й водню [1] представлена на рис. 1.2.

Вихідною сировиною для електролізу є концентрований розчин хлориду натрію. Розчин солі готують розчиненням солі під землею, подаючи гарячу воду в спеціально пробурені шпари, або в наземних умовах. Отриманий сирий розсіл містить значну кількість зважених часток, а також шкідливих для електролізу домішок – солей кальцію, магнію, заліза й тому перед подачею на електроліз його очищають.

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримані при електролізі продукти: електролітичні луг, вологий хлор і вологий водень до надходження до споживача проходять відповідну обробку.



Рисунок 1.2 – Принципова технологічна схема виробництва гідроксиду натрію, хлору й водню: 1 – розчинення солі привізний або підземної; 2 – содово-каустичне очищення розсолу 3 – нейтралізація розсолу; 4 – електроліз; 5 – упарювання електролугів; 6 – баки-збірники; 7 – готування зворотного розсолу; 8 – охолодження хлору; 9 – осушення хлору; 10 – скраплення хлору; 11 – танки рідкого хлору; 12 – охолодження водню

Електролітичний луг, який одержують в діафрагменних електролізерах, містить звичайно  $120 \div 140 \text{ кг/м}^3$  гідроксиду натрію й  $180 \div 200 \text{ кг/м}^3$  солі. Для підвищення концентрації розчину гідроксиду натрію до товарного значення здійснюють упарювання електролітичних лугів. При цьому відбувається зниження розчинності солі в розчині і її випадання в осад. Сіль, що називають зворотною сіллю, відокремлюють від розчину гідроксиду натрію й використовують для готування зворотного розсолу, що повертається на стадію очищення сирого розсолу. Звичайно у зворотному розсолі втримується  $2 \div 3 \text{ кг/м}^3$

гідроксиду натрію, що виявляється достатнім для осадження іонів магнію, так що додатково луг не вводять.

Товарний продукт – сода каустична – 46÷50 % розчин гідроксиду натрію після упарювання проходить додаткове очищення від солі, надходить у баки-збірники, з яких відвантажується споживачам. Вихідний з електролізера вологий хлор піддають охолодженню, з метою видалення основної кількості вологи й хлориду натрію, а потім глибокій осушці сульфатною кислотою. Глибока сушка хлору необхідна для забезпечення можливості його подальшої переробки, щоб виключити корозію сталевих апаратури й забивання комунікацій продуктами корозії. Осушений хлор направляють безпосередньо споживачеві або піддають стисканню й скрапленню. Зріджений хлор накопичують у спеціальних сховищах-танках, що перебувають під тиском, або в спеціальних кульових ємностях при ізотермічних умовах — під атмосферним тиском і при температурі нижче, ніж -34 °С.

Підтримку необхідної температури при ізотермічному зберіганні рідкого хлору здійснюють за допомогою комп'ютера шляхом постійного випару частини рідкого хлору. Хлор з танків і сховищ відвантажують споживачеві в рідкому або через випарники в газоподібному стані. Вологий водень піддають осушці в насадкових колонах, заповнених кільцями Рашига або в колонах без насадки. Осушений і одночасно відмитий від захопленого з електролізера католіту водень подається споживачам. При необхідності глибоку осушку водню проводить споживач. У процесі очищення сирого розсолу від домішок, при охолодженні хлору й водню, при упарюванні електролугів, при виготовленні діафрагми хлорних електролізерів і на інших стадіях виробництва утворюються тверді й рідкі відходи, які необхідно утилізувати. Технологічна схема виробництва концентрованого розчину гідроксиду калію, хлору й водню аналогічна.

Основні технологічні параметри зведені в таблицю 1.1

					<i>БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 - Технологічні параметрів процесу електролізу хлоридів лужних металів з метою автоматизації

Параметр	Опис	Одиниці вимірювання	Значення для автоматизації
Температура електролізу	Оптимальна температура для стабільного процесу електролізу	°C	80–90°C
Контроль температури	ПІД-регулювання для підтримки стабільної температури	-	$\Delta T$ не більше $\pm 2^\circ\text{C}$
Електролізний струм	Основний параметр, що впливає на швидкість реакції	A	5–20 A (залежно від потужності установки)
Регулювання струму	Контроль через регулятор струму (ПІД-регулятор)	-	Похибка регулювання не більше 1%
Напруга на комірці	Залежить від опору електроліту та матеріалу електродів	V	2–5 V
Контроль напруги	Регулювання за допомогою стабілізатора	-	Похибка не більше $\pm 0.2\text{ V}$
Концентрація NaCl у розчині	Впливає на електропровідність та ефективність процесу	mol/L	3–4 mol/L
Моніторинг концентрації	Автоматичний датчик провідності (кондуктометр)	-	Оновлення кожні 5 хвилин
Час електролізу	Залежить від необхідної кількості продукту	год	Визначається технологічним завданням
Енерговитрати	Показник енергетичної ефективності процесу	кВт·год/кг	2.5–4.0 кВт·год/кг
Температура розчину	Контроль через теплообмінник та циркуляцію	°C	80–90°C
Моніторинг температури	Показники з термопар або термометрів опору	-	Оновлення кожну хвилину
Катодний потенціал	Напруга на катоді відносно стандартного водневого електрода	V	-2.2 V
Анодний потенціал	Напруга на аноді відносно стандартного водневого електрода	V	+1.36 V
Тиск у комірці	Робочий тиск підтримується для уникнення утворення парів	атм	1.2–1.5 атм
Контроль тиску	Датчики тиску з автоматичним коригуванням через клапани	-	Похибка не більше $\pm 0.05\text{ атм}$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ

Арк.

16

Параметр	Опис	Одиниці вимірювання	Значення для автоматизації
Вихід продуктів	Кількість отриманих Na та Cl <sub>2</sub>	кг/год	10–15 кг/год (залежно від струму)
Опір електролітного розчину	Впливає на напругу та потужність	Ом	0.1–0.5 Ом
Контроль опору	Вимірювання через електрохімічний імпедансний аналізатор	-	Періодичне калібрування
Частка хлору в газовій фазі	Відсоток хлору в газовій суміші (необхідний контроль для безпеки)	%	95–98%
Моніторинг газового складу	Газоаналізатор з автоматичним сигналом про витоки	-	Постійний моніторинг

Вимоги до автоматизації процесу [2,8]:

- Забезпечення стабільності температури: застосування ПІД-регуляторів для нагрівачів.
- Контроль сили струму та напруги: використання потужних тиристорних або інверторних систем.
- Контроль рівня розплаву: датчики рівня та автоматичне підживлення.
- Контроль концентрації хлориду: системи автоматичного дозування сировини.
- Моніторинг виділеного хлору: газоаналізатори та автоматичні клапани для регулювання відведення.

#### 1.4 Готування й очищення розсолу

Вимоги, пропоновані до очищеного розсолу (розчину хлориду натрію) на вітчизняних підприємствах і на закордонних заводах, наведені у табл. 1.1.

Розсіл для діафрагменного електролізу повинен мати прозорість 98 %, вміст іонів амонію — не більше 10 мг/дм<sup>3</sup>, що виключає нагромадження трихлориду азоту в системі вище небезпечної межі.

Представлені в табл. 1.2 вимоги до складу розсолу забезпечують тривалу роботу діафрагми зі стабільними характеристиками, без забивання її пір

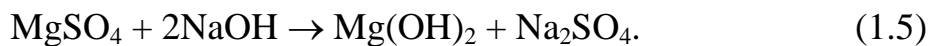
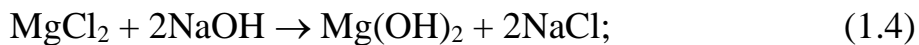
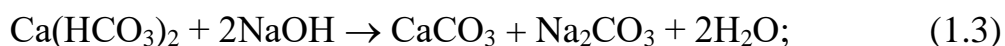
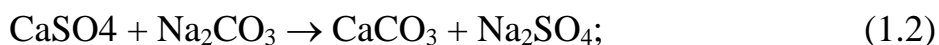
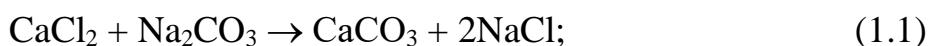
					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

домішками, що приводить до росту спадання напруги в діафрагмі, росту концентрації гідроксиду натрію в католіту й зниженню виходу за струмом.

Таблиця 1.2 – Вимоги до очищеного розсолу діафрагменного електролізеру з ОРТА [1]

Країна	Склад очищеного розсолу, кг/м <sup>3</sup>					
	NaCl	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NaOH	Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Італія	320÷325	5·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-3</sup>	5	0,2÷0,4	0,3÷0,8
США	315÷352	5·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-3</sup>	0÷5	0,1÷0,2	0,5÷0,6

Для очищення розсолу від домішок кальцію й магнію застосовують содово-каустичний метод. Очищення засноване на утворенні малорозчинних сполук кальцію й магнію. При цьому протікають наступні реакції:



Одночасно осаджується гідроксид заліза. Для осадження магнію використовують луг, який залишається у зворотному розсолі, що надходить із цеху упарювання електролугів.

При ступені перетворення солі при електролізі, рівному 0,5, об'єм зворотного розсолу приблизно дорівнює об'єму сирого розсолу, що подається на очищення.

Часто для виключення подачі карбонату натрію на очищення у зворотному розсолі залишають значно більше гідроксиду натрію, ніж потрібно для осадження магнію, і піддають зворотний розсіл карбонізації, пропускаючи через нього газу, що містять не менше 6 % об. вуглекислого газу. Для цього можуть використовуватися газу, що відходять з котелень, газу з печей для плавлення гідроксиду натрію, що утворюються при випалі вапняку, і в інших процесах.

Гідроксид, який міститься у зворотному розсолі, реагує з діоксидом вуглецю за реакцією:



Карбонізацію зворотного розсолу ведуть із таким розрахунком, щоб утворилася достатня кількість соди для осадження кальцію й створення необхідного її надлишку в очищеному розсолі —  $0,3 \div 0,4 \text{ кг/м}^3$ . При цьому у зворотному розсолі повинен залишатися гідроксид натрію в кількості, достатній для осадження магнію й створення надлишку лугу в розсолі не менше  $0,05 \text{ кг/м}^3$ . Іноді для зручності керування процесом на карбонізацію направляють лише частину зворотного розсолу, а іншу кількість, минаючи карбонізатор, змішують з карбонізованим розсолом. При відсутності джерел  $\text{CO}_2$  застосовують розчини соди. Для цього в схему включають розчинник соди, ємності й насоси для содового розчину. Для запобігання розведення розсолу, при додаванні содового розчину, останній готують на зворотному розсолі. Концентрація  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  у содовому розчині становить  $60 \div 80 \text{ г/дм}^3$ .

Реакції осадження проводять звичайно в апаратах, які називають освітлювачами, що мають зону змішування реагентів і зону просвітлення розсолу. У деяких схемах використовують попереднє змішування реагентів і розсолу в апаратах невеликого об'єму, наприклад, баках об'ємом  $1 \div 3 \text{ м}^3$  з мішалками, а потім розчин направляють на відстоювання. Технологічна схема очищення розсолу показана на рис. 1.3.

Сирий розсіл з концентрацією  $310 \div 315 \text{ кг/м}^3$  хлориду натрію надходить у прийомний бак 1, потім у підігрівник 2 і насосом 3 подається через відокремлювач повітря в освітлювач 10. Зворотний розсіл з концентрацією солі  $305 \div 310 \text{ кг/м}^3$  подають двома потоками, один із яких проходить через карбонізатор 4 у прийомний бак 5 і далі у повітревідокремлювач освітлювача, а другий — безпосередньо в освітлювач.

					<i>БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



(сирого й зворотного), що подається в освітлювач. Прояснений розсіл після освітлювача надходить у збірник проясненого розсолу 11, звідки насосом 12 подається на фільтр 13, потім у бак 14 на нейтралізацію надлишкового лугу хлороводневою кислотою, що подається з бака 15, і далі через баки 16 і 17 і підігрівник 18 – на електроліз, шлам, що відокремлюється в освітлювачі 10, виводять у збірник 19, звідки подають на фільтр – преси типу ФПАК2М-20. Осад з фільтрів відправляють на утилізацію, а відфільтрований розсіл повертають у виробництво.

### 1.5 Виготовлення діафрагм

Діафрагма на катоді хлорного електролізера повинна володіти рядом характеристик: однорідністю, певним перебігом й електричним опором, механічною й хімічною стійкістю. Вона повинна забезпечити при електролізі низьку напругу й високий вихід за струмом гідроксиду лужного металу, виключити змішування електродних газів. Тривалість роботи діафрагми повинна бути досить великою, щоб скоротити витрати праці на розбирання електролізерів, зняття старої й нанесення на катод нової діафрагми.

Принципова схема осадження азбестової діафрагми на катодах хлорних електролізерів показана на рис. 1.4.

Для виготовлення діафрагм хлорних електролізерів використовують звичайно хризотіловий азбест — природну речовину, що має хімічну формулу  $3\text{Mg} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

Спочатку азбест (рис. 1.4, а) завантажують у масний рол 1, куди подають воду. У масному ролі азбест розпушується й розбивається на окремі волокна. Після рола пульпа азбесту подається на фільтр 2, де азбест відділяється від води, після чого надходить у бак 3 для готування суспензії азбесту. У бак 3 подають охолоджений електролуг (католіт) і повітря. У результаті перемішування азбест рівномірно розподіляється по об'єму розчину, створюючи стійку суспензію.

Вимірявши кількість суспензії, її подають у бак 4 і з нього у внутрішній простір катоду. Електролуг безупинно відсмоктують у ресивер 6 за допомогою

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вакуум-насоса 7, при цьому азбест осаджується на сітці, а розчин виводять через штуцер у корпусі катода 8.

Для забезпечення рівномірного нанесення азбесту на поверхню сітчастого катода корпус катода 9 (рис. 3.15, б) встановлюють на піддон 10 і нарощують його висоту за допомогою приставного короба 11. Воду з рола можна використовувати багаторазово, направляючи її в збірник 12 і знову в рол.

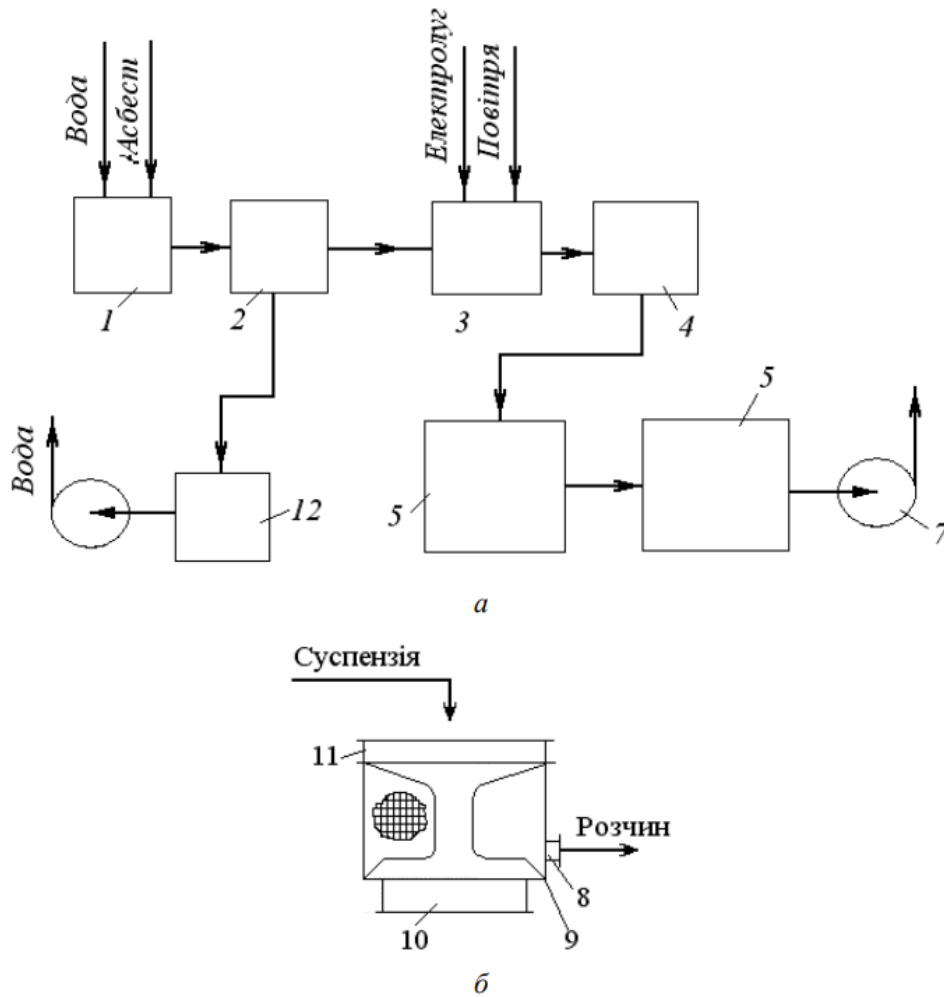


Рисунок 1.4 – Принципова схема (а) осадження азбестової діафрагми й вузол всмоктування (б): 1 – рол; 2 – фільтр; 3 – бак для готування азбестової суспензії; 4 – напірний бак; 5 – електролізер; 6 – ресивер; 7 – вакуум-насос; 8 – штуцер для виводу розчину; 9 – корпус катода; 10 – піддон; 11 – приставний короб; 12 – збірна ємність води

Після нанесення азбесту на катодну сітку, коли вся рідина з катода відсмоктана, діафрагму сушать спочатку при кімнатній температурі,

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

просмоктуючи через неї повітря вакуум-насосом, а потім, не відключаючи вакуум-насос, при  $80\div 100$  °С у спеціальній сушильній камері [6]. При виготовленні модифікованої діафрагми, так званої асбополімерної, в азбестову суспензію вводять тонкодисперсний порошок або волокна полімеру, що забезпечує стійкий зв'язок суспензії з полімером. Асбополімерну діафрагму спочатку сушать як звичайну азбестову, а потім при температурі  $300\div 400$  °С, забезпечуючи розм'якшення полімеру в діафрагмі й скріплення ним волокон азбесту. Готова діафрагма з азбесту повинна мати масу  $1,8\div 2,0$  кг/м<sup>2</sup> катодної сітки, а з азбесту з полімером –  $1,6\div 1,8$  кг/м<sup>2</sup>. Перед нанесенням діафрагми катоди, що були в роботі, ретельно очищують від слідів старої діафрагми й іржі. Асбополімерна діафрагма має більше низький, ніж азбестова, електричний опір, спадання напруги на ній на  $0,1\div 0,15$  В нижче. Крім того, вона має підвищену механічну й хімічну міцність, завдяки чому термін служби асбополімерної діафрагми в  $3\div 4$  рази вище.

## 1.6 Конструкції електролізерів

Діафрагмений хлорний електролізер монополярного типу конструктивно виконують із трьох основних елементів: струмо– днища, корпуса-катода й кришки. На струмовідвідному днищі розміщують аноди, число яких залежить від потужності електролізера, тобто струмового навантаження, на яку електролізер розрахований. Катод діафрагменного електролізера виготовляють зі сталевій сітки діаметром від 1,2 до 2,5 мм. Струм до сітки підводять від корпуса електролізера через струмовідвідні сталеві елементи. На рис. 1.5 показаний зовнішній вигляд діафрагменного електролізера.

Струм до днища 1 електролізера підводять за допомогою анодної шини 17, а до катода — за допомогою закріпленої на корпусі 3 шини 4 [7]. Для кращого розподілу струму по катоду на сталевий корпус наварюють шину 5. Корпус і днище стягають між собою через гумову підкладку 2 за допомогою стяжних болтів (на рис. не показані). Кришка 7 (з гумованої сталі, титану або полімерних

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матеріалів) кріпиться до фланця корпусу через гумову прокладку 6 стяжними болтами (не показані).

На корпусі закріплюється пристрій для виведення електролугу 21, що оснащений переривником струму 20, і вакуумметром 16, який показує тиск водню в електролізері. На кришці є штуцера для відводу анодного газу 11, для введення в електролізер розсолу 13, для закріплення поплавкового показника рівня аноліта 12, для термометра 14 і вакуумметра 15.

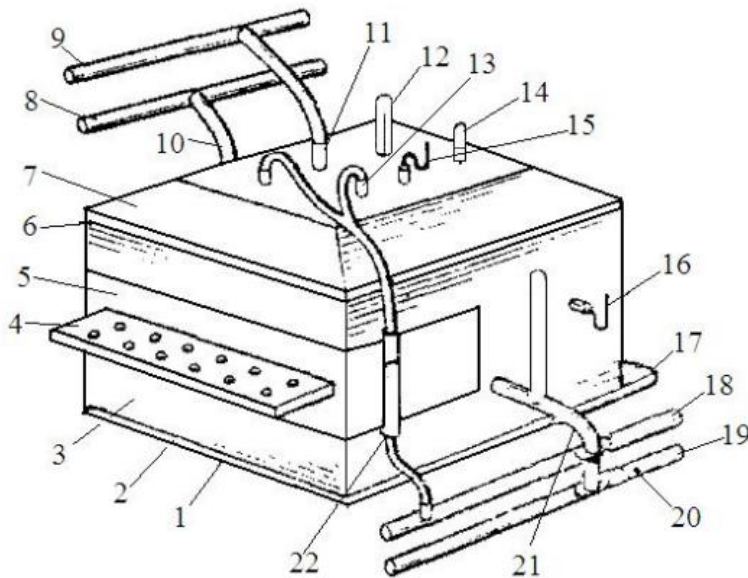


Рисунок 1.5 – Діафрагменний монополярний електролізер: 1 – днище; 2 – прокладка; 3 – корпус; 4 – катодна шина; 5 – шина; 6 – прокладка; 7 – кришка; 8 – колектор водню; 9 – колектор хлору; 10 – патрубок для відводу водню; 11 – штуцер для відводу хлору; 12 – поплавковий показник рівня аноліта; 13 – штуцер для уведення розсолу; 14 – термометр; 15, 16 – вакуумметри; 17 – анодна шина; 18 – ропний колектор; 19 – колектор електролугу; 20 – переривник струму; 21 – відвід католіта; 22 – ротаметр

Хлор з електролізера відводять у рядовий колектор хлору 9, водень через вивідний штуцер у корпусі й патрубок 10 — у рядовий колектор водню 8. Електролуг через зливальний пристрій 21, виводять у рядовий колектор електролугу 19. Розсіл в електролізер подають із рядового колектора розсолу 18 через ротаметр 22.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Графітові аноди, які ще збереглися в старих конструкціях, являють собою плити довжиною 1100 мм, шириною 250 мм і товщиною 45 мм [4]. Для підвищення хімічної стійкості плити просочені заполімеризованим лляним маслом. Плити монтують на сталевому анодному днищі у вигляді коробки з низькими стінками, що служить струмовідводом до графітових анодів. Кріплення анодів до днища ілюструє рис. 1.6.

Днище 1 складається зі сталевого аркуша й приварених до нього швелерів, що утворюють стінки днища. Струмовідвід до днища здійснюють від шини 2. До стінок днища кріплять болтами 3 мідні скоби 4, до яких, у свою чергу, приєднують контактні частини анодів 5. Струм до анодів проходить від днища через мідні скоби. Для забезпечення низького електричного опору в контактах всі металеві контактні поверхні повинні бути ретельно зачищені. Для захисту від корозії хлорованим анолітом контактні частини графітових анодів заливають шаром рубраксу 6 і бетону 7.

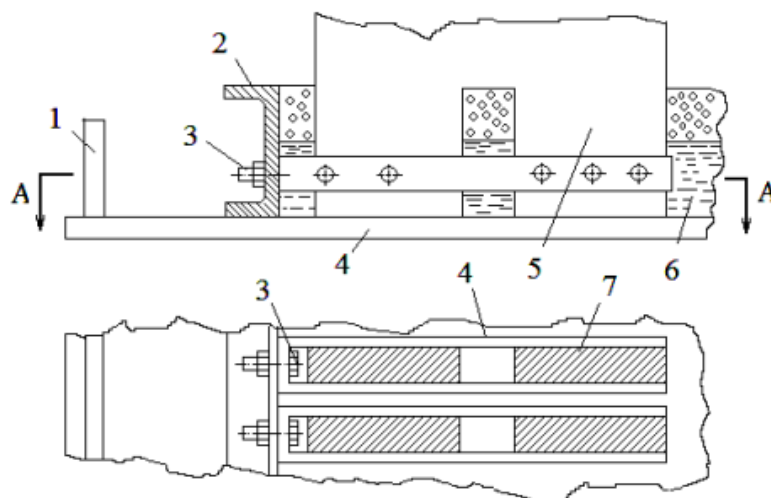


Рисунок 1.6 – Днище діафрагменного електролізера із графітовими анодами: 1 – днище; 2 – шина; 3 – болти; 4 – мідні скоби; 5 – аноди; 6 – рубракс; 7 – бетон

Залежно від потужності й особливостей виробництва хлору й гідроксидів лужних металів можуть застосовуватися різні типи електролізерів, що працюють

із різною щільністю струму, виходом за струмом й напругою [5]. Показники ряду діафрагменних електролізерів наведені в табл. 1.3.

Електролізери, дані про роботу яких наведені в табл. 1.3, помітно відрізняються по терміну служби діафрагм, що пов'язане з розходженням типу діафрагм, конструктивними особливостями електролізерів і необхідною щільністю струму.

Найбільший термін служби в азбестових модифікованих діафрагм, до складу яких для підвищення хімічної й механічної міцності вводять різні полімери.

Таблиця 1.2 – Показники роботи різних діафрагменних хлорних електролізерів з металевими анодами

Показники	Марки		
	БГК-50/25	БГК-100	ДМ-50
Навантаження, кА	50	100	50
Щільність струму, кА/м <sup>2</sup>	1,29	1,35	1,30
Напруга, В	3,45	3,55	3,35
Вихід за струмом, %	96	96	96
Виробництво хлору, т/добу	1,52	3,05	1,52
Витрата електроенергії, кВт·год/т	2604	3680	3529
Строк роботи діафрагми, міс.	6	6	18
Строк роботи анодів, років	5-6	5-6	5-6
Концентрація NaOH у католіні, кг/м <sup>3</sup>	125	125	125

Електроліз хлоридів лужних металів є складним технологічним процесом з високими вимогами до автоматизації через: високу температуру процесу; необхідність точного контролю параметрів струму та напруги; складність контролю рівня та концентрації хлориду; потенційну небезпеку виділення газоподібного хлору [2 - 7].

Розробка автоматизованої системи управління потребує комплексного підходу із залученням сучасних регуляторів, датчиків та систем моніторингу.

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Висновки до розділу

У даному розділі було проведено детальний аналіз технологічного процесу електролізу хлоридів лужних металів у діафрагменному електролізері. Розглянуто основні стадії процесу, його фізико-хімічні основи, конструктивні особливості обладнання, вимоги до сировини та умови проведення електролізу. Зокрема, встановлено, що ефективність процесу значною мірою залежить від температурного режиму, концентрації електроліту, рівня напруги і струму, а також стану діафрагми.

Проаналізовано основні вузли електролізної установки, серед яких анодна та катодна камери, діафрагма, системи подачі та відведення реагентів і продуктів, системи охолодження та електроживлення. Визначено можливі технологічні ускладнення, такі як засмічення діафрагми, зниження струмової ефективності та небезпека утворення вибухонебезпечних сумішей.

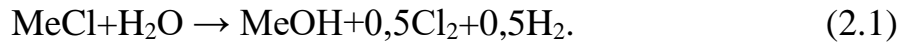
Виявлено, що існуючий процес потребує вдосконалення з метою підвищення енергоефективності, забезпечення стабільності параметрів електролізу та підвищення рівня автоматизації. Це відкриває перспективи для впровадження сучасних засобів контролю та управління, що є актуальним у контексті створення автоматизованої системи керування процесом електролізу.

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОЛІЗУ ХЛОРИДІВ ЛУЖНИХ МЕТАЛІВ

### 2.1 Теоретичні основи процесу електролізу хлоридів лужних металів

При електролізі хлоридів протікає реакція [1-3,5]:



На аноді відбувається утворення хлору, на сталевому катоді виділяється водень, а на ртутному – розряджається іон лужного металу й утворюється амальгама – сплав натрію чи калію з ртуттю. Схема діафрагменного електролізера з фільтруючою діафрагмою представлена на рис. 2.1.

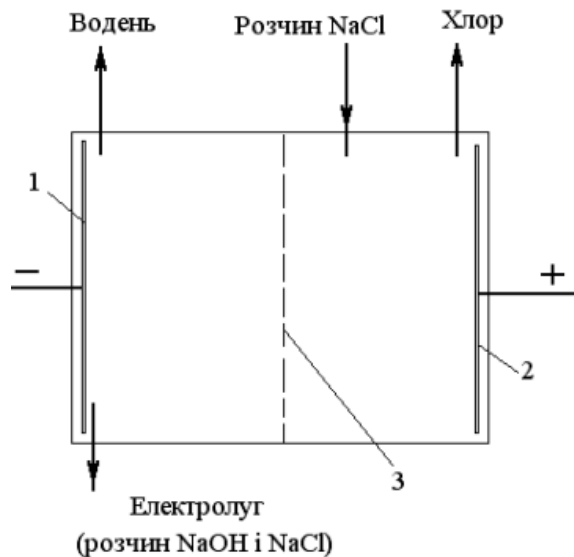
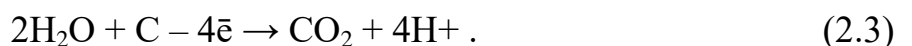


Рисунок 2.1 – Схема діафрагменного електролізера для одержання гідроксиду натрію: 1 – катод; 2 – анод; 3 – діафрагма

В анодну частину електролізера подають розчин хлориду металу. Цей розчин фільтрується через діафрагму в катодний простір, звідки виводиться. На аноді протікає реакція окислювання іонів хлору а також побічні реакції, головна з яких є розряд молекул води:

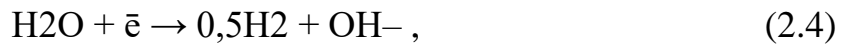


На графітовому аноді за рахунок окислювання вуглецю виходить  $\text{CO}_2$ :



На катоді йде виділення водню, регенеруються гідроксидіони, що з іонами натрію утворюють гідроксид лужного металу:

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Гідроксид-іони, що несуть негативні заряди, під дією градієнта електричного потенціалу прагнуть до анода і, проникаючи в анодну зону, підвищують рН аноліту, сприяючи прискоренню побічних реакцій і взаємодії хлору з анолітом. Для зменшення проникнення гідроксид-іонів в анодний простір і придушення побічних реакцій на аноді й в аноліті встановлюють діафрагму між анодним і катодним простором. При цьому швидкість руху гідроксид-іонів у діафрагмі буде визначатися трьома складовими:

$$v_{\text{OH}^-} = v_{\text{мігр}} + v_{\text{диф}} - v_{\text{пот}}, \quad (2.6)$$

де  $v_{\text{OH}^-}$  – швидкість переміщення гідроксид-іонів у напрямку анода, м/с;  
 $v_{\text{мігр}}$  – складова швидкості, обумовлена міграцією іонів під дією електричного поля;  $v_{\text{диф}}$  – дифузійна складова швидкості (градієнт концентрації між катодом та анодом);  $v_{\text{пот}}$  – швидкість потоку розчину, що перешкоджає переміщенню гідроксид-іонів до анода. Кількість гідроксид-іонів, що переноситься через 1 м<sup>2</sup> діафрагми, можна характеризувати в електричних одиницях щільністю струму:

$$i_{\text{OH}^-} = v_{\text{OH}^-} \cdot C_{\text{OH}^-} \cdot F, \quad (2.7)$$

де  $i_{\text{OH}^-}$  – щільність струму іонів гідроксилу в діафрагмі, А/м<sup>2</sup> ;

$C_{\text{OH}^-}$  – концентрація гідроксид-іонів у діафрагмі, моль/м<sup>3</sup> ; F – постійна Фарадея, Кл·моль<sup>-1</sup> .

З урахуванням складових рівняння (3.7) можна записати:

$$i_{\text{OH}^-} = v_0 C_{\text{OH}^-} F \frac{d\varphi}{dx} + v_0 RT \left( -\frac{dC_{\text{OH}^-}}{dx} \right) - v_0 C_{\text{OH}^-} F \quad (2.8)$$

Чи

$$i_{\text{OH}^-} = U_0 F \frac{d\varphi}{dx} + v_0 RT \left( -\frac{dC_{\text{OH}^-}}{dx} \right) - v_0 C_{\text{OH}^-} F \quad (2.9)$$

де  $v_0$  – швидкість міграції іонів при градієнті електричного потенціалу 1 В/м;  
 $d\varphi/dx$  – градієнт електричного потенціалу в діафрагмі, В·м<sup>-1</sup> ; R – універсальна газова постійна, Дж·К<sup>-1</sup> ·моль<sup>-1</sup> , T – абсолютна температура, К;  $dC_{\text{OH}^-} / dx$  –

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

градієнт концентрації гідроксид-іонів у діафрагмі, моль/м<sup>3</sup> ;  $U_0$  – рухливість гідроксидіона при градієнті електричного потенціалу, В/м.

Гідроксид-іони, що пішли з католіту через діафрагму в аноліт, там нейтралізуються. Щільність струму, яка корисно використовувалася на одержання гідроксиду лужного металу, виведеного з електролізера, буде дорівнювати  $i - i_{OH^-}$ , а вихід за струмом гідроксиду складе:

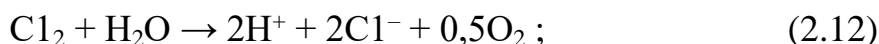
$$B_c = \frac{i - i_{OH^-}}{i} \cdot 100 \quad (2.10)$$

Таким чином, щільність струму гідроксид-іонів у діафрагмі залежить від градієнта електричного потенціалу і концентрації гідроксид-іонів у ній і від швидкості протитоку аноліту, тобто залежить від товщини діафрагми і концентрації гідроксиду лужного металу в католіту.

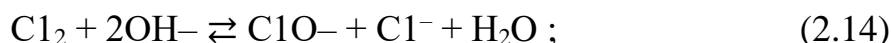
В аноліті відбувається гідроліз хлору:



утворення кисню:



а також реакції:



Останні три реакції протікають з помітною швидкістю, коли температура аноліту складає 90÷100 °С, а концентрація хлориду лужного металу перевищує 4·10<sup>3</sup> моль/м<sup>3</sup> та при рН ≥ 4. Вихід за струмом хлору з урахуванням побічних процесів на аноді і розчинення хлору в електроліті складе:

$$B_{cx} = 1 - \frac{i_k}{i} - \frac{i_x}{i} \quad (2.17)$$

де  $i_k$  – питома щільність струму на аноді, що витрачається на виділення кисню чи вуглекислого газу, А/м<sup>2</sup> ;  $i_x$  – питома швидкість розчинення хлору в аноліті, А/м<sup>2</sup>.

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Природно, що посилення проникнення гідроксид-іонів з католіту в аноліт веде до прискорення розчинення хлору, утворенню гіпохлорит-іонів, а при підвищених рН аноліту – хлорат-іонів.

Гіпохлорит-іони і хлорат-іони, які фільтруються з потоком розчину в католіт, забруднюють його, знижуючи якість розчинів, які одержуються.

Оптимальними умовами електролізу хлоридів з одержанням гідроксидів натрію і калію є такі, при яких гідроксид-іони не проникають в аноліт, а нейтралізуються в діафрагмі іонами водню, хлорнуватистою кислотою і розчинним молекулярним хлором, який фільтрується з анолітом через діафрагму. Цілком запобігти проникнення гідроксид-іонів в аноліт тільки за рахунок зустрічної фільтрації розчину неможливо, тому що в міру збільшення швидкості фільтрації буде зростати швидкість дифузійного переносу:

$$v_{\text{диф}} = (v_o \cdot R \cdot T / F) (-\ln C_{\text{OH}^-} / dx), \quad (2.18)$$

у зв'язку зі скороченням товщини дифузійного шару в міру витіснення гідроксид-іонів з діафрагми. Тому сума швидкостей міграції і дифузії гідроксид-іонів у діафрагмі завжди більше швидкості протитоку і щільність струму гідроксид-іонів більше нуля. Якщо нейтралізація гідроксид-іонів здійснюється в діафрагмі поблизу її анодної сторони, товщина діафрагми мінімальна, а її дифузійний опір буде використано для зменшення потоку гідроксидіонів. Для нейтралізації гідроксид-іонів у діафрагмі на границі з анолітом необхідно, щоб потік гідроксид-іонів дорівнював потоку нейтралізуючих речовин, тобто щоб виконувалася рівність  $i_{\text{OH}^-} = i_{\text{нейтр}}$ , де  $i_{\text{нейтр}}$  – сумарний потік іонів  $\text{H}^+$ , молекул  $\text{HClO}$  і  $\text{Cl}_2$ . Тому що хлорнуватиста кислота утворюється в результаті розчинення хлору в аноліті, а іони водню як при розчиненні хлору, так і при розряді молекул води на аноді, то  $i_{\text{нейтр}} = i_{\text{хр}} + i_{\text{кис}}$ , а щільність струму нейтралізації:

$$i_{\text{нейтр}} = (1 - \text{В}_{\text{сх}}) \cdot i \quad (2.19)$$

Рівняння для мінімальної товщини діафрагми може бути записане у вигляді:

$$\delta_{\text{min}} = K_1 / i_{\text{пір}}, \quad (2.20)$$

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $K_1$  – коефіцієнт, що залежить при заданому виході за струмом від температури і концентрації одержуваного розчину гідроксиду;  $i_{\text{пір}}$  – щільність струму в порах діафрагми, А/м<sup>2</sup>.

$$i_{\text{пір}} = \frac{i}{\alpha} \cdot \beta^2, \quad (3.21)$$

де  $\alpha$  – пористість діафрагми;  $\beta$  – коефіцієнт звивистості пір.

Мінімальна товщина діафрагми знижується пропорційно росту щільності струму, зростає з підвищенням температури і підвищенням концентрації гідроксиду в католіту.

Якщо товщина реальної діафрагми перевищує значення  $\delta_{\text{мін}}$  при прийнятих умовах електролізу, то анодний і катодний виходи за струмом (без врахування кислотності живильного розсолу) визначаються в основному побічними анодними процесами:

$$B_{\text{ск}} = B_{\text{сх}} = 1 - 2C_{\text{к}} = 1 - i_{\text{к}} / i, \quad (2.22)$$

де  $C_{\text{к}}$  – вміст кисню чи діоксиду вуглецю у хлорі, об'ємні частки. Якщо товщина реальної діафрагми менше, ніж  $\delta_{\text{мін}}$ , то буде зниження виходу за струмом хлору і гідроксиду металу, зниження концентрації хлору в анодному газі, забруднення розчину католіті хлористими сполуками. При достатній товщині діафрагми підвищення температури повинне приводити до підвищення виходу за струмом хлору і гідроксиду металу, а зниження концентрації хлориду до зменшення виходу за струмом. У табл. 2.1 наведені залежності виходу за струмом хлору  $B_{\text{сх}}$ , втрат струму на розчинення хлору  $B_{\text{срх}}$  і на виділення на аноді кисню  $B_{\text{ск}}$  при одержанні розчину гідроксиду натрію з концентрацією 120 кг/м<sup>3</sup> (щільність струму електролізу 3000 А/м<sup>2</sup>) від температури [1].

Таблиця 2.1 – Залежність виходу за струмом хлору від температури

Вихід	Температура, °С				
	30	60	70	80	90
$B_{\text{сх}}$	0,895	0,922	0,949	0,955	0,978
$B_{\text{срх}}$	0,082	0,054	0,024	0,013	-
$B_{\text{ск}}$	0,013	0,024	0,027	0,032	-

На рис. 2.3 надано вплив щільності струму електролізу на вихід за струмом гідроксиду. Вихід за струмом при заданій щільності струму зі збільшенням концентрації гідроксиду спочатку трохи зростає, тому що зменшується протока аноліту через діафрагму і відповідно влучення в неї розчиненого хлору й іонів водню.

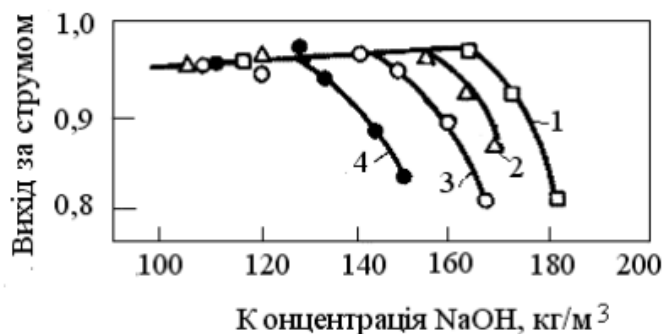


Рисунок 2.3 – Залежність виходу за струмом від концентрації одержуваного розчину гідроксиду натрію при температурі електролізу 94 °С і щільності струму,  $\text{кА/м}^2$  : 1– 4; 2–3; 3–2; 4–1

Потім, після досягнення деякої критичної концентрації гідроксиду в католіту, товщина діафрагми виявляється недостатньою, і настає різке падіння виходу за струмом гідроксиду через проникнення гідроксид-іонів в аноліт і прискореного розчинення хлору в аноліті.

При збільшенні товщини діафрагми чи підвищенні щільності струму електролізу, що еквівалентно збільшенню товщини, відбувається зростання граничної концентрації гідроксиду, перевищення якої призводить до різкого падіння виходу за струмом.

Граничні концентрації гідроксиду натрію в католіту при даній щільності струму і температурі електролізу 95 °С наведені в табл. 2.2.

Утворення хлорноватистої кислоти і гіпохлорит-іонів у діафрагменних електролізерах може відбуватися в просторово розділених зонах. Так, при  $\text{pH} < 4$  гіпохлорит-іони практично не утворюються і між гідроксид-іонами і розчиненим хлором протікає реакція:



При більш високих значеннях рН утворюються гіпохлоритіони та хлор-аніони.

Таблиця 2.2 – Граничні концентрації NaOH для діафрагм різної товщини

Щільність струму, кА/м <sup>2</sup>	Гранична концентрація гідроксиду натрію, кг/м <sup>3</sup> при товщині діафрагми, мм			
	2,5	2,65	2,8	3,2
1,0	130	1,35	-	140
2,0	148	150	155	170
3,0	158	162	170	190
4,0	170	178	-	125

Особливо доцільне підкислення живильного розсолу при застосуванні діафрагм, що мають неоднорідності. У цьому випадку на окремих ділянках швидкість фільтрації може істотно перевищувати швидкість фільтрації на інших ділянках. При цьому на ділянках зі зниженою швидкістю фільтрації гідроксид-іони будуть проникати в аноліт і брати участь переважно в реакції утворення НСЮ. На ділянках з підвищеною фільтруемістю хлорнуватиста кислота буде через діафрагму в католіт, реагуючи з гідроксидіонами з утворенням гіпохлорит-іонів.

Нейтралізація в аноліті гідроксид-іонів хлоридом водню, що вводиться в живильний розсіл, виключає утворення хлорнуватистої кислоти і приводить до підвищення катодного виходу за струмом гідроксиду й анодного виходу за струмом хлору.

В залежності від щільності струму, концентрації хлоридіона в аноліті і рН може змінюватися вихід за струмом хлору, а також склад анодного газу і частка струму, що витрачається на виділення кисню. В електролізерах з фільтруючою діафрагмою використовують графітові аноди чи аноди з титановим покриттям. Графітові аноди готують зі штучного графіту. Для цього із суміші нафтового коксу, антрациту і кам'яновугільної смоли спочатку спресовують аноди потрібної форми, звичайно у виді прямокутних плит, обпалюють їх у печах при

1100÷1200 °С і потім після просочення пеком проводять графітизацію при температурі 2500÷2700 °С.

Титанові аноди з титанового листа, перфорованого отворами, або з робочою поверхнею, виконаної з титанових прутків, виготовляють у такий спосіб. Спочатку знежирюють титанову основу. Потім протравляють поверхню титану в 25 %-вій хлороводневій або 56 %-вій сульфатній кислоті при температурі 80÷90 °С. Перед протравленням може застосовуватися дробеметна обробка поверхні титану. Після протравляння титанову основу промивають водою, сушать при 30÷40 °С і потім на суху поверхню титану наносять водяний розчин  $\text{Ru}(\text{OH})\text{Cl}_3$  і  $\text{TiCl}_4$ . Після висушування розчину на поверхні титану аноди нагрівають до 400÷470 °С. При цьому поверхня покривається добре зчепленим з нею твердим розчином оксидів титану і рутенію за наступною сумарною реакцією:



У сучасних конструкціях діафрагменних хлорних електролізерів використовують титанові аноди з покриттям із твердого розчину оксидів рутенію і титану (ОРТА). Можливо також застосування анодів з титану з платиновим гальванічним покриттям (ПТА).

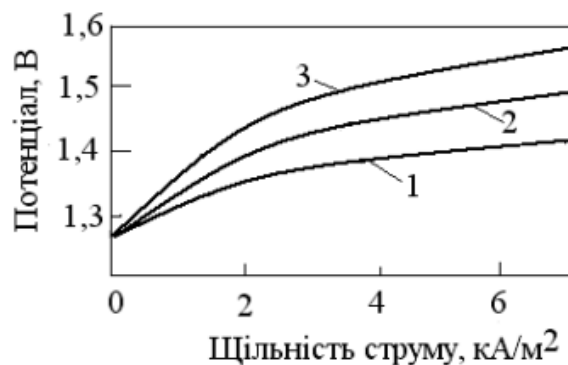


Рисунок 2.4 – Залежність потенціалу анодів у розчині хлориду натрію з концентрацією 300 кг/м<sup>3</sup> при температурі 90 °С від щільності струму:  
 1 – ОРТА; 2 – платинований титан при рН < 3; 3 – графіт і платинований титан при рН > 3

На рис. 2.4 і 2.5 представлені поляризаційні криві і вихід за струмом кисню на анодах з різних матеріалів, що характеризують істотну залежність поляризації і складу газу від матеріалу електрода і складу розчину.



Рисунок 2.5 – Вихід за струмом кисню в залежності від рН розчину NaCl при щільності струму 2 кА/м<sup>2</sup> і температурі 80 °С: 1 – ОРТА; 2 – платинований титан

На рис. 2.6 показано вплив кислотності електроліту на швидкість руйнування графітового аноду. Видно, що зі збільшенням кислотності швидкість руйнування графітового аноду зменшується.

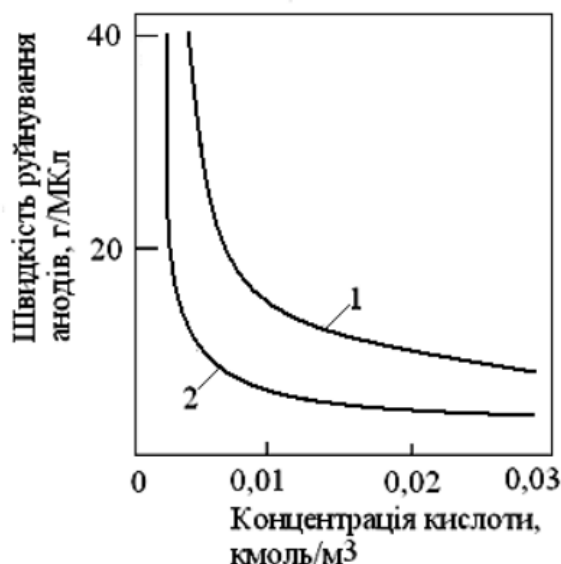


Рисунок 2.6 – Вплив кислотності розчину хлориду натрію на швидкість руйнування графітового аноду: 1 – новий графітовий анод; 3 – графітовий анод, що був у роботі

Особливо великий вплив може зробити рН розчину. Так, при рН розчину  $> 3$  збільшується потенціал ПТА через зміну складу оксидів на поверхні анода. Зі збільшенням рН зростає швидкість побічних процесів на електроді. Для виявлення впливу величини рН на виділення на аноді хлору і кисню розглянемо формули для потенціалу розряду хлорид-іонів і молекул води. Для реакції розряду хлорид-іонів  $\text{Cl}^- - e^- \rightarrow 0,5\text{Cl}_2$ :

$$\varphi_i = \varphi_{0,x} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{\sqrt{P_x}}{\alpha_{\text{Cl}^-}} + a_x + b_x \ln i_x \quad (2.25)$$

Для реакції розряду молекул води  $\text{H}_2\text{O} - 2e^- \rightarrow 1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+$ :

$$\varphi_i = \varphi_{0,k} + \frac{RT}{2F} \ln(\sqrt{P_k} \cdot \alpha_{\text{H}^+}^2) + a_k + b_k \ln i_k \quad (2.26)$$

де  $\varphi_i$  – потенціал анода при щільності струму  $i$ ;  $\varphi_{0,x}$ ,  $\varphi_{0,k}$  – стандартні потенціали електродних реакцій розряду іонів хлору і молекул води;  $\alpha_{\text{Cl}^-}$  і  $\alpha_{\text{H}^+}$  – активність іонів хлору і водню в розчині;  $P_x$  і  $P_k$  – парціальні тиски хлору і кисню над розчином при електролізі;  $a_x$  і  $a_k$ ,  $b_x$  і  $b_k$  – константи рівняння Тафеля для розряду іонів хлору і виділення кисню;  $i_x$  і  $i_k$  – парціальні щільності струму розряду іонів хлору і молекул води. Прирівнявши праві частини рівняння (2.25) і (2.26) і провівши перетворення, одержимо:

$$i_k = k_1 \cdot k_2 \left( \frac{P_x}{C_{\text{Cl}^-}^2 \sqrt{P_k} \alpha_{\text{H}^+}} \right)^{\frac{RT}{2Fk}} \cdot i_x^{\frac{b_x}{b_k}} \quad (2.27)$$

де  $k_1 = [\exp(\alpha_x - \alpha_k)]^{\frac{1}{b_k}}$ ;  $k_2 = [\exp(\varphi_{0,x} - \varphi_{0,k})]^{\frac{1}{b_k}}$ .

Рівняння (3.27) зв'язує швидкість розряду молекул води на аноді з параметрами електролізу і типом анода.

## 2.2 Розрахунок матеріального балансу відділення електролізу хлористого натрію

Вихідні дані: продуктивність цеху 72000 т/рік; склад очищеного розсолу, г/дм<sup>3</sup> : NaCl 310; Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3,4; NaOH 0,09; склад електролугів, г/дм<sup>3</sup> : NaOH 132; NaCl 187; Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 4,17; температура електролізу 95 °С; вихід за струмом 97 %;

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

амперне навантаження 50 кА; тиск в електролізері 101275 Па; температура розсолу, який поступає, 90 °С.

Годинна продуктивність відділення за NaOH:

$$\frac{72000 \cdot 1000}{24 \cdot 360} = 8333,33 \text{ кг/год,}$$

де 360 – число робочих днів на рік.

З урахуванням втрат на стадіях виробництва (згідно практичним даним втрати NaOH звичайно не перевищують 3 %):

$$m(\text{NaOH}) = 8333,33 \cdot 1,03 = 8583,33 \text{ кг/год.}$$

Основна реакція, що протікає при електролізі:



$$58,5 \quad 18 \quad 40 \quad 0,5 \cdot 71 \quad 0,5 \cdot 2$$

За реакцією на одержання 8583,33 кг/год. NaOH витрачається NaCl:

$$m(\text{NaCl}) = \frac{8583,33 \cdot 58,3}{40} = 12553,12 \text{ кг/год.}$$

Необхідний об'єм електролугу:

$$V_{\text{ел}} = \frac{8583,33}{132} = 65,02 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

У цій кількості електролугу міститься, кг/год:

$$m(\text{NaOH}) \quad 8583,33;$$

$$m(\text{NaCl}) \quad 65,02 \cdot 187 = 12158,74;$$

$$m(\text{Na}_2\text{SO}_4) \quad 65,02 \cdot 4,17 = 271,13;$$

$$\text{Усього} \quad 21013,2.$$

Загальна кількість NaCl, що надходить на електроліз:

$$m(\text{NaCl}) = 12553,12 + 12158,74 = 24711,86 \text{ кг/год.}$$

Ступінь розкладання NaCl:

$$a_n = \frac{12553,12}{24711,86} = 0,508.$$

Об'єм очищеного розсолу, що надходить на електроліз:

$$V_{\text{о.р}} = \frac{24711,86}{310} = 79,72 \text{ м}^3 / \text{год}$$

З очищеним розсоллом надходить, кг/год:

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$m(\text{NaOH})$	$79,72 \cdot 0,09 = 7,17;$
$m(\text{NaCl})$	24711,86;
$m(\text{Na}_2\text{SO}_4)$	$79,72 \cdot 3,4 = 271,05;$
Усього	24990,08.

Кількість води, що надходить із розсолем:

$$m(\text{H}_2\text{O}) = 79,72 \cdot 1162,7 = 92690,44 \text{ кг/год},$$

де 1162,7 – густина розсолу при 80 °С, кг/м<sup>3</sup>.

Кількість води, що витрачається при електролізі:

$$m(\text{H}_2\text{O}) = \frac{12553,12 \cdot 18}{58,5} = 3862,50 \text{ кг/год}.$$

Кількість хлору, що утворився:

$$m(\text{Cl}_2) = \frac{12553,12 \cdot 71 \cdot 0,5}{58,5} = 7617,71 \text{ кг/год}.$$

або

$$V(\text{Cl}_2) = \frac{7617,71}{3,209} = \text{м}^3/\text{год}.,$$

де 3,209 – густина хлору при нормальних умовах, кг/м<sup>3</sup>.

При температурі 95 °С й тиску 101325 Па вміст пари води у вологому хлорі становить 4,039 кг/м<sup>3</sup>, тоді кількість водяної пари, яку виносить хлор:

$$m(\text{H}_2\text{O}) = 2373,86 \cdot 4,039 = 9588,02 \text{ кг/год}.$$

Кількість водню, що утворився:

$$m(\text{H}_2) = \frac{12553,12 \cdot 0,5 \cdot 2}{58,5} = 214,58 \text{ кг/год}.$$

або

$$V(\text{H}_2) = \frac{214,58}{0,0899} = 2386,87 \text{ м}^3/\text{год}.,$$

де 0,0899 — густина водню при нормальних умовах, кг/м<sup>3</sup>.

При розрахунках приймаємо, що кількість пари води, винесеної 1 м<sup>3</sup> хлору й водню однакова, тоді кількість водяної пари, яку виносить водень:

$$m(\text{H}_2\text{O}) = 2386,87 \cdot 4,039 = 9640,57 \text{ кг/год}.$$

Кількість води, що міститься в електролугах:

$$m(\text{H}_2\text{O}) = 92690,44 - 3862,50 - 9588,02 - 9640,57 = 69599,35 \text{ кг/год}.$$

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підсумки розрахунків матеріального балансу відділення електролізу хлористого натрію наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Матеріальний баланс відділення електролізу

Компоненти	Прихід			
	З очищеним розсолом	Від хімічної реакції	Разом	З електро-лугом
NaCl	24711,86	-	24711,86	12158,74
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	271,05	-	271,05	271,05
NaOH	7,17	8583,33	8590,50	8590,50
H <sub>2</sub> O	92690,44	-	92690,44	69599,35
H <sub>2</sub>	-	214,58	214,58	-
Cl <sub>2</sub>	-	7617,71	7617,71	-
Усього	117680,52	16415,62	134096,14	90619,64
Компоненти	Витрати			
	На хімічну реакцію	З воднем	З хлором	Разом
NaCl	12553,12	-	-	24711,86
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-	-	-	271,05
NaOH	-	-	-	8590,50
H <sub>2</sub> O	3862,50	9640,57	9588,02	92690,44
H <sub>2</sub>	-	214,58	-	214,58
Cl <sub>2</sub>	-	-	7617,71	7617,71
Усього	16415,62	9855,15	17205,73	134096,14

### 2.3 Матеріальний баланс електролізера

Мольна концентрація розсолу, який надходить:

$$m_{\text{роз}} = \frac{1000 \cdot c}{M \cdot (\rho - c)},$$

де  $c$  – концентрація розсолу, г/дм<sup>3</sup>;  $M$  – молярна маса NaCl, г/моль;  $\rho$  – густина розсолу, г/дм<sup>3</sup>.

$$m_{\text{роз}} = \frac{1000 \cdot 310}{58,5 \cdot (1162,7 - 310)} = 6,21 \text{ кмоль/г.}$$

Кількість води, що надходить із розсоллом в анодний простір:

$$m(\text{H}_2\text{O}) = \frac{A \cdot I \cdot \eta}{\alpha_n \cdot m_0},$$

де  $A = 37,2$ ;  $I$  – амперне навантаження, кА;  $\eta$  – вихід за струмом;  $\alpha_n$  – ступінь розкладання  $\text{NaCl}$ .

$$m(\text{H}_2\text{O}) = \frac{37,2 \cdot 50 \cdot 0,97}{0,508 \cdot 6,21} = 571,91 \text{ кг/год.}$$

Кількість іонів хлору, що надходять із розсоллом:

$$m(\text{Cl}) = \frac{35,5 \cdot A \cdot I \cdot \eta}{\alpha_n \cdot 1000},$$

$$m(\text{Cl}) = \frac{35,5 \cdot 37,2 \cdot 50 \cdot 0,97}{0,508 \cdot 1000} = 126,08 \text{ кг/год.}$$

Кількість іонів хлору, що надходять із катодного простору:

$$m(\text{Cl}) = \frac{35,5 \cdot A \cdot I \cdot n_a}{1000},$$

де  $n_a$  – число переносу іонів  $\text{Cl}$ ,  $n_a = 0,65$ .

$$m(\text{Cl}) = \frac{35,5 \cdot 37,2 \cdot 50 \cdot 0,65}{1000} = 42,92 \text{ кг/год.}$$

Кількість іонів натрію, які надходять з розсоллом в анодний простір:

$$m(\text{Na}) = \frac{23 \cdot A \cdot I \cdot \eta}{\alpha_n \cdot 1000},$$

$$m(\text{Na}) = \frac{23 \cdot 37,2 \cdot 50 \cdot 0,97}{0,508 \cdot 1000} = 81,69 \text{ кг/год.}$$

Кількість води, що надходить із електролітом у катодний простір:

$$m(\text{H}_2\text{O}) = A \cdot I \left[ \frac{\eta}{\alpha_n \cdot m_0} - \frac{18 \cdot \eta}{2000} \cdot \left( \frac{p^I}{p - p^I} \right) \right]$$

де  $p'$  – парціальний тиск пари води в хлор-газі над аналітом, Па;  $p$  – загальний тиск вологого газу, Па.

Підсумки розрахунків матеріального балансу електролізера надано в табл. 2.4.

					БР.АКПЗд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.4 – Матеріальний баланс електролізера

Статті приходу	кг/год	Статті витрати	кг/год
1	2	3	4
<b><i>Анодний простір</i></b>			
Вода з розсолом	571,91	Вода в катодний простір	490,06
Іони Cl <sup>-</sup> із розсолом	126,08		
Перенос іонів Cl <sup>-</sup> із катодного простору	42,92	Пари води, винесені хлор-газом	81,85
Іони Na <sup>+</sup> з розсолом	81,69	Іони хлору з виділенням Cl <sub>2</sub>	64,05
		Іони Cl <sup>-</sup> у катодний простір	104,95
		Іони Na <sup>+</sup> у катодний простір	81,69
Разом	822,60	Разом	822,60
<b><i>Катодний простір</i></b>			
Вода з анодного простору	490,06	Вода на хімічну реакцію	32,48
Іони Cl <sup>-</sup> із анодного простору	104,95	Газоподібний водень	1,80
		Пара води, яка виноситься водень-газом	81,85
Іони Na <sup>+</sup> з анодного простору	81,69	Вода з електролугами	373,87
		Іони Cl <sup>-</sup> в анодний простір	42,92
		Іони Cl <sup>-</sup> із електролугами	62,03
		Іони Na <sup>+</sup> із електролугами:	
		а) у вигляді NaOH	41,50
		б) у вигляді NaCl	40,19
Разом	676,7	Разом	676,7
<b><i>По електролізу в цілому</i></b>			
Вода з розсолом	571,91	Вода на хімічну реакцію	32,48
Іони Cl <sup>-</sup> із розсолом	126,08		

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42



5. Використання ПІД-регулювання температури та струму сприятиме стабільності процесу та забезпечує отримання високоякісного гідроксиду натрію при мінімізації втрат на побічні реакції.
6. Розроблена модель буде використана для оптимізації промислових процесів електролізу з метою підвищення виходу за струмом гідроксиду лужного металу та зменшення утворення побічних продуктів.

					<i>БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		44

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ХЛОРИДІВ ЛУЖНИХ МЕТАЛІВ В ДІАФРАГМЕННОМУ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРІ

Дослідження моделі дозволяє глибше зрозуміти процеси, що відбуваються в діафрагменному електролізері, та забезпечити надійне автоматичне керування процесом з урахуванням змін зовнішніх і внутрішніх параметрів [11-17].

#### 3.1 Математична модель діафрагменного електролізера

##### 3.1.1 Електрохімічні рівняння

Закон Фарадея для розрахунку кількості речовини на електроді:

$$m = \frac{Q \cdot M}{z \cdot F}$$

де:

$m$  – маса виділеної речовини (кг),

$Q$  – електричний заряд (Кл),

$M$  – молярна маса речовини (г/моль),

$z$  – валентність іонів,

$F$  – константа Фарадея (96485 Кл/моль).

Зв'язок заряду з електричним струмом:

$$Q = I \cdot t$$

де:

$I$  – струм (А),

$t$  – час електролізу (с).

##### 3.1.2 Енергетичний баланс електролізера

Баланс тепла:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_{\text{ел}} + P_{\text{реак}} - P_{\text{втрат}}}{m \cdot c}$$

де:

$T$  – температура електроліту (°C),

$P_{\text{ел}}$  – електрична потужність,

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$P_{\text{реакц}}$  – теплота реакції (Вт),

$P_{\text{втрат}}$  – теплові втрати (Вт),

$m$  – маса електроліту (кг),

$c$  – теплоємність (Дж/(кг·°C)).

Втрати тепла через стінки:

$$P_{\text{втрат}} = k \cdot S \cdot (T - T_{\text{env}})$$

де:

$k$  – коефіцієнт теплопередачі (Вт/(м<sup>2</sup>·°C)),

$S$  – площа теплообміну (м<sup>2</sup>),

$T_{\text{env}}$  – температура навколишнього середовища (°C).

### 3.1.3 Модель концентраційної динаміки

Закон збереження маси для реагентів:

$$\frac{dC_{\text{NaCl}}}{dt} = - \frac{I \cdot M_{\text{NaCl}}}{z \cdot F \cdot V} - k_{\text{реакц}} \cdot C_{\text{NaCl}}$$

де:

$C_{\text{NaCl}}$  – концентрація натрій хлориду (моль/л),

$V$  – об'єм електроліту (л),

$k_{\text{реакц}}$  – швидкість реакції (1/с).

### 3.1.4 Модель електродинамічного процесу

Залежність струму від напруги:

$$I = \frac{U - E_{\text{ел}}}{R_{\text{ел}}}$$

де:

$U$  – прикладена напруга (В),

$E_{\text{ел}}$  – електродний потенціал (В),

$R_{\text{ел}}$  – електричний опір електроліту (Ом).

Опір електроліту:

$$R_{\text{ел}} = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

					БР.АКПзδ – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де:

$\rho$  – питомий опір електроліту (Ом·м),

$l$  – довжина шляху струму (м),

$S$  – площа перетину (м<sup>2</sup>).

### 3.1.5 Контур керування (ПД-регулювання)

Модель температурного контролю:

$$u_T = K_p(e_T) + K_i \int e_T dt + K_d \frac{de_T}{dt}$$

де:

$e_T = T_{\text{зад}} - T$  – похибка температури.

Модель струмового контролю:

$$u_I = K_p(e_I) + K_i \int e_I dt + K_d \frac{de_I}{dt}$$

де:

$e_I = I_{\text{зад}} - I$  – похибка струму.

## 3.2 Передавальні функції системи автоматизації

Передавальні функції дозволяють подати динамічні процеси у вигляді алгебраїчних виразів, що значно спрощує аналіз системи автоматизації.

### 3.2.1 Температурний контур

Математична модель теплового балансу:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_{\text{ел}} + P_{\text{реак}} - P_{\text{втрат}}}{m \cdot c}$$

Підставимо потужність електролізу:

$$P_{\text{ел}} = U \cdot I$$

Теплові втрати через стінки:

$$P_{\text{втрат}} = k \cdot S \cdot (T - T_{\text{env}})$$

Лінеаризація рівняння теплового балансу:

$$\frac{dT}{dt} + \frac{k \cdot S}{m \cdot c} \cdot T = \frac{U \cdot I}{m \cdot c}$$

Після застосування оператора Лапласа:

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$sT(s) + \frac{k \cdot S}{m \cdot c} \cdot T(s) = \frac{U \cdot I}{m \cdot c}$$

*Передавальна функція температурного контуру:*

$$W_T(s) = \frac{T(s)}{U(s)} = \frac{1}{(m \cdot c) \cdot s + k \cdot S}$$

### 3.2.2 Струмовий контур

Математична модель електродинамічного процесу:

$$I = \frac{U - E_{\text{ел}}}{R_{\text{ел}}}$$

Де опір електроліту:

$$R_{\text{ел}} = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

Після лінеаризації:

$$sI(s) + \frac{1}{R_{\text{ел}}} \cdot I(s) = \frac{1}{R_{\text{ел}}} \cdot U(s)$$

*Передавальна функція струмового контуру:*

$$W_I(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{1/R_{\text{ел}}}{s + 1/R_{\text{ел}}}$$

### 3.2.3 Контур концентрації NaCl

Рівняння балансу концентрації:

$$\frac{dC_{\text{NaCl}}}{dt} = - \frac{I \cdot M_{\text{NaCl}}}{z \cdot F \cdot V} - k_{\text{реакц}} \cdot C_{\text{NaCl}}$$

Після застосування Лапласа:

$$sC_{\text{NaCl}}(s) + k_{\text{реакц}} \cdot C_{\text{NaCl}}(s) = - \frac{I \cdot M_{\text{NaCl}}}{z \cdot F \cdot V}$$

Передавальна функція концентрації NaCl:

					БР.АКПЗд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_C(s) = \frac{C_{NaCl}(s)}{I(s)} = \frac{-M_{NaCl}}{(z \cdot F \cdot V) \cdot (s + k_{реакц})}$$

### 3.2.4 Передавальна функція ПІД-регулятора

Передавальна функція ідеального ПІД-регулятора:

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

Температурний регулятор:

$$W_{PID-T}(s) = K_{pT} + \frac{K_{iT}}{s} + K_{dT} \cdot s$$

Струмовий регулятор:

$$W_{PID-I}(s) = K_{pI} + \frac{K_{iI}}{s} + K_{dI} \cdot s$$

Система складається з двох незалежних контурів керування: температурного та струмового.

Передавальна функція температурного контуру (замкнена):

$$W_T(s) = \frac{W_{PID-T}(s) \cdot W_T(s)}{1 + W_{PID-T}(s) \cdot W_T(s)}$$

Передавальна функція струмового контуру (замкнена):

$$W_I(s) = \frac{W_{PID-I}(s) \cdot W_I(s)}{1 + W_{PID-I}(s) \cdot W_I(s)}$$

Передавальні функції дають змогу чітко описати поведінку температури, струму та концентрації NaCl в електролізері.

Створюємо структуру моделі в Matlab/Simulink (рис.3.1):

#### 1. Температурний контур:

- ПІД-регулятор температури.
- Динаміка температури (передавальна функція).
- Зворотний зв'язок.

#### 2. Струмовий контур:

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- ПІД-регулятор струму.
- Динаміка струму (передавальна функція).
- Зворотний зв'язок.

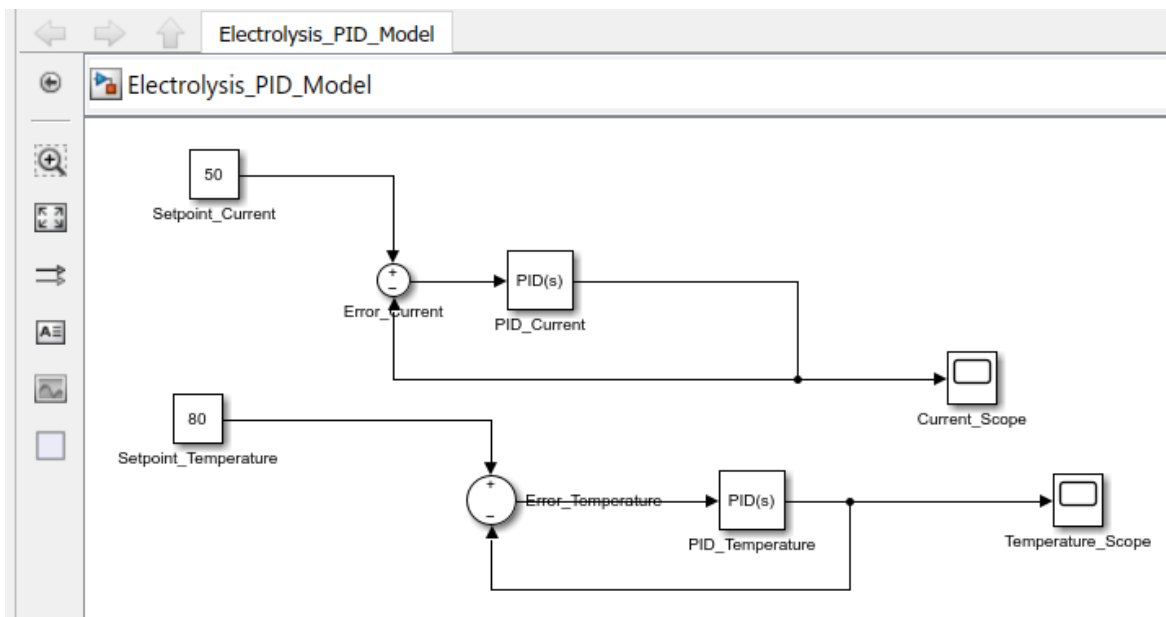


Рисунок 3.1 – Вікно моделі в ПП Matlab

Візуалізація результатів моделювання при вхідних сталих значеннях наведена на рис.3.2 і 3.3.

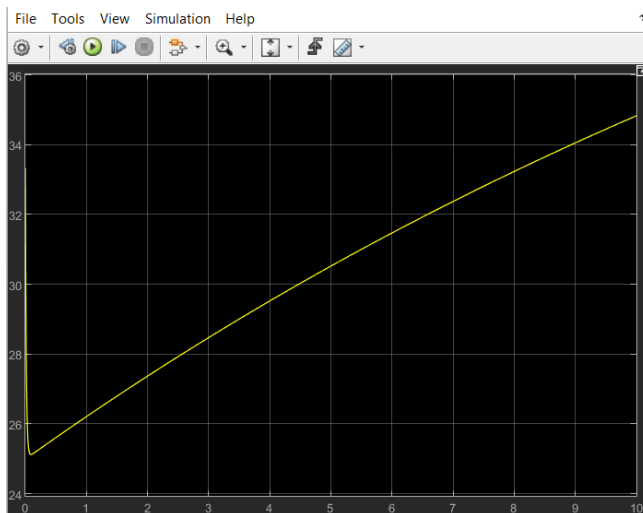


Рисунок 3.2 – Графік зміни струму

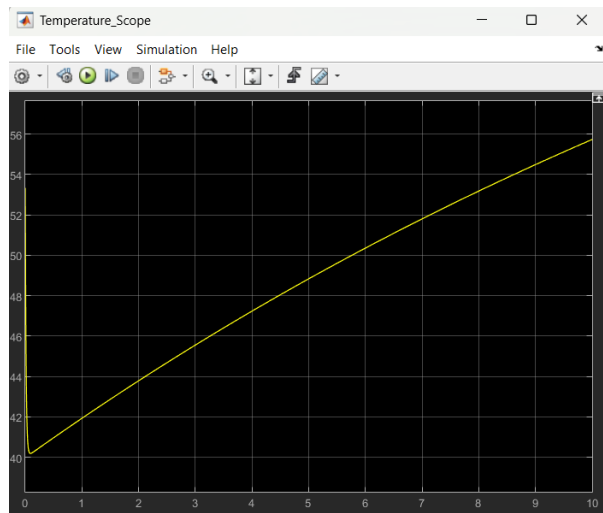


Рисунок 3.3 – Графік зміни температури

На рис.3.4 входами є одиничні стрибкоподібні сигнали і відповідно на виходах отримаємо перехідні характеристики по струму (рис.3.5) і по температурі (рис. 3.6).

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

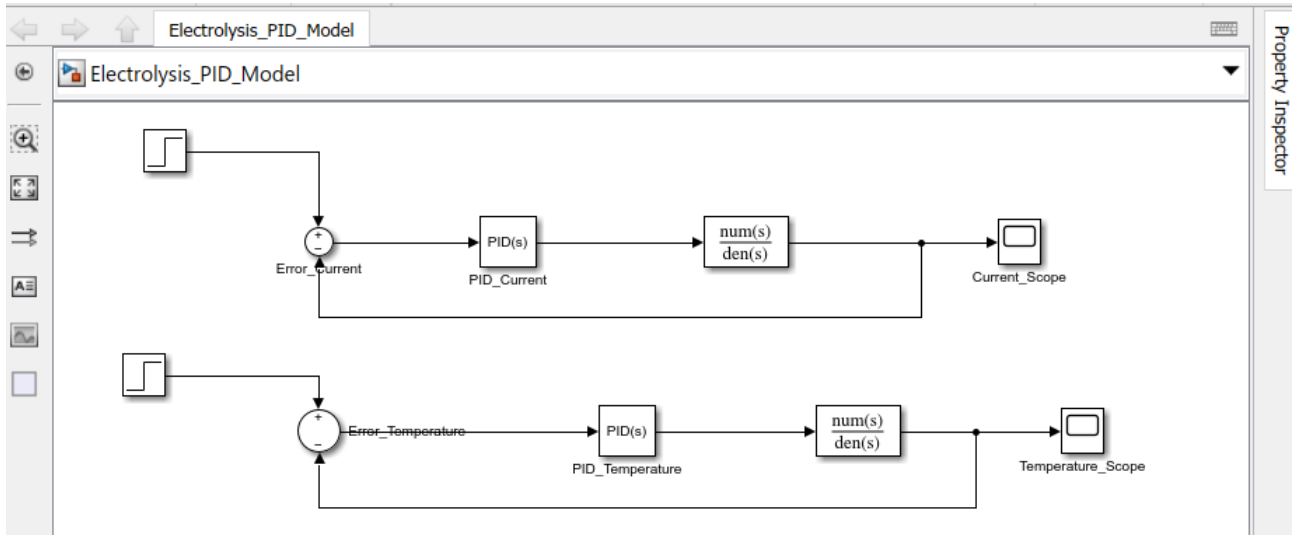


Рисунок 3.4 – Вікно моделі в ПП Matlab

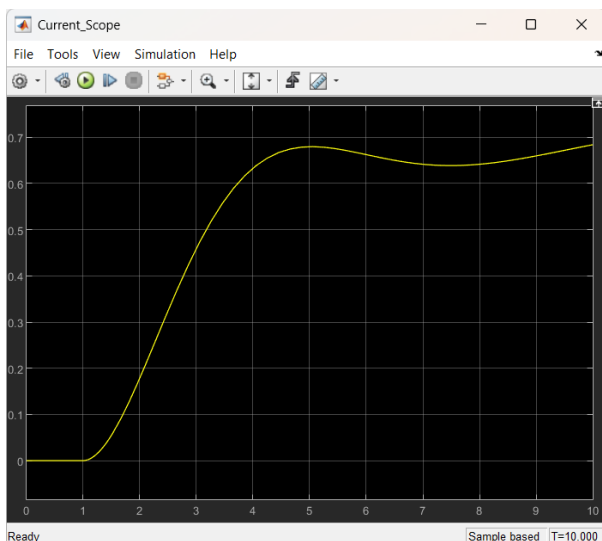


Рисунок 3.5 – Перехідна характеристика по струму

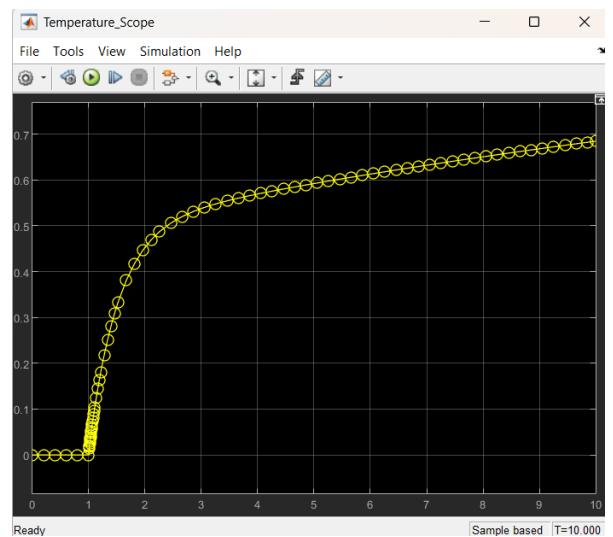


Рисунок 3.6 – Графік характеристика по температурі

### 3.3 Аналіз стійкості системи керування електролізу хлоридів лужних металів у діафрагменному електролізері

Для аналізу стійкості системи автоматизації електролізу хлоридів лужних металів у діафрагменному електролізері можна скористатися наступними методами:

#### 1. Аналіз характеристичного рівняння:

- Знаходимо характеристичне рівняння замкненої системи.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

- Використаємо критерій Гурвіца для визначення стійкості.
- 2. *Логарифмічні амплітудно-фазові характеристики (ЛАФЧ):*
  - Будуємо ЛАФЧ замкненої системи за допомогою Bode-діаграми (рис.3.7).
  - Перевіряємо стабільність за критерієм Найквіста.
- 3. *Аналіз корневих локусів:*
  - Будуємо корневий годограф для визначення розташування полюсів (рис.3.8).
  - Перевіряємо, чи знаходяться всі полюси в лівій півплощині.
- 4. *Часові характеристики системи:*
  - Проводимо імітацію перехідного процесу в MATLAB/Simulink.
  - Оцінюємо стійкість за характером перехідної характеристики (рис.3.9).

```
>> sys_cl = feedback(W_T * pid(Kp_T, Ki_T, Kd_T), 1);
poles = pole(sys_cl);
stability = all(real(poles) < 0);
disp(['Система стійка: ', num2str(stability)]);
Система стійка: 1
```

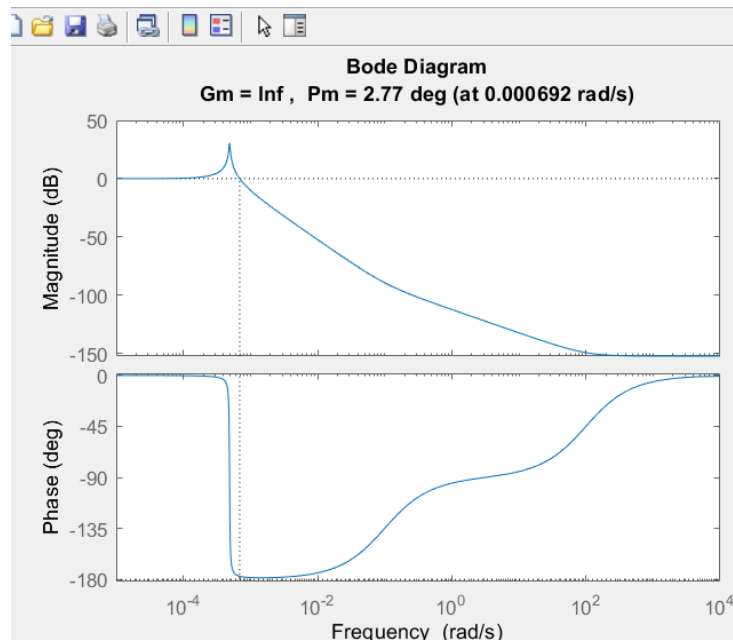


Рисунок 3.7 – Логарифмічні амплітудно-частотні характеристики (діаграми Бодє)

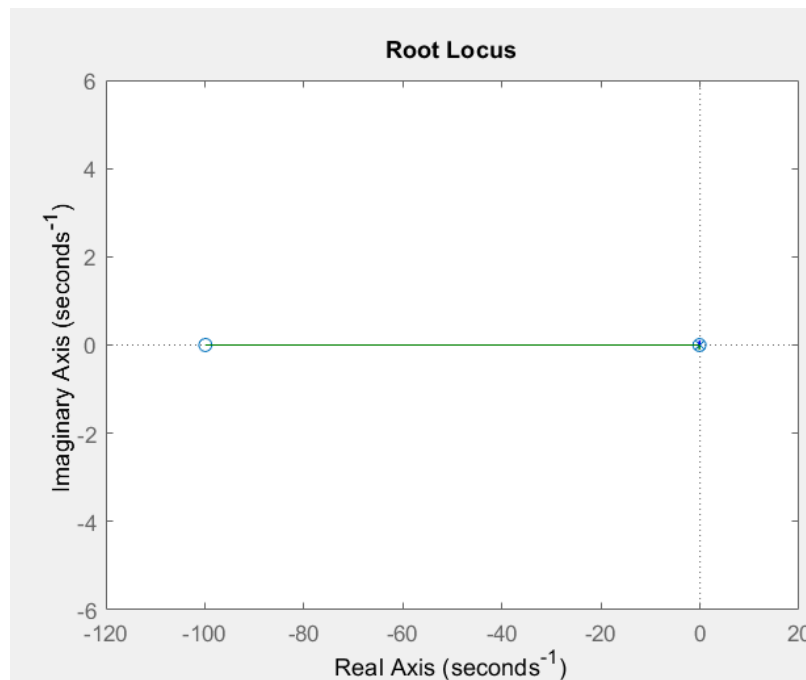


Рисунок 3.8 – Кореневий годограф розташування полюсів

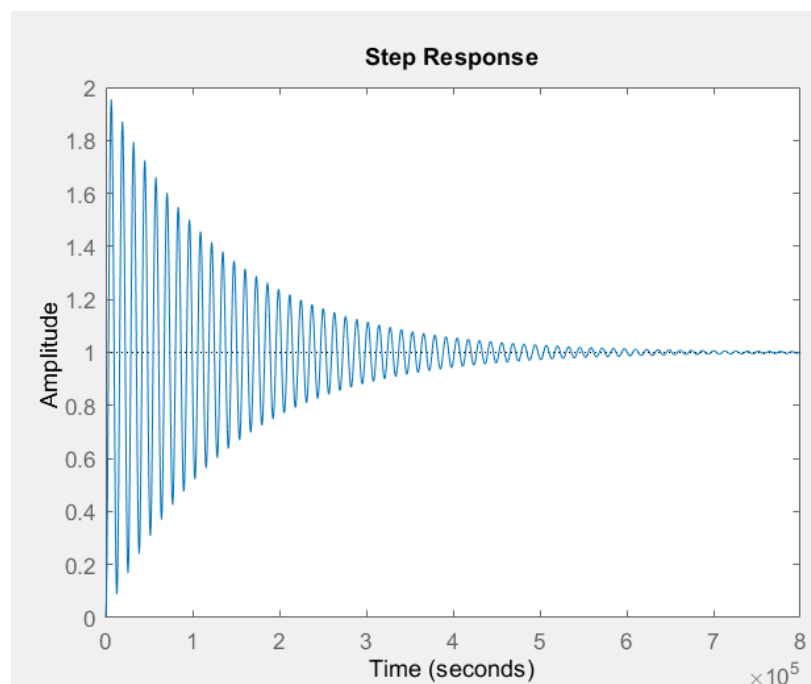


Рисунок 3.9 – Перехідна характеристика

Інтерпретація результатів:

- Всі полюси замкненої системи мають від'ємну дійсну частину – система стійка.
- На ЛАФЧ запас стійкості по амплітуді та фазі додатній – система стійка.
- Перехідна характеристика має згасаючий характер.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

### 3.4 Аналіз показників якості системи автоматизації електролізу хлоридів лужних металів

Аналіз показників якості системи автоматизації електролізу хлоридів лужних металів у діафрагменному електролізері є важливою частиною оцінки її ефективності та стійкості. Ось кілька основних показників, які є корисні для оцінки якості системи автоматизації:

#### 3.4.1 Основні показники якості:

1. Час стабілізації (Settling Time,  $T_s$ ):

- Це час, необхідний для того, щоб система стабілізувалася в межах певної похибки від заданого значення.
- Можна визначити за допомогою аналізу перехідної характеристики.

2. Час настання (Rise Time,  $T_r$ ):

- Це час, який потрібен системі для того, щоб перехідний процес від найменшого значення до встановленого значення в межах заданого діапазону.
- Важливо для оцінки швидкості реакції системи на зміни умов.

3. Перерегулювання (Overshoot,  $M_p$ ):

- Це максимальне відхилення вихідної величини від установленого значення в перехідному процесі.
- Оцінюється як відсоток від встановленої величини.
- Чим менше перерегулювання, тим більш стабільною є система.

4. Інтегральний показник якості (Integral of Squared Error, ISE):

- Це інтеграл квадрата помилки між заданим значенням і виходом системи.
- Ідеально, якщо значення ISE мінімальне, оскільки це означає мінімальні коливання і помилки.

5. Інтегрально-сумаційний показник (Integral of Time-weighted Absolute Error, ІТАЕ):

- Це інтеграл помилки, важений часом, і може допомогти оцінити загальні відхилення з урахуванням часу.

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

#### 6. Нормалізоване відхилення (Steady-State Error, SSE):

- Це залишкове відхилення після стабілізації системи. Якщо SSE дорівнює нулю, то система має ідеальний контроль.

#### 7. Загальний коефіцієнт регулювання (Control Effort):

- Це вимір зусиль, які потрібні для управління системою. Високий коефіцієнт може свідчити про надмірне втручання в систему для підтримання стабільності.

### 3.4.2 Аналіз показників якості в MATLAB

#### 1. Час стабілізації та час настання:

Використовуємо команду `stepinfo`, щоб отримати ці характеристики для передавальної функції замкненої системи.

```
>> sys_cl = feedback(W_T * pid(Kp_T, Ki_T, Kd_T), 1);  
info = stepinfo(sys_cl);  
disp(info);  
    RiseTime: 2.1536e+03  
    SettlingTime: 5.4012e+05  
    SettlingMin: 0.0881  
    SettlingMax: 1.9549  
    Overshoot: 95.4945  
    Undershoot: 0  
         Peak: 1.9549  
    PeakTime: 6.4230e+03
```

#### 2. Перерегулювання:

Визначаємо за допомогою `stepinfo` або просто аналізуємо максимальне відхилення від встановленого значення (рис.3.9).

```
>> step(sys_cl);  
title('Перехідна характеристика');
```

#### 3. Інтегральні показники якості (ISE, ITAE):

Для цих показників можна використовувати інтеграцію помилки між заданим значенням і виходом.

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

>> step(sys_cl);
title('Перехідна характеристика');
>>
>> e = @(t) (setpoint - output(t)); % функція помилки
ISE = integral(@(t) e(t).^2, 0, Inf);
ITAE = integral(@(t) t .* abs(e(t)), 0, Inf);
disp(['ISE: ', num2str(ISE)]);
disp(['ITAE: ', num2str(ITAE)]);

```

Інтерпретація результатів:

- *Час стабілізації та час настання:* Оскільки час малий, то система швидко досягає стабільного стану.
- *Перерегулювання:* Перерегулювання є мінімальним, і це вказує на те, що система не "перериває" швидко змінювані параметри.
- *ISE, ITAE:* Малі значення цих показників свідчать про добру якість управління, оскільки мінімізується помилка протягом часу.

Отже, оцінка якості системи автоматизації електролізу допомагає виявити слабкі місця і забезпечити оптимальні налаштування для стабільного та ефективного управління. Це дозволяє досягти балансу між швидкістю реагування, точністю і мінімізацією зусиль у системі.

### Висновки до розділу

1. У ході дослідження було розроблено математичну модель процесу електролізу хлоридів лужних металів у діафрагменному електролізері, яка враховує основні фізико-хімічні параметри, зокрема: температуру електроліту, густину струму, концентрацію іонів та інші технологічні показники.
2. На основі моделі було реалізовано автоматизовану систему керування (АСУ) з використанням ПІД-регуляторів для контролю температури та струму. Проведено аналіз впливу параметрів регулювання на стійкість та швидкодію системи.
3. Застосування ПІД-регуляторів забезпечило стабілізацію параметрів процесу на встановленому рівні з мінімальним перерегулюванням та прийнятним

						БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
							55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

часом перехідного процесу. Використання ІСЕ (інтеграл квадрату помилки) та ІТАЕ (інтеграл часу на абсолютну помилку) дозволило кількісно оцінити якість системи автоматизації.

4. Модель дозволила провести імітаційні дослідження різних режимів роботи електролізера, що дало змогу оптимізувати параметри керування та зменшити енерговитрати під час виробництва хлоридів.
5. Отримані результати підтверджують ефективність розробленої системи автоматизації для електролізера з діафрагмою. Застосування моделі у промислових умовах дозволить підвищити точність підтримання технологічних параметрів та знизити ризик аварійних ситуацій за рахунок автоматичного коригування режимів роботи.

					<i>БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК

### 4.1 Розробка функціональної схеми автоматизації

Основні потоки технології хлоридів лужних металів в діафрагменному електролізері: подача розчину хлориду натрію (NaCl - соляного розчину) до електролізера; вихід хлору Cl<sub>2</sub> з анодної камери; вихід гідроксиду натрію NaOH з катодної камери.

Компоненти та їхні позначення (рис.4.1): LT – датчик рівня, який вимірює рівень рідини у живильному баку; LIC – регулятор рівня, який керує рівнем подачі розчину до системи; FIC – регулятор витрати, який регулює витрату розчину NaCl. FV – регульований клапан витрати, який відкривається/закривається на основі сигналу від FIC та LIC. FF – блок подачі або фільтрації потоку; TIC – регулятор температури, який регулює температуру подачі до електролізера; VI – індикатор напруги, що вимірює напругу, прикладену до електролізера; TC – регулятор температури (локальний або вихідний); TT – датчик температури, який передає значення температури на TC; CT – датчик струму: вимірює струм у катодній камері.

Електролізер складається з анодної і катодної камер, розділених діафрагмою. На аноді утворюється Cl<sub>2</sub>, а на катоді – утворюється NaOH і H<sub>2</sub> (не позначений на схемі).

Ця функціональна схема дозволяє: підтримувати оптимальні умови процесу (температуру, струм, рівень, витрату); забезпечувати безпеку роботи; автоматично регулювати параметри електролізу.

### 4.2 Алгоритм схеми підключення ПЛК Siemens S7-1200

Наведемо код в MATLAB, який демонструє підключення ПЛК Siemens S7-1200 до системи керування процесом одержання хлоридів лужних металів у діафрагменному електролізері. Для цього використаємо бібліотеку **snap7** або OPC, залежно від обладнання (рис.4.2). Наведемо два варіанти:

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### Варіант 1: Через Snap7

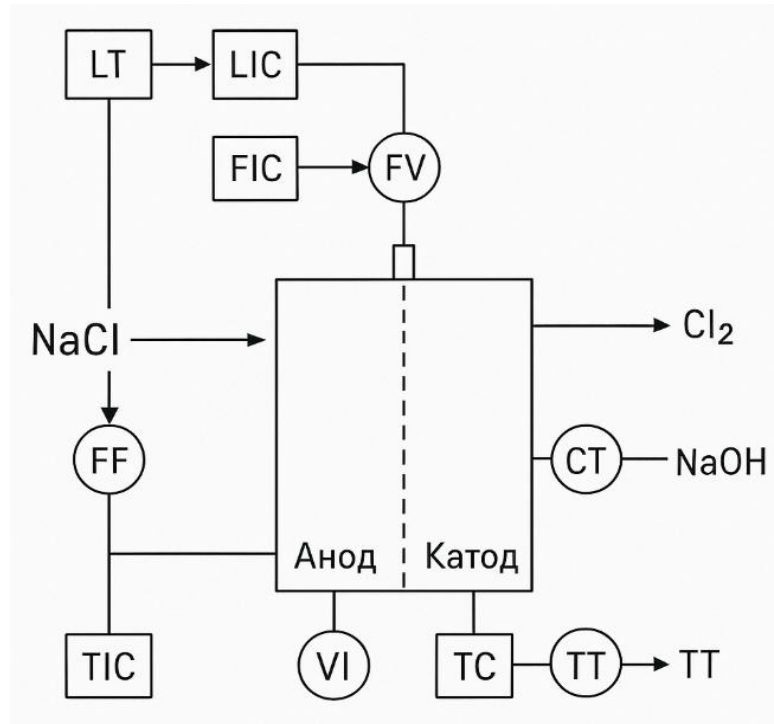


Рисунок 4.1 – Функціональна схема автоматизації

```
>> % Ініціалізація клієнта Snap7
client = snap7.client;
client.connect('192.168.0.1', 0, 1); % IP PLC, Rack=0, Slot=1

% Зчитування даних з DB (наприклад, DB1, байт 0, 4 байти)
[data, ~] = client.readArea(snap7.areaDB, 1, 0, 4);
temperature = typecast(uint8(data), 'single'); % конвертуємо байти у float

% Виведення температури
fprintf('Температура електроліту: %.2f °C\n', temperature);

% Запис значення у PLC (наприклад, встановити задану напругу в електролізері)
setVoltage = single(4.5); % Встановлюємо 4.5 В
dataToWrite = typecast(setVoltage, 'uint8');
client.writeArea(snap7.areaDB, 1, 10, dataToWrite); % DB1, байт 10

% Відключення
client.disconnect();
```

### Варіант 2: Через OPC UA

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

```

>> % Підключення до OPC UA сервера
uaClient = opcua('opc.tcp://192.168.0.1:4840'); % IP вашого ПЛК
connect(uaClient);

% Перегляд доступних вузлів
nodes = browseNamespace(uaClient);

% Зчитування значення температури
temperatureNode = findNodeByName(uaClient.Namespace, 'ElectrolyteTemperature')
temperatureVal = readValue(uaClient, temperatureNode);
fprintf('Температура електроліту: %.2f °C\n', temperatureVal.Value);

% Запис нової напруги електролізу
voltageNode = findNodeByName(uaClient.Namespace, 'ElectrolyzerVoltage');
writeValue(uaClient, voltageNode, 4.5); % Встановити 4.5 В

% Відключення
disconnect(uaClient);

```

У кодї наведено лише базові приклади читання/запису: температура електроліту; напруга електролізера; струм; стан клапанів насосів; рівень в електролізері [11-17].

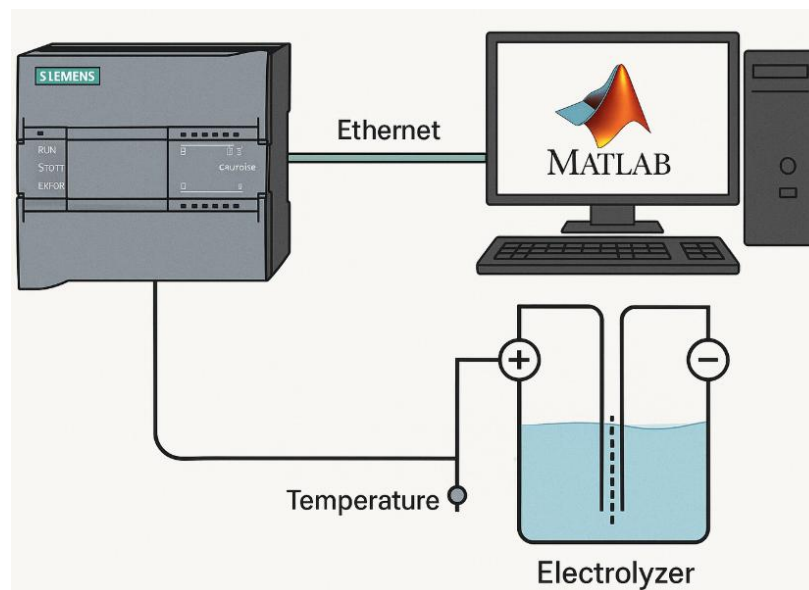


Рисунок 4.2 – Схема підключення ПЛК Siemens S7-1200) до системи керування процесом одержання хлоридів лужних металів у діафрагменному електролізері.

### 4.3 Опис схеми підключення електролізера та ПЛК

Основні компоненти схеми (рис.4.3):

1. Датчики та вимірювальні прилади:

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

- PT (Pressure Transmitter) - датчик тиску.
  - TT (Temperature Transmitter) - датчик температури.
  - LT (Level Transmitter) - датчик рівня.
  - FT (Flow Transmitter) - датчик витрати.
  - Датчики підключені до ПЛК через аналогові входи (AI).
2. Живлення:
- Блок живлення подає напругу на ПЛК.
3. ПЛК (Програмований логічний контролер):
- Приймає сигнали від датчиків через аналогові входи (AI).
  - Керує виконавчими механізмами через дискретні виходи (DO) та аналогові виходи (AO).
4. Електролізер:
- Підключений до аналогових входів ПЛК для контролю параметрів процесу (струм, напруга).

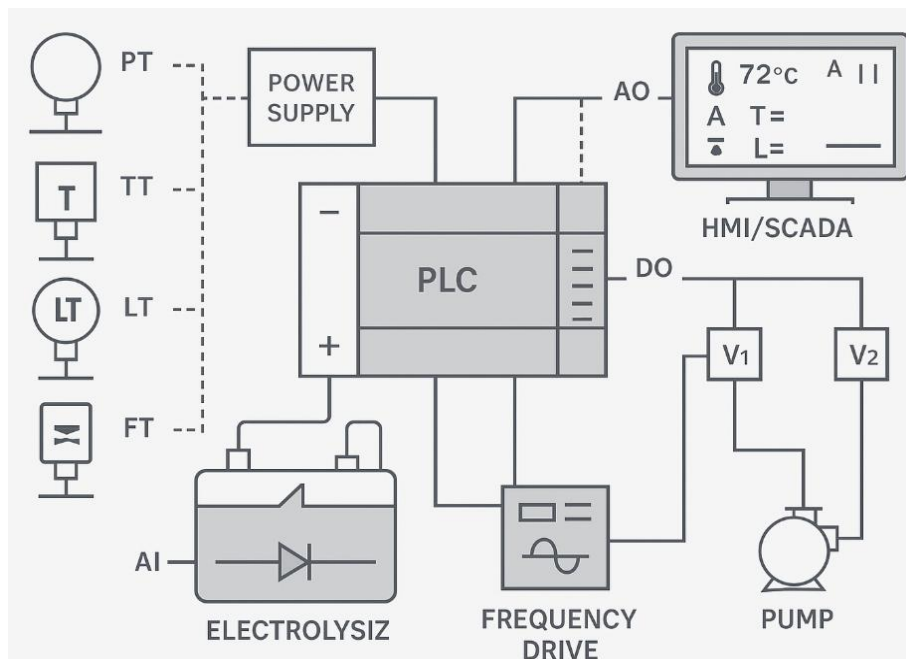


Рисунок 4.3 – Схема підключення електролізера

5. Частотний перетворювач (Frequency Drive):
- Регулює швидкість насоса, забезпечуючи контроль витрати розчину через електролізер.
6. Насос:

– Приводиться в дію через частотний перетворювач.

7. Керуюча арматура:

– Клапани V1 та V2 контролюють потік рідини через систему.

8. HMI/SCADA:

– Інтерфейс людина-машина для моніторингу та керування параметрами процесу.

– Відображає дані про температуру (72°C), струм (A), рівень (L) та інші параметри.

**Логіка роботи:**

1. Датчики тиску, температури, рівня та витрати передають сигнали на ПЛК.

2. ПЛК обробляє сигнали та передає дані на HMI/SCADA для моніторингу.

3. На основі даних ПЛК керує частотним перетворювачем для регулювання швидкості насоса.

4. Через дискретні виходи ПЛК керує клапанами V1 і V2, відкриваючи або закриваючи потік розчину.

5. HMI/SCADA дозволяє оператору контролювати та налаштовувати параметри процесу.

Детальний опис підключення ПЛК та електролізера в системі автоматизації ПЛК є центральним елементом системи автоматизації (рис.4.2; 4.3), що забезпечує:

– Збір даних від датчиків.

– Обробку сигналів.

– Керування виконавчими механізмами (насосами, клапанами).

– Передачу даних на HMI/SCADA для візуалізації та моніторингу.

– Структура підключення:

**Аналогові входи (AI):**

Підключені до датчиків тиску (PT), температури (TT), рівня (LT) та витрати (FT). Дані надходять у вигляді аналогових сигналів (наприклад, 4-20 мА або 0-10 В).

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналогові виходи (АО): передають сигнал частотному перетворювачу для регулювання швидкості насоса.

Дискретні виходи (DO): керують електромагнітними клапанами (V1, V2), відкриваючи або закриваючи їх відповідно до алгоритму.

Основні функції ПЛК:

1. Контроль параметрів електролізу:

- Регулювання струму електролізера залежно від показників датчиків.
- Збереження заданої температури через PID-регулювання.

2. Контроль подачі розчину:

- Регулювання швидкості насоса через частотний перетворювач для підтримки постійної витрати.

3. Моніторинг аварійних ситуацій:

- Виявлення перевищення температури або тиску.
- Реакція на низький рівень розчину в електролізері.

4. Передача даних на HMI/SCADA:

- Відображення актуальних параметрів процесу.
- Індикація аварій та попереджень.

Електролізер здійснює електрохімічний процес розкладання хлоридів лужних металів на компоненти під дією електричного струму.

*Основні компоненти:*

- Електроди: Катод і анод, між якими проходить електролітичний процес.
- Робочий розчин: Розчин лужних хлоридів, який піддається електролізу.
- Блок живлення: Забезпечує стабільний струм і напругу для проведення процесу.
- Система охолодження: Підтримує задану температуру робочого розчину.

*Параметри процесу:*

- Струм (А): Контролюється ПЛК через аналоговий вхід. Збільшується або зменшується відповідно до необхідної інтенсивності електролізу.

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Температура (Т): Підтримується в межах технологічного діапазону (наприклад, 70–80°C) за допомогою ПД-регулятора.
- Рівень розчину (L): Контролюється за допомогою датчика рівня для забезпечення безперервності процесу.
- Витрата (F): Регулюється частотним перетворювачем насоса для забезпечення оптимального обсягу подачі розчину.

*Основні функції електролізера:*

- Електрохімічний процес: розкладання хлоридів на хімічні компоненти.
- Контроль температури: запобігання перегріву робочого розчину.
- Підтримка струму: регулювання величини струму в залежності від концентрації розчину.
- Захист від аварій: вимикання електроживлення при перевищенні температури або тиску.

*Взаємодія ПЛК та електролізера:*

- ПЛК отримує сигнал від датчиків електролізера та коригує параметри процесу.
- При відхиленні струму або температури від заданих меж ПЛК автоматично вмикає охолодження або знижує струм.
- Сигнали від ПЛК також керують швидкістю насоса, щоб забезпечити потрібну подачу розчину в електролізер.

#### **Висновки до розділу 4**

У процесі розроблення схем для автоматизації електролізу хлоридів лужних металів було створено комплексну систему керування, що забезпечує безперервність та надійність технологічного процесу.

Основними компонентами автоматизації є програмований логічний контролер (ПЛК), електролізер, датчики контролю параметрів (тиску, температури, рівня та витрати), виконавчі механізми (насоси та клапани), частотний перетворювач та система візуалізації (HMI/SCADA).

Розроблені схеми дозволяють:

					<i>БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Ефективно контролювати параметри процесу електролізу, забезпечуючи стабільність технологічного режиму.
2. Здійснювати моніторинг основних показників у реальному часі завдяки інтеграції з HMI/SCADA.
3. Реагувати на відхилення параметрів шляхом автоматичного регулювання струму, температури та витрати розчину.
4. Забезпечити безпеку процесу за рахунок автоматичного відключення у разі аварійних ситуацій.

Застосування сучасних технологій автоматизації сприяє підвищенню продуктивності та надійності процесу електролізу, знижуючи ризик людських помилок та підвищуючи ефективність керування.

					<i>БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						64
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У процесі виконання роботи було досліджено та реалізовано комплексний підхід до автоматизації електрохімічного процесу.

Основним результатом дослідження є створення автоматизованої системи керування діафрагменним електролізером, яка забезпечує контроль та регулювання ключових параметрів процесу.

Показано, що автоматичне регулювання струму та температури в електролізері забезпечує оптимальні умови для електрохімічного розкладу хлоридів.

Доведено, що система автоматично реагує на перевищення критичних значень температури, тиску або рівня розчину, що дозволяє запобігти аварійним ситуаціям.

Підтверджено, що завдяки частотному перетворювачу регулюється швидкість насоса, що забезпечує раціональне використання електроенергії.

Встановлено, що оптимізація подачі реагентів дозволяє зменшити витрати на сировину.

Виявлено, що автоматизація процесу мінімізує участь оператора, що знижує ймовірність помилок та підвищує точність регулювання.

Таким чином, розроблена автоматизована система забезпечує надійну та ефективну роботу діафрагменного електролізера, що сприяє підвищенню якості продукції та безпеки технологічного процесу.

					<i>БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Волошин М. Д. Електрохімічна технологія неорганічних речовин: навчальний посібник / Волошин М. Д., Іванченко А. В. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2012. – 325 с.
2. Колектив авторів. Електрохімія сьогодення: здобутки, проблеми та перспективи / кол. авторів. – Київ: Наукова думка, 2018. – 280 с.
3. Колесник Є. В. Науково-технологічні засади інженерії поверхні при формуванні електрокристалізованих покриттів: монографія / Є. В. Колесник. – Київ: НТУУ «КПІ», 2021. – 240 с.
4. Методи аналізу сировини та продукції хімічних виробництв: навч. посібник / кол. авторів. – Харків: Харк. держ. ун-т, 2019. – 350 с.
5. Петренко С. О. Моделювання та автоматизація електрохімічних процесів / С. О. Петренко. – Київ: НАН України, 2018. – 180 с.
6. Юр'єв В. І. Технологія електролізу лужних металів: монографія / В. І. Юр'єв. – Харків: ХНТУ, 2016. – 320 с.
7. Яковенко О. В. Технічне регулювання у галузі хімічних технологій: підручник / О. В. Яковенко. – Дніпро: ДНУ, 2015. – 210 с.
8. Електрохімічна технологія неорганічних речовин / [Електронний ресурс] / Державний університет «Дніпровська політехніка». – Дніпро: ДУ «Дніпровська політехніка», 2012. – 84 с.
9. Електрохімічна технологія неорганічних речовин / [Електронний ресурс] / Державний університет «Дніпровська політехніка». – Дніпро: ДУ «Дніпровська політехніка», 2013. – 84 с. – Режим доступу:  
<https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/5/7/2-7-mzs32.pdf>.
10. Хімічні технології / [Електронний ресурс] / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – 120 с. – Режим доступу:  
<https://repository.kpi.kharkov.ua/bitstreams/692975ad-be76-410b-ba26-7bf66452f01d/download>.

					БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

11. Performance evaluation of diaphragm electrolysis cell for alkali metal chlorides [Електронний ресурс] // ScienceDirect. – Режим доступу:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S194439862413929X>.
12. Electrode-diaphragm assembly for alkaline water electrolysis [Електронний ресурс] // ResearchGate. – Режим доступу:  
[https://www.researchgate.net/publication/350209990\\_Electrode-diaphragm\\_assembly\\_for\\_alkaline\\_water\\_electrolysis](https://www.researchgate.net/publication/350209990_Electrode-diaphragm_assembly_for_alkaline_water_electrolysis).
14. Revisiting Chlor-Alkali Electrolyzers: from Materials to Devices [Електронний ресурс] // SpringerLink. – Режим доступу:  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12209-021-00285-9>
15. Separators and Membranes for Advanced Alkaline Water Electrolysis [Електронний ресурс] // ACS Publications. – Режим доступу:  
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.3c00694>.
16. Chlorine production [Електронний ресурс] // Wikipedia. – Режим доступу:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Chlorine\\_production](https://en.wikipedia.org/wiki/Chlorine_production).
17. Chloralkali process [Електронний ресурс] // Wikipedia. – Режим доступу:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Chloralkali\\_process](https://en.wikipedia.org/wiki/Chloralkali_process).

					<i>БР.АКПзд – 05.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66