

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ

Група АКП -21-1

Денис Марковецький

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

Марковецький Денис Ярославович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 685.1:544.54:546.11/.12

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Автоматизація технологічного процесу одержання водню і кисню

(назва роботи)

електролізом води

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

О.В. Кучмистенко

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-21-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

Д.Я.Марковецький

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

М. В. Шавранський

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.Я.Чигур

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 151-Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

А.І.Лагойда

202 року

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Марковецькому Денису Ярославовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація технологічного процесу одержання водню і кисню електролізом води

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

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

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

2. Строк подання студентом роботи

13.06.2025

3. Вихідні дані до роботи матеріали практики, технологічний регламент

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

4.1. Аналіз технологічного процесу одержання водню і кисню з води як об'єкта автоматизації

4.2. Моделювання та ідентифікація процесу одержання водню і кисню з води

4.3. Синтез системи керування процесом одержання водню і кисню

4.4 Розробка проектних схем автоматизації

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

Лист 1 – Технологічна схема - БР.АКП – 12.00.00.001

Лист 2 – Технологічні параметри процесу - БР.АКП – 12.00.00.002

Лист 3 – Моделювання електролізера - БР.АКП – 12.00.00.003

Лист 4 – Програма для ПЛК Schneider на мові C++ - БР.АКП – 12.00.00.004

Лист 5 – Аналіз стійкості в ПП MATLAB - БР.АКП – 12.00.00.005

Лист 6 – Блок-схема замкненої схеми керування в MATLAB БР.АКП – 12.00.00.006

Лист 7 – Динамічні характеристики - БР.АКП – 12.00.00.007

Лист 8 – Функціональна схема автоматизації – БР.АКП – 12.00.00.008

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу одержання водню і кисню з води як об'єкта автоматизації	13.05.2025 р.	Виконано
2	Моделювання та ідентифікація процесу одержання водню і кисню з води	20.05.2025 р.	Виконано
3	Синтез системи керування процесом одержання водню і кисню	30.05.2025 р.	Виконано
4	Розробка проектних схем автоматизації	05.06.2025 р.	Виконано
5	Висновки по роботі	12.06.2025 р.	Виконано

Студент _____
(підпис)

Д.Я. Марковецький
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

М.В.Шавранський
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 65 сторінок, 25 рисунків, 11 таблиць, 20 джерел.

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

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

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

Методи дослідження: застосовано математичне та імітаційне моделювання у середовищі MATLAB/Simulink для дослідження динаміки процесу та розробки системи керування. Для оцінки ефективності запропонованих рішень здійснено верифікацію моделі шляхом порівняння результатів моделювання з теоретичними даними.

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

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

ABSTRACT

Bachelor's thesis contains: 65 pages, 25 figures, 11 tables, 20 sources.

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

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

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

Research methods: mathematical and simulation modeling in the MATLAB/Simulink environment was used to study the dynamics of the process and develop a control system. To assess the effectiveness of the proposed solutions, model verification was carried out by comparing the modeling results with theoretical data.

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

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

3.3 Дослідження системи керування та визначення параметрів налаштування.....	47
3.4 Оцінка основних показників якості регулювання системи.....	48
Висновки до розділу.....	53
4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНИХ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОЛІЗУ ВОДИ.....	54
4.1 Функціональна схема автоматизації процесу електролізу води.....	54
4.2 Моделювання роботи системи на основі симульованих даних.....	51
4.2 Автоматизована система керування процесом електролізу на основі ПЛК.....	56
4.3 Схема підключення обладнання.....	58
4.4 Схема розміщення обладнання та приладів автоматизації.....	59
Висновки до розділу	62
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	67
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	68

					БР. АКП - 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АСК – автоматизована система керування

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

ПЛК – програмований логічний контролер

ПП – програмний продукт

ПХ – перехідна характеристика

СА – система автоматизації

САК – система автоматичного керування

СК – система керування

ТП – технологічний процес

ФЧХ – фазо-частотна характеристика

					БР. АКП - 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

У сучасному світі дедалі більшого значення набувають технології, пов'язані з виробництвом екологічно чистої енергії. Одним із найперспективніших напрямів є воднева енергетика, в основі якої лежить одержання водню — зокрема методом електролізу води. Цей процес є екологічно безпечним, оскільки не супроводжується викидами вуглекислого газу або інших шкідливих речовин, а отримані гази — водень і кисень — мають широкий спектр застосування в енергетиці, металургії, хімічній промисловості та медицині.

Проте ефективність і безпека цього процесу значною мірою залежать від рівня автоматизації. Надійне керування електролізерами, контроль технологічних параметрів, зниження енерговитрат та підвищення чистоти продукції неможливі без впровадження сучасних систем автоматичного регулювання. Саме тому тема автоматизації процесу одержання водню і кисню є актуальною як з точки зору наукового дослідження, так і з позиції практичного впровадження на підприємствах.

Сучасний розвиток промисловості та енергетики вимагає переходу до екологічно чистих та відновлюваних джерел енергії. Одним із перспективних напрямів є використання водню як енергоносія майбутнього. Водень, що отримується шляхом електролізу води, не містить викидів вуглецю, а сам процес розкладання води є екологічно безпечним. Окрім того, як побічний продукт утворюється кисень, який також має широке промислове застосування.

Процес електролізу води є енергоємним і вимагає точного контролю основних параметрів — струму, напруги, температури, тиску, складу електроліту та чистоти газів. Відхилення будь-якого з цих параметрів може призвести до зниження продуктивності, зростання енерговитрат або навіть до виникнення аварійних ситуацій. Тому автоматизація процесу одержання водню й кисню набуває особливої актуальності.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОДЕРЖАННЯ ВОДНЮ І КИСНЮ З ВОДИ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Властивості й застосування продуктів електролізу води

Водень є одним з найбільш розповсюджених у природі елементів. Вміст його в літосфері, атмосфері і гідросфері складає 17 % мольних. В земній корі 1 % маси приходить на водень. У вільному стані він зустрічається іноді в вулканічних і природних газах. Водень входить до складу води, вугілля, нафти, природного газу і багатьох мінеральних і органічних речовин, а також в тваринні організми і рослини [1]. Він найпоширеніший елемент космосу. Половину маси Сонця і більшості зірок складає водень. Юпітер і Сатурн в основному складаються з водню.

Атом водню володіє одним валентним електроном, що знаходиться в сфері дії атомного ядра. Тому водень утворює лише двохатомні молекули.

Водень має три ізотопи: протій ^1H , дейтерій ^2H (чи D) і тритій ^3H (чи T), що можуть утворювати молекулу легкого водню – протію H_2 , важкого водню – дейтерію D_2 , тритію T_2 , протодейтерію HD, прототритію HT, дейтеротритію DT.

Молекули водню характеризуються великою міцністю і малою поляризуемістю, мають незначні розміри і малу масу. Все це обумовлює велику рухливість водневих молекул, а отже, дуже низькі температури плавлення ($-259,1$ °C) і кипіння ($-252,6$ °C). Водень мало розчинний у воді й органічних розчинниках. Молекулярний водень не має кольору і запаху, легко запалюється і горить синюватим полум'ям. Він має велику дифузійну здатність.

При підвищених температурах водень дифундує в метали (Fe, Ti, Co, Ni й ін.), при цьому кількість водню, що поглинається металом, збільшується з ростом температури і тиску.

Кисень – найбільш розповсюджений елемент на Землі – 52,3 % (ат.). Він включає три стабільних ізотопи: ^{16}O (99,759 %), ^{17}O (0,037 %) і ^{18}O (0,204 %)[1].

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Внаслідок широкого поширення і великої хімічної активності кисень визначає багато в чому форму існування в природі інших хімічних елементів. У вільному стані кисень знаходиться тільки в атмосфері. В табл. 1.1 наведені дані про основні фізичні властивості водню і кисню [1].

Таблиця 1.1 – Основні фізичні властивості водню і кисню

Газ	O ₂	H ₂
Молекулярна маса	31,999	2,016
Щільність, * кг/м ³	1,429	0,0099
Теплопровідність, *Вт/(мК)	0,0233	0,162
Питома теплопровідність, *кДж/(кгК)	0,913	14,27
Теплота плавлення, кДж/кг	13,83	58,7
Теплота пароутворення, ** кДж/кг	215,79	454,62
Розчинність у воді, *** об'єм/ об'єм	0,038	0,019

* При 0 °С и 1,01·10⁶ Па.

** При 1,01·10⁶ Па.

*** При 10 °С і 1,01·10⁶ Па.

Газоподібний кисень не має кольору і запаху. У рідкому і твердому стані він має блідо-синій колір. Під дією потоку електронів, протонів, короткохвильового випромінювання молекулярний кисень частково перетворюється в озон O₃, що має ще більш високу окисну активність, ніж O₂.

При температурі – 120 °С і тиску близько 4905 кПа, кисень переходить у рідкий стан. Під атмосферним тиском рідкий кисень кипить при температурі – 182,97 °С і твердіє при –218,8 °С. Суміші водню з киснем чи повітрям вибухонебезпечні в широкому діапазоні вмісту водню. Концентраційні межі вибуховості сумішей водню з киснем і повітрям наведені в табл. 1.2. [1, 4, 11]

Видно, що суміш водню з киснем має найбільш широкі концентраційні межі вибуховості. Швидкість поширення вибухової хвилі при вибуху гримучої

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

суміші (суміш H_2 і O_2 при співвідношенні за об'ємом 2:1) складає близько 2800 м/с.

Таблиця 1.2 – Концентраційні межі вибуховості сумішей водню з киснем і повітрям

Показники	З киснем	З повітрям
Межі вибуховості, % мас.	4,5 – 95,0	4,1 – 74,2
Температура самозаймання, °С	450	510
Максимальна швидкість розповсюдження полум'я, м/с	8,9	2,67

Важка вода (оксид дейтерію) D_2O являє собою ізотопний різновид води, молекули якого замість атомів протію 1H містять атоми дейтерію. У природній воді на один атом дейтерію приходить 6500 – 7200 атомів 1H .

Молекулярна маса D_2O – 20,09, температура кипіння – 101,4 °С, температура плавлення – 3,8 °С, відносна щільність рідкої фази (d^{20}_4) – 1,104 кг/м³, теплота випару при температурі 25 °С – 45,46 кДж/моль. Температура максимальної щільності 11,6 °С. Важка вода сповільнює біологічні процеси, пригнічує живі організми.

Існує напівважка вода, у молекули якої лише один атом водню заміщений дейтерієм DHO , а також надважка вода T_2O , що містить замість 1H радіоактивний ізотоп 3H . Надважка вода має температуру кипіння 104 °С, замерзає при 4 – 9 °С, має щільність 1,33 г/см³. Вченими відкрито 48 різновидів важкої води, з яких 39 радіоактивні. Кількість різновидів важкої води може бути збільшена, якщо врахувати наявність в природі крім ^{16}O ще ^{17}O та ^{18}O , які здатні створювати важкокисневу воду. Крім того, відомі штучні ізотопи кисню, які мають атомну масу 13, 14, 15, 19 та 20. [1, 4].

Електрохімічна технологія води є одним з основних методів одержання важкої води, хоча вона досить енергоємна, тому вартість важкої води оцінюється на рівні 210 доларів за 1 кг. В основу процесу покладена властивість важкої води

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

концентруватися в електроліті за рахунок меншої швидкості електрохімічного розкладання D₂O у порівнянні зі звичайною водою. Для зменшення енерговитрат на одержання важкої води можна застосувати подвійне виморожування річної води, яке дозволяє збільшити вміст D₂O та HDO. У важкої води реакторного типу частка дейтерію в суміші складає 99,8 % атомних, а вміст тритію в межах 4 – 400 МБк/кг, хлоридів не більше 0,1 мг/кг. Електропровідність важкої води не повинна перевищувати 5·10⁻⁴ См/м, окисненість води (за KMnO₄) не більш як 10 мг/кг. В процесі виробництва важкої води одночасно створюється вода з зниженим вмістом ізотопу дейтерію (менше 10⁻³ %)[4].

Сірководень, розчинений в воді Чорного моря на глибині більш як 200 м, розглядається як потенційне джерело для одержання водню шляхом електролізу. Сірководень можна розкласти за реакцією $H_2S = H_2 + S$, $\Delta H = 0,2$ еВ моль H₂. Енерговитрати на виробництво водню шляхом електролізу сірководню складають 0,85 — 1,0 кВт·год/м³, в той час як для розкладання води потрібно 7,8 кВт·год/м³ H₂. Проте проблема полягає у необхідності встановлення електролізера на глибині 400 м.

Вміст дейтерію в глибинних шарах води Чорного моря на два порядки вище ніж в світовому океані.

Водень і кисень, що одержуються шляхом електрохімічного розкладання води мають досить високу чистоту. Концентрація водню вищого сорту повинна бути не менше 99,5 % об. Водень є сировиною, що знаходить широке і різноманітне застосування в народному господарстві. Світове виробництво водню складає понад 35 млн. т/рік, при цьому більше половини обсягу усього виробленого водню використовується у виробництві синтетичного аміаку. Водень застосовують при синтезі метанолу, у процесах гідрокрекінгу і гідроочищення нафтопродуктів, при зварювальних роботах. У перспективі очікується зростання промислових потреб водню, а також ріст його споживання внаслідок розвитку нових областей промисловості. Прогнозуються в майбутньому, у зв'язку з вичерпанням не відновлювальних джерел енергії —

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

природного газу, нафти, вугілля, одержувати водень на атомних електростанціях шляхом електрохімічного розкладання води з наступним використанням в якості носія енергії на транспорті, теплових станціях, в хімічній промисловості. Водень розглядається як джерело для накопичення, передачі і використання енергії. Пропонуються в вищих навчальних закладах створити кафедри водневої енергетики. Водень і вода відносяться до невичерпних джерел енергії в майбутньому.

Електролітичний кисень використовується в машинобудуванні, у чорній і кольоровій металургії, хімічній промисловості (виробництво азотної, сульфатної, оцтових кислот, формальдегіду й ін.). Важка вода знаходить застосування в ядерних реакторах як сповільнювач нейтронів і теплоносія, використовується при одержанні D_2 , як розчинник у спектроскопії. Вона є перспективним компонентом палива термоядерних реакторів, тому що енергія 1 кг дейтерію, що вивільняється в процесі термоядерного синтезу, еквівалентна енергії, отриманої при спалюванні 10 тис. тонн вугілля. Важка вода використовується в якості ізотопного індикатора в хімії і біології. Сучасні електролізні технології дозволяють одержувати важку воду із вмістом дейтерію 99,995 %.[1,4,11,13].

1.2 Опис технологічної схеми електролізу води

Технологічна схема електролізу води включає: вузол готування електроліту; стадію очищення води на механічному і іонообмінному фільтрах; відділення електролізу із системами охолодження і циркуляції електроліту, регулювання рівня електроліту і підтримки рівного тиску газів в комірці; стадії сушки й очищення водню та кисню.

На рис. 1.1 приведена технологічна схема одержання водню і кисню електролізом води. [1]

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Робочий розчин електроліту готують розчиненням твердого лугу з барабанів 1 у баці 2. Отриманий розчин направляють у ємність 3 для коректування концентрації лугу і подають у електролізер 21. Для послаблення корозії сталі в електроліт вводять 2 – 3 кг/м³ K₂Cr₂O₇.

Вода, очищена від механічних домішок на фільтрі 4, направляється послідовно в колони 6, 7, заповнені катіоно- і аніонообмінною смолою відповідно, де проводиться глибоке очищення від домішок, і самопливом надходить у збірник 9, звідки насосом перекачується в живильний бак 10 і через промивник газу подається в електролізер 21.

Водень і кисень, що утворюються в процесі електролізу, у колонках 20 відокремлюються від циркулюючого розчину електроліту і надходять у промивачі — регулятори тиску газів 18 і 19, у яких газу охолоджуються і відмиваються від лугу.

З промивачів газу направляються через клапанні регулятори тиску 17 споживачу. При необхідності електролізні газу піддають додатковому очищенню. На насадкових фільтрах 11, заповнених скляною ватою, газу очищують від лужного туману. Очищення водню від домішки кисню проводять у контактному апараті 12 на нікель-алюмінієвому чи нікель-хромовому каталізаторах при 100 – 130 °С. Очищення кисню від домішки водню здійснюють у контактному апараті 13, заповненому платинованим азбестом, платиною, нанесеною на оксид алюмінію, чи гопкаліптом. Очищені газу подають у холодильники 14 і після охолодження передають на сушку в осушувальні колони 15, заповнені силікагелем чи оксидом алюмінію. Осушені газу через ресивери 16 направляють споживачам.

Електролітичний водень повинний відповідати наступним вимогам: вміст Н₂ – не менше 99,7 % об., вміст О₂ – не більше 0,3 % об., вологість газу не більше 25·10⁻³ кг/м³ (при атмосферному тиску). Електролітичний кисень повинен містити не більше 0,7 % об. водню.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Іонообмінні смоли в колонах з фільтрами 6 і 7 піддають періодичній регенерації. Катіонообмінну смолу в колоні 6 промивають 5 – 10%-вим розчином соляної кислоти з ємності 5, а аніонообмінну в колоні 7, 5 – 10% - вим розчином лугу з ємності 8.

Виробництво водню і кисню електролізом води характеризується високим рівнем автоматизації. Відділення електролізу оснащено приладами для автоматичного контролю і регулювання процесу, а також системою ручного блокування. Струмове навантаження регулюється в залежності від заданої продуктивності. подача охолодженої води здійснюється автоматично, при цьому параметром, за яким виконується регулювання, є температура в різних точках електролізера. При відхиленні рівня електроліту від регламентованих норм відбувається автоматичне відключення електролізера. Автоматичне відключення можливо також при підвищенні тиску газів, збільшенні температури електроліту і зниженні чистоти одного з газів. Останнє здійснюється сигналом від автоматичних газоаналізаторів, що безупинно контролюють якість електролізних газів.

1.3 Основні технологічні параметри для автоматизації електролізу води

У процесі електролізу води для автоматизації використовуються технологічні параметри (рис.1.1), які безперервно контролюються й регулюються, щоб забезпечити стабільність, ефективність і безпеку процесу. Ось основні з них [1, 4, 11, 13]:

1) Електричні параметри

- Напруга на електролізері (U) – зазвичай в межах $1.6 \div 2.2$ В на комірку, контролюється для підтримки ефективності процесу.
- Сила струму (I) – визначає продуктивність електролізу (пряма залежність від об'єму водню й кисню).
- Щільність струму (J) – струм на одиницю площі електрода, критично важливий для уникнення перегріву і зносу електродів.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

2) Температура

- Температура електроліту – оптимально 60÷90 °С (до 160 °С при підвищеному тиску); регулюється через системи охолодження.
- Температура газів – важливо для подальшого сушіння та очищення.

3) Рівень електроліту

Рівень підтримується автоматично для запобігання оголенню електродів або переповненню та контролюється в обох просторах – анодному й катодному.

4) Склад і концентрація електроліту

Концентрація лугу (наприклад, КОН або NaOH) — впливає на провідність і продуктивність; контролюється приготуванням і дозуванням. РН електроліту – індикатор стабільності середовища.

5) Тиск газів

В електролізерах під тиском (1÷4 МПа) — підтримується тиск кисню і водню та їх баланс. Автоматичні регулятори тиску запобігають його перевищенню або розбалансуванню.

6) Дебіт (витрата) газів

Об'єм виробленого водню і кисню — використовується для обрахунку ефективності процесу та керування живленням.

7) Склад газів (чистота)

Газоаналізатори вимірюють вміст:

- Н₂ у кисні (макс. 0,7% об.)
- О₂ у водні (макс. 0,3% об.)
- Вміст вологи (наприклад, ≤ 0,025 кг/м³ для водню).

Якщо параметри виходять за межі — автоматичне очищення або зупинка системи.

8) Температура охолоджуючої води

Забезпечує стабільну температуру в електролізері, особливо при інтенсивному виділенні газів.

										Арк.
										18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ					

Зведемо в таблицю 1.3 основні технологічні параметри, які використовуються для автоматизації процесу електролізу води, з одиницями вимірювання та типовими діапазонами

Таблиця 1.3 – Технологічні параметри процесу електролізу води

№	Параметр	Одиниця виміру	Типовий діапазон	Примітка
1	Напруга на електролізері (U)	В (вольт)	1,6 – 2,2 В на комірку	Залежить від типу електролізера
2	Сила струму (I)	А (ампер)	До кількох кА	Визначає продуктивність
3	Щільність струму (J)	кА/м ²	1 – 30 кА/м ²	Оптимум залежить від конструкції
4	Температура електроліту	°С	60 – 90 °С (до 160 °С під тиском)	Регулюється охолодженням
5	Температура газів	°С	20 – 40 °С після охолодження	До осушувачів
6	Рівень електроліту	% / мм / см	В межах, що не допускають оголення електродів	Контролюється диференційними датчиками
7	Концентрація лугу (КОН/NaOH)	% (масова)	20 – 30 %	Залежить від електролізера
8	pH електроліту	–	>12	Лужне середовище
9	Тиск водню	МПа	0,1 – 4,0 МПа	При електролізі під тиском
10	Тиск кисню	МПа	0,1 – 4,0 МПа	Має бути зрівноваженим із тиском Н ₂
11	Витрата газів (Н ₂ / О ₂)	м ³ /год	Від кількох до сотень м ³ /год	В залежності від масштабу
12	Вміст Н ₂ у кисні	% об.	Не більше 0,7 %	Вимоги до чистоти
13	Вміст О ₂ у водні	% об.	Не більше 0,3 %	Теж вимоги до чистоти
14	Вологість водню	кг/м ³	Не більше 0,025 кг/м ³	Після сушіння
15	Вологість кисню	кг/м ³	В аналогічних межах	Після сушіння
16	Температура охолоджуючої води	°С	10 – 30 °С	Залежить від системи охолодження

1.4 Електроліз води під тиском

У процесі електролізу з 1 м³ води утворюється 1242 м³ Н₂ і 621 м³ О₂[11]. Ця обставина дозволяє збільшити тиск електролізних газів приблизно в 1800 разів і тим самим істотно спростити технологічну схему за рахунок виключення з неї

									Арк.
									19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ				

газгольдерів і компресорів. Тиск в електролізних камерах зменшує напруга електролізу і відповідно знижується витрата електроенергії. Залежність напруги на окремій комірці електролізера від тиску при різній щільності струму представлена на рис. 1.2.

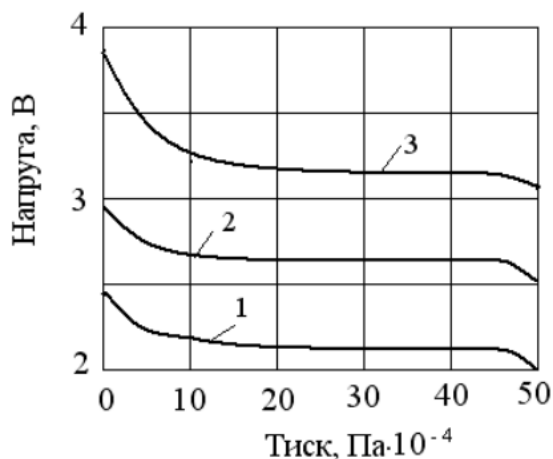


Рисунок 1.2 – Залежність напруги на окремій комірці електролізера від тиску газів при різній щільності струму, кА/м² : 1–2,5; 2–5,0; 3–10,0

Оборотні потенціали електродів і напруга розкладання при підвищенні тиску повинні зростати:

P , МПа 0,1; 1,0; 10,0; 100,0

ΔU_p , В (при 80 °С) 0; 0,052; 0,104; 0,156

Зростання напруги розкладання пояснюється залежністю від тиску значень електродних потенціалів через зміну розчинності газів. При зміні тиску від P_1 до P_2 значення оборотного електродного потенціалу змінюється для катода на величину [1,4]:

$$\Delta\varphi_{\text{к}} = \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{2,\text{H}_2}}{P_{1,\text{H}_2}},$$

для анода на величину:

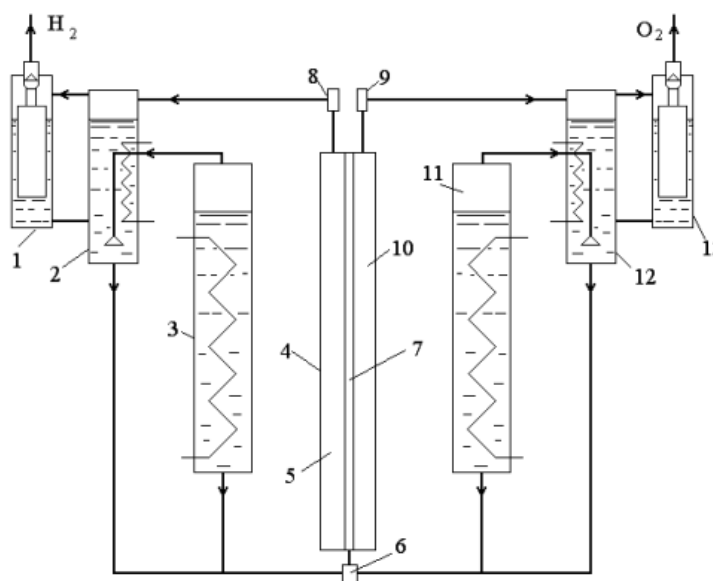
$$\Delta\varphi_{\text{а}} = \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{2,\text{O}_2}}{P_{1,\text{O}_2}},$$

а для теоретичної напруги розкладання на величину:

$$\Delta U_p = \Delta\varphi_{\text{а}} - \Delta\varphi_{\text{к}} = \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{2,\text{O}_2}^{1/2} \cdot P_{2,\text{H}_2}}{P_{1,\text{O}_2}^{1/2} \cdot P_{1,\text{H}_2}},$$

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

при цьому скидання газу в атмосферу виключено. Дана система проста у виконанні й обслуговуванні, забезпечує достатню точність регулювання, надійна.



1 – регулятор тиску водню; 2 – промивач водню; 3 – холодильник католіту; 4 – електролізер; 5 – катодний простір; 6 – живильний канал; 7 – діафрагма; 8 – водневий газовий канал; 9 – кисневий газовий канал; 10 – анодний простір; 11 – холодильник аноліту; 12 – промивач кисню; 13 – регулятор тиску кисню

Рисунок 1.3 – Схема системи підтримки постійного рівня електроліту і рівності тиску обох газів у електролізері

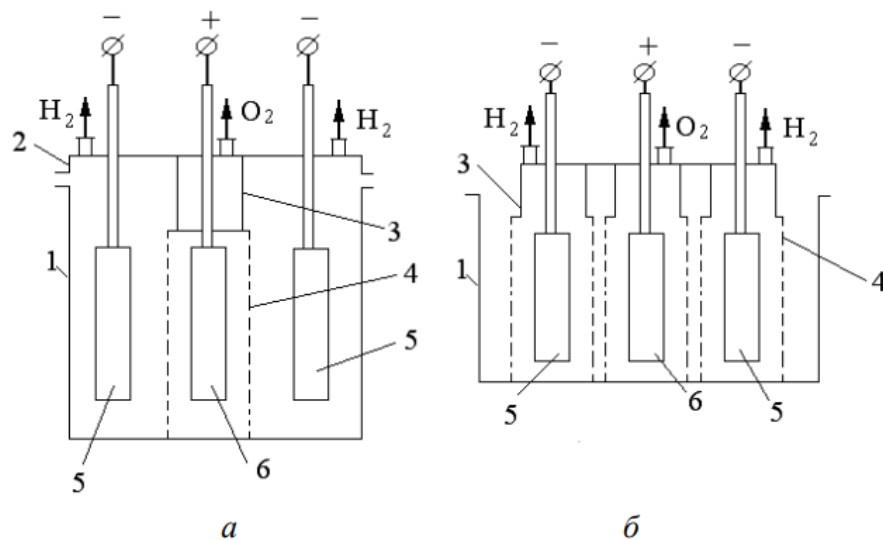
При необхідності підтримки постійної різниці тиску на лініях відводу кисню і водню встановлюють пружинні перепускні клапани.

1.5 Конструкції електролізерів для електролізу води

Електролізери для одержання водню і кисню відрізняються один від одного за способом включення електродів, за устроєм корпусу, за способом поділу газів, а також за тиском газів, що одержуються [1,4,13]. За способом включення електродів електролізери поділяються на монополярні і біполярні. Монополярні електролізери включають комплект монополярних електродів (анодів і катодів),

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

електрично з'єднаних паралельно. Біполярні електролізери містять набір біполярних електродів, що поміщені між монополярними електродами. У цьому випадку біполярні електроди включені послідовно. Біполярні електроди характеризуються тим, що в них одна сторона працює як анод, а інша є катодом. За устроєм корпусу та способом поділу газів електролізери підрозділяються на ящикові і фільтр-пресні. На рис. 1.4 представлені схеми монополярних електролізерів ящикового типу. На рис. 1.5 наведені схеми біполярних електролізерів ящикового і фільтр-пресного типів. У електролізерів ящикового типу кожен електрод оснащений дзвоном, розміщеним над електродом, у який збирається газ, що утворюється.



1 – корпус електролізера; 2 – кришка; 3 – резервуар для збору газу; 4 – діафрагма; 5 – катоди; 6 – анод

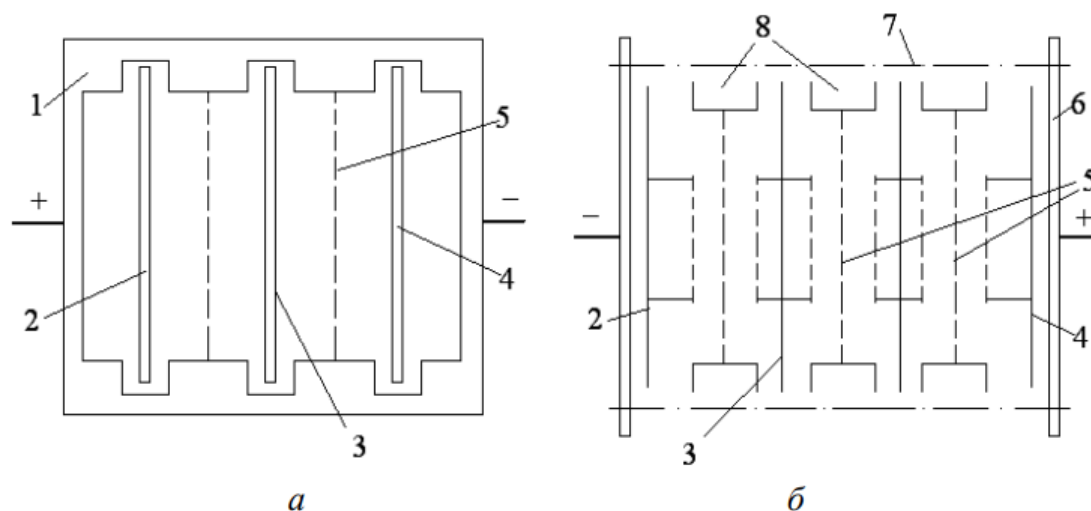
Рисунок 1.4 – Схема монополярного електролізера ящикового типу з герметичною кришкою (а) і з відкритим корпусом (б)

Електролізери фільтр-пресного типу містять електролітичні комірки, у яких анодний і катодний простори розділені діафрагмою чи іонообмінною мембраною. Електролізери з комбінованим способом поділу газів оснащені дзвонами і діафрагмами. Для одержання водню і кисню експлуатуються біполярні фільтр-

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

пресні електролізери наступних типів: ФВ-500, СЕУ-4М, СЕУ-20, СЕУ-40, ЕФ-12/6-10, ЕФ-24/12-10, БЕУ-250.

За тиском газів, що одержуються, електролізери можна розділити на пристрої, які працюють при атмосферному тиску, і пристрої, що дозволяють одержувати гази з тиском $1 \div 4$ МПа [1,4,13].



1 – корпус електролізера; 2 – анод; 3 – біполярний електрод; 4 – катод; 5 – діафрагма; 6 – стяжна плита; 7 – стяжний болт; 8 – рама діафрагми

Рисунок 1.5 – Схеми біполярних електролізерів ящикового (а) і фільтрпресного типу (б)

За тиском газів, що одержуються, електролізери можна розділити на пристрої, які працюють при атмосферному тиску, і пристрої, що дозволяють одержувати гази з тиском $1 \div 4$ МПа.

З метою зменшення втрат напруги в розчині електроліту за рахунок зниження його газонаповнення розроблено цілий ряд конструкцій електродів: електроди з виносними робочими елементами — сітчасті, перфоровані чи просічні, подвійні електроди — перфоровані чи просічні, жалюзійні, пластинчасті й ін. У промисловості найбільше поширення одержали біполярні електроди фільтр-пресного типу із виносними робочими елементами.

У процесі роботи електроліт, що містить пухирці газів, що виділяються, піднімається нагору. З верхньої частини електролізної комірки гази, захоплюючи

									Арк.
									24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ				

за собою рідину, надходять по штуцерах у газові канали електролізера. Частина електроліту, що містить менше газових пухирців і має велику щільність, направляється до нижньої частини комірки між основним і виносними аркушами, сприяючи циркуляції електроліту в комірці.

Електроліт, захоплений газами в канали, відокремлюється від них і самопливом направляється в холодильники середньої камери. Охолоджений електроліт фільтрується, змішується з водою, що надходить на розкладання, і направляється в живильний канал електролізера. У такий спосіб здійснюється природна зовнішня циркуляція електроліту.

Найбільше промислове поширення в закордонних країнах одержали електролізери фірм «Де Нора», «Демаг», «Лурги». Деякі характеристики електролізерів цих фірм у порівнянні з вітчизняними електролізерами приведені в табл. 1.3. [1]

Таблиця 1.3 – Характеристики електролізерів фільтр-пресного типу для одержання водню і кисню

Електролізер	Навантаження	Напруга на комірці, В	Щільність струму, кА/м^3	Витрата електроенергії, $\text{кВт}\cdot\text{год/м}^3 \text{H}_2$	Число комірок, шт
Електролізери, які працюють на атмосферному тиску					
ФВ-500	7,5 – 11,0	2,15 – 2,39	2,5 – 3,7	5,6	до 164
«Де Нора» (Італія)	1 – 10	2,12 – 2,16	-	4,8 – 4,9	10 – 100
«Демаг» ФРН	0,15 – 8,5	2,0 – 2,1	-	4,45 – 4,5	50 – 100
ТЕ(ФРН)	2,4 – 3,0	2,12 – 2,16	-	4,8 – 4,9	-
Електролізери, які працюють на підвищеному тиску					
ЕФ	0,61	2,3	1,56	5,6	50-100
БЕУ-250	6,0	2,05 – 2,08	2,0	4,9 – 5,0	100

1.6 Електролізери для роботи під тиском

Електролізери СЕУ фільтр-пресного типу розраховані для роботи під тиском 1 МПа. Вони відрізняються невеликою рушійною силою циркуляції електроліту. Технічна характеристика деяких електролізерів типу СЕУ, наведена в табл. 1.4.

Електролізери типу ЕФ експлуатуються при тиску 1-1,5 МПа. Чистота одержуваного водню досягає 99,8 %, кисню – 99,6 %. [1]

Таблиця 1.4 – Технічна характеристика деяких електролізерів типу серії СЕУ

Показники	СЕУ – 4М	СЕУ – 20	СЕУ – 40
Сила струму, А	330	1000	1000
Напруга, В	72	100	200
Тиск, МПа	1	1	1
Температура, °С	80 ± 5	85 ± 5	85 ± 5
Потужність, м ³ /год:			
Водню	4	20,5	41
Кисню	2	10,25	20,5
Габаритні розміри, мм:			
довжина	1700	2400	4100
ширина	610	1060	1060
висота	830	1780	1780
Маса електролізера, кг	1290	4720	7435

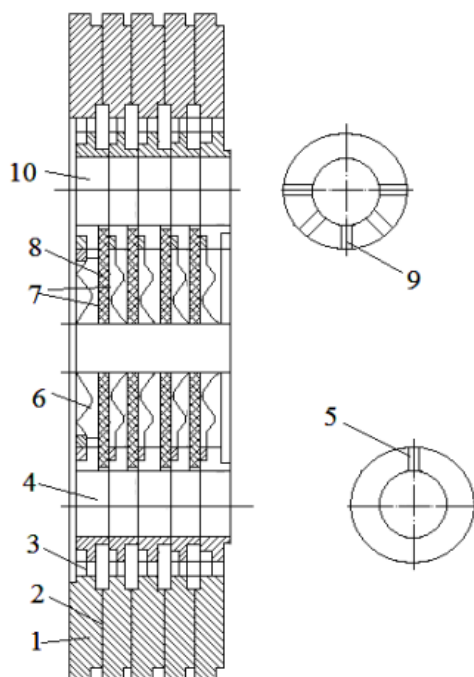
Електролізер БЕУ–250 має конструкцію, що включає шість автономних блоків на навантаження 1 кА. Така конструкція дозволяє відключати і ремонтувати окремий блок без зупинки усього електролізера.

Електролізер Зданского-Лонца, призначений для роботи під тиском 3-4 МПа, розроблений фірмою «Лурги» (ФРН). Конструкція комірки електролізера Зданского-Лонца представлена на рис. 1.6.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Електролізер Зданського-Лонца містить внутрішні канали для збору газів і для розподілу циркулюючого електроліту і живильної води [1]. У цьому електролізері застосована примусова циркуляція електроліту за допомогою відцентрового насоса. Електролізні комірки включають гофровані електроди з нікельованої сталі, на які поміщені електродні сітки. Термін служби діафрагми досить високий за рахунок того, що вона затиснута між електродними сітками.

Відомі також і інші конструкції електролізерів для одержання водню і кисню – з пористими і полімерними діафрагмами та іонообмінними мембранами.



1 – рама діафрагми; 2 – прокладка; 3 – отвір у гофрованому електроді; 4 – живильний канал; 5 – канал для подачі електроліту в комірку; 6 – гофрований електрод; 7 – електродна сітка; 8 – азбестова діафрагма; 9 – канали для відводу газів з електролізних комірок; 10 – газовий канал

Рисунок 1.6 – Схема електролізної комірки електролізера Зданського-Лонца

1.7 Напрямки удосконалення автоматизації процесу електролізу води

1) Розширений моніторинг і контроль у реальному часі

- Впровадження інтелектуальних сенсорів, які в реальному часі відстежують: температуру, тиск, рівень електроліту, напругу, склад газової суміші.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

- Інтеграція з SCADA-системами або IoT-платформами для дистанційного нагляду, аналізу та керування процесом.

2) Автоматичне регулювання складу електроліту

- Додавання систем автоматичної дозування реагентів (лугів, води, інгібіторів корозії) з урахуванням концентрації та температури.
- Автоматична регенерація іонообмінних смол без участі оператора.

3) Оптимізація енерговитрат

- Застосування адаптивних алгоритмів керування струмом і напругою в залежності від робочих умов (температура, тиск, поточний вихід газів).
- Використання інтелектуальних перетворювачів струму з функціями енергозбереження.

4) Прогнозна діагностика та обслуговування

- Використання машинного навчання для прогнозування зносу електродів, забруднення фільтрів, деградації діафрагм тощо.
- Планове техобслуговування на основі аналітики, а не просто за графіком 5.

5) Безпека процесу

- Встановлення газоаналізаторів з інтелектуальними сигналами тривоги при відхиленнях у складі водню/кисню.
- Інтеграція з аварійними системами: автоматичне відключення при загрози вибуху або порушенні тиску.

6) Цифрові двійники процесу

- Створення віртуальних моделей (digital twins) для моделювання та оптимізації процесу в режимі симуляції.
- Можливість тестувати зміни в алгоритмах керування без втручання у фізичне обладнання.

Висновки до розділу

У цьому розділі проведено комплексний аналіз технологічного процесу електролізу води з метою одержання водню та кисню. Розглянуто фізико-хімічні

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

властивості основних продуктів процесу – водню та кисню, включаючи їхні ізотопні форми, вибухонебезпечність сумішей та використання у різних галузях промисловості.

Проаналізовано структуру технологічної схеми електролізу води, зокрема основні стадії підготовки електроліту, очищення води, виробництва газів, їхнього очищення, сушіння та подачі до споживачів. Відзначено високий рівень автоматизації сучасних електролізних установок.

Окрему увагу приділено електролізу води під тиском, що дозволяє знизити витрати електроенергії, зменшити кількість допоміжного обладнання та підвищити ефективність процесу. Представлено типи електролізерів, що використовуються в промисловості, їх конструктивні особливості та параметри роботи.

Також розглянуто перспективні напрямки вдосконалення процесу електролізу: використання новітніх матеріалів, твердих і полімерних електролітів, підвищення температури і тиску, а також комбіновані методи, що дозволяють зменшити енерговитрати.

Таким чином, електроліз води є перспективним методом одержання водню й кисню високої чистоти, а постійне удосконалення обладнання й технології сприяє підвищенню економічної доцільності його широкого застосування, зокрема в умовах розвитку водневої енергетики та переходу до альтернативних джерел енергії.

Загалом, комплексна автоматизація процесу електролізу води сприяє досягненню стабільної якості водню та кисню, зниженню енерговитрат і створенню передумов для широкого впровадження водневої енергетики.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

2 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ОДЕРЖАННЯ ВОДНЮ І КИСНЮ З ВОДИ

2.1 Теоретичні основи електротехнології води

Процес електролізу води ґрунтується на електрохімічній реакції розкладу молекул води на складові елементи – водень та кисень – під дією електричного струму. Для забезпечення ефективної роботи системи автоматизації необхідно розробити математичну модель, яка описує основні фізико-хімічні, електричні та теплові процеси, що відбуваються під час електролізу [1,4,11].

Процес електролітичного розкладання води описується наступним рівнянням:



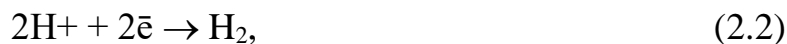
Для роздільного одержання водню і кисню використовують електролізери з діафрагмами чи мембранами, що розділяють катодний і анодний простір. Через низьку електропровідність чистої води ($4,41 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ при температурі 18°C) її електролітичне розкладання проводять у присутності фонового електроліту. При цьому з погляду здешевлення електролізних установок і спрощення їхнього обслуговування найбільш придатними сполуками є розчини гідроксидів натрію чи калію.

У спеціальних електролізерах іноді використовують розчини деяких солей чи кислот.

Дистильована чи знесолена вода, що використовується для приготування розчину електроліту, повинна містити не більш $1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ заліза, $2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ хлоридів і $3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ сухого залишку. У розчинах лугів, які застосовуються для електролітичного розкладання води, не повинні міститися домішки, що вступають в електродні реакції і приводять до корозії електролізера. У процесі електролізу має місце нагромадження домішок, що роблять помітний шкідливий вплив. Іони хлору викликають руйнування анодних матеріалів. Нагромадження великої кількості карбонат-іонів, що утворюються при розчиненні в електроліті

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

діоксиду вуглецю з атмосферного повітря, приводить до збільшення електричного опору електроліту і, отже, підвищує напругу на електролізері. На катоді електролізера можуть відновлюватися іони заліза, і утворити так названу залізну "губку". Катодний осад може досягти діафрагми, що відокремлює катодний простір електролізера від анодного, і за рахунок відновлення присутнього в ній гідроксиду заліза привести до металізації діафрагми. У результаті в анодному просторі електролізера можливе виділення водню й утворення вибухонебезпечної суміші газів. Для того, щоб виключити влучення в розчин електроліту хлоридів, заліза й інших домішок, розчин готують на основі гідроксидів натрію чи калію високого ступеня чистоти. Розчин електроліту, що використовується в установках для електролізу води, містить 16÷20 % NaOH або 25÷30 % KOH. Дані концентрації нижче, ніж це необхідно для забезпечення максимальної електропровідності, однак ця обставина дозволяє зменшити корозійну активність розчину і трохи знизити вартість електроліту. Катодний процес у залежності від кислотності середовища може бути описаний наступними сумарними рівняннями: у кислому середовищі:



у лужному середовищі:



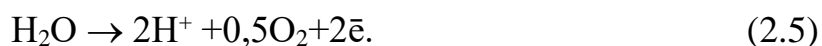
У кислих розчинах відбувається розряд іонів водню з утворенням атомного водню, який адсорбується на поверхні катода. Процес утворення молекулярного водню з атомного може протікати за каталітичним або електрохімічним механізмами. За каталітичним механізмом два адсорбованих атоми водню взаємодіють на поверхні катода й утворюють молекулу водню (процес рекомбінації). За електрохімічним механізмом процеси розряду іонів H^+ і виділення молекулярного водню протікають одночасно:



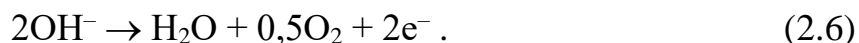
де $(\text{H} - \text{Me})$ – адсорбовані на катоді атоми водню.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

У лужному середовищі концентрація H^+ дуже мала і процес здійснюється шляхом прямого розряду молекул води з утворенням атомного водню і гідроксид-іонів з наступною рекомбінацією атомного водню. Анодний процес, так само як і катодний, залежить від кислотності середовища. У кислому середовищі:



У лужному середовищі:



У кислих розчинах підвід іонів OH^- до анодної поверхні є стадією, що лімітує, і на аноді відбувається прямий розряд молекул води. У лужних розчинах надходження гідроксид-іонів до поверхні анода не ускладнене й спостерігається пряме окислювання іонів OH^- з утворенням кисню і води.

Рівноважні електродні потенціали для даного випадку залежать від величини рН розчину електроліту, температури, тиску і можуть бути виражені наступними рівняннями:

$$\varphi_k = - 0,059 \text{ рН}; \quad (2.7)$$

$$\varphi_a = 1,23 - 0,059 \text{ рН}, \quad (2.8)$$

де φ_k , φ_a – рівноважні потенціали катода й анода, В. Різниця ($\varphi_k - \varphi_a$) визначає величину теоретичної напруги розкладання води, що у стандартних умовах складає 1,23 В.

Теоретичну напругу розкладання води (U_p) можна визначити за зміною ізобарно-ізотермічного потенціалу процесу утворення води з елементів у стандартних умовах:

$$U_p = \Delta G^\circ_{298} / (zF) = 237,19 \cdot 10^3 / 92 \cdot 9650 = 1,23 \text{ В}, \quad (2.9)$$

де G°_{298} – ізобарно-ізотермічний потенціал у стандартних умовах, Дж/моль;

F – число Фарадея;

z – число електронів, що беруть участь у реакції.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Величина U_p не залежить від рН, але змінюється при зміні температури і тиску. Наприклад, при підвищенні температури від 25 до 80 °С U_p знижується від 1,23 до 1,18 В.

На практиці електроліз води реалізується при більш високій напрузі. Дана обставина зв'язана з тим, що крім витрат електроенергії на проведення власне електрохімічного розкладання води, необхідно затрачати електроенергію на подолання електричного опору електроліту, діафрагми, електродів, контактів, а також додаткового опору, обумовленого концентраційною і дифузійною поляризацією, перенапругою процесів виділення водню і кисню. Баланс напруги на комірці для електролізу води можна представити у виді суми наступних складових [1,4,11]:

$$U = U_p + \Delta\varphi_a - \Delta\varphi_k + \Delta\varphi_{kn} + \Delta\varphi_{dn} + \Delta U_{el} + \Delta U_d + \Delta U_{мет} , \quad (2.10)$$

де U – напруга на комірці; $\Delta\varphi_a$, $\Delta\varphi_k$ – перенапруга виділення кисню на аноді і водню на катоді; $\Delta\varphi_{kn}$, $\Delta\varphi_{dn}$ – концентраційна і дифузійна поляризації; ΔU_{el} , ΔU_d — втрати напруги в електроліті і діафрагмі. Перенапруги виділення водню і кисню впливають на витрати електроенергії в процесі електролізу води. У табл. 2.1 представлені значення перенапруги виділення H_2 і O_2 при електролізі лужних розчинів в умовах, близьких до умов промислової експлуатації.

У сучасних промислових електролізерах електроди виконуються з вуглецевої сталі, при цьому аноди додатково покривають шаром нікелю. Катоди можуть бути активовані шляхом осадження на них нікелю, що містить сірку чи метали платинової групи.

У процесі електролізу концентрація іонів лужного металу в катодному просторі зростає, а в анодному відповідно знижується за рахунок їхнього переносу до негативного катода. В анодному просторі електролізера через розряд гідроксид-іонів з утворенням кисню знижується концентрація іонів OH^- . В підсумку обидва фактори обумовлюють різні концентрації лугу в анодному і катодному просторах і виникнення концентраційної поляризації $\Delta\varphi_{kn}$. Величину концентраційної поляризації можна визначити з виразу:

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

$$\Delta\varphi_{\text{кп}} = \frac{RT}{zF} \ln \frac{C_1}{C_2}, \quad (2.11)$$

де C_1 і C_2 – концентрація лугу в катодному й анодному просторі електролізера відповідно.

Таблиця 2.1 – Перенапряга виділення водню і кисню при електролізі 16 %-го розчину гідроксиду натрію [1]

$\Delta\varphi$, мВ	Матеріал електроду	При температурі 18°C та щільності струму, кА/м ²		При температурі 80 °C та щільності струму, кА/м ²		
		1,0	2,0	0,5	1,0	2,0
$\Delta\varphi_{\text{к}}$	Платина	-80	-95	-30	-45	-55
	Гальванічноосаджений нікель з включенням сірки	-190	-210	-60	-80	-100
	Нікель (катаний)	-510	-550	-390	-430	-470
	Сталь 3	-390	-450	-180	-220	-270
	Залізо нікельоване	-490	-560	-240	-260	-300
$\Delta\varphi_{\text{а}}$	Гальванічноосаджений нікель з включенням сірки	385	420	220	240	265
	Сталь, легована нікелем (після піскоструйної обробки)	440	480	275	290	310
	Нікель (катаний)	820	850	360	400	430
	Гладка платина	1280	1340	-	-	-

При температурі 80 °C й відношенні $C_1 / C_2 = 1,1$ $\Delta\varphi_{\text{кп}} = 3$ мВ.

Дифузійна поляризація, що виникає на межі між анолітом і католітом через розходження в числах переносу аніона і катіона, невелика і складає при температурі 80 °C та $C_1 / C_2 = 1,1$ приблизно 1 мВ. Втрати напруги в електроліті і діафрагмі можна визначити з рівнянь:

$$\Delta U_{\text{ел}} = i \cdot \rho \cdot \delta_{\text{ме}} \cdot K_{\text{з}}; \quad (2.12)$$

$$\Delta U_{\text{д}} = i \cdot \rho \cdot \delta \cdot K_{\text{д}}, \quad (2.13)$$

де i – щільність струму, А/м²; ρ – питомий опір електроліту, Ом·м; $\delta_{\text{ме}}$ – відстань між робочими поверхнями електродів, м; $K_{\text{з}}$ – коефіцієнт збільшення питомого

опору електроліту за рахунок його газонаповнення; δ – товщина діафрагми, м; $K\delta$ – коефіцієнт збільшення питомого опору діафрагми за рахунок її пористості і звивистості її пір, K_d . Коефіцієнти K_r і K_d приблизно дорівнюють $2,0 \div 2,5$. Питомий опір розчину електроліту можна визначити за даними, представленими у табл. 2.2 і 2.3.

Таблиця 2.2 – Питомий опір водних розчинів гідроксиду натрію, мОм·м

Температура, °C	Концентрація розчину, % мас.				
	15	20	25	30	35
50	15,75	15,08	15,83	17,80	19,50
70	11,72	10,88	10,88	11,66	12,00
75	11,62	10,18	10,10	10,50	11,03
80	10,46	9,56	9,41	9,69	10,11

Втрати напруги в струмовідводах електролізера і його металевих частинах і контактах складають близько 100 мВ.

Таблиця 2.3 – Питомий опір водних розчинів гідроксиду калію, мОм·м

Температура, °C	Концентрація розчину, % мас.			
	20	25	30	35
50	12,50	11,04	10,42	10,75
70	9,88	8,65	8,27	8,18
75	9,28	8,20	7,75	7,72
80	8,82	7,90	7,37	7,31

Зразковий баланс напруги на окремій комірці електролізера ФВ-500 приведений у табл. 2.4 (щільність струму – $4,25 \text{ кА/м}^2$, електроліт – 27,2 % розчин КОН) [1,4,11].

Таблиця 2.4 – Баланс напруги на осередку електролізера ФВ-500 (у дужках зазначений внесок даної складової напруги в загальну напругу, %)

Напруга, В	Температура, °C		
	90	95	100
$U = \varphi_k - \varphi_a$	1,172 (47,9)%	1,168 (49,3) %	1,164 (49,4)%
$\Delta\varphi_k - \Delta\varphi_a$	0,888 (36,3)%	0,818 (34,5)%	0,798 (33,9)%
$\Delta U_{\text{ел}} + \Delta U_{\text{Д}}$	0,286 (11,7)%	0,283 (12,0)%	0,292 (12,4)%
$\Delta U_{\text{мет}}$	0,1 (4,1)%	0,1 (4,2)%	0,1 (4,2)%
U	2,449 (100)%	2,369 (100)%	2,356 (100)%

2.2 Матеріальний баланс електролізу води

Відповідно до закону Фарадея при проходженні через електролізер $I \cdot F$ електрики (96500 А·с/екв., чи 26,8 А·год./екв.) на електродах повинно утворитися по 1 екв. водню і кисню. У дійсності водню і кисню виділяється менше через втрати, що обумовлені розчиненням газів у електроліті з наступним відновленням кисню на аноді й окислюванням водню на катоді, розрядом домішок на електродах, корозією анодів, витоками струму.

Кількість газу, що утворюється під час електролізу, можна визначити за законом Фарадея [4,8]:

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{n \cdot F}$$

де:

m – маса виділеного газу, г,

M – молярна маса (2 г/моль для H_2 , 32 г/моль для O_2),

I – струм, А,

t – час, с,

n – кількість електронів (2 для H_2 , 4 для O_2),

$F = 96485$ Кл/моль – стала Фарадея.

Перехід до об'ємної форми (за нормальних умов) здійснюється через рівняння ідеального газу[4,8]:

$$V = \frac{I \cdot t \cdot R_g \cdot T}{n \cdot F \cdot P}$$

де:

V – об'єм газу, м³,

$R_g = 8.314$ Дж/(моль·К) – універсальна газова стала,

T – температура, К,

P – тиск, Па.

У залежності від конструкції і терміну експлуатації електролізера і діафрагми, а також умов роботи вихід за струмом складає 95÷99 %.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Розрахунок зроблений для випадку, коли протягом 1 години пропускають струм силою 1 кА, а вихід за струмом дорівнює 98 %, об'єм газів приведений до нормальних умов (температура 0 °С, тиск $1,01 \cdot 10^5$ Па).

Матеріальний баланс процесу електролітичного розкладання води приведений у табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Матеріальний баланс електролізу води (у розрахунку на 1000 А·год.)

Найменування потоків	Прихід	Витрати	Втрати
Вода, кг/год	0,0336	0,3293	0,0067
Водень, кг/год	-	0,0366	0,0007
Кисень, кг/год	-	0,2927	0,0060

Питому витрату електроенергії постійного струму на одержання 1 м³ водню і 0,5 м³ кисню можна визначити для нормальних умов за рівнянням:

$$W = \frac{238QU}{V_c} \quad (2.14)$$

де W – питома витрата електроенергії, кВт·год./м³; U – напруга на електролізері, В; V_c – вихід за струмом, %.

2.3 Тепловий баланс електролізера

Електроенергія W , яка використовується на розкладання води W_x , і на перетворення в теплоту електролізу W_T . Для цього випадку рівняння енергетичного балансу [4,8,11]:

$$W = I \cdot U \cdot \tau = W_T + W_x, \text{ кВт·год.}, \quad (2.15)$$

де I – струмове навантаження на електролізері, А; U – напруга електролізу, В; τ – час, год.

Позначимо через U_x напругу, при якій вся електроенергія перетворюється в хімічну енергію газів, що утворюються. Тоді теплота буде визначатися як:

$$I \cdot U \cdot \tau = I \cdot U_x + W_T.$$

Звідси одержимо:

$$W_T = I \cdot \tau (U - U_x). \quad (2.16)$$

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Тепловий ефект процесу спалювання 1 моль H_2 до H_2O (р) при $25\text{ }^\circ\text{C}$ складає 287 кДж/моль . Використовуючи цю величину, можна визначити U_x [4,8,11]:

$$U_x = \frac{\Delta H}{zF} = \frac{287 \cdot 10^3}{2 \cdot 96500} = 1,48\text{ В} \quad (2.17)$$

Розрахувати величину W_T можна за рівнянням:

$$W_T = 3,6 \cdot 10^6 I (U - 1,48), \text{ Дж/год.} \quad (2.18)$$

Теплова енергія W_T , яка витрачається на нагрівання газів, що утворюються, частково випромінюється в навколишнє середовище і витрачається на випар води. Основна частка теплоти, що виділяється, знімається охолодженою водою в холодильнику, через який циркулює електроліт, тим самим забезпечуючи задану температуру електролізу (звичайно близько $95\text{ }^\circ\text{C}$). Кількість теплоти на випар води розраховуємо з виразу:

$$W_{\text{пар}} = 2,15 \cdot 10^6 \frac{P^I}{P - P^I} (V_{O_2} + V_{H_2}) \quad (2.19)$$

де P^I – тиск насиченої пари над розчином електроліту, Па; P – тиск у електролізері, Па; V_{O_2} і V_{H_2} об'єми кисню і водню, що виділилися, $\text{м}^3/\text{год}$.

P' – тиск насиченої пари над розчином електроліту, Па; P – тиск у електролізері, Па; V_{O_2} і V_{H_2} об'єми кисню і водню, що виділилися, $\text{м}^3/\text{год}$.

Тепловий баланс для електролізера ФВ-500 наведений у табл. 2.6 за такими умовами:

- лінійне навантаження – 8 кА ;
- напруга на електролізері – $362,4\text{ В}$;
- число електролізних комірок – 164 ;
- кількість одержуваних H_2 — $537,6\text{ м}^3/\text{год.}$, O_2 – 268 ,

2.4 Моделювання електричного кола електролізера

Електролізер можна розглядати як електричне коло з активним і індуктивним опором. Модель такого кола описується диференціальним рівнянням [4,8,11]:

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

$$U(t) = R \cdot I(t) + L \frac{dI(t)}{dt} \quad (2.20)$$

В операторній формі (перетворення за Лапласом) тобто передавальна функція:

$$W(p) = \frac{I(p)}{U(p)} = \frac{1}{R+Lp} \quad (2.21)$$

де:

R – електричний опір електроліту,

L – індуктивність кола.

Це рівняння є базою для побудови регуляторів струму, що використовуються у системі керування.

Таблиця 2.6 – Тепловий баланс електролізера ФВ-500

Прихід теплоти	ГДж/год	%	Витрати теплоти	ГДж/год	%
Теплота Джоуля-Ленца (W_t)	3,448	99,0		3,194	91,7
З водою			З парою	0,085	2,45
			З киснем	0,012	0,35
			З воднем	0,024	0,7
			Втрати в навколишнє середовище	0,168	4,8
Всього:	3,483	100	Всього:	3,483	100

2.5 Температурна модель процесу

В процесі електролізу утворюється тепло. Температура електроліту може описуватись за допомогою моделі об'єкта з тепловою інерцією [2-4,8,9]:

$$G(p) = \frac{K}{\tau p + 1} \quad (2.22)$$

де:

$G(p)$ – передавальна функція,

K – коефіцієнт підсилення, градуси/Вт,

τ – теплова стала часу,

p – оператор Лапласа.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Ця модель дозволяє розробити систему регулювання температури з використанням ПІ або ПІД-регулятора.

2.6 PID-регулятор в контурі керування

Для автоматичного регулювання температури, струму або тиску може бути використаний PID-регулятор із рівнянням [2-7,9,10]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.23)$$

де:

$u(t)$ – керуючий сигнал,

$e(t)$ – відхилення від заданого значення,

K_p , K_i , K_d – коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференціальної дії відповідно.

Висновки до розділу

У цьому розділі розглянуто процес електролізу води з точки зору фізико-хімічного аналізу, математичного моделювання та систем автоматичного керування. Розкрито теоретичні основи електролізу як електрохімічного процесу, описано основні електродні реакції для кислотного та лужного середовищ, а також визначено чинники, що впливають на енерговитрати — перенапруги, опори, поляризації та втрати в елементах системи.

Проведено моделювання матеріального, теплового та енергетичного балансу електролізера. Розраховано питомі витрати електроенергії на одиницю об'єму газу, кількість виділеного тепла та енергію, що витрачається на нагрівання й випар води. Це дозволяє більш точно прогнозувати ефективність процесу та керувати ним у реальному часі.

Запропоновано математичні моделі, які описують електричну та температурну динаміку електролізера, що є базою для побудови системи автоматичного керування. Представлено використання PID-регуляторів для

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

стабілізації таких параметрів, як температура, струм і тиск, що забезпечує надійну та безпечну роботу установки.

Таким чином, використання математичного моделювання та ідентифікації процесу електролізу води є необхідною умовою для оптимізації роботи, підвищення енергоефективності та впровадження сучасних систем автоматизації на основі цифрових технологій.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ОДЕРЖАННЯ ВОДНЮ І КИСНЮ

3.1 Структура системи керування

Автоматизоване керування процесом електролізу води є критично важливим для забезпечення стабільної продуктивності, високої чистоти водню та кисню, а також безпечного функціонування електролізера. У цьому розділі здійснено синтез системи керування на основі математичного моделювання, аналізу динаміки об'єкта та вибору оптимального алгоритму регулювання [2-10].

Основні параметри, які підлягають регулюванню в процесі електролізу:

- Сила струму, що безпосередньо визначає інтенсивність розкладу води;
- Температура електроліту, що впливає на електропровідність та ефективність процесу;
- Тиск газів у камерах, який необхідно підтримувати в межах безпечних значень;
- Чистота газів, що забезпечується контролем складу газової суміші.

Структура системи керування (рис.3.1) передбачає наявність датчиків струму, температури, тиску та складу газів, сигналів із яких надходять до програмованого логічного контролера (ПЛК), що обчислює керуючі дії згідно із заданими алгоритмами. Нижче наведена програма для ПЛК фірми Schneider.

Система керування працює за принципом зворотного зв'язку [2,5,6-9]. Датчики постійно вимірюють параметри процесу і передають дані до контролера. Контролер порівнює ці значення із заданими (уставками) і, на основі алгоритмів керування, генерує керуючі сигнали для виконавчих механізмів, щоб підтримувати процес в заданому режимі. Оператор через HMI/SCADA здійснює моніторинг, задає уставки та втручається в роботу системи за потреби.

3.1.1 Програма для ПЛК Schneider на мові C++

ПЛК від Schneider Electric зазвичай програмуються в середовищі EcoStruxure Control Expert (раніше Unity Pro), яке підтримує стандарт IEC 61131-

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

3, а саме мови ST, LD, FBD, SFC, IL. Мову C++ стандартно не підтримують ПЛК цієї лінійки, однак ми маємо справу з сучасними контролерами, які підтримують Edge Computing, тому використаємо C++ у зв'язці з Edge Applications (через Linux-контейнер або Node-RED, MQTT тощо) [12-14].

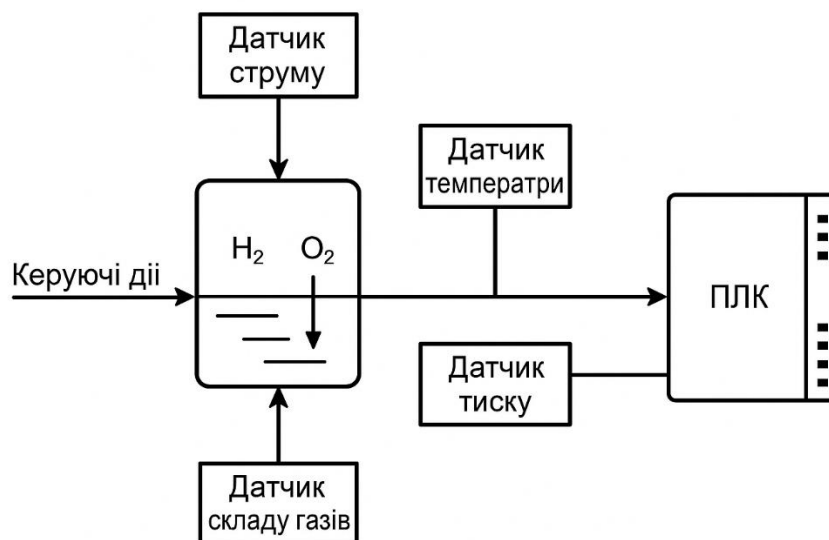


Рисунок 3.1 – Структура системи керування

У нас застосовується інтеграція з ПЛК через C++, тому напишемо C++ програму, яка керує електролізом, спілкуючись із ПЛК Schneider через Modbus TCP.

```
#include <iostream>
#include <modbus.h>
#include <unistd.h>

using namespace std;

int main() {
    // Параметри з'єднання
    const char* ip = "192.168.0.10"; // IP ПЛК
```

```

int port = 502;

// Підключення до ПЛК
modbus_t* mb = modbus_new_tcp(ip, port);
if (modbus_connect(mb) == -1) {
    cerr << "Не вдалося підключитись до ПЛК!" << endl;
    modbus_free(mb);
    return -1;
}

```

```

// Адреси регістрів
const int TEMP_REG = 0;           // Температура
const int LEVEL_REG = 1;         // Рівень електроліту
const int PRESS_REG = 2;         // Тиск
const int CMD_REG = 10;          // Команда: 1 - старт, 0 - стоп
const int STATUS_REG = 11;       // Стан: 1 - працює, 0 - зупинено

uint16_t data[3]; // TEMP, LEVEL, PRESS

// Зчитування параметрів
if (modbus_read_registers(mb, TEMP_REG, 3, data) == -1) {
    cerr << "Помилка читання регістрів!" << endl;
} else {
    float temp = data[0] / 10.0;
    float level = data[1] / 10.0;
    float pressure = data[2] / 10.0;

    cout << "Температура: " << temp << " °C" << endl;
    cout << "Рівень: " << level << " %" << endl;
    cout << "Тиск: " << pressure << " МПа" << endl;
}

```

```

// Проста логіка запуску
if (temp < 90 && level > 50 && pressure < 4.0) {
    uint16_t start_cmd = 1;
    modbus_write_register(mb, CMD_REG, start_cmd);
    cout << "Запущено електроліз!" << endl;
} else {
    uint16_t stop_cmd = 0;
    modbus_write_register(mb, CMD_REG, stop_cmd);
}

```

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

```

        cout << "Запущено електроліз!" << endl;
    } else {
        uint16_t stop_cmd = 0;
        modbus_write_register(mb, CMD_REG, stop_cmd);
        cout << "Зупинка: перевірте умови." << endl;
    }
}

// Закриття з'єднання
modbus_close(mb);
modbus_free(mb);
return 0;
}

```

Ця, вище наведена, програма дає контролеру можливість автоматично керувати процесом електролізу за заданими правилами й алгоритмами.

3.2 Аналіз стійкості системи керування електролізером

Аналіз стійкості є критично важливим етапом при розробці та впровадженні будь-якої системи керування, включаючи системи для електролізу води. Метою такого аналізу є оцінка здатності системи повертатися до свого сталого робочого стану після впливу збурень [2-10]. Для процесу електролізу води, де стабільність виробництва водню та кисню є ключовою, цей аналіз набуває особливого значення.

Стійкість системи керування процесом одержання водню і кисню електролізом води – важливий етап при проектуванні автоматизованої системи електролізера, тому така система повинна забезпечувати стабільну роботу при змінних навантаженнях, температурі, концентрації електроліту, тощо.

Фактори, що впливають на стійкість системи керування електролізом води:

- Нелінійні характеристики електролізера: вольт-амперна характеристика, залежність опору від умов процесу.
- Інерційність процесу: теплові та масообмінні процеси в електролізері мають певну інерційність.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

- Характеристики регуляторів: неправильно налаштовані параметри регуляторів можуть призвести до нестабільності.
- Збурення: коливання напруги живлення, зміни температури та тиску, неоднорідність потоку електроліту.
- Взаємодія підсистем: взаємодія між системами контролю струму, напруги, тиску та температури може впливати на загальну стійкість.

Аналіз стійкості проводимо в програмному середовищі MATLAB [15].

Нижче наведено лістинг програми.

MATLAB-код для аналізу стійкості системи керування

```
>> % Параметри об'єкта (теплова модель)
>> K = 1;      % підсилення
>> tau = 10;   % теплова стала часу
>> % Передавальна функція об'єкта
>> G = tf(K, [tau 1]); % G(p) = K / (tau*p + 1)
>> % Параметри PID-регулятора
>> Kp = 2;
>> Ki = 0.5;
>> Kd = 1;
>> % Передавальна функція PID-регулятора
>> PID = Kp + Ki / tf('s') + Kd * tf('s');
>> % Відкрита система
>> OpenLoop = PID * G;
>> % Замкнена система з одиничним зворотним зв'язком
>> ClosedLoop = feedback(OpenLoop, 1);
>> % Аналіз стійкості
>> disp('Полюси замкненої системи:');
Полюси замкненої системи:
>> pole(ClosedLoop)

ans =

    -0.1364 + 0.1639i
    -0.1364 - 0.1639i
```

Система стійка, оскільки корені мають дійсні від'ємні значення.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

3.3 Дослідження системи керування та визначення параметрів налаштування

Наведемо модель, яка розроблена в розділі 2, у вигляді блок-схеми в MATLAB/Simulink [15]. Це модель, що охоплює основні контури автоматизації: регулювання струму та температури електроліту (рис.3.2). Візуалізація цих параметрів зображена на рис.3.3.

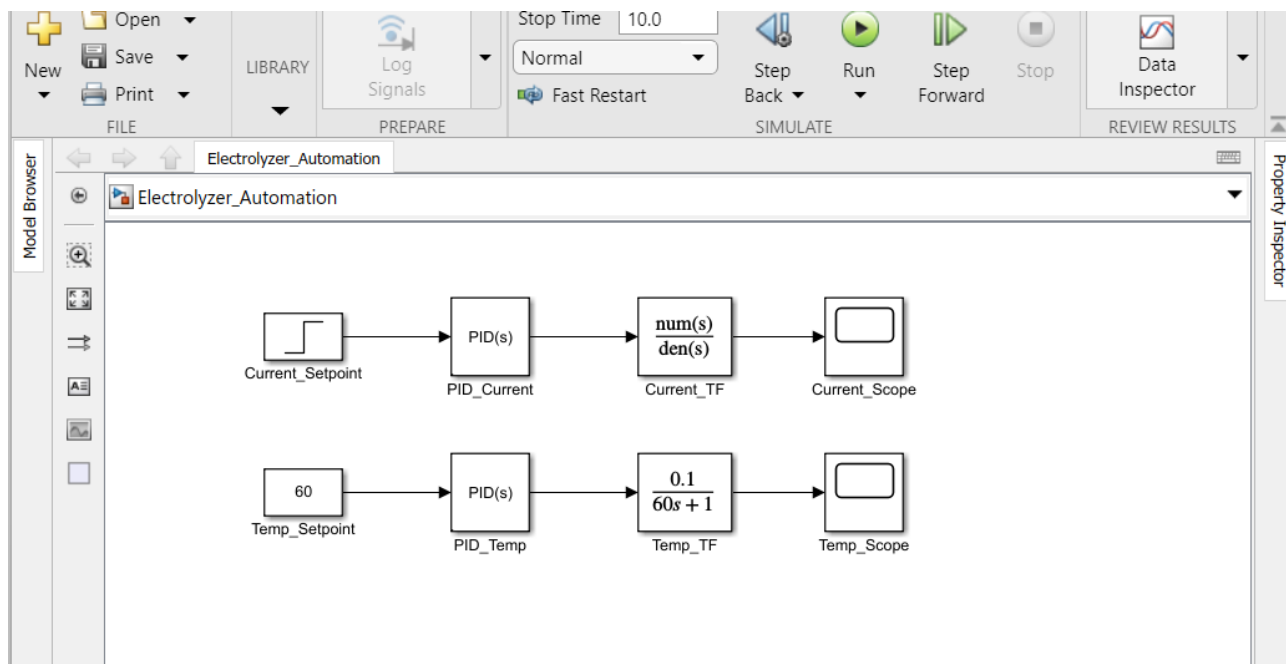
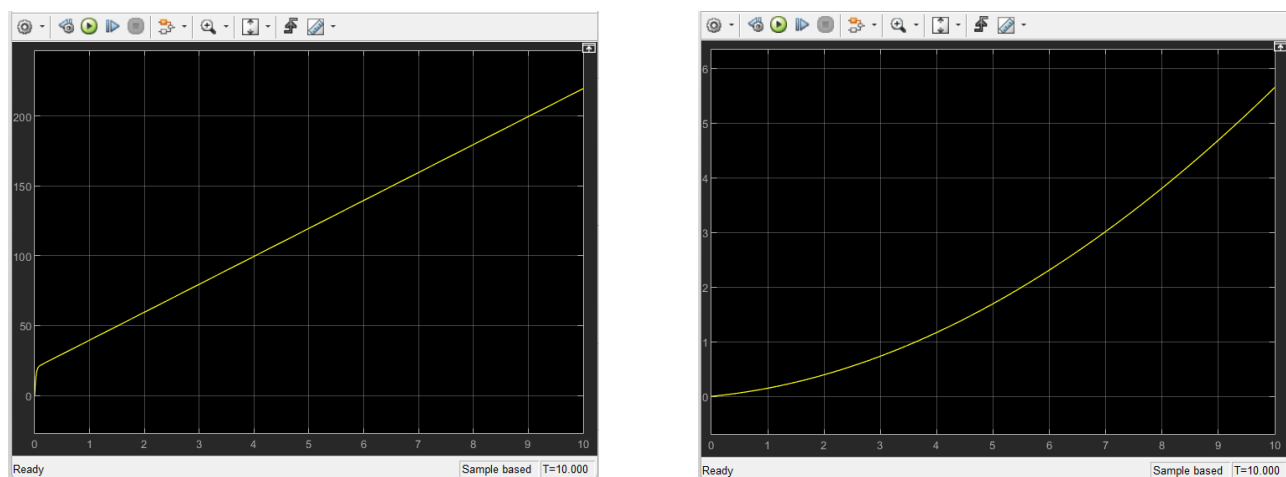


Рисунок 3.2 – Блок-схема основних контурів автоматизації



а)

б)

Рисунок 3.3 – Графіки залежності: а) струму; б) температури

На рис.3.4 зображена блок-схема замкненої системи керування в Simulink, яка дає можливість: швидко бачити, як змінюються параметри системи (струм,

тиск, температура) у відповідь на різні керуючі дії; шукати оптимальні налаштування контролера. Є можливість "погратися" з системою у віртуальному світі і зрозуміти, як вона поводитиметься в реальності. Візуалізація результатів показана на рис.3.4.

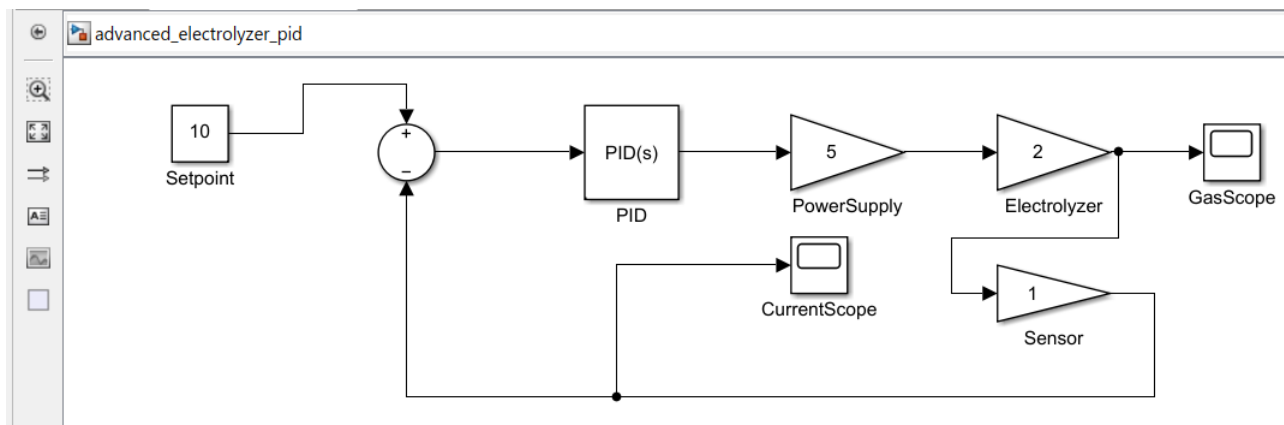


Рисунок 3.4 – Блок-схема замкненої схеми керування

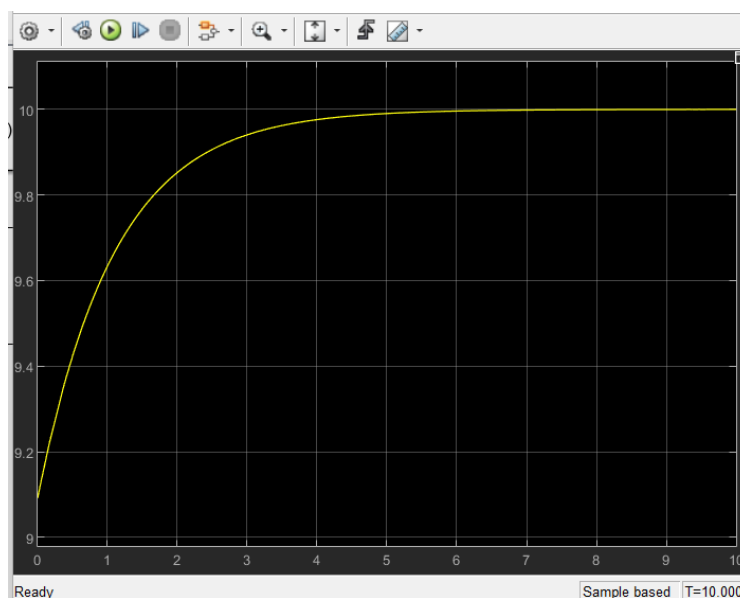


Рисунок 3.5 – Візуалізація системи керування – графік залежності температури

3.3.1 Лістинг програми для електричного кола електролізера

Напишемо програму в командному вікні Matlab для електричного кола електролізера

```

>> % Параметри електричного кола електролізера
>> L = 0.01; % Гн
>> R = 0.5; % Ом
>> % Передавальна функція об'єкта
>> G = tf(1, [L R]); % G(p) = 1 / (L*p + R)
>> % Параметри PID-регулятора (базові)
>> Kp = 5; % пропорційний
>> Ki = 20; % інтегральний
>> Kd = 0.001; % диференціальний
>> % Передавальна функція PID-регулятора
>> PID = Kp + Ki / tf('s') + Kd * tf('s');

>> % Відкрита система
>> OpenLoop = PID * G;
>> % Замкнена система з одиничним зворотним зв'язком
>> ClosedLoop = feedback(OpenLoop, 1);
>> % Аналіз стійкості
>> disp('Полюси замкненої системи:');
Полюси замкненої системи:
>> disp(pole(ClosedLoop))
-496.3368
-3.6632

>> % Графіки
>> figure;
>> step(ClosedLoop);
>> title('Перехідна характеристика (електрична модель + PID)');
>> figure;
>> bode(OpenLoop);
>>
>> title('Bode-діаграма відкритої системи');
>> figure;
>> nyquist(OpenLoop);
>> title('Nyquist-діаграма відкритої системи');

```

Динамічні характеристики системи показані на рисунках 3.6 ÷ 3.9.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

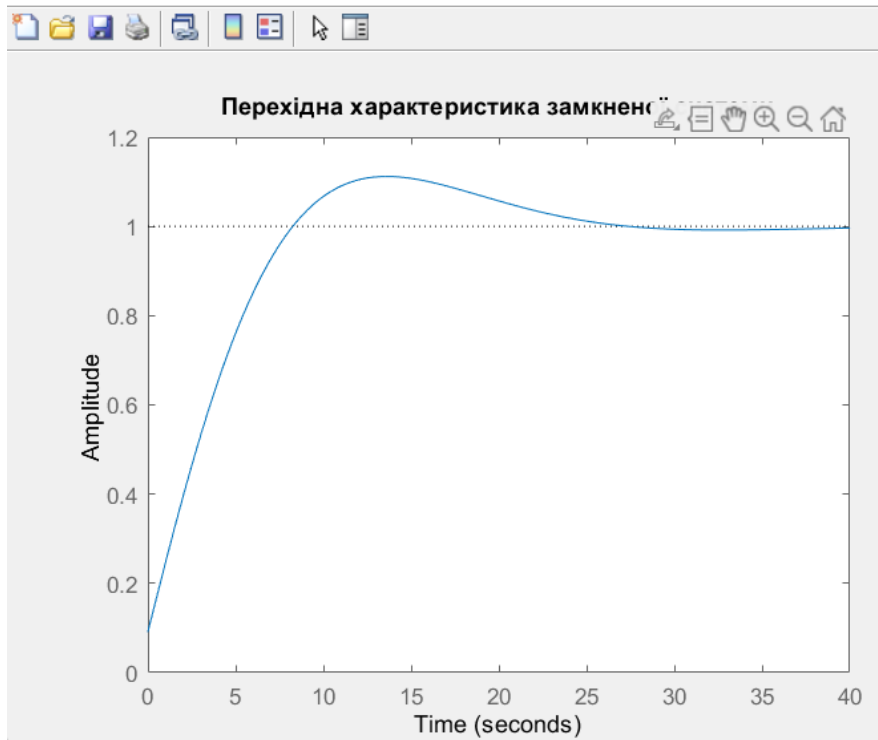


Рисунок 3.6 – Перехідна характеристика системи

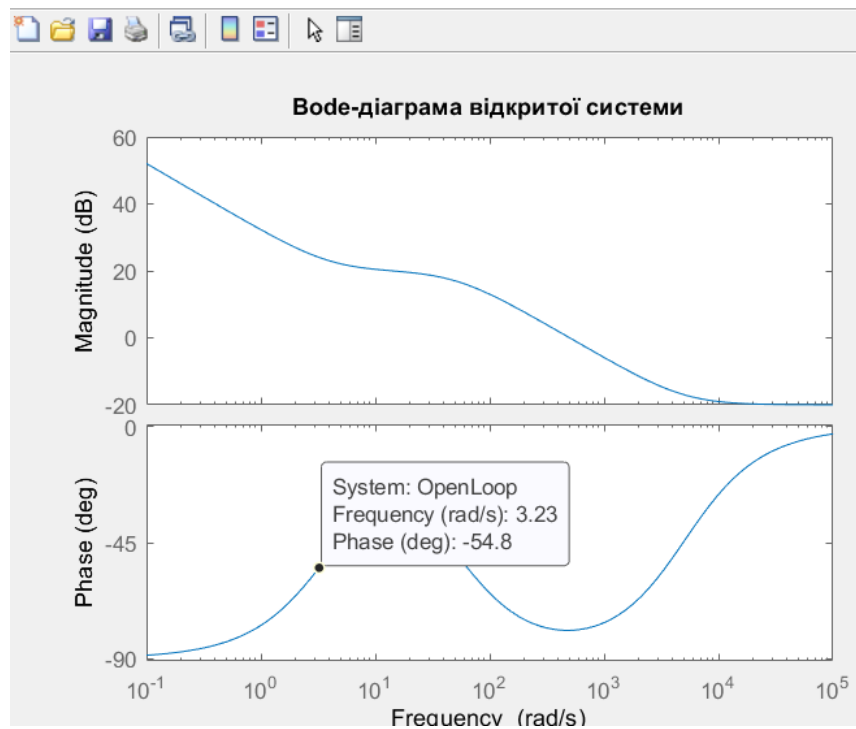


Рисунок 3.7 – Частотні характеристики (АЧХ і ФЧХ)

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

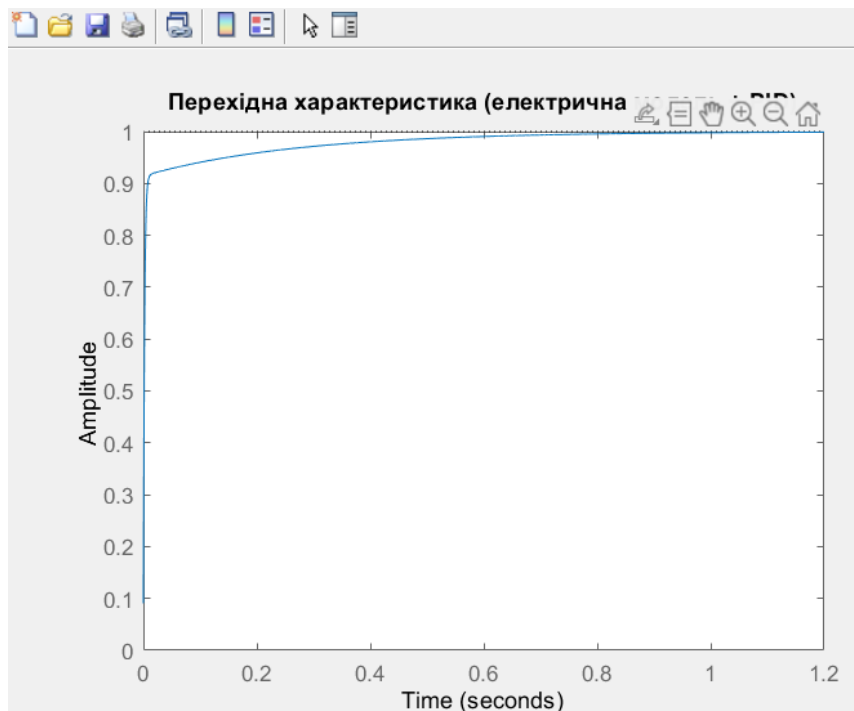


Рисунок 3.8 – Перехідна характеристика (електрична частина)

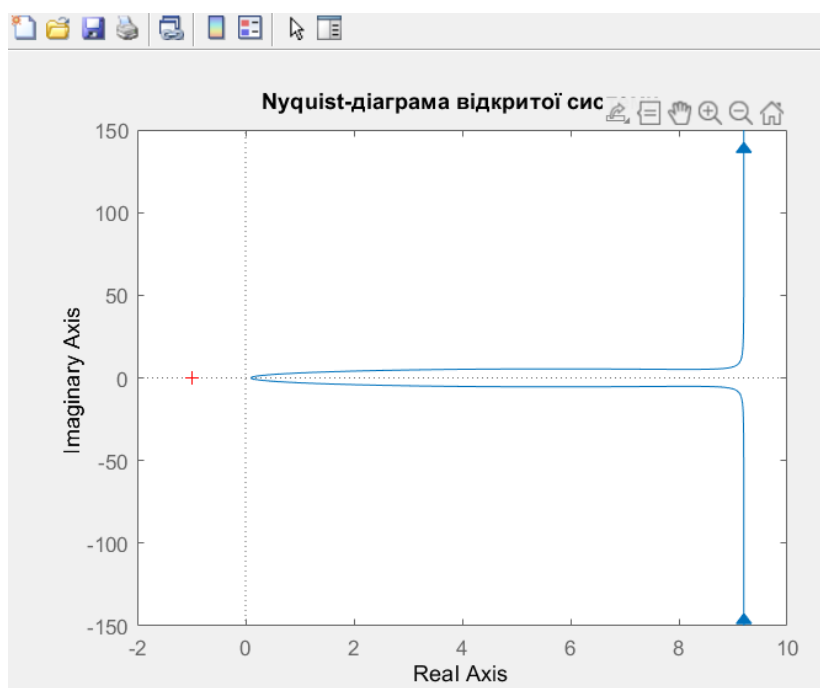


Рисунок 3.9 – Діаграма Найквіста відкритої системи

3.3.2 Порівняння трьох регуляторів П; ІІ і ПІД.

Проведемо дослідження і зробимо порівняння для трьох випадків [16-20]:

1. Без регулятора (відкритий контур);

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

2. З пропорційним регулятором (П);
3. З ПІ-регулятором;
4. З ПІД-регулятором.

Лістинг програми порівняння трьох регуляторів показано нижче.

```

>> % Параметри об'єкта керування
>> L = 0.5; % Індуктивність, Гн
>> R = 1;   % Опір, Ом
>> K = 1;   % Підсилення
>> s = tf('s');
>> W = K / (L*s + R); % Передатна функція об'єкта
>> % Регулятори
>> Kp = 5;           % Пропорційний коефіцієнт
>> Ki = 10;          % Інтегральний коефіцієнт
>> Kd = 0.1;         % Диференціальний коефіцієнт
>> R_P  = Kp;         % П-регулятор
>> R_PI = Kp + Ki/s; % ПІ-регулятор
>> R_PID = Kp + Ki/s + Kd*s; % ПІД-регулятор

>> % Замкнені системи
>> T_open = W;
>> T_P    = feedback(R_P*W, 1);
>> T_PI   = feedback(R_PI*W, 1);
>> T_PID  = feedback(R_PID*W, 1);
>> % Побудова графіків
>> figure;
>> step(T_open, T_P, T_PI, T_PID);
>> legend('Без регулятора', 'П', 'ПІ', 'ПІД');
>> title('Порівняння реакцій системи');
>> grid on;
>> % Аналіз якості регулювання
>> disp('--- Показники якості ---');

```

Графіки порівняння для П-; ПІ-; ПІД- регуляторів зображено на рис.3.10.

Графіки порівняння для П-, ПІ- та ПІД-регуляторів у системі керування електролізером дозволяють наочно оцінити ефективність різних типів регулювання за кількома ключовими критеріями: перехідні процеси та стійкість.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

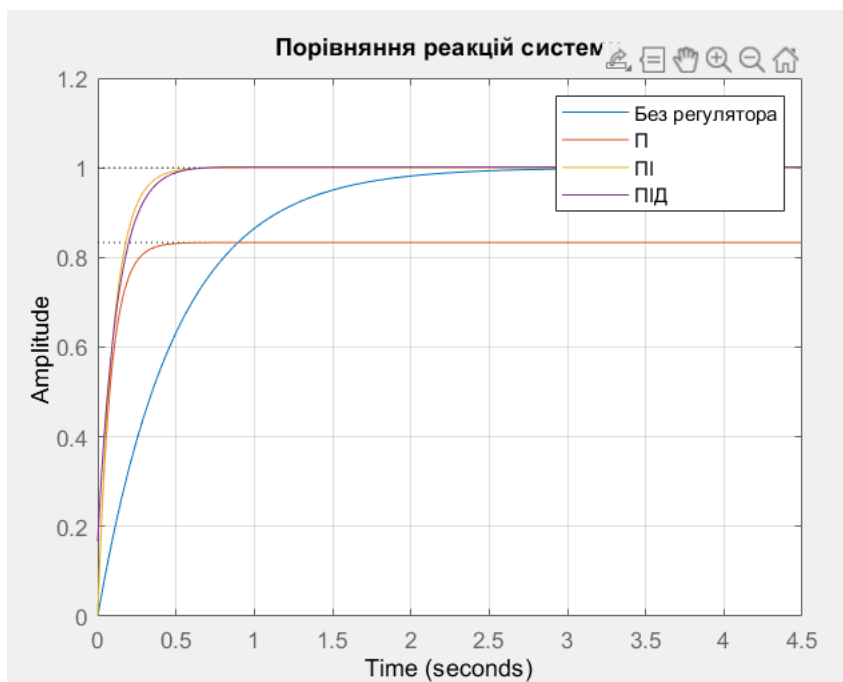


Рисунок 3.10 – Графіки порівняння для П-; ПІ-; ПІД- регуляторів і без регулятора

Ці графіки допомагають обрати оптимальний тип регулятора для системи керування електролізером, щоб забезпечити стабільну, швидку та точну роботу установки.

3.4 Оцінка основних показників якості регулювання системи

Параметри налаштування регуляторів визначено в п.3.3.2, тому розглянемо основні показники якості регулювання до яких відноситься [2,7,10,17]:

1. Перерегулювання (Overshoot) — максимальне перевищення над усталеним значенням.
2. Час перехідного процесу (Settling Time) – час, за який вихід системи входить у допустимі межі (наприклад, $\pm 5\%$) навколо усталеного значення.
3. Час підйому (Rise Time) – час, за який сигнал зростає від 10% до 90% усталеного значення.
4. Статична похибка (Steady-State Error) – різниця між усталеним значенням виходу та бажаним значенням у сталому режимі.
5. Коливальність (Oscillations) – наявність та тривалість коливань у процесі встановлення виходу.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Для оцінки показників якості створимо графіки залежності, наприклад, часу регулювання, перерегулювання і статичної похибки від параметрів регулятора, зокрема від коефіцієнта K_p .

Почнемо з найпростішого – зафіксуємо $K_i = 10$, $K_d = 0.1$, а K_p будемо змінювати в діапазоні, скажімо, від 1 до 20 і відповідно побудуємо графіки (рис.3.11) для: часу регулювання (Settling Time); перерегулювання (Overshoot); статична похибка (Steady-State Error).

Графіки залежностей показників якості регулювання від коефіцієнта підсилення K_p (рис.3.11) дають можливість проаналізувати вплив налаштувань регулятора на динаміку системи.

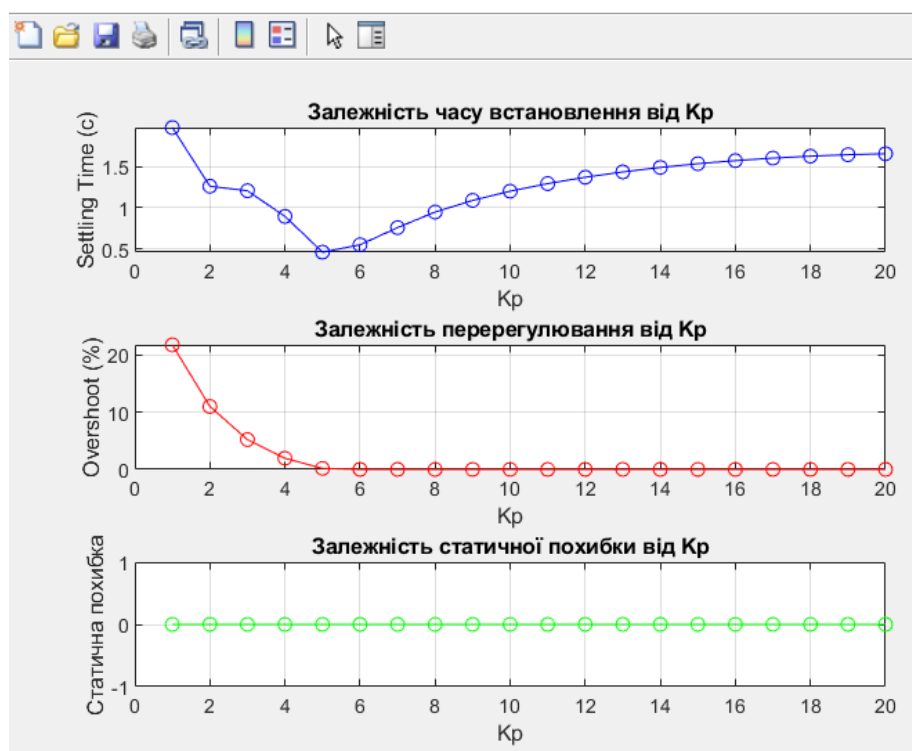


Рисунок 3.11 – Графіки залежності показників якості (часу регулювання, перерегулювання і статичної похибки) від параметрів регулятора, зокрема від коефіцієнта K_p .

Проаналізуємо отримані графіки.

Перший графік – час регулювання $t_{рег}$ залежно від K_p :

- На початку, при збільшенні K_p , час регулювання зменшується: система швидше реагує на відхилення.
- Після певного оптимального значення K_p збільшення K_p призводить до появи коливань → час регулювання починає зростати.

Другий графік – перерегулювання $\sigma_{\text{пере}}$ залежно від K_p :

- При зростанні K_p перерегулювання постійно збільшується.
- Великий K_p викликає агресивну відповідь системи, з великими коливаннями навколо заданого значення.

Третій графік – статична похибка $\epsilon_{\text{уст}}$ залежно від K_p

- Для П-регулятора: зі збільшенням K_p статична похибка зменшується (пропорційно до $1/K_p$).
- Проте похибка не стає нульовою – навіть при великому K_p .

Створимо 3D-поверхню для візуалізації залежності одного з показників якості від пари параметрів K_p і K_i . Це допоможе побачити, як поєднання цих коефіцієнтів впливає на динаміку системи. Результати наведені на рис.3.12÷3.14.

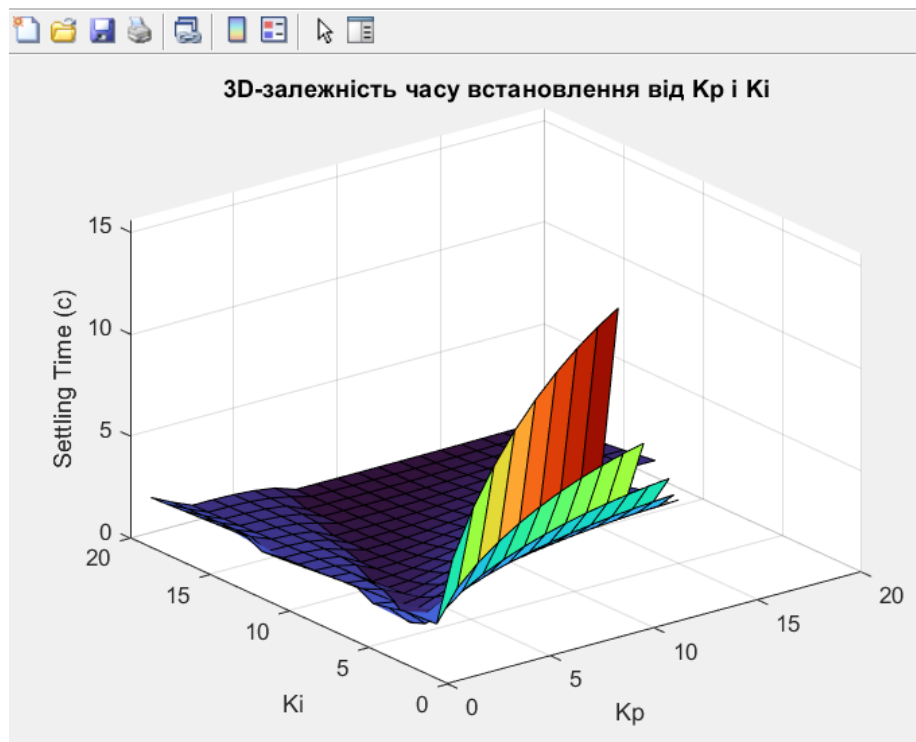


Рисунок 3.12 – Візуалізація 3D-залежності часу регулювання від пари параметрів K_p і K_i

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

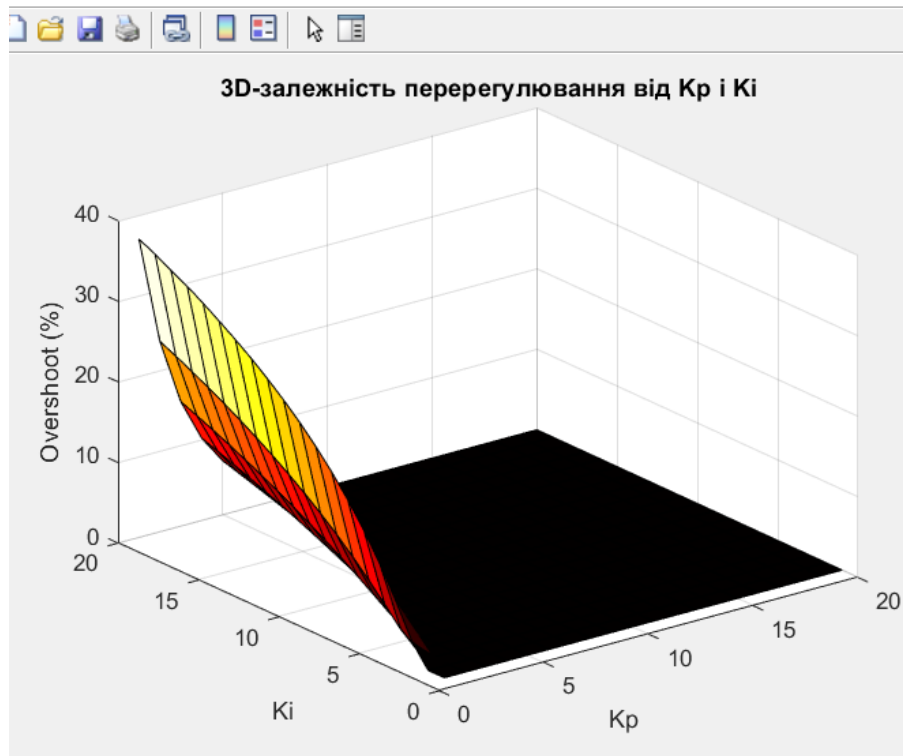


Рисунок 3.13 – Візуалізація 3D-залежності перерегулювання від пари параметрів K_p і K_i

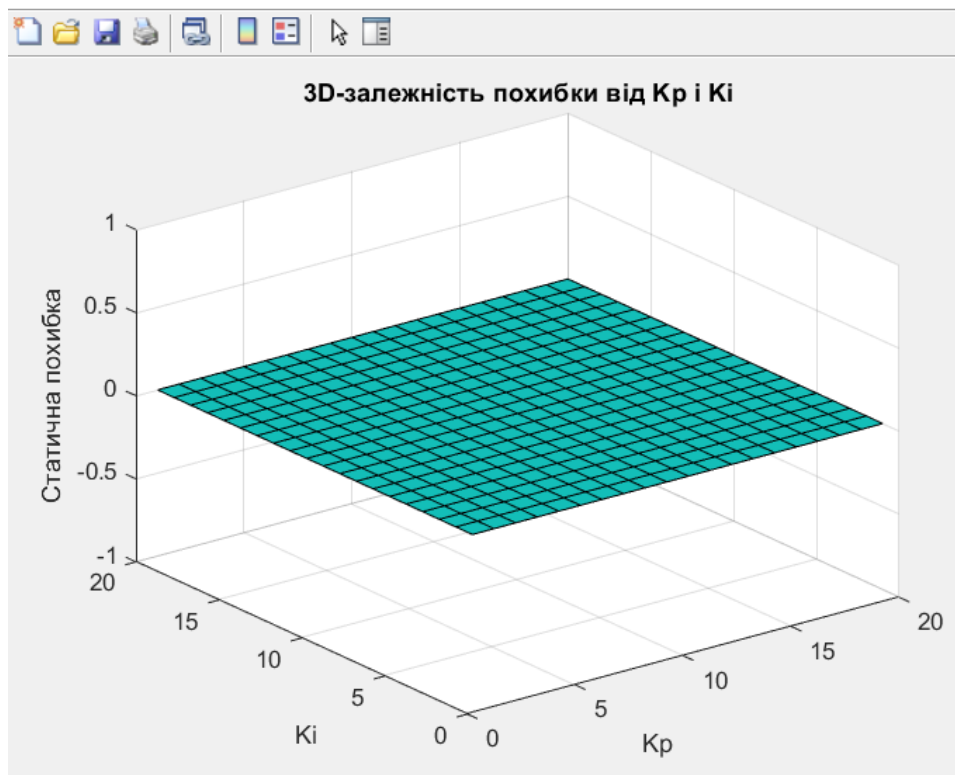


Рисунок 3.14 – Візуалізація 3D-залежності статичної похибки від пари параметрів K_p і K_i

На цих рисунках зображені три 3D-поверхні, які показують: як змінюється час регулювання, перерегулювання та статична похибка в залежності від поєднання K_p і K_i .

Знайдемо, при яких значеннях K_p та K_i : час регулювання; перерегулювання; статична похибка є мінімальними.

Нижче наведений лістинг (код) програми, який обчислює мінімуми та виводить оптимальні K_p і K_i для кожного показника.

```
>> % Пошук мінімумів
>> [minSettling, idx_settling] = min(Settling(:));
>> [minOvershoot, idx_overshoot] = min(Overshoot(:));
>> [minEss, idx_ess] = min(Ess(:));
>> % Визначення координат (Kp, Ki) відповідно до індексів
>> [i_settling, j_settling] = ind2sub(size(Settling), idx_settling);
>> [i_overshoot, j_overshoot] = ind2sub(size(Overshoot), idx_overshoot);
>> [i_ess, j_ess] = ind2sub(size(Ess), idx_ess);

>> % Отримання значень Kp та Ki
>> opt_Kp_settling = KP(i_settling, j_settling);
>> opt_Ki_settling = KI(i_settling, j_settling);
>> opt_Kp_overshoot = KP(i_overshoot, j_overshoot);
>> opt_Ki_overshoot = KI(i_overshoot, j_overshoot);
>> opt_Kp_ess = KP(i_ess, j_ess);
>> opt_Ki_ess = KI(i_ess, j_ess);
>> % Вивід результатів
>> fprintf('--- Оптимальні параметри ---\n');
--- Оптимальні параметри ---
>> fprintf('Мінімальний Settling Time: %.2f с при Kp = %.2f, Ki = %.2f\n', ..
    minSettling, opt_Kp_settling, opt_Ki_settling);
Мінімальний Settling Time: 0.19 с при Kp = 11.00, Ki = 20.00
>> fprintf('Мінімальний Overshoot: %.2f %% при Kp = %.2f, Ki = %.2f\n', ...
    minOvershoot, opt_Kp_overshoot, opt_Ki_overshoot);
Мінімальний Overshoot: 0.00 % при Kp = 1.00, Ki = 1.00
>> fprintf('Мінімальна Статична похибка: %.4f при Kp = %.2f, Ki = %.2f\n', ..
    minEss, opt_Kp_ess, opt_Ki_ess);
Мінімальна Статична похибка: 0.0000 при Kp = 1.00, Ki = 1.00
```

Отже, оптимальні параметри налаштування при мінімальних значеннях часу, перерегулювання та статичної похибки.

Мінімальний час встановлення: 0.19 с при $K_p = 11.00$, $K_i = 20.00$.

Мінімальне перерегулювання: 0.00 % при $K_p = 1.00$, $K_i = 1.00$.

Мінімальна статична похибка: 0.0000 при $K_p = 1.00$, $K_i = 1.00$.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Висновки до розділу

У цьому розділі було проведено повний цикл синтезу та дослідження системи автоматизованого керування процесом електролізу води для одержання водню та кисню. Запропонована структура системи охоплює використання датчиків струму, температури, тиску та складу газів, сигнали з яких надходять до програмованого логічного контролера (ПЛК), що реалізує алгоритм керування.

У середовищі MATLAB/Simulink було змодельовано роботу основних контурів автоматизації. Це дало змогу: дослідити динаміку системи; оцінити її стійкість; перевірити ефективність різних типів регуляторів (П, ПІ, ПІД); обрати оптимальні параметри регулятора.

Проведено аналіз стійкості системи, який підтвердив її здатність до стабільної роботи за збурень та змін навантаження.

Порівняльне дослідження регуляторів показало, що ПІД-регулятор забезпечує найкращі показники якості: мінімальну статичну похибку, відсутність перерегулювання та швидкий час встановлення.

За результатами чисельного моделювання визначено оптимальні значення параметрів регулятора, які мінімізують час регулювання, перерегулювання та статичну похибку.

Таким чином, дослідження в Simulink дозволили сформувати ефективну систему керування процесом електролізу, що забезпечує стабільну, точну та безпечну роботу електролізера в режимі реального часу.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

4 РОЗРОБКА СХЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОЛІЗУ ВОДИ

4.1 Функціональна схема автоматизації процесу електролізу води

Функціональна схема автоматизації (рис.4.1) відображає основні елементи системи автоматичного регулювання температури в технологічному процесі електролізу води та їх взаємозв'язки.

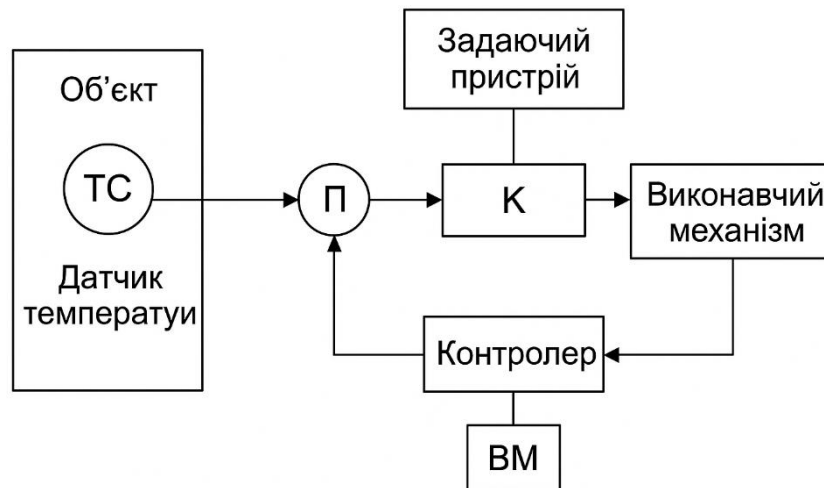


Рисунок 4.1 – Функціональна схема автоматизації процесу електролізу води

Опис елементів схеми:

- 1) Об'єкт регулювання – це технологічна установка або процес, в якому потрібно підтримувати певний рівень температури для забезпечення оптимальної роботи (наприклад, електролізер у процесі електролізу води).
- 2) **ТС.** Температурний датчик здійснює безперервний контроль фактичної температури в об'єкті. Отримане аналогове або цифрове значення температури надходить на порівнювальний елемент системи.
- 3) **П.** Порівнювальний елемент (суматор) обчислює різницю між заданим значенням температури (уставкою) і фактичним значенням температури, яке подає датчик. Визначена похибка регулювання (ΔT) є основою для подальших керуючих дій.
- 4) **Задаючий пристрій** встановлює бажане (еталонне) значення температури для процесу. Це може бути операторська панель (НМІ) або налаштування безпосередньо в контролері.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

- 5) **К** (Регулятор). Регулятор формує керуючий сигнал на основі величини похибки. У схемі може бути використано П-, ПІ- або ПІД-регулятор залежно від вимог до динамічних характеристик системи. Він забезпечує таке керування об'єктом, щоб мінімізувати похибку і стабілізувати температуру.
- 6) Виконавчий механізм реалізує фізичну зміну технологічного процесу. Наприклад, це може бути регулюючий клапан, електронагрівач, насос або інший пристрій, який впливає на параметри об'єкта (температуру) відповідно до команди від регулятора.
- 7) Контролер (зазвичай ПЛК — програмований логічний контролер) отримує сигнали з датчиків, виконує обчислення за алгоритмом регулювання і формує сигнали керування для виконавчих механізмів. Також контролер реалізує функції захисту, сигналізації і архівації даних.
- 8) **ВМ**. Вимірювальний модуль відповідає за обробку сигналів від первинних датчиків (наприклад, перетворення аналогових сигналів у цифрові, фільтрацію шумів) і передає їх до контролера у зручному для обробки вигляді.

Принцип роботи системи:

- a) Датчик температури безперервно вимірює поточну температуру об'єкта.
- b) Значення температури надходить на порівнювальний елемент, де обчислюється похибка відносно заданої температури.
- c) Регулятор, отримавши похибку, розраховує необхідну зміну впливу на об'єкт для компенсації цієї похибки.
- d) Керуючий сигнал передається на виконавчий механізм, який безпосередньо змінює стан об'єкта (наприклад, змінює подачу охолоджуючої води або рівень нагрівання).
- e) Контролер забезпечує координацію всієї системи, здійснює обробку даних і реалізує алгоритми автоматизації.
- f) Вимірювальний модуль допомагає забезпечити точність і надійність збору інформації.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Особливості системи:

- Система працює за принципом замкнутого контуру регулювання із негативним зворотним зв'язком.
- Використання сучасного контролера дозволяє реалізувати адаптивне регулювання, аварійне блокування процесу та інтеграцію із різними системами диспетчеризації.

4.2 Автоматизована система керування процесом електролізу на основі ПЛК

1) Загальні відомості

На схемі (рис.4.2) представлена автоматизована система керування процесом електролізу, реалізована на основі програмованого логічного контролера (PLC). Система призначена для забезпечення стабільного та безпечного функціонування електролізера шляхом автоматичного моніторингу основних параметрів процесу та управління допоміжним обладнанням.

2) Опис елементів системи

До складу системи входять:

- Датчики вимірювання технологічних параметрів:

PT – датчик тиску (Pressure Transmitter);

TT – датчик температури (Temperature Transmitter);

LT – датчик рівня (Level Transmitter);

FT – витратомір (Flow Transmitter).

Датчики передають аналогові сигнали на вхід PLC для подальшої обробки.

- Електролізер (ELECTROLYSIZ) — основний технологічний об'єкт, стан якого контролюється за допомогою аналогових сигналів, що надходять до PLC.
- Частотний перетворювач (Frequency Drive) — пристрій для плавного регулювання частоти обертання електродвигуна насоса, що дозволяє підтримувати оптимальні технологічні параметри.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

- Насос (Pump) — забезпечує перекачування робочого середовища через електролізер.

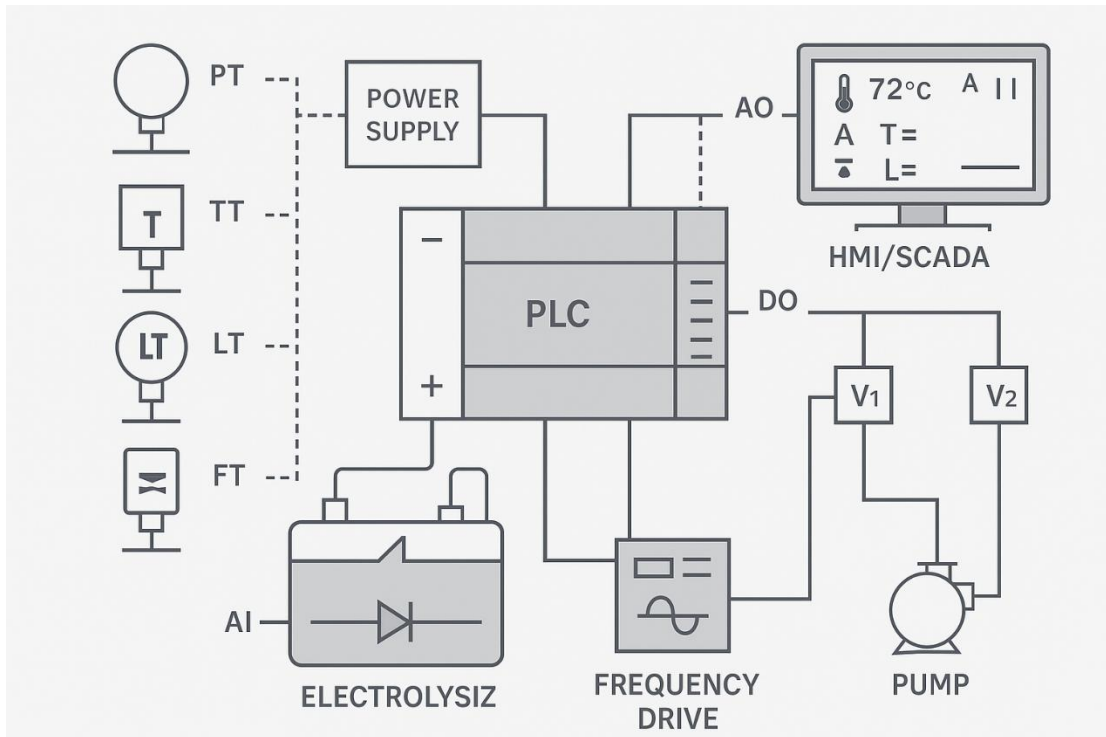


Рисунок 4.2 – АСК процесом електролізу, реалізована на основі ПЛК

- Клапани (V1, V2) — електромеханічні виконавчі пристрої, які регулюють потоки середовища за командами з PLC.
- HMI/SCADA-система — операторський інтерфейс для моніторингу та дистанційного керування процесом. На екрані відображаються ключові параметри: температура, рівень, витрата та тиск.
- Блок живлення (Power Supply) — забезпечує енергоживлення усіх елементів системи.

3) Принцип роботи системи

Система функціонує за таким принципом:

1. Датчики реєструють значення технологічних параметрів та передають їх до PLC через аналогові входи.
2. Контролер обробляє дані відповідно до закладеної алгоритміки управління.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

3. В залежності від поточних значень параметрів та встановлених меж:
 - формується сигнал на частотний перетворювач для регулювання швидкості насоса;
 - здійснюється керування відкриттям або закриттям клапанів V1 та V2;
 - здійснюється регулювання параметрів роботи електролізера.
4. Поточні дані та сигнали тривоги передаються на HMI/SCADA для візуалізації та взаємодії з оператором.
5. Оператор може задавати нові параметри та режим роботи через HMI/SCADA.

4.3 Схема підключення обладнання

1) Загальні відомості

На представленій схемі (рис.4.3) зображено *підключення основних елементів* технологічної установки до програмованого логічного контролера (ПЛК) виробництва Schneider Electric. Схема відображає типову конфігурацію системи збору даних та керування виконавчими механізмами.

2) Опис елементів

Система включає такі пристрої:

- Температурний перетворювач — передає інформацію про температуру технологічного середовища на вхід PLC.
- Перетворювач тиску – забезпечує вимірювання тиску в системі і передає відповідні сигнали контролеру.
- Електричний виконавчий механізм – пристрій (наприклад, електропривідний клапан), який виконує команди контролера, отримані через цифровий вихід.
- Двигун (М) – електродвигун, керований PLC, який приводить у дію технологічне обладнання.

3) Принцип роботи

Датчики температури та тиску через цифрові входи (DI) передають сигнали на PLC. На основі аналізу вхідних даних PLC виконує логічні операції

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

та видає сигнали керування через цифрові виходи (DO) на виконавчі пристрої: електричний механізм та двигун.

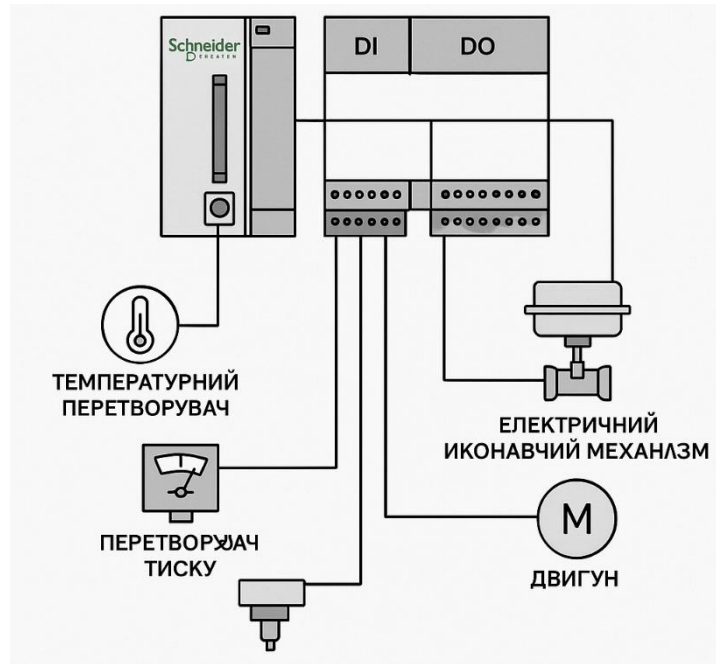


Рисунок 4.3 – Схема підключення обладнання

Таке рішення дозволяє автоматизувати процеси вимірювання, обробки даних і оперативного керування обладнанням у реальному часі.

4.4 Схема розміщення обладнання та приладів автоматизації

Схема розміщення обладнання та приладів автоматизації (ще її називають монтажною або компоновочною схемою) показує, як фізично розміщені (рис.4.4): електролізер; баки для електроліту та води; фільтри; ресивери для водню і кисню; шафа керування (ПЛК); датчики температури, тиску, рівня; системи осушення газів; кабельні траси і з'єднання.

Пояснення до позначень на схемі наведені в таблиці 4.1

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

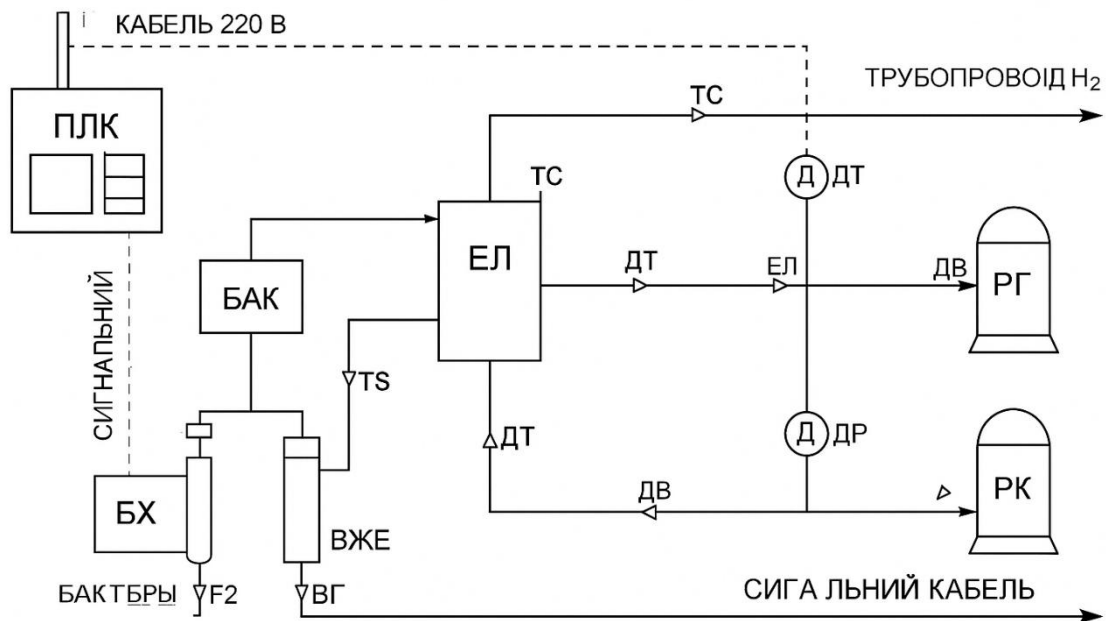


Рисунок 4.4 – Схема розміщення обладнання та приладів автоматизації

Таблиця 4.1 – Пояснення до позначень на схемі зображеної на рис.4.4

Позначення	Розшифрування	Призначення
ПЛК	Програмований логічний контролер	Центральний елемент керування. Отримує сигнали з датчиків та формує команди
Кабель 220 В	Силове живлення контролера	Подача електроенергії на ПЛК
Сигнальний кабель	Кабель для передавання сигналів датчиків	Підключення датчиків до ПЛК
БХ	Бак хімікатів (луг або кислота)	Підготовка розчину електроліту
F2	Механічний фільтр	Очищення води від домішок
БАК	Технологічний бак	Ємність для зберігання води або електроліту
БЖЕ	Бак живлення електролізера	Подавання води чи електроліту в електролізер
ВГ	Вентиль газу	Керування потоком водню або кисню
TS	Датчик температури	Вимірює температуру електроліту або газу
ДТ	Датчик тиску	Контролює тиск газу (водню або кисню)
ЕЛ	Електролізер	Основний апарат розкладу води на водень і кисень
ДР	Датчик рівня	Визначає рівень електроліту в електролізері
ДВ	Датчик витрати	Вимірює витрату газу
РГ	Ресивер газу (водню)	Ємність для накопичення водню
РК	Ресивер кисню	Ємність для накопичення кисню
Трубопровід Н ₂	Лінія подачі водню	Відведення водню до споживача

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

Висновки до розділу

У даному розділі було виконано повний комплекс робіт із розробки проектних схем для автоматизованої системи керування процесом електролізу води.

Розглянуто та побудовано:

- функціональну схему автоматизації, що демонструє логіку взаємодії елементів системи автоматичного регулювання температури;
- структурну схему автоматизованої системи керування на основі ПЛК, яка включає засоби вимірювання, виконавчі механізми, контролер та операторський інтерфейс;
- електричну принципову схему підключення обладнання до ПЛК, яка відображає фізичні з'єднання між датчиками, виконавчими пристроями та контролером;
- схему розміщення обладнання та приладів автоматизації, що ілюструє просторову компоновку елементів на об'єкті;
- мнемосхему процесу електролізу, яка візуалізує основні етапи технологічного процесу та дозволяє оператору ефективно контролювати систему.

Всі розроблені схеми відповідають вимогам сучасних підходів до промислової автоматизації та враховують принципи енергоефективності, безпеки й зручності обслуговування. Застосування ПЛК у поєднанні з HMI/SCADA забезпечує гнучке керування, надійний моніторинг параметрів процесу та можливість інтеграції з іншими системами управління.

Таким чином, створена система є технічно обґрунтованою, функціонально завершеною та придатною до впровадження в реальних виробничих умовах.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломній роботі було розглянуто актуальну тему — автоматизація процесу електролізу води з метою одержання водню і кисню. В ході дослідження досягнуто наступних результатів:

1. Проведено аналіз технологічного процесу електролізу води та визначено основні параметри, які потребують автоматичного контролю та регулювання (температура, тиск, рівень, витрата).
2. Обґрунтовано необхідність автоматизації процесу, з урахуванням вимог до безпеки, енергоефективності, надійності та стабільності роботи електролізера.
3. Розроблено структурну та функціональну схеми автоматизації, що описують взаємозв'язки між основними компонентами: датчиками, регуляторами, виконавчими механізмами та контролером.
4. Запропоновано рішення на основі ПЛК Schneider Electric, що дозволяє реалізувати адаптивне регулювання параметрів процесу, а також забезпечує можливість інтеграції з HMI/SCADA-системами для моніторингу та керування.
5. Розроблено електричну принципову схему, яка відображає підключення вимірювальних приладів та виконавчих механізмів до контролера.
6. Побудовано схему розміщення обладнання, що враховує ергономічні та технічні вимоги до монтажу і експлуатації.
7. Створено мнемосхему технологічного процесу, яка забезпечує візуалізацію стану системи та підвищує ефективність операторського керування.

У результаті виконаної роботи створено ефективну автоматизовану систему керування процесом електролізу води. Запропонована система дозволяє підвищити безпеку, продуктивність, надійність та енергоефективність процесу одержання водню і кисню, що є особливо актуальним в умовах розвитку водневої енергетики та переходу до екологічно чистих технологій.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

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. Бараненко, В. П., Олійник, Ю. П. Теорія автоматичного керування. – К.: Каравела, 2009. – 472 с.
3. Бахірєв, В. А. Основи автоматизації технологічних процесів. – К.: Либідь, 2004. – 320 с.
4. Мошевий, В. М., Мельник, Ю. Л. Основи електрохімічних процесів і установок. – К.: Вища школа, 2012. – 256 с.
5. Трощій, А. С. Моделювання та ідентифікація процесів в автоматизованих системах керування: навчальний посібник. – Київ: НАУ, 2015. – 178 с.
6. Пилипенко, Ю. І. Основи теорії автоматичного керування: навч. посібник. – Полтава: ПНТУ, 2016. – 214 с.
7. Глушков А. В. Теорія автоматичного керування: підручник. – Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2018. – 412 с.
8. Міненко С. І., Ковбасенко Ю. І. Математичне моделювання процесів і систем: навчальний посібник. – Київ: КНУБА, 2019. – 232 с.
9. Дьяків В. М., Федоров С. В. Основи моделювання систем автоматизації: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2020. – 198 с.
10. Серьогін В. П., Сапожніков С. В. Системи автоматичного регулювання: підручник. – Харків: НТУ «ХП», 2017. – 368 с.
11. Пащенко О. М. Основи електрохімії: навчальний посібник. – Київ: КНУ, 2015. – 210 с.
12. Franklin, G. F., Powell, J. D., Emami-Naeini, A. Feedback Control of Dynamic Systems. – 7th ed. – Boston: Pearson, 2015. – 864 p.
13. Liu, H., Song, C., Li, X. Hydrogen and Oxygen Production via Water Electrolysis: Modelling and Control Strategies. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – Vol. 45, No. 55. – P. 30657–30675.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

14. Varkarakis, E., Lymberopoulos, N., Zachariou, A. Hydrogen production via electrolysis: a parametric study. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2001. – Vol. 26, No. 7. – P. 639–649.
15. MATLAB and Simulink for Control System Design. – The MathWorks, Inc., 2022. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/solutions/control-systems.html>
16. Ogata K. Modern Control Engineering. – 5th ed. – New Jersey: Prentice Hall, 2010. – 904 p.
17. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems. – 13th ed. – Boston: Pearson, 2017. – 1104 p.
18. Seborg D. E., Edgar T. F., Mellichamp D. A., Doyle F. J. Process Dynamics and Control. – 4th ed. – Hoboken: Wiley, 2020. – 512 p.
19. Leonhard W. Control of Electrical Drives. – 3rd ed. – Berlin: Springer-Verlag, 2001. – 420 p.
20. Milton J. B., Arnold D. C. Introduction to Control Systems. – New York: McGraw-Hill, 1995. – 580 p.

					БР.АКП – 12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65