

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Кафедра автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів

До захисту допущено
Завідувач кафедри
Сергій БОЙЧЕНКО
«___» _____ 2026 р.

Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг інтелектуальних
електротехнічних та мехатронних комплексів»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
на тему: «Автоматизована система керування продукуванням водню на базі лужного
електролізера»

Виконав
студент 4 курсу, групи ОА-21
Гайко Михайло Русланович _____

Керівник:
ас.
Торопова Лілія Володимирівна _____

Консультант з електропостачання:
к.т.н., доц.
Мейта Олександр Вячеславович _____

Консультант з охорони праці:
к.т.н., доц.
Мітюк Людмила Олексіївна _____

Рецензент:
к.т.н., доц.
Чернявський Анатолій Володимирович _____

Нормоконтролер:
к.т.н., доц.
Кулаковський Леонід Ярославович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному
Проєкті немає запозичень з праць інших авторів
Студент _____

Київ – 2026 рік

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						1
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	ДП ОА21.02.000 ПЗ	Загально-технічна частина	1	
2	A4	ДП ОА21.02.000 ПЗ	Схема електропостачання	1	
3	A4	ДП ОА21.02.000 ПЗ	Схема моделювання	1	
4	A4	ДП ОА21.02.000 ПЗ	Результати моделювання роботи ВЕУ	1	

				ДП ОА-21.02.000		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Гайко М.Р.			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Торопова Л.В.				1	1
Консульт.	Мейта О. В. Мітюк Л. О.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМК гр. ОА-21	

					ДП ОА21.02.000 ПЗ		Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			2

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Автоматизована система керування продукуванням
водню на базі лужного електролізера»**

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						3
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут енергозбереження і енергоменеджменту
Кафедра автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Інжиніринг автоматизованих електротехнічних комплексів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій БОЙЧЕНКО

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Гайку Михайлу Руслановичу

1. Тема проєкту: «Автоматизована система продукування водню на базі лужного електролізера», керівник проєкту Ас. Торопова Л.В., затверджені наказом від «26» травня 2026 р. №1910-С.

2. Термін подання студентом проєкту ____ 10 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до проєкту: «Автоматизована система керування продукуванням водню на базі лужного електролізера».

4. Зміст пояснювальної записки:

Загально-технічна частина

Електропостачання

Спеціальна частина

Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначення обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо):

1 аркуш – Загально-технічна частина;

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						4
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 2 аркуш – Схема електропостачання;
 3 аркуш – Схема моделювання
 4 аркуш – Результати моделювання роботи ВЕУ;

6. Консультанти розділів проєкту:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Електропостачання	к.т.н., доцент, Мейта О.В.		
Охорона праці	к.т.н., доцент, Мітюк Л.О.		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1.	Загально-технічна частина		
2.	Електропостачання		
3.	Спеціальна частина		
4.	Охорона праці		
5.	Підготовка графічного матеріалу		

Студент _____ Михайло ГАЙКО

Керівник _____ Лілія ТОРОПОВА

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						5
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

Вступ	10
1. Технологічна частина.....	12
1.1 Аналітичний огляд існуючих технологій видобутку водню з використанням електролізерів	12
1.1.1 Загальна характеристика водню як енергоносія	12
1.1.2 Основні методи отримання водню	13
1.1.3 Класифікація електролізерів	14
1.1.4 Принцип роботи лужного електролізера	15
1.1.5 Сфери застосування електролізних установок	16
1.1.6 Переваги та недоліки лужних електролізерів	17
1.2 Вимоги і принцип роботи існуючих систем керування лужними електролізерами.....	18
1.2.1 Основні параметри, що підлягають контролю.....	18
1.2.2 Структура систем автоматичного керування	19
1.2.3 Принципи регулювання процесу електролізу	20
1.2.4 Сучасні підходи до автоматизації	22
1.2.5 Вимоги до безпеки та надійності систем.....	23
Висновки до розділу	25
2. Електропостачання.....	26
2.1 Характеристика умов проєктування та розподілу електроенергії на підприємстві.....	26
2.2 Розрахунок електричного освітлення	29
2.2.1 Практична реалізація розрахунку для відділень цеху.....	29
2.3 Розрахунок електричних навантажень та вибір трансформаторів.....	31
2.3.1 Розрахункове навантаження першої групи споживачів для номінального режиму роботи та вибір трансформатора.....	31

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						6
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3.2	Перевірка обраних трансформаторів	33
2.4	Розрахунок електричних мереж підприємства та вибір типу перерізів провідників.....	35
2.4.1	Перевірка за нагрівом	36
2.4.2	Перевірка за втратами напруги	38
2.4.3	Перевірка та остаточний вибір кабелю.....	40
2.5	Розрахунок струмів КЗ.....	41
2.5.1	Розрахунок опорів елементів схеми заміщення.....	42
2.5.2	Опори до точок КЗ:	45
2.5.3	Визначення струмів КЗ.....	45
2.5.4	Визначення ударних струмів	45
2.6	Вибір електричних апаратів та уставок їх спрацювання	46
2.6.1	Вибір роз'єднувачів	47
2.6.2	Вибір автоматичних вимикачів	48
2.6.3	Вибір магнітних пускачів.....	49
2.6.4	Вибір запобіжників	51
2.7	Основні енергетичні показники підприємства.....	53
Висновки до розділу		56
3. Спеціальна частина		58
3.1	Вибір елементів автоматизації для системи керування лужним електролізером.....	58
3.1.1	Аналіз технологічних параметрів, що підлягають контролю та регулюванню	58
3.1.2	Вибір датчика струму електролізера.....	59
3.1.3	Вибір датчиків температури та тиску	60
3.1.4	Вибір датчика рівня електроліту	60
3.1.5	Вибір виконавчих механізмів	61

3.1.6	Формування структури нижнього рівня автоматизації.....	62
3.2	Вибір та налаштування програмованого логічного контролера системи керування електролізом.....	64
3.2.1	Формування вимог до контролера системи керування.....	64
3.2.2	Порівняльний аналіз промислових програмованих логічних контролерів	64
3.2.3	Обґрунтування вибору Siemens SIMATIC S7-1200.....	66
3.2.4	Конфігурація модулів введення-виведення	67
3.2.5	Організація обміну даними між PLC та SCADA	69
3.2.6	Реалізація алгоритмів захисту та аварійного відключення	70
3.3	Синтез системи керування електролізом.....	70
3.3.1	Розроблення математичної моделі лужного електролізера.....	70
3.3.2	Теплова модель електролізера	72
3.3.3	Формування повної системи диференціальних рівнянь електролізера.....	74
3.3.4	Лінеаризація математичної моделі та побудова моделі у просторі станів	75
3.3.5	Синтез LQI-регулятора.....	76
3.3.6	Формування закону керування та аналіз стійкості системи.....	78
3.4	Дослідження технологічного процесу видобутку водню методом цифрового моделювання.....	78
3.4.1	Розроблення імітаційної моделі лужного електролізера	78
3.4.2	Розроблення моделі автоматизованої системи керування електролізером	80
3.4.3	Дослідження реакції електролізера на ступінчасту зміну напруги ..	81
3.4.4	Дослідження роботи системи з LQI-регулятором	85
3.4.5	Порівняльний аналіз результатів моделювання	89

3.4.6 Аналіз впливу струму на продуктивність електролізера за воднем .	90
Висновки до розділу	93
4. Комплексний аналіз та проектування системи охорони праці електролізного цеху виробництва водню.....	94
4.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів виробничого середовища	94
4.2 Заходи попередження небезпек	96
4.3 Умови праці	98
4.3.1 Мікрокліматичні умови	98
4.3.2 Акустичне середовище та вібрація	99
4.3.3 Світлове середовище	99
4.4 Заходи з електробезпеки.....	100
4.4.1 Технічні системи захисту	101
4.4.2 Організація безпечної експлуатації.....	101
4.5 Пожежна безпека.....	102
4.5.1 Архітектурні та конструктивні рішення.....	102
4.5.2 Системи автоматичного гасіння	102
4.6 План ліквідації аварій	103
Висновки до розділу	105
Висновки	106
Перелік використаної літератури	107
Схема електрична принципова	110
Додаток А.....	110

ВСТУП

Сучасний розвиток енергетики характеризується активним пошуком екологічно безпечних джерел енергії та технологій зниження викидів парникових газів. Одним із найбільш перспективних напрямів є використання водню як універсального енергоносія, який може застосовуватися для накопичення енергії, живлення транспортних систем, забезпечення технологічних процесів у промисловості та інтеграції відновлюваних джерел енергії в енергетичну інфраструктуру. Особливу увагу сьогодні приділяють виробництву так званого «зеленого» водню шляхом електролізу води з використанням електроенергії, отриманої від відновлюваних джерел.

Серед існуючих технологій електролізу лужні електролізери є найбільш поширеними завдяки високій надійності, тривалому ресурсу роботи та відносно невисокій вартості обладнання. Разом з тим ефективність їх функціонування значною мірою залежить від якості автоматичного керування технологічним процесом, підтримання оптимальних режимів роботи та забезпечення безпечної експлуатації.

Актуальність роботи полягає у необхідності розроблення сучасної автоматизованої системи керування лужним електролізером, яка забезпечує стабільне виробництво водню, підвищення енергоефективності процесу та зниження впливу людського фактора на роботу технологічного обладнання.

Метою дипломного проєкту є розроблення автоматизованої системи продукування водню на базі лужного електролізера із застосуванням сучасних засобів автоматизації, програмованого логічного контролера та алгоритмів автоматичного регулювання.

Для досягнення поставленої мети були вирішені такі завдання: проведено аналіз існуючих технологій виробництва водню та систем автоматизації електролізних установок; виконано розрахунки системи електропостачання; обґрунтовано вибір засобів автоматизації та програмованого логічного контролера; розроблено математичну модель лужного електролізера; синтезовано систему автоматичного керування на основі LQI-регулятора; проведено дослідження

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						10
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

роботи системи методом комп'ютерного моделювання; розроблено комплекс заходів з охорони праці та безпечної експлуатації обладнання.

Об'єктом дослідження є технологічний процес виробництва водню методом лужного електролізу води.

Предметом дослідження є автоматизована система керування технологічними параметрами лужного електролізера.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів під час проєктування та модернізації промислових систем виробництва водню, а також при впровадженні сучасних засобів автоматизації в електролізних установках.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						11
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналітичний огляд існуючих технологій видобутку водню з використанням електролізерів

1.1.1 Загальна характеристика водню як енергоносія

Водень – найпоширеніший елемент у Всесвіті та перспективний енергоносіє завдяки високій теплотворній здатності й екологічності. Під час його згоряння утворюється лише вода, що сприяє зменшенню викидів парникових газів [1, 2].

Водень широко застосовується в хімічній промисловості, нафтопереробці, транспорті та паливних елементах. Особливе значення має «зелений» водень, отриманий електролізом води з використанням відновлюваних джерел енергії.

Крім того, водень є ефективним засобом акумулювання енергії: у системах Power-to-Gas надлишкова електроенергія перетворюється на водень для подальшого зберігання, транспортування або повторного виробництва електроенергії.

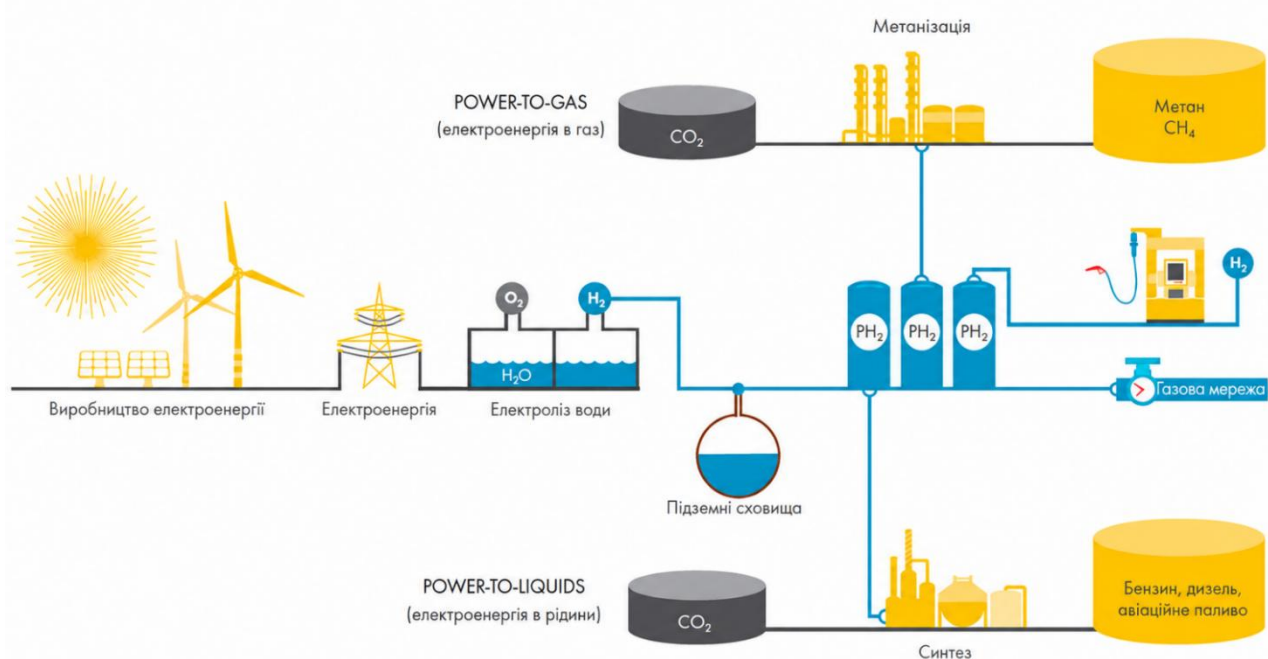


Рисунок 1.1 – Схема акумулювання надлишкової відновлюваної енергії через виробництво водню та синтетичного палива.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						12
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Водень має й недоліки: складність зберігання й транспортування через низьку густину, потребу у високому тиску або кріогенних температурах та підвищені вимоги безпеки через вибухонебезпечність.

Попри це, водень є перспективним енергоносієм і важливим елементом переходу до сталої та екологічно безпечної енергетики.

1.1.2 Основні методи отримання водню

Основними промисловими методами отримання водню є паровий риформінг природного газу, газифікація вугілля, біологічні технології та електроліз води.

Найпоширенішим є паровий риформінг, який відзначається економічністю, але супроводжується значними викидами CO₂. Газифікація вугілля також забезпечує виробництво водню, проте має ще більший негативний вплив на довкілля.

Біологічні методи перебувають на стадії досліджень і поки не отримали широкого застосування через низьку продуктивність. Найперспективнішим вважається електроліз води, що дозволяє отримувати високочистий водень без прямих шкідливих викидів, особливо при використанні відновлюваних джерел енергії [3].

Візуальне порівняння методів отримання водню наведено на рис. 1.2.

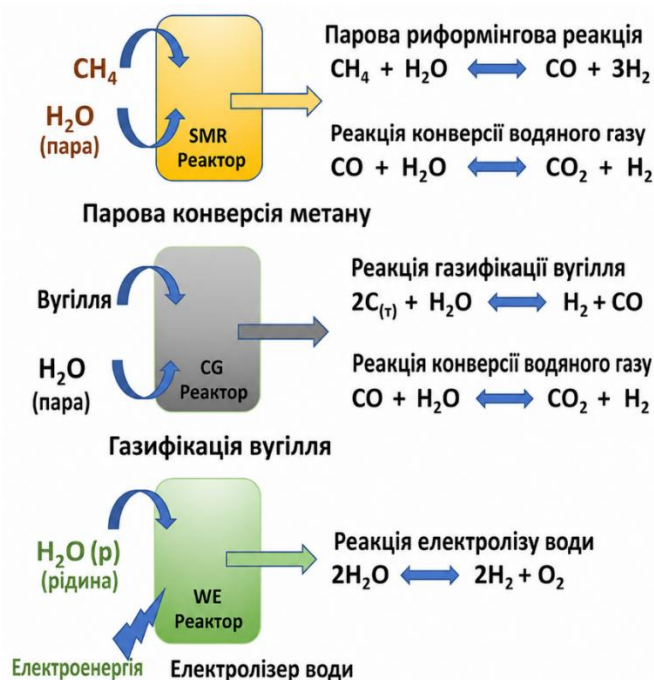


Рисунок 1.2 – Порівняльна схема отримання водню

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

За типом електроліту електролізери поділяються на лужні, мембранні (РЕМ) та твердооксидні. Найбільш поширеними є лужні електролізери завдяки їх низькій вартості та високій надійності, хоча вони мають обмежені можливості регулювання режимів роботи.

Отже, методи отримання водню поділяють на традиційні та екологічно чисті. Серед останніх найбільш перспективним є електроліз води, особливо у поєднанні з відновлюваними джерелами енергії.

1.1.3 Класифікація електролізерів

Електроліз води є одним із ключових методів отримання водню, а його ефективність значною мірою визначається типом застосованого електролізера. Сучасні електролізні установки класифікуються за типом електроліту, температурним режимом роботи та конструктивними особливостями.

Найбільш поширеними є три основні типи електролізерів: лужні (AEL), протонно-обмінні мембранні (РЕМ) та твердооксидні (SOEC) (рис.1.3).

Як це порівняти з лужними та РЕМ?				
Електролізер	Лужний	РЕМ	SOEC	
Електроліт	30% розчин КОН або 25% розчин NaOH	Твердий полімер	Керамічно-металева сполука	
Робоча темп. (°C)	80-90	50-80	650-1,000	
Робочий тиск (МПа)	≤3.2	≤5	≤1	
Чистота водню (%)	≥99.8	≥99.99	≥99.9	
Ефективність напруги	62-82	67-82	<110	
Термін служби стека	10 років	3-4 роки	2-3 роки	
Поточна стадія	Зрілий	Комерційний	Демонстрація	
Вартість (USD/кВт·год)	350-1,400	700-1,800	>2,300	

Рисунок 1.3 – Характеристики різних типів електролізерів

Лужні електролізери використовують розчин КОН або NaOH, відзначаються низькою вартістю, надійністю та тривалим ресурсом, але мають обмежену динаміку регулювання [4].

РЕМ-електролізери застосовують полімерну мембрану, забезпечують високу густину струму та швидку реакцію на зміну навантаження, проте характеризуються високою вартістю через використання дорогісінних каталізаторів.

SOEC-електролізери працюють за високих температур і мають високий ККД, але є складними в експлуатації та перебувають на стадії розвитку [5].

Лужні електролізери переважають за вартістю та надійністю, РЕМ – за динамічністю, а SOEC – за ефективністю. У даній роботі розглядаються лужні електролізери як найбільш поширене та економічно доцільне рішення для автоматизованого виробництва водню.

1.1.4 Принцип роботи лужного електролізера

Лужний електролізер — це електрохімічна установка для розкладання води на водень і кисень під дією постійного струму. Процес відбувається в лужному електроліті (KOH або NaOH).

Конструктивно він складається з анода, катода та пористої діафрагми, яка розділяє гази й забезпечує іонний обмін між електродами (рис. 1.4).

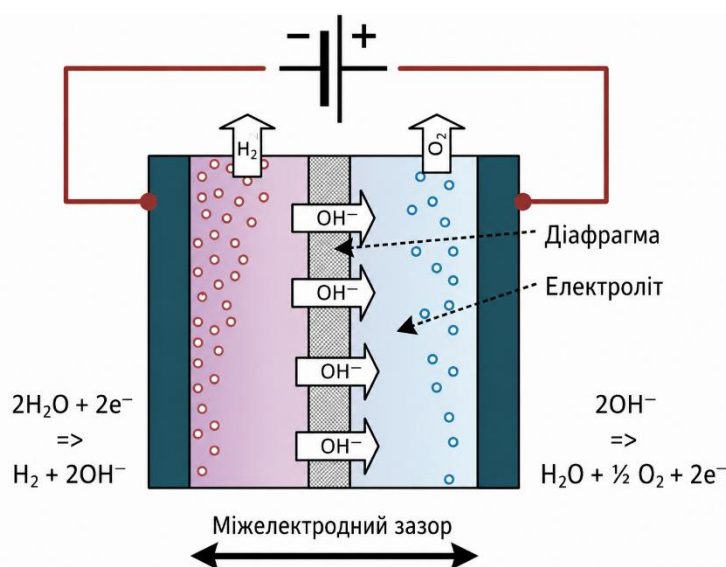


Рисунок 1.4 – Принципова схема роботи лужного електролізера

У лужному електролізері вода розкладається на водень і кисень під дією постійного струму, а електроліт забезпечує іонну провідність системи.

Основними параметрами процесу є температура, тиск, густина струму та концентрація електроліту; зазвичай робота ведеться при 60–90 °С для підвищення ефективності.

Реальна напруга перевищує теоретичну через омичні втрати та перенапруги, а також супроводжується тепловиділенням, що вимагає стабілізації температури.

Завдяки простій конструкції та високій надійності лужні електролізери широко застосовуються для промислового виробництва водню.

1.1.5 Сфери застосування електролізних установок

Електролізні установки для виробництва водню знаходять широке застосування в різних галузях промисловості та енергетики. Їх використання обумовлене можливістю отримання високочистого водню безпосередньо на місці споживання, а також перспективами інтеграції з відновлюваними джерелами енергії (рис.1.5).

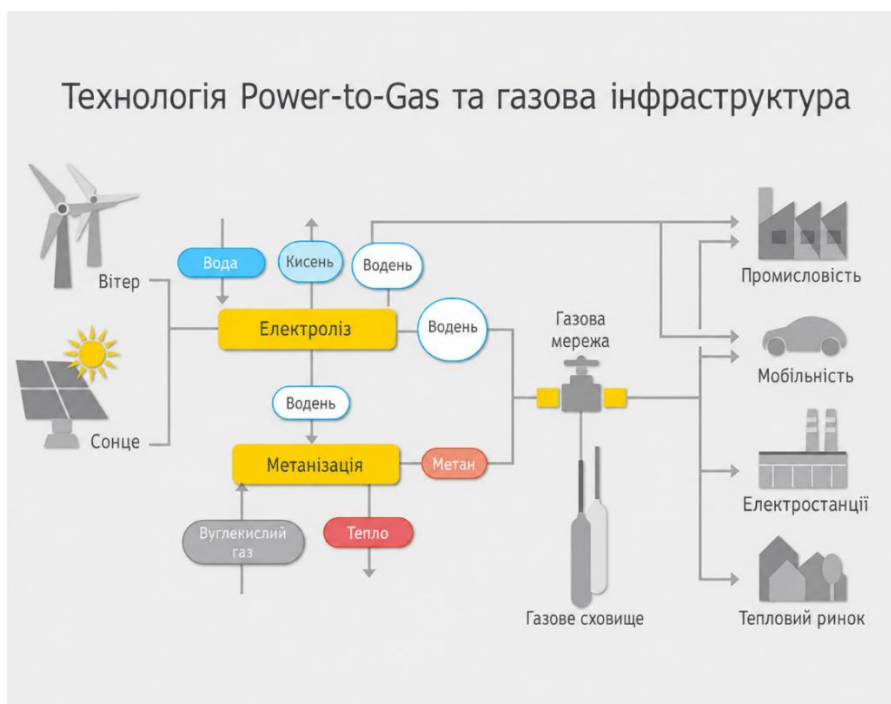


Рисунок 1.5 - Сфери застосування водню та електролізних систем

Водень широко застосовується в хімічній промисловості для виробництва аміаку, метанолу та очищення нафтопродуктів. У металургії він використовується як відновник, що дозволяє зменшити викиди CO₂.

В енергетиці водень є ефективним засобом накопичення енергії в системах Power-to-Gas, а в транспорті використовується як паливо для транспортних засобів із паливними елементами.

Електролізні установки також застосовуються в автономних енергосистемах і системах резервного живлення. Завдяки розвитку відновлюваної енергетики значення електролізу води для виробництва водню постійно зростає.

1.1.6 Переваги та недоліки лужних електролізерів

Лужні електролізери є однією з найбільш досліджених і впроваджених у промисловості технологій отримання водню методом електролізу води. Їх широке застосування обумовлене поєднанням технічної надійності, відносно невисокої вартості та тривалого терміну експлуатації. Водночас дана технологія має ряд обмежень, які необхідно враховувати при проектуванні автоматизованих систем продукування водню. Список наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки лужних електролізерів

Переваги	Недоліки
1	2
Висока технологічна зрілість і відпрацьованість конструкції	Низька динамічність роботи (повільна реакція на зміну навантаження)
Відносно низька вартість обладнання	Обмежена можливість роботи з нестабільними джерелами енергії
Використання доступних матеріалів (без дорогоцінних металів)	Нижча густина струму порівняно з PEM-електролізерами
Тривалий термін експлуатації (десятки тисяч годин)	Великі габарити установки при однаковій продуктивності
Висока надійність при стаціонарному режимі роботи	Необхідність роботи з рідким лужним електролітом

Продовження табл. 1.1.

1	2
Відносно високий ККД (близько 60–70%)	Корозійна активність середовища
Можливість роботи при підвищеному тиску	Ризик змішування водню та кисню при пошкодженні діафрагми
Простота обслуговування та ремонту	Нижча чистота водню (потреба в додатковому очищенні)

Лужні електролізери є відносно дешевими, надійними та технологічно зрілими установками з тривалим ресурсом роботи та ККД до 60–70%.

До їх переваг належать доступні матеріали та можливість роботи під тиском, а до недоліків — низька динамічність, менша густина струму, більші габарити порівняно з РЕМ-електролізерами, а також використання агресивного електроліту та ризику змішування газів.

Таким чином, лужні електролізери є ефективним промисловим рішенням, але потребують врахування їх особливостей при проєктуванні систем автоматичного керування.

1.2 Вимоги і принцип роботи існуючих систем керування лужними електролізерами

1.2.1 Основні параметри, що підлягають контролю

Система керування лужним електролізером контролює основні технологічні параметри для забезпечення стабільної та безпечної роботи [6].

Ключовими є струм і напруга, що визначають продуктивність і енергоспоживання. Також регулюється температура електроліту (60–90 °С), яка впливає на швидкість реакцій і ефективність процесу.

Додатково контролюються тиск, рівень та якість електроліту, що забезпечує безпечну експлуатацію, стабільність процесу та довговічність обладнання.

Систему контролю параметрів наведено на рис. 1.6.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						18
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

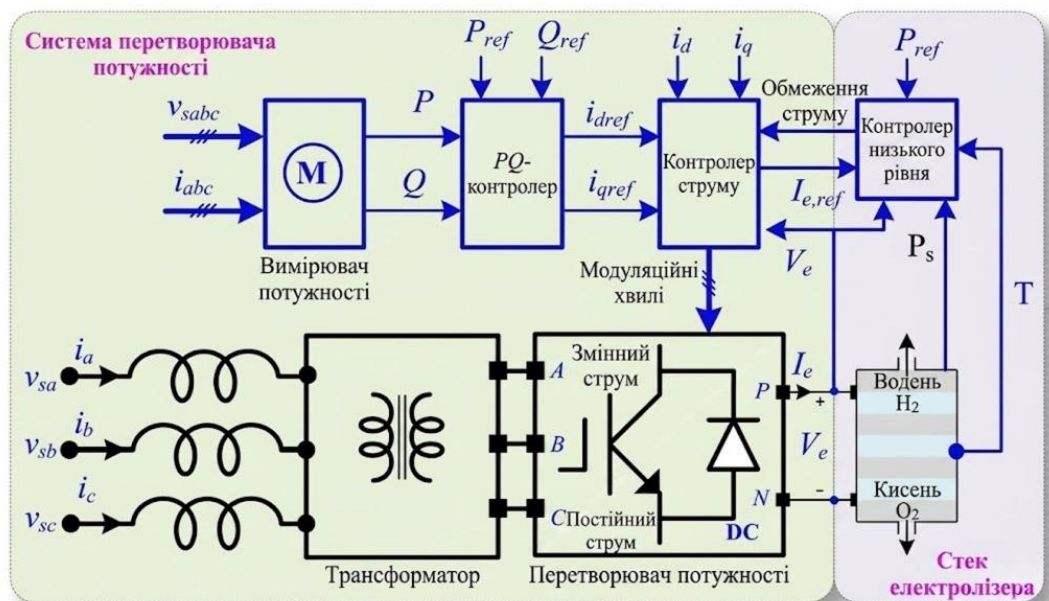


Рисунок 1.6 – Схема контролю технологічних параметрів електролізера

Додатково система може контролювати витрати газів, співвідношення водню та кисню, стан діафрагми й параметри навколишнього середовища, що підвищує загальну надійність установки [7].

Отже, контроль технологічних параметрів є основою роботи системи керування, забезпечуючи стабільність процесу, безпеку та ефективність лужного електролізера.

1.2.2 Структура систем автоматичного керування

Система автоматичного керування лужним електролізером працює за принципом зворотного зв'язку та забезпечує підтримання заданих режимів і безпечну експлуатацію.

Її структура включає три рівні: вимірювальний (датчики струму, напруги, температури, тиску та рівня), керуючий (PLC, що обробляє сигнали та формує керування) і виконавчий (перетворювачі, клапани, насоси та системи охолодження) [8].

Взаємодія оператора із системою здійснюється через HMI, який забезпечує контроль параметрів і налаштування режимів, а також може інтегруватися зі SCADA для централізованого моніторингу [9].

Функціональну схему наведено на рис. 1.7.

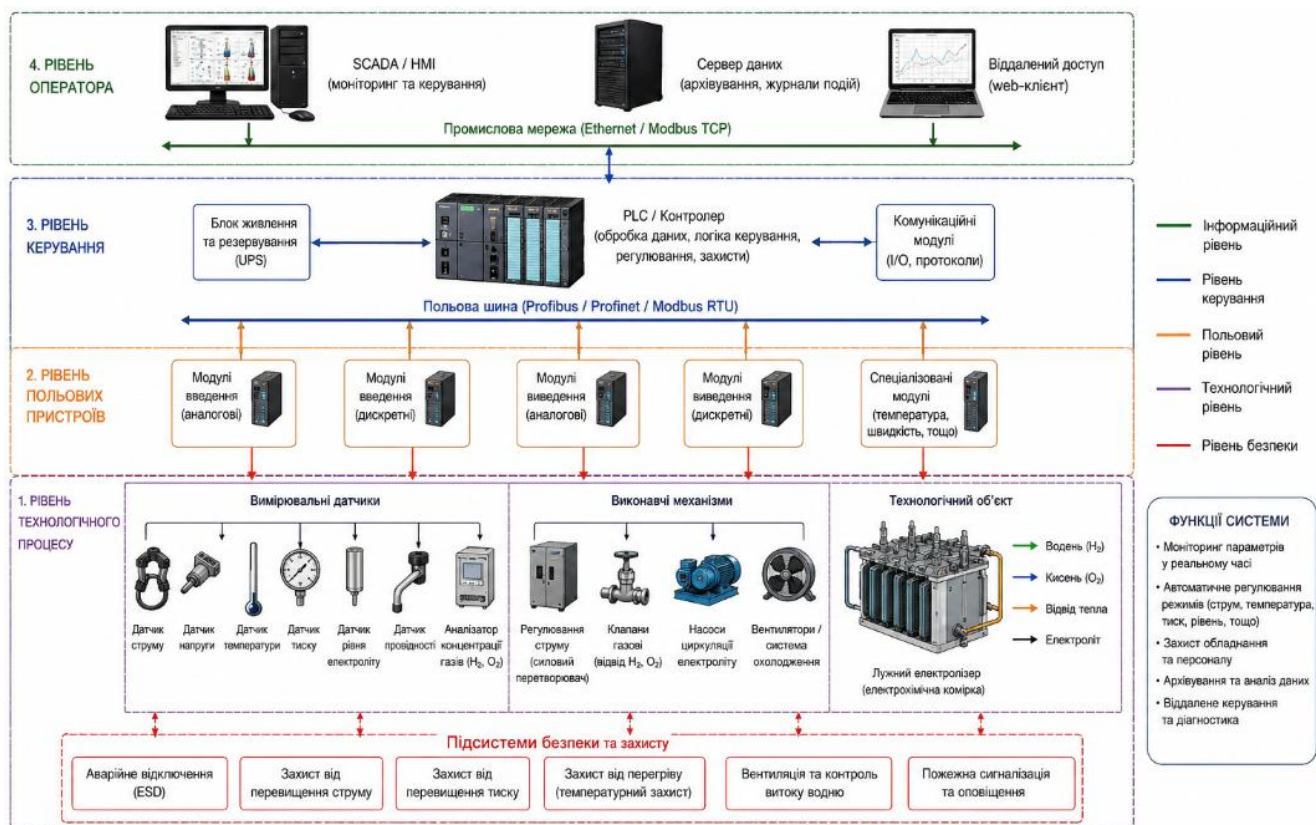


Рисунок 1.7 – Структурна схема системи автоматичного керування електролізером

Системи керування електролізером працюють із багатопараметричним об'єктом, де зміна струму одночасно впливає на температуру, тиск і газоутворення, що потребує багатоконтурного та узгодженого регулювання.

Обов'язковою складовою є захисні підсистеми, які забезпечують аварійне відключення або безпечний режим роботи при перевищенні критичних параметрів через ризик утворення вибухонебезпечних сумішей [10].

Отже, система керування є складним багаторівневим комплексом із датчиків, контролера, виконавчих механізмів та HMI, і її правильна організація є ключовою для стабільної та безпечної роботи електролізної установки.

1.2.3 Принципи регулювання процесу електролізу

Регулювання лужного електролізера включає підтримання електричних, теплових і гідродинамічних параметрів для стабільного виробництва водню.

Основним керованим параметром є струм, що визначає продуктивність процесу. Напруга використовується як індикатор енергетичних втрат і стану установки.

Температура підтримується системою охолодження, а тиск — керуванням відведенням газів і роботою компресорів. Додатково контролюються рівень, концентрація та циркуляція електроліту, що забезпечує стабільність електрохімічних процесів.

Приклад схеми системи автоматичного регулювання наведено на рис. 1.8.



Рисунок 1.8 – Схема системи автоматичного регулювання (контур керування)

У сучасних системах застосовують багатоконтурні, каскадні та адаптивні регулятори, що враховують взаємний вплив основних параметрів процесу.

Для підвищення точності керування використовуються цифрові алгоритми, зокрема прогнозне регулювання та елементи інтелектуального керування, які дозволяють підлаштовувати роботу електролізера до змін умов.

Таким чином, ефективне керування базується на узгодженому регулюванні струму, напруги, температури, тиску та параметрів електроліту, що забезпечує стабільну та безпечну роботу установки.

1.2.4 Сучасні підходи до автоматизації

Сучасні системи автоматизації лужних електролізерів спрямовані на підвищення автономності, енергоефективності та інтеграцію з цифровими технологіями, що особливо актуально при роботі з відновлюваними джерелами енергії через їхню змінну генерацію.

Одним із ключових рішень є використання SCADA-систем, які забезпечують централізований моніторинг, керування та архівування даних. Вони дозволяють оператору в реальному часі контролювати стан електролізера, аналізувати параметри та реагувати на аварійні ситуації (рис. 1.9).

Архітектура SCADA-системи

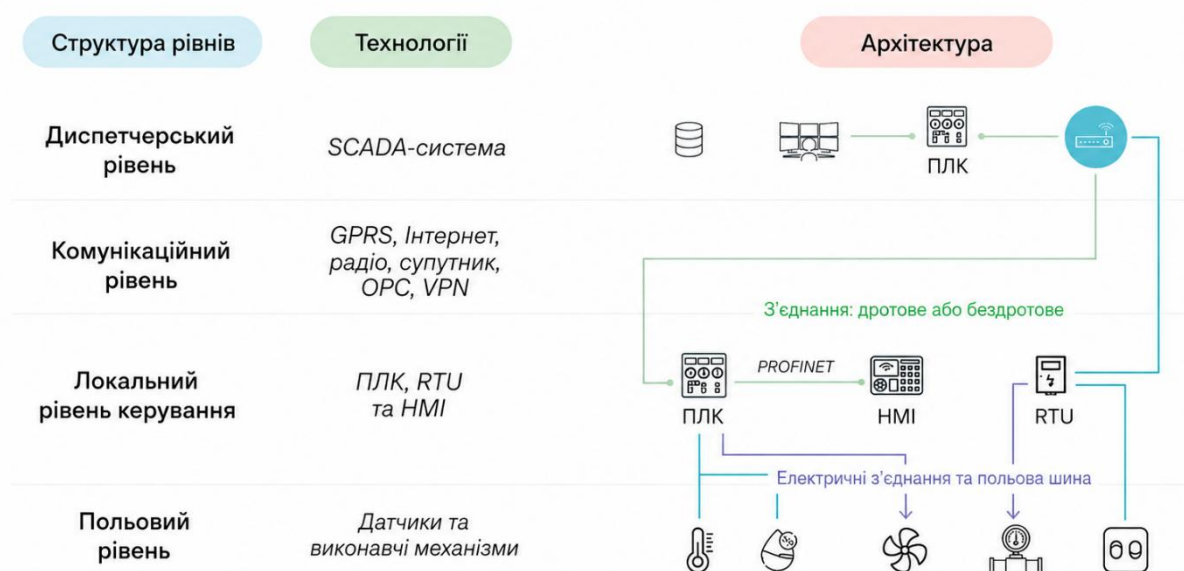


Рисунок 1.9 – Архітектура SCADA-системи керування електролізером

Сучасна автоматизація лужних електролізерів ґрунтується на PLC-контролерах, що забезпечують виконання алгоритмів керування, діагностику та інтеграцію з промисловими мережами.

Для умов нестабільного енергопостачання застосовуються адаптивні методи керування, а також підходи машинного навчання для прогнозування режимів роботи та виявлення відхилень.

Важливими напрямками розвитку є віддалений моніторинг, інтеграція в Smart Grid та підвищення кібербезпеки, що підвищує ефективність і надійність виробництва водню.

1.2.5 Вимоги до безпеки та надійності систем

Системи виробництва водню на базі лужних електролізерів належать до об'єктів підвищеної небезпеки через утворення вибухонебезпечних газових сумішей, використання лужних електролітів, а також роботу під тиском і високими струмами. Це зумовлює підвищені вимоги до безпеки на всіх етапах життєвого циклу.

Ключовою умовою є забезпечення вибухобезпеки шляхом герметичності газових трактів і надійного розділення водню та кисню. Для цього застосовуються діафрагми або мембрани, а також системи контролю витоків водню та аварійної вентиляції, що автоматично реагують на перевищення допустимих концентрацій газу (рис. 1.10).

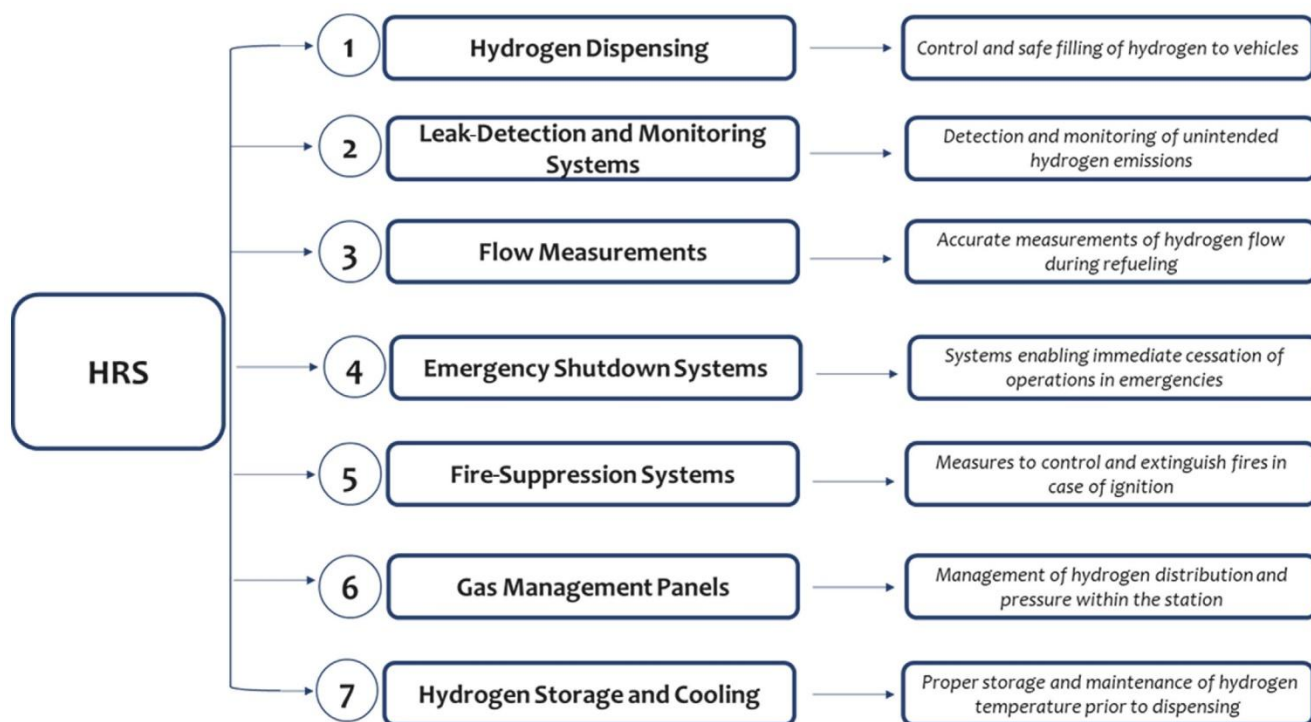


Рисунок 1.10 – Схема системи безпеки електролізної установки

Безпечна експлуатація лужного електролізера передбачає контроль тиску за допомогою запобіжних клапанів, реле тиску та систем аварійного скидання.

Електробезпека забезпечується автоматичними вимикачами, захистом від перевантажень, контролем ізоляції та заземленням.

Надійність системи підвищується резервуванням насосів, датчиків і джерел живлення, а також використанням корозійностійких матеріалів.

Система керування повинна підтримувати аварійні режими, автоматичне відключення при небезпечних відхиленнях і функції діагностики, що забезпечує стабільну та безпечну роботу установки.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						24
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

У розділі виконано аналіз сучасних методів отримання водню та принципів роботи електролізних систем. Встановлено, що серед промислових технологій найбільш перспективним є електроліз води, оскільки він забезпечує отримання високочистого водню та може бути інтегрований з відновлюваними джерелами енергії.

Показано, що з існуючих типів електролізерів лужні системи є найбільш відпрацьованими та економічно доцільними для промислового застосування. Їх робота базується на електрохімічному розкладі води в лужному середовищі, а ефективність процесу визначається стабільністю електричних і теплових параметрів.

Проаналізовано основні сфери використання електролізних установок, зокрема енергетику, хімічну промисловість та металургію, де водень застосовується як сировина та енергоносіє.

У частині систем керування встановлено, що автоматизація базується на багаторівневій структурі з використанням датчиків, PLC-контролерів та виконавчих механізмів. Ключовими параметрами контролю є струм, напруга, температура, тиск і рівень електроліту.

Сучасні підходи до автоматизації передбачають використання SCADA-систем, адаптивних алгоритмів та інтелектуальних методів керування, що підвищує ефективність і гнучкість роботи установок.

Враховуючи вимоги безпеки, обов'язковим є впровадження систем захисту від перевантажень, витоків газу та аварійних режимів, що забезпечує надійну експлуатацію обладнання.

Загалом встановлено, що створення автоматизованої системи продукування водню на базі лужного електролізера є технічно обґрунтованим і перспективним рішенням за умови комплексного підходу до керування та безпеки процесу.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						25
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

2.1 Характеристика умов проектування та розподілу електроенергії на підприємстві

Електролізний цех є об'єктом, де електрична енергія є не просто допоміжним ресурсом, а безпосереднім інструментом перетворення речовини. Це зумовлює специфіку навантажень, які характеризуються значною потужністю та необхідністю випрямлення струму, що в свою чергу вносить спотворення у показники якості електроенергії в мережі [11].

Даний розділ дипломної роботи має на меті розроблення цілісної системи електропостачання, яка б відповідала найвищим стандартам надійності та безпеки. В ході проектування було враховано вимоги нормативних документів, таких як Правила улаштування електроустановок (ПУЕ) та Державні будівельні норми (ДБН), що регулюють проектування промислових мереж та систем штучного освітлення.

Електролізний цех є об'єктом 1 особливої категорії надійності. Для безпеки персоналу та обладнання необхідно забезпечити два незалежні джерела живлення, безперебійне живлення, тривале резервне живлення, автоматичне введення резерву.

Проектований об'єкт являє собою складну інженерну споруду, де інтегровані процеси підготовки води, безпосереднього електролізу лужного розчину, компресії газу та його очищення. За архітектурно-планувальними характеристиками цех поділяється на два основні відділення: хімічне (довжиною 20 м) та машинне (довжиною 45 м), при загальній ширині приміщення 25 м (табл. 2.1). Така структура обумовлена технологічним циклом: у хімічному відділенні зосереджені процеси підготовки електроліту та власне електроліз, тоді як машинне відділення призначене для механічної обробки та транспортування отриманого водню.

Таблиця 2.1 – Геометричні розміри цеху

Довжина, м	Ширина, м	1 Відділення, м	2 Відділення, м
65	25	20	45

Одним із найважливіших етапів проектування є визначення категорії надійності електропостачання. Відповідно до ПУЕ, електроприймачі електролізного цеху відносяться до I категорії, а окремі вузли – до особливої групи I категорії. Це означає, що перерва в електропостачанні може призвести до небезпеки для життя людей, значних матеріальних збитків або розладу складного технологічного процесу. Елементи цеху наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Склад та характеристики електроприймачів електролізного цеху. Частина 1

Номер на плані	Електроприймач	Косинус	Кількість (роб+рез)	Номінальна потужність, кВт	Режим роботи	Примітка
1	2	3	4	5	6	7
1	Електролізер лужний (вбудований випрямляч та датчики)	0,92	1+0	25	Тривалий	Основне обладнання
11+3	Компресор водню (1 ступінь)	0,88	1+1	12 (6+6)	Тривалий	Підвищення тиску водню після виходу з електролізера
4+14	Компресор водню (2 ступінь)	0,88	1+1	18 (9+9)	Тривалий	Доведення тиску водню до необхідних значення для зберігання
10+15	Система охолодження електролізера (чилер)	0,9	1+1	8 (4+4)	Тривалий	Відведення тепла (процес електролізу)
9+16	Насос циркуляції електроліту	0,85	1+1	1,6 (0,8+0,8)	Тривалий	Циркуляція лужного розчину
6	Система підготовки води (зворотний осмос, насос) ТВ = 40%	0,85	1+0	1,5	Періодичний	Очищення води та її зберігання
17	Системи осушення та очищення водню	0,85	1+0	0,7	Тривалий	Осушення та очищує водень від вологи та домішок перед зберіганням
18	Буферний ресивер водню з автоматикою	0,95	1+0	0,15	Тривалий	Короткочасне накопичення водню та стабілізація тиску (безперебійне живлення)
2,12+13	Система вентиляції цеху	0,83	2+1	12 (2*4 + 4)	Тривалий	Видалення можливих витоків водню, вибухобезпека

Продовження таблиці 2.2.

1	2	3	4	5	6	7
19	Щит силовий (не енергоприймач, а розподільчий пункт)	—	1+0	0,3 (втрати)	Тривалий	Розподіл електроенергії між приймачами (основні)
7	Щит керування та автоматики	0,95	1+0	0,5	Тривалий	Керування технологічним процесом, сигналізація та захист (безперебійне живлення)
5	Робоче та аварійне освітлення цеху	0,9	1+0	1,5 (+ПРА для люмінесцентних ламп)	Тривалий	Безпечні умови праці (окремі лінії)
8	Система газового контролю, аварійного захисту та контролю параметрів	0,95	1+0	0,6	Тривалий	1 – контроль концентрації водню в цеху, сигналізація при перевищенні норм (безперебійне живлення) 2 – аварійне відключення, переведення в безпечний стан при аварії (безперебійне живлення) 3 – вимірювання температури, тиску, концентрації кисню (можливо ще якісь параметри) та передача даних до 2 та відповідального
20	Трансформатори напруги в ТП	-	2	-	Тривалий	-

Для забезпечення надійності у проекті передбачено резервування основного силового обладнання (схема 1 роб. + 1 рез. для компресорів, чилерів та насосів). Це дозволяє не лише забезпечити безперебійність процесу, а й проводити планове обслуговування без зупинки виробництва. Електролізер, як основний споживач, оснащений вбудованим випрямлячем та датчиками, що вимагає особливої уваги при виборі живильних кабелів через можливу наявність гармонійних складових у струмі. План розташування обладнання в цеху зображено на рис. 2.1.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						28
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

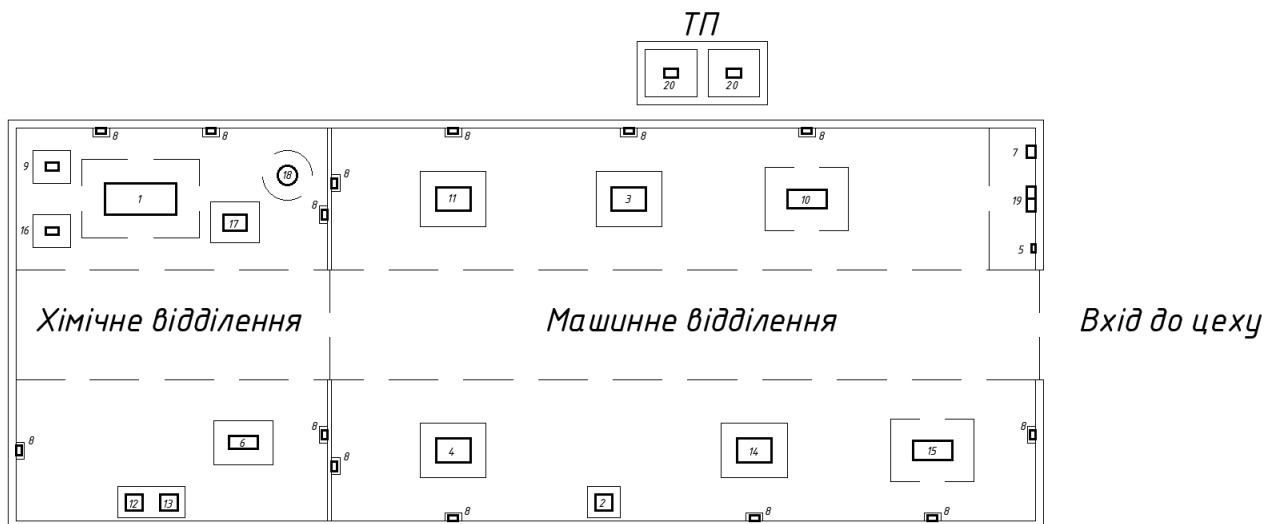


Рисунок 2.1 – План розташування обладнання електролізного цеху

2.2 Розрахунок електричного освітлення

Освітлення промислових приміщень є критичним фактором, що впливає на безпеку праці та ефективність візуального контролю технологічних процесів. При проектуванні електролізного цеху необхідно враховувати специфіку середовища – потенційну наявність вибухонебезпечних сумішей водню. Для розрахунку загального рівномірного штучного освітлення горизонтальних робочих поверхонь у таких приміщеннях найбільш доцільним є використання методу коефіцієнта використання світлового потоку.

Таблиця 2.3 – Тип світильника і світловий потік лампи $F_{\text{л}}$

Тип світильника	Область застосування	Тип лампи	Потужність, Вт	Напруга, В	ККД, %	$\cos(\varphi)$	Світловий потік
РПЛ01	Вибухонебезпечні	ЛБ-40	40	220	65	0,5	3000

2.2.1 Практична реалізація розрахунку для відділень цеху

Оскільки цех розділений на два відділення з різною площею, розрахунок проводиться диференційовано. Це дозволяє оптимізувати кількість точок освітлення та забезпечити рівномірність світлового поля в кожній технологічній зоні.

Показник приміщення:

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						29
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$i_1 = \frac{A_1 \cdot B}{h \cdot (A_1 + B)} = \frac{20 \cdot 25}{1,8 \cdot (20 + 25)} = 6,173 \quad (2.1)$$

Коефіцієнт запасу:

$$K_3 = 1,7 \quad (2.2)$$

Мінімальна освітленість по нормах:

$$E_{MIN} = 15 \text{ лк} \quad (2.3)$$

Площа освітлювального приміщення:

$$S_1 = A_1 \cdot B = 20 \cdot 25 = 500 \text{ м}^2 \quad (2.4)$$

Коефіцієнт нерівномірності освітлення

$$z = 1,35 \quad (2.5)$$

Коефіцієнт використання освітлювальних установок:

$$K_{B1} = 0,61 \quad (2.6)$$

Загальний світловий потік F , необхідний для забезпечення нормованої освітленості:

$$F_1 = \frac{K_3 \cdot E_{MIN} \cdot S_1 \cdot z}{K_{B1}} = \frac{1,7 \cdot 15 \cdot 500 \cdot 1,35}{0,61} = 28217,2 \text{ лм} \quad (2.7)$$

Потрібна кількість ламп

$$n_1 = \frac{F_1}{F_L} = \frac{28217,2}{3000} = 9,406 \approx 10 \text{ шт} \quad (2.8)$$

Аналогічні розрахунки проведено і для другої частини приміщення.

Потужність світильників без пускорегулюючого апарата (ПРА):

$$P_{CB} = \frac{(n_1 + n_2) \cdot 40}{1000} = \frac{(10 + 20) \cdot 40}{1000} = 1,2 \text{ кВт} \quad (2.9)$$

Сумарна потужність освітлювальної системи цеху становить 1,2 кВт (без урахування ПРА). Проте для розрахунку електричних мереж та вибору захисних апаратів використовується значення 1,5 кВт (табл. 2.2), що враховує втрати в пускорегулюючій апаратурі та створює необхідний інженерний запас. Аварійне освітлення організовується шляхом виділення частини світильників робочого освітлення в окремі лінії, що живляться від джерела безперебійного живлення або незалежного вводу.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						30
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3 Розрахунок електричних навантажень та вибір трансформаторів

Оскільки реальний графік споживання енергії електролізними установками, насосами, компресорами та системою вентиляції є випадковим процесом, використано статистичні методи. Розрахунок електричних навантажень проводиться методом коефіцієнта попиту. Для цього необхідно знайти коефіцієнт попиту, активні розрахункові потужності до кожного споживача, розрахункову активну потужність групи, тангенси кожного споживача, реактивні розрахункові потужності до кожного споживача, розрахункову реактивну потужність групи і далі вже повну розрахункову потужність групи. Це необхідно виконати за умови номінального режиму роботи цеху (2 робочі трансформатори).

Далі необхідно забезпечити безпечний післяаварійний стан роботи цеху. Для цього один із трансформаторів умовно «виходить з ладу» і все навантаження переходить на інший трансформатор. Трансформатори мають бути однакові, щоб уникнути нерівномірного навантаження, вирівнювальних струмів, неможливості паралельної роботи трансформаторів, перегріву, втрати найдійності, ускладнення захисту та інших можливих негативних наслідків.

Електрична схема зображена на рис. 2.2 (Додаток А).

2.3.1 Розрахункове навантаження першої групи споживачів для номінального режиму роботи та вибір трансформатора

Коефіцієнт попиту:

$$K_{\Pi 1} = 0,43 + 0,57 \cdot \frac{P_{H \max}}{\sum_{i=1}^{n=10} P_{Hi}} =$$
$$= 0,43 + 0,57 \cdot \frac{25}{25 + 4 + 9 + 6 + 1,5 + 1,5 \cdot \sqrt{0,4 + 0,5 + 0,6 + 4 + 0,8}} = 0,702 \quad (2.10)$$

Розрахункові значення активних потужностей:

$$P_{p1} = K_{\Pi 1} \cdot P_{H1} = 0,702 \cdot 25 = 17,555 \text{ кВт} \quad (2.11)$$

Розрахункове значення активної потужності для всієї групи споживачів:

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						31
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{p\Gamma p1} = K_{\Pi 1} \cdot \sum_{i=1}^{n=10} P_{Hi} = 0,702 \cdot (25 + 4 + 9 + 6 + 1,5 + 1,5 \cdot \sqrt{0,4} + 0,5 + 0,6 + 4 + 0,8) = 36,76 \text{ кВт} \quad (2.12)$$

Тангенс кожного споживача:

$$\operatorname{tg}(\varphi_1) = \sqrt{\frac{1}{\cos^2(\varphi_1)} - 1} = \sqrt{\frac{1}{0,92^2} - 1} = 0,426 \quad (2.13)$$

Реактивна розрахункова потужність кожного споживача:

$$Q_{p1} = P_{p1} \cdot \operatorname{tg}(\varphi_1) = 17,555 \cdot 0,426 = 7,479 \text{ кВАр} \quad (2.14)$$

Розрахункове значення реактивної потужності для всієї групи споживачів:

$$Q_{p\Gamma p1} = \sum_{i=1}^{n=10} Q_{pi} = 7,479 + 1,888 + 3,411 + 2,274 + 0,51 + 0,413 + 0,115 + 0,138 + 1,36 + 0,348 = 17,937 \text{ кВАр} \quad (2.15)$$

Повна розрахункова потужність для всієї групи споживачів:

$$S_{p\Gamma p1} = \sqrt{P_{p\Gamma p1}^2 + Q_{p\Gamma p1}^2} = \sqrt{36,76^2 + 17,937^2} = 40,903 \text{ кВА} \quad (2.16)$$

Обрано двообмоткових масляний трансформатор ТМ-63/10. Номінальна потужність:

$$S_{HTp} = 63 \text{ кВА} \quad (2.17)$$

Коефіцієнт завантаження:

$$\beta_1 = \frac{S_{p\Gamma p1}}{S_{HTp}} = \frac{40,903}{63} = 0,649 \quad (2.18)$$

Розрахунки проведені за формулами (2.10-2.18) для номінального режиму роботи навантаження групи №1, ідентичні розрахункам для номінального навантаження групи №2.

Обрано двообмоткових масляний трансформатор ТМ-63/10. Номінальна потужність:

$$S_{HTp} = 63 \text{ кВА}$$

Коефіцієнт завантаження:

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						32
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\beta_2 = \frac{S_{pГр2}}{S_{HTp}} = \frac{20,103}{63} = 0,319$$

2.3.2 Перевірка обраних трансформаторів

Розрахунки проведені за формулами (2.10-2.18) ідентичні розрахункам, проведеним для післяаварійного режиму роботи, де працює лише 1 трансформатор, а навантаження не розділяється на групи.

Коефіцієнт завантаження для післяаварійного режиму роботи:

$$\beta_{AB} = \frac{S_{pAB}}{S_{HTp}} = \frac{55,266}{63} = 0,877$$

Втрати в трансформаторах:

$$\begin{aligned} \Delta P_T &= 0,02 \cdot S_{Tp} = 0,02 \cdot 63 = 1,26 \text{ кВт} \\ \Delta Q_T &= 0,1 \cdot S_{Tp} = 0,1 \cdot 63 = 6,3 \text{ кВАр} \end{aligned} \quad (2.19-2.20)$$

Трансформатори ТМ-63/10 підходять і для номінального режиму роботи, і для післяаварійного режиму при включенні всього навантаження (включаючи резерви). На основі значень, отриманих в п.3 складено табл. 2.4 та табл. 2.5.

Таблиця 2.4 – Електричні навантаження підприємства у випадку номінальної роботи енергообладнання.

Вхідні дані					Результати розрахунків			
№ споживача	P_H , кВт	Кількість	$\cos(\varphi)$	K_{II}	$tg(\varphi)$	P_P , кВт	Q_P , кВАр	S_P , кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Група споживачів №1								
1	25	1	0,92	0,70 2	0,426	17,555	7,479	-
2	4	1	0,83		0,672	2,809	1,888	
3	9	1	0,88		0,54	6,32	3,411	
4	6	1	0,88		0,54	4,213	2,274	
5	1,5	1	0,9		0,484	1,053	0,51	
6	1,5	1	0,85		0,62	0,666	0,413	

Продовження таблиці 2.4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	0,5	1	0,95	0,702	0,329	0,351	0,115	-
8	0,6	1	0,95		0,329	0,421	0,138	
9	4	1	0,9		0,484	2,809	1,36	
10	0,8	1	0,85		0,62	0,562	0,348	
Усього по групі №1						36,76	17,937	40,903
Група споживачів №2								
11	6	1	0,88	0,609	0,54	3,654	1,972	-
12	4	1	0,83		0,672	2,436	1,637	
13	4	1	0,83		0,672	2,436	1,637	
14	9	1	0,88		0,54	5,482	2,959	
15	4	1	0,9		0,484	2,436	1,18	
16	0,8	1	0,85		0,62	0,487	0,302	
17	0,7	1	0,85		0,62	0,426	0,264	
18	0,15	1	0,95		0,329	0,091	0,03	
Усього по групі №2						17,449	9,981	20,103
Втрати кожного трансформатора						1,26	6,3	-

Таблиця 2.5 – Електричні навантаження підприємства у випадку післяаварійної роботи енергообладнання.

Вхідні дані					Результати розрахунків			
№ споживача	P_H , кВт	Кіль-сть	$\cos(\varphi)$	K_{Π}	$tg(\varphi)$	P_p , кВт	Q_p , кВАр	S_p , кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	25	1	0,92	0,606	0,426	15,148	6,453	-
2	4	1	0,83		0,672	2,424	1,629	
3	9	1	0,88		0,54	5,453	2,943	

Продовження таблиці 2.5.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	6	1	0,88	0,606	0,54	3,636	1,962	-
5	1,5	1	0,9		0,484	0,909	0,44	
6	1,5	1	0,85		0,62	0,575	0,356	
7	0,5	1	0,95		0,329	0,303	0,1	
8	0,6	1	0,95		0,329	0,364	0,119	
9	4	1	0,9		0,484	2,424	1,174	
10	0,8	1	0,85		0,62	0,485	0,3	
11	6	1	0,88		0,54	3,636	1,962	
12	4	1	0,83		0,672	2,424	1,629	
13	4	1	0,83		0,672	2,424	1,629	
14	9	1	0,88		0,54	5,453	2,943	
15	4	1	0,9		0,484	2,424	1,174	
16	0,8	1	0,85		0,62	0,485	0,3	
17	0,7	1	0,85		0,62	0,424	0,263	
18	0,15	1	0,95		0,329	0,091	0,03	
Усього						49,079	25,408	55,266
Втрати трансформатора						1,26	6,3	-

2.4 Розрахунок електричних мереж підприємства та вибір типу перерізів провідників

Основним критерієм вибору в мережах до 1 кВ є тривалий допустимий струм за умовою нагріву. Тому порівняно розрахунковий струм лінії з табличними значеннями ПУЕ, які встановлені для різних типів кабелів та способів їх прокладання. Вхідні дані для початку перевірок наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Вхідні дані для розрахунку електричних мереж. Частина 1

Споживач	№ лінії	Довжина лінії, м	Тип лінії	Потужність, що передається лінією	$\cos(\varphi)$	Розрахунковий робочий струм лінії I_p , А
Група споживачів №1						
Мк1	1	30	КЛ	49,079	0,888	79,77
Електролізер	1.1	70	КЛ	15,148	0,92	23,766
Вентилятор1	1.2	57	КЛ	2,424	0,83	4,215
Компресор1 ст2	1.3	38	КЛ	5,453	0,88	8,945
Компресор2 ст1	1.4	70	КЛ	3,636	0,88	5,963
Освітлення	1.5	95	КЛ	0,909	0,9	1,458
Сис. під. води	1.6	85	КЛ	0,575	0,85	0,976
Щит. кер. авт	1.7	5	КЛ	0,303	0,95	0,46
Сис. газ. ав. кон	1.8	97	КЛ	0,364	0,95	0,552
Чилер1	1.9	75	КЛ	2,424	0,9	3,887
Насос цир. Ел1	1.10	28	КЛ	0,485	0,85	0,823
Група споживачів №2						
Мк2	2	28	КЛ	49,079	0,888	79,77
Компресор1 ст1	2.11	50	КЛ	3,636	0,88	5,963
Вентилятор2	2.12	87	КЛ	2,424	0,83	4,215
Вентилятор3	2.13	85	КЛ	2,424	0,83	4,215
Компресор2 ст2	2.14	56	КЛ	5,453	0,88	8,945
Чилер2	2.15	40	КЛ	2,424	0,9	3,887
Насос цир. ел2	2.16	83	КЛ	0,485	0,85	0,823
Сис. осуш. очищ	2.17	65	КЛ	0,424	0,85	0,72
Буфер. ресивер	2.18	59	КЛ	0,091	0,95	0,138

2.4.1 Перевірка за нагрівом

Робочий струм кожної лінії навантаження:

$$I_{p,1} = \frac{P_{pAB1}}{\sqrt{3} \cdot U_M \cdot \cos(\varphi_1)} = \frac{15,148}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 0,92} = 23,766 \text{ А} \quad (2.21)$$

Розрахунок для інших споживачів є аналогічним. Дані занесено до табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Вибір марки та перерізу кабелю за нагрівом. Частина 1

Споживач	№ лінії	Розрахунковий робочий струм лінії I_p , А	Допустимий струм лінії I_d , А	Переріз мм^2	Марка (дод. 55, 3 жили, повітря)
Електролізер	1.1	23,766	35	4	ВВГнг-LS 3*4
Вентилятор1	1.2	4,215	19	1,5	ВВГнг-LS 3*1,5
Компресор1 ст2	1.3	8,945	19	1,5	ВВГнг-LS 3*1,5
Компресор2 ст1	1.4	5,963	19	1,5	ВВГнг-LS 3*1,5
Освітлення	1.5	1,458	19	1,5	ВВГнг-LS 3*1,5
Сис. під. води	1.6	0,976	19	1,5	ВВГнг-LS 3*1,5
Щит. кер. авт	1.7	0,46	19	1,5	ВВГнг-LS 3*1,5
Сис. газ. ав. кон	1.8	0,552	19	1,5	ВВГнг-LS 3*1,5
Чилер1	1.9	3,887	19	1,5	ВВГнг-LS 3*1,5
Насос цир. Ел1	1.10	0,823	19	1,5	ВВГнг-LS 3*1,5
Компресор1 ст1	2.11	5,963	19	1,5	ВВГнг-LS 3*1,5
Вентилятор2	2.12	4,215	19	1,5	ВВГнг-LS 3*1,5
Вентилятор3	2.13	4,215	19	1,5	ВВГнг-LS 3*1,5
Компресор2 ст2	2.14	8,945	19	1,5	ВВГнг-LS 3*1,5
Чилер2	2.15	3,887	19	1,5	ВВГнг-LS 3*1,5
Насос цир. ел2	2.16	0,823	19	1,5	ВВГнг-LS 3*1,5
Сис. осуш. очищ	2.17	0,72	19	1,5	ВВГнг-LS 3*1,5
Буфер. ресивер	2.18	0,138	19	1,5	ВВГнг-LS 3*1,5
Мк1	1	79,77	95	25	ВВГнг-LS 3*25
Мк2	2	79,77	95	25	ВВГнг-LS 3*25

Обрано кабелі з мідними жилами з гумовою ізоляцією в металевих захисних оболонках і кабелі з мідними жилами з гумовою або пластмасовою ізоляцією в свинцевій, пластмасовій або гумовій оболонці неброньовані. Перевірки виконані для аварійного режиму роботи обладнання.

Однак вибір лише за нагрівом не є достатнім. Довгі кабельні лінії можуть мати значний опір, що призводить до падіння напруги на шляху від підстанції до споживача. Якщо напруга на затискачах двигуна або електролізера впаде нижче допустимої межі (зазвичай це 39 В), обладнання буде працювати нестабільно, ККД знизиться, а пускові характеристики погіршаться. Особливо це актуально для

віддалених насосів або вентиляторів цеху. У таких випадках необхідно збільшувати переріз кабелю, доки втрата напруги не вкладається у нормативи.

2.4.2 Перевірка за втратами напруги

2.4.2.1 Втрати напруги в трансформаторі

Втрати КЗ трансформатора:

$$\Delta P_{TP.K3} = 1,3 \text{ кВт} \quad (2.22)$$

Напруга КЗ трансформатора

$$U_{TP.K3.\%} = 4,5 \% \quad (2.23)$$

Напруга активної складової КЗ трансформатора:

$$U_{A.Tp.\%} = \frac{\Delta P_{TP.K3} \cdot 10^3}{10 \cdot S_{HTp}} = \frac{1,3 \cdot 10^3}{10 \cdot 63} = 2,063 \% \quad (2.24)$$

Напруга реактивної складової КЗ трансформатора:

$$U_{P.Tp.\%} = \sqrt{U_{TP.K3.\%}^2 - U_{A.Tp.\%}^2} = \sqrt{4,5^2 - 2,063^2} = 3,999 \% \quad (2.25)$$

Косинус трансформатора:

$$\cos(\varphi_{Tp}) = \frac{P_{pAB}}{S_{pAB}} = \frac{49,079}{55,266} = 0,888 \quad (2.26)$$

Синус трансформатора:

$$\sin(\varphi_{Tp}) = \sqrt{1 - \cos(\varphi_{Tp})^2} = \sqrt{1 - 0,888^2} = 0,46 \quad (2.27)$$

Коефіцієнт завантаження трансформатора:

$$\beta_{AB} = 0,877$$

Розраховане у відсотках значення втрат напруги в трансформаторі:

$$\begin{aligned} \Delta U_{Tp.\%} &= \beta_{AB} \cdot (U_{A.Tp.\%} \cdot \cos(\varphi_{Tp}) + U_{P.Tp.\%} \cdot \sin(\varphi_{Tp})) = \\ &= 0,877 \cdot (2,063 \cdot 0,888 + 3,999 \cdot 0,46) = 3,22 \% \end{aligned} \quad (2.28)$$

Коефіцієнт зміни напруги в трансформаторі:

$$K_0 = 1 \quad (2.29)$$

Генераторна напруга мережі, для якої розраховуються втрати напруги:

$$U_0 = 0,4 \text{ кВ} \quad (2.30)$$

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						38
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розраховане значення втрат напруги в трансформаторі:

$$\Delta U_{Tp} = \Delta U_{Tp,\%} \cdot K_0 \cdot \frac{U_0 \cdot 10^3}{100} = 3,22 \cdot 1 \cdot \frac{0,4 \cdot 10^3}{100} = 12,881 \text{ В} \quad (2.31)$$

2.4.2.2 Втрати напруги у магістральному кабелі

Питома провідність міді:

$$\gamma = 50 \text{ м/Ом} \cdot \text{мм}^2 \quad (2.32)$$

Переріз магістрального кабелю:

$$S_{MK.1} = 25 \text{ мм}^2 \quad (2.33)$$

Розраховане значення втрат напруги в магістральному кабелі:

$$\Delta U_{MK.1} = \frac{P_{pAB} \cdot L_{MK.1} \cdot 10^3}{\gamma \cdot S_{MK.1} \cdot U_M \cdot 10^3} = \frac{49,079 \cdot 30 \cdot 10^3}{50 \cdot 25 \cdot 0,4 \cdot 10^3} = 2,945 \text{ В} \quad (2.34)$$

Розрахунок для іншого магістрального кабелю є аналогічним.

2.4.2.3 Втрати напруги в кабелі до споживача

Переріз кабелю навантаження до споживачів:

$$S_{KH.1} = 16 \text{ мм}^2$$

Розраховане значення втрат напруги в кабелі навантаження:

$$\Delta U_{KH.1} = \frac{P_{pAB1} \cdot L_{KH.1} \cdot 10^3}{\gamma \cdot S_{ГК.1} \cdot U_M \cdot 10^3} = \frac{15,148 \cdot 70 \cdot 10^3}{50 \cdot 16 \cdot 0,4 \cdot 10^3} = 3,314 \text{ В}$$

Розрахунок для інших ліній навантаження кабелю до споживачів є аналогічним.

2.4.2.4 Загальні втрати напруги та перевірка

$$\Delta U_{Bmp.1} = \Delta U_{Tp} + \Delta U_{MK.1} + \Delta U_{KH.1} = 12,881 + 2,945 + 3,314 = 19,14 < 39 \text{ В} \quad (2.35)$$

Перевірка виконується для кожного кабельної лінії. Розрахунок для інших ліній навантаження є аналогічним.

Отримані дані занесено до табл. 2.8, де обрано кабель з більшим перерізом для кожної лінії.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						39
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4.3 Перевірка та остаточний вибір кабелю

Таблиця 2.8 – Вибір та перевірка перерізів електричних мереж підприємства.

Частина 1

№ лінії	Розрахунковий робочий струм лінії I_p , А	За нагрівом		За втратами напруги		Остаточна обрана марка (дод. 55, 3 жили, повітря)
		Допустимий струм лінії I_d , А	Переріз мм^2	Втрати напруги, В	Переріз мм^2	
1.1	23,766	35	4	3,314	16	ВВГнг-LS 3*16
1.2	4,215	19	1,5	1,727	4	ВВГнг-LS 3*4
1.3	8,945	19	1,5	2,59	4	ВВГнг-LS 3*4
1.4	5,963	19	1,5	3,181	4	ВВГнг-LS 3*4
1.5	1,458	19	1,5	1,079	4	ВВГнг-LS 3*4
1.6	0,976	19	1,5	0,611	4	ВВГнг-LS 3*4
1.7	0,46	19	1,5	0,019	4	ВВГнг-LS 3*4
1.8	0,552	19	1,5	0,441	4	ВВГнг-LS 3*4
1.9	3,887	19	1,5	2,272	4	ВВГнг-LS 3*4
1.10	0,823	19	1,5	0,17	4	ВВГнг-LS 3*4
2.11	5,963	19	1,5	2,272	4	ВВГнг-LS 3*4
2.12	4,215	19	1,5	2,636	4	ВВГнг-LS 3*4
2.13	4,215	19	1,5	2,575	4	ВВГнг-LS 3*4
2.14	8,945	19	1,5	3,817	4	ВВГнг-LS 3*4
2.15	3,887	19	1,5	1,212	4	ВВГнг-LS 3*4
2.16	0,823	19	1,5	0,503	4	ВВГнг-LS 3*4
2.17	0,72	19	1,5	0,345	4	ВВГнг-LS 3*4
2.18	0,138	19	1,5	0,067	4	ВВГнг-LS 3*4
Мк1	79,77	95	25	2,945	25	ВВГнг-LS 3*25
Мк2	79,77	95	25	2,748	25	ВВГнг-LS 3*25

Крім нагріву та напруги, переріз має бути перевірений на відповідність захисному апарату. Струм спрацювання автоматичного вимикача повинен бути узгоджений з допустимим струмом кабелю, щоб при невеликому перевантаженні спочатку спрацював захист, а не плавилася ізоляція лінії.

2.5 Розрахунок струмів кз

Для розрахунку складено схему заміщення, де кожен елемент (трансформатор, кабель, шина) представлений своїм активним та реактивним опором. Розрахунок ведеться у «іменованих одиницях» (Ом), оскільки це найпростіший шлях для цехових мереж. Опори трансформаторів знайдено з паспортних даних (напруга КЗ, втрати КЗ), а опори кабелів – з довідників залежно від їх довжини та перерізу. Дані занесено до табл. 2.9.

Таблиця 2.9 – Опори елементів мережі у іменованих одиницях. Частина 1

Елемент мережі	R , Ом	X , Ом
1	2	3
Джерело живлення	0	2
Джерело живлення прив	0	0,0032
Маг-ний кабель вн	1,094	0,08
Маг-ний кабель вн прив.	0,00175	0,000128
Трансформатор	0,052	0,102
Маг-ний кабель нн 1	0,022	0,00264
Маг-ний кабель нн 2	0,02	0,002464
Лінія 1.1	0,081	0,0063
Лінія 1.2	0,263	0,005757
Лінія 1.3	0,175	0,003838
Лінія 1.4	0,323	0,00707
Лінія 1.5	0,438	0,009595
Лінія 1.6	0,392	0,008585
Лінія 1.7	0,023	0,000505
Лінія 1.8	0,447	0,009797
Лінія 1.9	0,346	0,007575
Лінія 1.10	0,129	0,002828
Лінія 2.11	0,231	0,00505
Лінія 2.12	0,401	0,008787

Продовження таблиці 2.9.

1	2	3
Лінія 2.13	0,392	0,008585
Лінія 2.14	0,258	0,005656
Лінія 2.15	0,184	0,00404
Лінія 2.16	0,383	0,008383
Лінія 2.17	0,3	0,006565
Лінія 2.18	0,272	0,005959

Розрахункова схема заміщення, згідно якої було складено табл. 2.9, зображена на рис. 2.3.

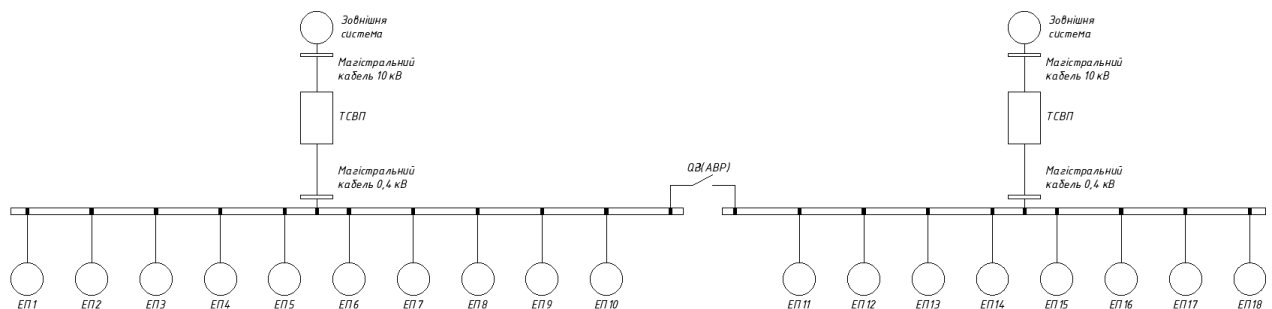


Рисунок 2.3 – Розрахункова схема заміщення

2.5.1 Розрахунок опорів елементів схеми заміщення

Коефіцієнт трансформації трансформатора напруги TV :

$$K_U = \frac{U_{BH.TP}}{U_{HH.TP}} = \frac{10}{4} = 25 \quad (2.36)$$

Потужність трифазного КЗ зовнішньої системи:

$$S_K^{(3)} = 50 \text{ МВА} \quad (2.37)$$

Напруга середня номінальна:

$$U_{C.H.} = 10 \text{ кВ} \quad (2.38)$$

Активний опір зовнішньої системи (ЗС):

$$R_{3.C} = 0 \text{ Ом} \quad (2.38)$$

Реактивний опір ЗС:

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						42
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$X_{3.C} = \frac{U_{C.H.}^2}{S_K^{(3)}} = \frac{10^2}{50} = 2 \text{ Ом} \quad (2.39)$$

Приведений реактивний опір ЗС до вторинної обмотки трансформатора на низьку сторону напруги (НН):

$$X_{3.C.ПР} = \frac{X_{3.C}}{K_U^2} = \frac{2}{25^2} = 0,0032 \text{ Ом} \quad (2.40)$$

Номінальний струм трансформатора через вторинну обмотку:

$$I_{H.ТР} = \frac{S_{ТР}}{\sqrt{3} \cdot U_{НН.ТР}} = \frac{63}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 90,933 \text{ А} \quad (2.41)$$

Активний опір трансформатора вторинної обмотки:

$$R_{ТР} = \frac{P_{ТР.КЗ}}{3 \cdot I_{H.ТР}^2} = \frac{1300}{3 \cdot 90,933^2} = 0,052 \text{ Ом} \quad (2.42)$$

Повний опір трансформатора вторинної обмотки:

$$Z_{ТР} = \frac{U_{ТР.КЗ.\%} \cdot U_{НН.ТР}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{H.ТР}} = \frac{4,5 \cdot 400}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot 90,933} = 0,114 \text{ Ом} \quad (2.43)$$

Реактивний опір трансформатора вторинної обмотки:

$$X_{ТР} = \sqrt{Z_{ТР}^2 - R_{ТР}^2} = \sqrt{0,114^2 - 0,052^2} = 0,102 \text{ Ом} \quad (2.44)$$

Номінальний струм первинної обмотки трансформатора ВН на напругу 10 кВ:

$$I_{H.ТР} = \frac{S_{ТР}}{\sqrt{3} \cdot U_{ВН.ТР}} = \frac{63}{\sqrt{3} \cdot 10} = 3,637 \text{ А}$$

В якості магістрального кабелю на високу сторону напруги (ВН) трансформатора обрано кабель **СБл-10 3*16**. Його не позначено на рис. 2.3.

Площа поперечного перерізу кабелю:

$$S_{МК.ВН} = 16 \text{ мм}^2$$

Питомий опір міді:

$$\rho_M = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м} \quad (2.45)$$

Прийнята довжина магістрального кабелю від ЗС до трансформаторної підстанції (ТП):

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						43
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$L_{MK.BH} = 1000 \text{ м} = 1 \text{ км} \quad (2.46)$$

Активний опір магістрального кабелю ВН:

$$R_{MK.BH} = \rho_M \cdot \frac{L_{MK.BH}}{S_{MK.BH}} = 0,0175 \cdot \frac{1000}{16} = 1,094 \text{ Ом} \quad (2.47)$$

Питомий індуктивний опір лінії:

$$x_{0.MK.BH} = 0,08 \text{ Ом/км} \quad (2.48)$$

Реактивний опір магістрального кабелю ВН:

$$X_{MK.BH} = x_{0.MK.BH} \cdot L_{MK.BH} = 0,08 \cdot 1 = 0,08 \text{ Ом} \quad (2.49)$$

Активний опір магістрального кабелю приведений до НН:

$$R_{MK.BH.ПР} = \frac{R_{MK.BH}}{K_U^2} = \frac{1,094}{25^2} = 0,00175 \text{ Ом} \quad (2.50)$$

Реактивний опір магістрального кабелю приведений до НН:

$$X_{MK.BH.ПР} = \frac{X_{MK.BH}}{K_U^2} = \frac{0,08}{25^2} = 0,000128 \text{ Ом}$$

Питомий активний опір ліній кабелю до навантаження в залежності від перерізу:

$$r_{0.KH.16} = 1,15 \text{ Ом/км}$$

Питомий реактивний опір ліній кабелю до навантаження в залежності від перерізу:

$$x_{0.KH.16} = 0,09 \text{ Ом/км}$$

Активний опір кожної кабельної лінії до навантаження:

$$R_{KH.1.1} = r_{0.KH.16} \cdot L_{KH.1} = 1,15 \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 0,081 \text{ Ом}$$

Реактивний опір кожної кабельної лінії до навантаження:

$$X_{KH.1.1} = x_{0.KH.16} \cdot L_{KH.1} = 0,09 \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 0,0063 \text{ Ом}$$

Активний опір магістрального кабелю НН від ТП до ГРЩ:

$$R_{MK.1} = r_{0.KH.25} \cdot L_{MK.1} = 0,727 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 0,022 \text{ Ом}$$

Реактивний опір магістрального кабелю НН від ТП до ГРЩ:

$$X_{MK.1} = x_{0.KH.25} \cdot L_{MK.1} = 0,088 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 0,00264 \text{ Ом}$$

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						44
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Схема заміщення ділянки мережі з усіма опорами зображена на рис. 2.4.

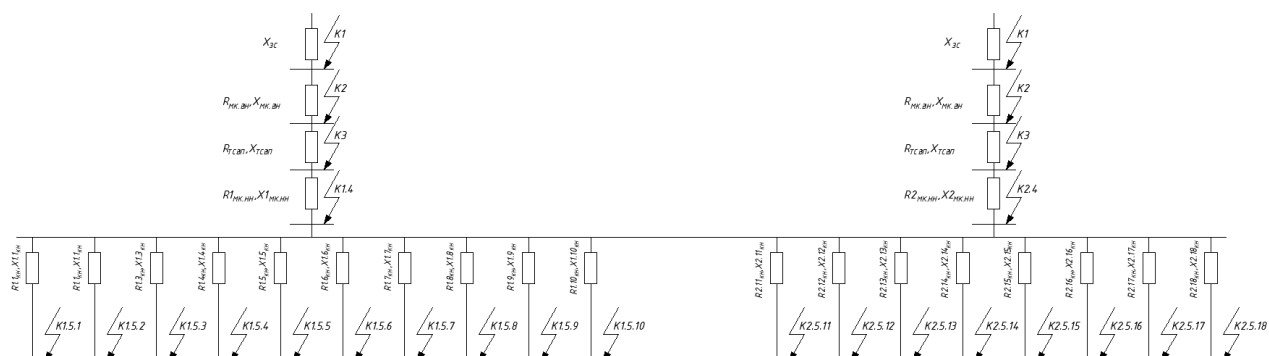


Рисунок 2.4 – Схема заміщення ділянки мережі

Точка $K1$:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0 \text{ OM} \\ X_1 &= X_{3.C} = 2 \text{ OM} \\ Z_1 &= \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{0^2 + 2^2} = 2 \text{ OM} \end{aligned} \quad (2.51)$$

Опори інших точок визначено аналогічним способом. Отримані дані занесено до табл. 2.10.

2.5.3 Визначення струмів КЗ

Трифазний струм КЗ

$$I_{K.1}^{(3)} = \frac{U_{BH.TP}}{\sqrt{3} \cdot Z_1} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 3} = 2,887 \text{ kA} \quad (2.52)$$

Двофазний струм КЗ:

$$I_{K.1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{K.1}^{(3)}}{2} = \frac{\sqrt{3} \cdot 2,887}{2} = 2,5 \text{ кА} \quad (2.53)$$

2.5.4 Визначення ударних струмів

Ударний коефіцієнт:

$$K_y = 1,25 \quad (2.54)$$

Амплітудне значення ударного струму:

$$i_{V1} = I_{K1}^{(2)} \cdot \sqrt{2} \cdot K_V = 2,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,25 = 4,419 \text{ кА} \quad (2.55)$$

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						45
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Діюче значення ударного струму:

$$I_{y.1} = I_{K.1}^{(3)} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (K_y - 1)^2} = 2,887 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (K_y - 1)^2} = 3,062 \text{ кА} \quad (2.56)$$

Виконано аналогічні розрахунки згідно формул (2.52-2.56) точок КЗ. Отримані дані занесено до табл. 2.10.

Таблиця 2.10 – Розрахунок струмів КЗ в іменованих одиницях:

Точка КЗ	U_{CH} , кВ	R , Ом	X , Ом	Z , Ом	$I_K^{(3)}$, кА	$I_K^{(2)}$, кА	i_y , кА	I_y , кА
K1	10	0	2	2	2,887	2,5	4,419	3,062
K2	10	1,094	2,08	2,35	2,457	2,128	3,761	2,606
K3	0,4	0,054	0,105	0,118	1,956	1,694	2,995	2,075
K1.4	0,4	0,076	0,108	0,132	1,754	1,519	2,685	1,861
K1.5.1	0,4	0,156	0,114	0,193	1,194	1,034	1,827	1,266
K1.5.2	0,4	0,339	0,113	0,357	0,647	0,56	0,99	0,686
K1.5.3	0,4	0,251	0,111	0,275	0,841	0,728	1,287	0,892
K1.5.4	0,4	0,399	0,115	0,415	0,557	0,482	0,852	0,591
K1.5.5	0,4	0,514	0,117	0,527	0,438	0,379	0,671	0,465
K1.5.6	0,4	0,468	0,116	0,482	0,479	0,416	0,733	0,508
K1.5.7	0,4	0,099	0,108	0,147	1,576	1,365	2,413	1,671
K1.5.8	0,4	0,523	0,117	0,536	0,431	0,383	0,659	0,457
K1.5.9	0,4	0,422	0,115	0,437	0,528	0,458	0,809	0,56
K1.5.10	0,4	0,205	0,11	0,233	0,992	0,859	1,518	1,032
K2.4	0,4	0,075	0,107	0,131	1,767	1,53	2,706	1,874
K2.5.11	0,4	0,305	0,112	0,325	0,71	0,615	1,088	0,754
K2.5.12	0,4	0,476	0,116	0,49	0,472	0,409	0,722	0,5
K2.5.13	0,4	0,466	0,116	0,481	0,481	0,416	0,736	0,51
K2.5.14	0,4	0,333	0,113	0,351	0,657	0,569	1,006	0,697
K2.5.15	0,4	0,259	0,111	0,282	0,819	0,71	1,254	0,869
K2.5.16	0,4	0,457	0,116	0,472	0,49	0,424	0,75	0,519
K2.5.17	0,4	0,374	0,114	0,391	0,59	0,511	0,904	0,626
K2.5.18	0,4	0,347	0,113	0,365	0,633	0,549	0,97	0,672

2.6 Вибір електричних апаратів та уставок їх спрацювання

Необхідно виконати вибір електричних апаратів. Апарати мають бути не тільки працездатними, але й надійними у специфічних умовах електролізного

виробництва. Головними критеріями тут є відповідність номінальним параметрам мережі та здатність працювати в аварійних режимах.

2.6.1 Вибір роз'єднувачів

Двоє роз'єднувачів знаходяться в мережі 10 кВ, інші – 0,4 кВ. Здійснено 5 перевірок для правильного вибору роз'єднувача, щоб апарат міг в будь-який момент розірвати лінію і знеструмити пошкодження. Дані занесено до табл. 2.11.

Таблиця 2.11 – Обрані роз'єднувачі до електричної схеми

Адреса	Функціональне призначення та умовні позначення	Тип ел. апаратів	Умови вибору електричних апаратів									
			За номінальною напругою		За допустимою напругою		За номінальним струмом		За ел. дин. стійкістю		За термічною стійкістю	
			$U_{ном.ап} \geq U_M$		$U_{M.A} \geq U_{P.M}$		$I_{ном.ап} \geq I_P$		$i_{д.с} \geq i_y$		$I_{TC} \sqrt{t_{TC}} \geq I_{\infty} \sqrt{t_{PP}}$	
			$U_{ном.ап},$ кВ	$U_M,$ кВ	$U_{M.A},$ кВ	$U_{P.M},$ кВ	$I_{ном.ап},$ А	$I_P,$ А	$i_{д.с.},$ кА	$i_y,$ кА	$I_{TC} \sqrt{t_{TC}}$	$I_{\infty} \sqrt{t_{PP}}$
Відкритий РП-10	QS1-QS2 (K2)	РНД-35/32000У1	35	10	40,25	12	2000	3,637	80	3,761	63	1,228
Закритий РП-0,4	QS5 (K1.5.5)	INS630 3P	690	0,4	793.5	0,44	630	1,458	50	0,671	21,909	0,219
	QS7 (K1.5.7)	INS630 3P	690	0,4	793.5	0,44	630	0,46	50	2,413	21,909	0,788
	QS8 (K1.5.8)	INS630 3P	690	0,4	793.5	0,44	630	0,552	50	0,659	21,909	0,215
	QS18 (K2.5.18)	INS630 3P	690	0,4	793.5	0,44	630	0,138	50	0,97	21,909	0,317

Приклад вибору роз'єднувачів QS1-QS2 (10 кВ) РНД-35/32000У1:

- перевірка за номінальною напругою апарата:

$$U_{H.A} = 35 \text{ кВ}$$

$$U_{H.C} = 10 \text{ кВ} \quad (2.57-2.59)$$

$$U_{H.A} \geq U_{H.C}$$

- перевірка за допустимою напругою

$$U_{M.A} = 35 \cdot 1,15 = 40,25 \text{ кВ}$$

$$U_{P.M} = 12 \text{ кВ} \quad (2.60-2.62)$$

$$U_{M.A} \geq U_{P.M}$$

- перевірка за номінальним струмом апарата:

$$I_{H.A} = 2000 \text{ А}$$

$$I_P = \frac{S_{H.TP}}{\sqrt{3} \cdot U_{TP.BH}} = \frac{63}{\sqrt{3} \cdot 10} = 3,637 \text{ А} \quad (2.63-2.65)$$

$$I_{H.A} \geq I_P$$

- перевірка за електродинамічною стійкістю:

					ДП ОА21.02.000 ПЗ		Арк.
							47
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

$$i_{MAX} = 80 \text{ кА}$$

$$i_y = i_{y.2} = 3,761 \text{ кА} \quad (2.66-2.68)$$

$$i_{MAX} \geq i_y$$

- перевірка за термічною стійкістю:

$$I_{TC} \cdot \sqrt{t_{TC}} = 31,5 \cdot \sqrt{4} = 63 \text{ кА} \cdot \text{с}$$

$$I_{\infty} \cdot \sqrt{t_{\phi}} = 2,457 \cdot \sqrt{0,25} = 1,228 \text{ кА} \cdot \text{с} \quad (2.69-2.71)$$

$$I_t \cdot \sqrt{t} \geq I_{\infty} \cdot \sqrt{t_{\phi}}$$

Інші роз'єднувачі обираються за аналогічними перевітками, але під свої числові параметри.

2.6.2 Вибір автоматичних вимикачів

Вибір автоматичних вимикачів здійснюється за номінальною напругою та струмом. Автоматичний вимикач повинен пропускати тривалий струм навантаження без перегріву та хибних відключень. Найважливіше – це гранична комутаційна здатність. Це максимальний струм КЗ, який автомат може «розірвати», не вибухнувши при цьому самому. Порівняно розрахований трифазний струм КЗ у точці встановлення апарата з його паспортним значенням. Дані занесено до табл. 2.12.

Таблиця 2.12 – Обрані автоматичні вимикачі до електричної схеми.

Адреса	Функціональне призначення та умовні позначення	Тип ел. апаратів	Умови вибору електричних апаратів					
			За номінальною напругою $U_{НОМ.АП} \geq U_M$		За номінальним струмом $I_{НОМ.АП} \geq I_P$		За струмом вимикання $I_{ВУМ} \geq 1,2 \cdot I_K^{(3)}$	
			$U_{НОМ.АП}$, кВ	U_M , кВ	$I_{НОМ.АП}$, А	I_P , А	$I_{ВУМ}$, кА	$1,2 \cdot I_K^{(3)}$, кА
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Відкритий РП-0,4	QF19 (K3)	A3721B	0,66	0,4	250	79,77	2,5	2,305
	QF20 (K3)	A3721B	0,66	0,4	250	79,77	2,5	2,305
Закритий РП-0,4	QF1 (K1.4)	A3721B	0,66	0,4	250	23,766	2,5	2,105
	QF2 (K1.4)	A3721B	0,66	0,4	250	4,215	2,5	2,105
	QF3 (K1.4)	A3721B	0,66	0,4	250	8,945	2,5	2,105
	QF4 (K1.4)	A3721B	0,66	0,4	250	5,963	2,5	2,105
	QF5 (K1.4)	A3721B	0,66	0,4	250	1,458	2,5	2,105
	QF6 (K1.4)	A3721B	0,66	0,4	250	0,976	2,5	2,105
	QF7 (K1.4)	A3721B	0,66	0,4	250	0,46	2,5	2,105
	QF8 (K1.4)	A3721B	0,66	0,4	250	0,552	2,5	2,105
	QF9 (K1.4)	A3721B	0,66	0,4	250	3,887	2,5	2,105
	QF10 (K1.4)	A3721B	0,66	0,4	250	0,823	2,5	2,105
	QF11 (K2.4)	A3721B	0,66	0,4	250	5,963	2,5	2,121
	QF12 (K2.4)	A3721B	0,66	0,4	250	4,215	2,5	2,121
	QF13 (K2.4)	A3721B	0,66	0,4	250	4,215	2,5	2,121
	QF14 (K2.4)	A3721B	0,66	0,4	250	8,945	2,5	2,121
	QF15 (K2.4)	A3721B	0,66	0,4	250	3,887	2,5	2,121
	QF16 (K2.4)	A3721B	0,66	0,4	250	0,823	2,5	2,121
	QF17 (K2.4)	A3721B	0,66	0,4	250	0,72	2,5	2,121
	QF18 (K2.4)	A3721B	0,66	0,4	250	0,138	2,5	2,121

Приклад вибору автоматичного вимикача QF19 (0,4 кВ) А3721Б:

- перевірка за номінальною напругою апарата:

$$U_{H.A} = 0,66 \text{ кВ}$$

$$U_{H.M} = 0,4 \text{ кВ}$$

$$U_{H.A} \geq U_{H.M}$$

- перевірка за номінальним струмом апарата:

$$I_{H.A} = 250 \text{ А}$$

$$I_P = I_{P.MK} = 79,77 \text{ А}$$

$$I_{H.A} \geq I_P$$

- перевірка за струмом вимикання:

$$I_B = 2,5 \text{ кА}$$

$$1,2 \cdot I_{K.2.4}^{(3)} = 1,2 \cdot 1,767 = 2,121 \text{ кА} \quad (2.72-2.74)$$

$$I_B \geq 1,2 \cdot I_K^{(3)}$$

Інші автоматичні вимикачі обираються за аналогічними перевірками, але під свої числові параметри. Вважається, що вимикачі стоять не після кабелю, а в щитку. Тому точки КЗ після КН не підходять.

2.6.3 Вибір магнітних пускатів

Необхідно здійснити вибір магнітних пускатів. Магнітні пускаті призначені для дистанційного керування силовими електричними навантаженнями, насамперед трифазними асинхронними двигунами. Вони забезпечують безпечне замикання

та розмикання контактів під навантаженням, дозволяючи вмикати обладнання на відстані. Важливою функцією є захист від самовільного запуску пристрою після раптового зникнення та подальшого відновлення напруги в мережі. При комплектації тепловим реле пускач також оберігає двигун від тривалих перевантажень та роботи на двох фазах. Правильний вибір за номінальним струмом та категорією застосування гарантує довговічність контактної групи та стабільну роботу всієї установки. Дані занесено до табл. 2.13.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						49
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.13 – Обрані магнітні пускачі до електричної схеми

Адреса	Функціональне призначення та умовні позначення	Тип ел. апаратів	Умови вибору електричних апаратів							
			За номінальною напругою		За номінальним струмом		За потужністю двигуна		За струмом вимикання	
			$U_{НОМ.АП} \geq U_M$		$I_{НОМ.АП} \geq I_{Н.ДВ}$		$P_{М.Д} \geq P_{М.Д.}$		$I_{ВУМ} \geq 1,2 \cdot I_K^{(3)}$	
			$U_{НОМ.АП}$, кВ	U_M , кВ	$I_{НОМ.АП}$, А	$I_{Н.ДВ}$, А	$P_{М.Д}$, кВт	$P_{М.Д.}$, кВт	$I_{ВУМ}$, кА	$1,2 \cdot I_K^{(3)}$, кА
Закритий РП-0,4	КМ1 (К1.5.1)	8536SEO1V02H30S	0,46	0,4	90	39,222	37,5	25	100	1,194
	КМ2 (К1.5.2)	8536SCO3V02S	0,46	0,4	27	6,956	7,5	4	5	0,647
	КМ3 (К1.5.3)	8536SDO1V02S	0,46	0,4	45	14,762	18,75	9	5	0,841
	КМ4 (К1.5.4)	8536SCO3V02S	0,46	0,4	27	9,841	7,5	6	5	0,557
	КМ6 (К1.5.6)	8536SBO2V02S	0,46	0,4	18	2,547	3,75	1,5	5	0,479
	КМ9 (К1.5.9)	8536SCO3V02S	0,46	0,4	27	6,415	7,5	4	5	0,528
	КМ10 (К1.5.10)	8536SBO2V02S	0,46	0,4	18	1,358	3,75	0,8	5	0,992
	КМ11 (К2.5.11)	8536SCO3V02S	0,46	0,4	27	9,841	7,5	6	5	0,71
	КМ12 (К2.5.12)	8536SCO3V02S	0,46	0,4	27	6,956	7,5	4	5	0,472
	КМ13 (К2.5.13)	8536SCO3V02S	0,46	0,4	27	6,956	7,5	4	5	0,481
	КМ14 (К2.5.14)	8536SDO1V02S	0,46	0,4	45	14,762	18,75	9	5	0,657
	КМ15 (К2.5.15)	8536SCO3V02S	0,46	0,4	27	6,415	7,5	4	5	0,819
	КМ16 (К2.5.16)	8536SBO2V02S	0,46	0,4	18	1,358	3,75	0,8	5	0,49
	КМ17 (К2.5.17)	8536SBO2V02S	0,46	0,4	18	1,189	3,75	0,7	5	0,59

Приклад вибору магнітного пускача КМ1 (0,4 кВ) 8536SEO1V02H30S:

- перевірка за номінальною напругою апарата:

$$U_{Н.П} = 0,46 \text{ кВ}$$

$$U_{Н.М} = 0,4 \text{ кВ}$$

$$U_{Н.А} \geq U_{Н.М}$$

- перевірка за номінальним струмом апарата:

$$I_{Н.П} = 90 \text{ А}$$

$$I_{Н.Д} = \frac{25 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,92} = 39,222 \text{ А}$$

$$I_{Н.П} \geq I_{Н.Д}$$

- перевірка за потужністю двигуна:

$$P_{М.Д} = 37,5 \text{ кВт}$$

$$P_{М.Д.} = 25 \text{ кВт}$$

$$P_{М.Д} \geq P_{М.Д.}$$

(2.75-2.77)

- Перевірка за струмом вимикання:

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						50
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{BUM} = 100 \text{ кА}$$

$$1,2 \cdot I_{K.1.5.1}^{(3)} = 1,432 \text{ кА}$$

$$I_{BUM} \geq 1,2 \cdot I_{K.1.5.1}^{(3)}$$

Інші магнітні пускачі обираються за аналогічними перевірками, але під свої числові параметри. Вважається, що в електролізному цеху пускачі встановлені в спеціальних герметичних щитках біля самого обладнання.

2.6.4 Вибір запобіжників

Запобіжники обираються для захисту електричних кіл від струмів короткого замикання та тривалих перевантажень. Вони є «слабкою ланкою» схеми, яка руйнується швидше за ізоляцію дротів чи обмотки обладнання, розриваючи ланцюг у критичний момент. Правильний вибір запобіжника запобігає займанню проводки та термічному пошкодженню дорогих компонентів системи. Завдяки високій швидкості спрацювання вони миттєво локалізують аварійну ділянку, не дозволяючи пошкодженню поширитися на всю мережу. Також вони слугують економічним та простим засобом забезпечення пожежної безпеки в розподільних щитах та трансформаторних підстанціях. Дані занесено до табл. 2.14.

Таблиця 2.14 – Обрані запобіжники до електричної схеми. Частина 1

Адреса	Функціональне призначення та умовні позначення	Тип ел. апаратів	Умови вибору електричних апаратів							
			За номінальною напругою $U_{НОМ.АП} \geq U_M$		За номінальним струмом $I_{НОМ.АП} \geq I_{Н.ДВ}$		За допустимою напругою $U_{М.А} \geq U_{Р.М}$		За струмом вимикання $I_{ВИМ} \geq I_K^{(3)}$	
			$U_{НОМ.АП}$, кВ	U_M , кВ	$I_{НОМ.АП}$, А	$I_{Н.ДВ}$, А	$U_{М.А}$, кВ	$U_{Р.М}$, кВ	$I_{ВИМ}$, кА	$I_K^{(3)}$, кА
Відкритий РП-10	F1 (K2)	ПКТ 101-10-10-20 УЗ	10	10	10	3,637	12	12	20	2,457
	F2 (K2)	ПКТ 101-10-10-20 УЗ	10	10	10	3,637	12	12	20	2,457

Продовження таблиці 2.14.

Адреса	Функціональне призначення та умовні позначення	Тип ел. апаратів	Умови вибору електричних апаратів	
			За потужністю вимикання $S_{ВИМ} \geq S_K^{(3)}$	
			$S_{ВИМ}$, МВА	$S_K^{(3)}$, МВА
Відкритий РП-10	F1 (K2)	ПКТ 101-10-10-20 УЗ	346,41	42,552
	F2 (K2)	ПКТ 101-10-10-20 УЗ	346,41	42,552

Приклад вибору запобіжника F1 (10 кВ) ПКТ 101-10-10-20 УЗ:

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						51
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- перевірка за номінальною напругою апарата:

$$U_{H.A} = 10 \text{ кВ}$$

$$U_{H.C} = 10 \text{ кВ}$$

$$U_{H.A} \geq U_{H.C}$$

- перевірка за допустимою напругою

$$U_{M.A} = 10 \cdot 1,2 = 12 \text{ кВ}$$

$$U_{P.M} = 12 \text{ кВ}$$

$$U_{M.A} \geq U_{P.M}$$

- перевірка за номінальним струмом апарата:

$$I_{H.A} = 10 \text{ А}$$

$$I_P = I_{BH.TP} = 3,637 \text{ А}$$

$$I_{H.A} \geq I_P$$

- перевірка за струмом вимикання:

$$I_{BUM} = 20 \text{ кА}$$

$$I_{K.2}^{(3)} = 2,457 \text{ кА}$$

$$I_{BUM} \geq I_{K.2}^{(3)}$$

- перевірка за потужністю вимикання:

$$S_B = \sqrt{3} \cdot U_{H.A} \cdot I_B = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 20 = 346,41 \text{ МВА}$$

$$S_{t.2}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot U_{BH.TP} \cdot I_{K.2}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2,457 = 42,552 \text{ МВА} \quad (2.78-2.80)$$

$$S_B \geq S_{t.2}^{(3)}$$

Інший запобіжник обирається за аналогічними перевірками, але під свої числові параметри.

Коефіцієнт чутливості плавкої вставки:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{K.2}^{(2)}}{I_{BUM}} = \frac{2128}{10} = 212,8 \geq (4...7) \quad (2.81)$$

Надійність спрацювання плавкої вставки при мінімальний струмах КЗ достатня. Для забезпечення селективності налаштовано уставки апаратів так, щоб першим завжди спрацьовував автомат, що знаходиться ближче до місця пошкодження. В електролізному виробництві, де зупинка процесу може бути

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						52
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

небезпечною через ризик накопичення газів, селективність є критичною. Також враховано можливість впровадження систем АВР (автоматичного введення резерву) для відповідальних споживачів, таких як насоси охолодження або системи вентиляції, що гарантує безперервність технологічного циклу навіть при виході з ладу основної лінії живлення.

Таким чином, вибрані апарати утворюють цілісну систему, яка в нормальних умовах ефективно розподіляє енергію, а в аварійних – надійно локалізує пошкодження, зберігаючи дороге обладнання цеху в цілісності.

2.7 Основні енергетичні показники підприємства

Для отримання повних розрахунків необхідно визначити основні енергетичні показники підприємства, що являє собою електролізний цех з видобутку водню. Для цього необхідно визначити річні втрати електричної енергії (активної та реактивної та відсоток втрат за рік) в обраних трансформаторах для номінального навантаження (2 групи). Трансформатори знаходяться в роботі увесь рік безперервно. Продемонстровано розрахунки для трансформатора першої групи навантаження

Кількість годин використання максимуму прийнято вважати рівною:

$$T_M = 4000 \text{ год} \quad (2.82)$$

Кількість годин роботи трансформатора у році:

$$T_P = 8760 \text{ год} \quad (2.83)$$

Кількість годин використання втрат:

$$\tau = T_P \cdot (0,124 + T_M \cdot 10^{-4})^2 = 8760 \cdot (0,124 + 4000 \cdot 10^{-4})^2 = 2405 \text{ год} \quad (2.84)$$

Втрати КЗ трансформатора згідно (2.22):

$$\Delta P_{TP.K3} = 1,3 \text{ кВт}$$

Втрати холостого ходу (XX) трансформатора:

$$\Delta P_{TP.XX} = 0,24 \text{ кВт} \quad (2.85)$$

Напруга КЗ трансформатора згідно (2.23):

$$U_{TP.K3.\%} = 4,5 \%$$

Струм XX трансформатора:

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						53
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{TP.XX.\%} = 2,8 \% \quad (2.86)$$

Косинус навантаження трансформатора:

$$\cos(\varphi_{Tp1}) = \frac{P_{pTp1}}{S_{pTp1}} = \frac{36,76}{40,903} = 0,899 \quad (2.87)$$

Тангенс навантаження трансформатора:

$$tg(\varphi_{Tp1}) = \sqrt{\frac{1}{\cos^2(\varphi_{Tp1})} - 1} = \sqrt{\frac{1}{0,899^2} - 1} = 0,488$$

Синус навантаження трансформатора:

$$\sin(\varphi_{Tp1}) = \sqrt{1 - \cos^2(\varphi_{Tp1})} = \sqrt{1 - 0,899^2} = 0,439$$

Коефіцієнт завантаження згідно (2.18):

$$\beta_1 = 0,649$$

Річні втрати активної потужності в трансформаторі:

$$\begin{aligned} \Delta W_{Tp1} &= \Delta P_{TP.XX} \cdot T_P + \beta_1^2 \cdot \Delta P_{TP.K3} \cdot \tau = \\ &= 0,24 \cdot 8760 + 0,649^2 \cdot 1,3 \cdot 2405 = 3420,44 \text{ кВт} \cdot \text{год} \end{aligned} \quad (2.88)$$

Кількість переданої через трансформатор активної енергії за рік:

$$W_{P1} = P_{pTp1} \cdot T_M = 36,76 \cdot 4000 = 147039,7 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (2.89)$$

Відсоток втрат активної енергії в трансформаторі за рік:

$$W_{P1.\%} = \frac{\Delta W_{Tp1}}{W_{P1}} \cdot 100 = \frac{3420,44}{147039,7} \cdot 100 = 2,236 \% \quad (2.90)$$

Втрати реактивної потужності XX трансформатора:

$$\Delta Q_{TP.\mu} = \frac{I_{TP.XX.\%} \cdot S_{HTP}}{100} = \frac{2,8 \cdot 63}{100} = 1,764 \text{ кВАр} \quad (2.91)$$

Втрати реактивної потужності КЗ трансформатора:

$$\Delta Q_{TP.K3} = \frac{U_{TP.K3.\%} \cdot S_{HTP}}{100} = \frac{4,5 \cdot 63}{100} = 2,835 \text{ кВАр} \quad (2.92)$$

Річні втрати реактивної потужності в трансформаторі:

$$\begin{aligned} \Delta V_{Tp1} &= \Delta Q_{TP.\mu} \cdot T_P + \beta_1^2 \cdot \Delta Q_{TP.K3} \cdot \tau = \\ &= 1,764 \cdot 8760 + 0,649^2 \cdot 2,835 \cdot 2405 = 18326,99 \text{ кВАр} \cdot \text{год} \end{aligned} \quad (2.93)$$

Кількість переданої через трансформатор реактивної енергії за рік:

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

$$V_{P1} = Q_{pTp1} \cdot T_M = 17,937 \cdot 4000 = 71747,01 \text{ кВАр} \cdot \text{год} \quad (2.94)$$

Відсоток втрат реактивної енергії в трансформаторі за рік:

$$V_{P1.\%} = \frac{\Delta V_{TP1}}{V_{P1}} \cdot 100 = \frac{18326,99}{71747,01} \cdot 100 = 25,544 \% \quad (2.95)$$

Розрахунки для другої групи навантаження аналогічні до першої групи навантаження. Отримані дані занесено до табл. 2.15.

Таблиця 2.15 – Річні витрати електроенергії груп електроспоживачів

Група електроспоживачів	Річні витрати електроенергії					
	$\Delta W_{TP},$ кВт·год	$W_P,$ кВт·год	$W_{P.\%},$ %	$\Delta V_{TP},$ кВАр·год	$V_P,$ кВАр·год	$V_{P.\%},$ %
1	3420,44	14703,97	2,326	18326,99	71747,01	25,544
2	2420,77	69798	3,468	16146,93	39925,88	40,422

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

У даному розділі було розроблено систему електропостачання електролізного цеху з урахуванням особливостей технологічного процесу виробництва водню та вимог до надійності, безпеки і безперервності роботи обладнання. Встановлено, що електролізний цех належить до I особливої категорії надійності електропостачання, оскільки порушення живлення може призвести до зупинки технологічного процесу, виникнення аварійних режимів та створення небезпеки для персоналу через можливе накопичення вибухонебезпечних сумішей водню.

У ході виконання розділу було проведено аналіз складу електроприймачів цеху, визначено їх потужності, режими роботи та коефіцієнти потужності. Для забезпечення високої надійності системи передбачено резервування основного технологічного обладнання, зокрема компресорів, насосів циркуляції електроліту та систем охолодження. Таке рішення дозволяє підтримувати безперервність технологічного циклу навіть у випадку виходу з ладу окремих елементів системи.

Виконано розрахунок системи робочого та аварійного освітлення електролізного цеху методом коефіцієнта використання світлового потоку. У результаті забезпечено нормативний рівень освітленості виробничих приміщень із врахуванням специфіки вибухонебезпечного середовища. Для аварійного освітлення передбачено окремі лінії живлення від незалежного джерела, що підвищує безпеку експлуатації об'єкта.

На основі розрахунків електричних навантажень обрано два силові трансформатори типу ТМ-63/10, які забезпечують нормальну роботу цеху як у штатному режимі, так і в післяаварійному режимі при переході всього навантаження на один трансформатор. Перевірка коефіцієнтів завантаження та втрат потужності підтвердила правильність вибору трансформаторного обладнання.

Також проведено вибір перерізів кабельних ліній за умовами допустимого нагріву та втрат напруги. У результаті обрано кабелі марки ВВГнг-LS, які відповідають вимогам пожежної безпеки та забезпечують допустимі режими

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						56
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

роботи мережі. Розрахунок втрат напруги показав, що обрані перерізи гарантують стабільне електроживлення всіх споживачів.

Окрему увагу приділено розрахунку струмів короткого замикання та вибору електричних апаратів захисту. Визначено струми КЗ у характерних точках мережі, на основі чого виконано вибір автоматичних вимикачів, роз'єднувачів, магнітних пускачів та запобіжників. Проведені перевірки підтвердили відповідність апаратів умовам електродинамічної та термічної стійкості, а також здатність надійно відключати аварійні режими.

Таким чином, розроблена система електропостачання електролізного цеху забезпечує необхідний рівень надійності, безпеки та ефективності роботи технологічного обладнання, відповідає вимогам нормативних документів та може бути використана для стабільної експлуатації установки з виробництва водню методом електролізу.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						57
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Вибір елементів автоматизації для системи керування лужним електролізером

3.1.1 Аналіз технологічних параметрів, що підлягають контролю та регулюванню

Для ефективної та безпечної роботи лужного електролізера система автоматизації повинна контролювати основні технологічні параметри та підтримувати їх у заданих межах.

Головною регульованою координатою є струм електролізу, оскільки саме він визначає продуктивність установки та інтенсивність утворення водню. Напруга використовується для оцінки енергоефективності процесу та технічного стану електролізера.

До ключових параметрів належать також температура електроліту, яка впливає на швидкість реакцій і внутрішній опір системи, та тиск газів, контроль якого необхідний для безпечної експлуатації установки [12, 13].

Додатково контролюються рівень електроліту, витрата охолоджувальної рідини та стан циркуляційного насоса, що дозволяє забезпечити надійну роботу обладнання та своєчасно виявляти несправності.

На основі проведеного аналізу можна сформулювати перелік основних параметрів автоматизованої системи керування лужним електролізером, який наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні технологічні параметри системи керування

Параметр	Контроль	Регулювання
Струм електролізу	+	+
Напруга електролізера	+	-
Температура електроліту	+	+
Тиск водню	+	+
Рівень електроліту	+	+
Витрата охолоджувача	+	-

Таким чином, для забезпечення стабільної та безпечної роботи системи продукування водню необхідно здійснювати комплексний контроль електричних, теплових та технологічних параметрів електролізної установки. Особливу увагу слід приділити регулюванню струму електролізу, оскільки саме він безпосередньо визначає продуктивність установки та якість роботи всієї системи автоматичного керування.

3.1.2 Вибір датчика струму електролізера

Струм електролізу є ключовим параметром, що визначає продуктивність установки, оскільки за законом Фарадея кількість водню прямо залежить від електричного заряду. Тому система керування повинна забезпечувати точне вимірювання струму в широкому діапазоні навантажень.

У промислових лужних електролізерах струми можуть досягати сотень ампер, а на вимірювання додатково впливають електромагнітні завади від силового обладнання. До датчиків струму висуваються вимоги щодо точності, гальванічної ізоляції, завадостійкості та сумісності з PLC.

Основними типами датчиків є шунти, трансформатори струму та датчики на ефекті Холла. Шунти прості, але мають втрати та проблеми з ізоляцією, трансформатори не підходять для постійного струму, тоді як датчики Холла є найбільш універсальними та придатними для систем електролізу [14].

Для подальшого проєктування було розглянуто декілька промислових датчиків струму, характеристики яких наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняння датчиків струму

Модель	Діапазон вимірювання	Вихідний сигнал	Похибка
LEM HASS 200-S	±200 A	4–20 мА	±1 %
LEM HASS 400-S	±400 A	4–20 мА	±1 %
Phoenix Contact EEM-MA600	0–600 A	4–20 мА	±1 %

З урахуванням струмів понад 100 А обрано датчик LEM HASS 200-S, який забезпечує необхідний діапазон вимірювання та запас перевантаження.

Його основні переваги: гальванічна ізоляція, висока швидкодія, завадостійкість, сумісність із PLC та стандартний вихід 4–20 мА.

Сигнал з датчика подається на аналоговий модуль контролера, де оцифровується та використовується в алгоритмі регулювання струму.

Застосування датчика на ефекті Холла забезпечує точність вимірювання та придатність для сучасних систем електролізу, зокрема в умовах змінного навантаження від відновлюваних джерел енергії.

3.1.3 Вибір датчиків температури та тиску

Температура електроліту та тиск газів є ключовими параметрами, що визначають ефективність і безпеку роботи електролізної установки.

Під час електролізу частина електроенергії перетворюється на тепло, що підвищує температуру електроліту, а також утворюються водень і кисень, що впливають на тиск у системі. Підвищення температури зменшує опір електроліту та підвищує ефективність, але надмірне нагрівання призводить до деградації елементів установки, тому потрібен точний контроль у діапазоні 50–90 °С.

Для вимірювання температури доцільно використовувати платинові термометри опору Pt100, зокрема Siemens SITRANS TH100, які забезпечують високу точність, стабільність і сумісність із PLC.

Тиск водню контролюється датчиком Siemens SITRANS P220 з виходом 4–20 мА, що забезпечує завадостійку передачу сигналу та високу точність вимірювання в умовах водневого середовища.

Сигнали з датчиків надходять до PLC, де використовуються для моніторингу, регулювання температури та контролю тиску з формуванням аварійних сигналів при відхиленнях.

3.1.4 Вибір датчика рівня електроліту

Під час роботи електролізера відбувається циркуляція електроліту, однак можливі його втрати, що призводить до зниження рівня та порушення

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						60
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електрохімічних процесів. Це викликає зростання опору, перегрів і зниження продуктивності.

Надмірний рівень також небезпечний, оскільки може спричинити потрапляння електроліту в газові тракти та порушення роботи систем очищення. Тому контроль рівня є обов'язковим елементом автоматизації.

Для вимірювання використовуються різні типи датчиків, але для лужного електролізера доцільними є гідростатичні, а також дискретні сигналізатори рівня через їх надійність і стійкість до агресивного середовища.

У проєкті застосовано гідростатичний датчик 4–20 мА та сигналізатор Endress+Hauser Liquiphant FTL31 для контролю мінімального рівня. Сигнали надходять до PLC для формування попереджень, аварійних зупинок і керування підживленням системи.

3.1.5 Вибір виконавчих механізмів

Ефективність системи керування залежить не лише від вимірювання параметрів, але й від можливості впливу на процес через виконавчі механізми.

Основним виконавчим елементом є силовий випрямляч, який забезпечує живлення електролізера та дозволяє регулювати струм. У проєкті використано керований тиристорний випрямляч Siemens SINAMICS DCM, що підтримує аналогове та цифрове керування і інтеграцію з PLC. Саме його вихідна напруга використовується як керуючий вплив у моделі системи.

Для циркуляції електроліту застосовується насос Grundfos CRN 3-8 із частотним перетворювачем, що дозволяє регулювати витрату та покращує тепловий режим.

Система охолодження реалізується через теплообмінник і регулюючий клапан Siemens Acvatix VXG41 з електроприводом, який забезпечує підтримання температури електроліту.

Безпеку забезпечують електромагнітні клапани Burkert Type 6013, що перекривають газові магістралі в аварійних режимах.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						61
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, випрямляч, насос, система охолодження та клапани утворюють комплекс виконавчих механізмів, який забезпечує автоматичне керування процесом електролізу.

Функціональна схема керування для виконавчих механізмів наведена на рис. 3.1.

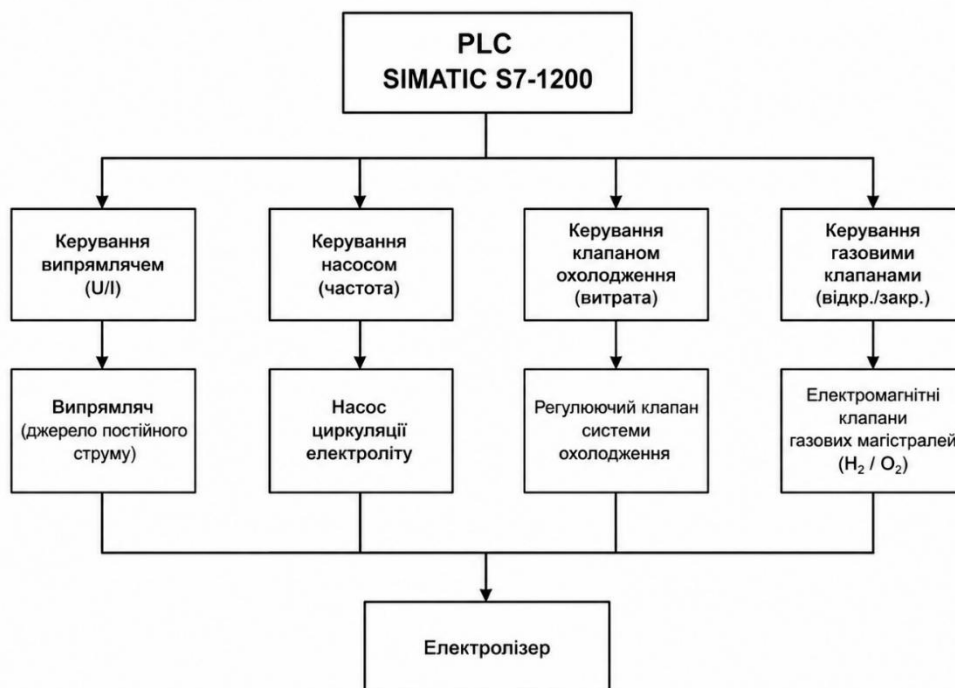


Рисунок 3.1 – Функціональна схема керування для виконавчих механізмів до контролера SIMATIC S7-1200

3.1.6 Формування структури нижнього рівня автоматизації

Нижній рівень автоматизованої системи забезпечує безпосередню взаємодію з технологічним обладнанням, збір даних і формування керуючих сигналів.

На цьому рівні контролюються основні параметри електролізера: струм, напруга, температура, рівень електроліту та тиск водню. Дані надходять від промислових датчиків із виходом 4–20 мА та через модулі аналогового вводу перетворюються в цифрову форму.

Центральним елементом є PLC, який виконує обробку сигналів, реалізує алгоритми регулювання, логічні функції та захисти. На основі відхилень від

установок контролер формує керуючі впливи для випрямляча, системи охолодження та інших виконавчих механізмів.

У разі аварійних ситуацій система забезпечує автоматичне переведення установки в безпечний режим шляхом зниження навантаження, зупинки обладнання або відключення живлення.

Нижній рівень інтегрується з SCADA-системою для моніторингу, архівації даних і дистанційного керування.

З урахуванням виконаного аналізу структура нижнього рівня автоматизації може бути представлена у вигляді функціональної схеми, наведеної на рис. 3.2.

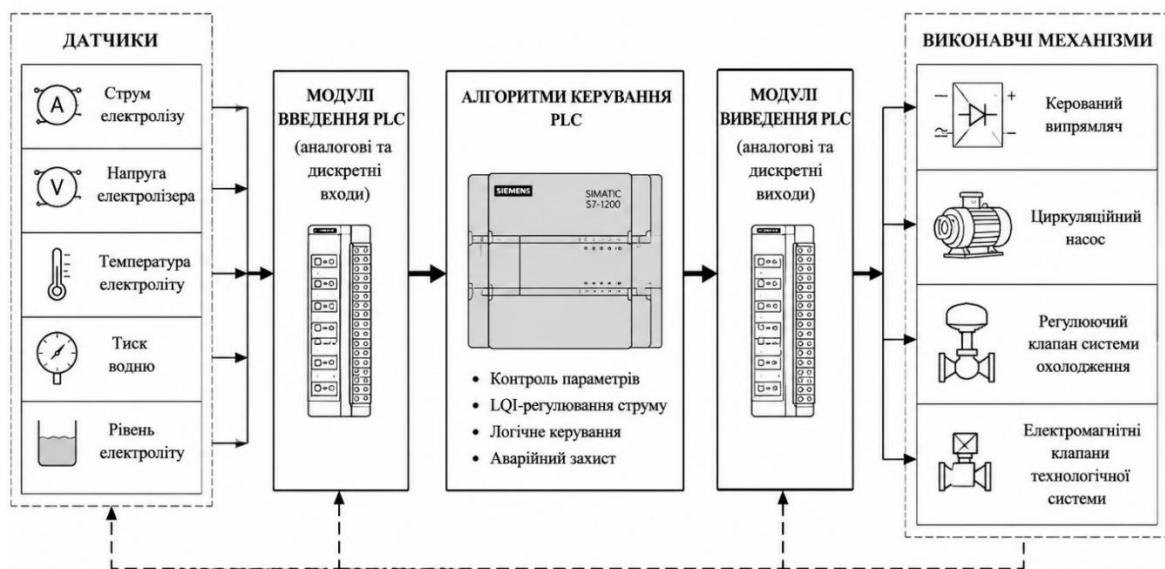


Рисунок 3.2 – Структура нижнього рівня автоматизації системи продукування водню на базі лужного електролізера

Вхідними сигналами системи є струм і напруга електролізера, температура електроліту, тиск водню та рівень електроліту.

Вихідні сигнали контролера формуються для керування випрямлячем, циркуляційним насосом, клапаном охолодження та електромагнітними клапанами технологічної системи.

Така структура нижнього рівня забезпечує повний цикл збору та обробки даних і є основою для подальшого вибору PLC та конфігурації його апаратної частини.

3.2 Вибір та налаштування програмованого логічного контролера системи керування електролізом

3.2.1 Формування вимог до контролера системи керування

Вибір PLC є важливим етапом проєктування, оскільки він визначає можливості реалізації алгоритмів керування та взаємодії з обладнанням.

Система електролізера працює з аналоговими та дискретними сигналами від датчиків струму, температури, тиску й рівня, а також керує насосами, клапанами та захисними пристроями. Контролер має забезпечувати виконання складних алгоритмів у реальному часі та підтримку промислових протоколів обміну даними.

Також важливими є надійність, самодіагностика, можливість розширення I/O та інтеграція з SCADA/HMI.

Отже, PLC повинен мати достатню продуктивність, підтримку необхідних I/O, промислових мереж, масштабованість і сумісність із системами візуалізації та керування.

3.2.2 Порівняльний аналіз промислових програмованих логічних контролерів

Після визначення вимог здійснюється вибір PLC для керування електролізом. На ринку найпоширенішими є рішення Siemens, Schneider Electric та Rockwell Automation, які застосовуються в енергетиці та хімічній промисловості.

Для порівняння розглянуто три серії контролерів: Siemens SIMATIC S7-1200, Schneider Electric Modicon M221 та Allen-Bradley Micro850.

Основні характеристики розглянутих контролерів наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Порівняння програмованих контролерів логічних параметрів

Характеристика	Siemens S7-1200	Modicon M221	Micro850
1	2	3	4
Ethernet	Так	Так	Так
Підтримка PID	Так	Так	Так
Можливість розширення	Висока	Середня	Середня
Аналогові модулі	Так	Так	Так
Інтеграція зі SCADA	Висока	Середня	Висока

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						64
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Продовження табл. 3.3.

1	2	3	4
Середовище програмування	TIA Portal	EcoStruxure Machine Expert	Connected Components Workbench
Поширеність в Україні	Висока	Середня	Низька

Порівняння показує, що всі розглянуті ПЛК придатні для керування електролізною установкою, однак Siemens має переваги для даного проєкту.

SIMATIC S7-1200 забезпечує масштабованість за рахунок підключення додаткових модулів I/O та комунікацій, що дозволяє розширювати систему без заміни контролера. Важливою перевагою є інтеграція з TIA Portal, яка об'єднує програмування, налаштування та візуалізацію.

Контролери цієї серії (рис. 3.3) підтримують сучасні промислові протоколи, мають вебсервер і дозволяють реалізовувати складні алгоритми керування в реальному часі [16].

	Siemens SIMATIC S7-1200	Schneider Electric Modicon M221	Allen-Bradley Micro850
			
Характеристика	Siemens S7-1200	Schneider Modicon M221	Allen-Bradley Micro850
Аналогові входи	До 8 (вбудовано)	До 6 (вбудовано)	До 5 (вбудовано)
Аналогові виходи	До 2 (вбудовано)	До 2 (вбудовано)	До 2 (вбудовано)
Ethernet	Є (вбудований)	Є (вбудований)	Є (вбудований)
Модулі розширення	Широкі можливості вводу/виходу	Широкі можливості вводу/виходу	Обмежені можливості вводу/виходу
Програмне забезпечення	TIA Portal	EcoStruxure Machine Expert Basic	Connected Components Workbench
Надійність	Висока	Висока	Висока
Орієнтовна вартість	Вища	Середня	Середня
Придатність для електролізера	Висока	Середня	Середня-висока

Обраний контролер:
Siemens SIMATIC S7-1200

- ✓ Найбільша кількість аналогових каналів
- ✓ Широкі можливості розширення та адаптації
- ✓ Інтеграція з TIA Portal та промисловими мережами
- ✓ Висока надійність та стабільність роботи

Рисунок 3.3 – Контролери, розглянуті під час вибору апаратної платформи

Проведений аналіз показує, що найбільш доцільним рішенням для системи керування електролізером є використання контролера SIMATIC S7-1200. Даний контролер забезпечує необхідний функціонал, має високу поширеність у промисловості та підтримує сучасні засоби програмної розробки.

3.2.3 Обґрунтування вибору Siemens SIMATIC S7-1200

Для системи автоматичного керування виробництвом водню обрано Siemens SIMATIC S7-1200.

Це компактна серія ПЛК для широкого спектра задач автоматизації, що поєднує достатню продуктивність, комунікаційні можливості та просту конфігурацію.

Для проєкту використано CPU 1214C DC/DC/DC, який забезпечує необхідну кількість входів і виходів для керування обладнанням електролізної установки.

Основні характеристики контролера наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Основні характеристики CPU 1214C

Параметр	Значення
Робоча напруга живлення	24 В
Дискретні входи	14
Дискретні виходи	10
Аналогові входи	2
Ethernet-порт	1
Максимальна кількість модулів розширення	8
Робоча температура	від -20 до +60 °С

Для підключення датчиків температури, тиску, струму та рівня необхідна додаткова кількість аналогових входів. З цією метою до складу системи включено модуль аналогового введення SM1231 AI, який забезпечує приймання стандартних сигналів 4–20 мА від польових датчиків.

Для керування регулюючими клапанами та іншими виконавчими механізмами використовується модуль аналогового виведення SM1232 AQ, що формує аналогові сигнали керування (рис. 3.4).

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						66
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

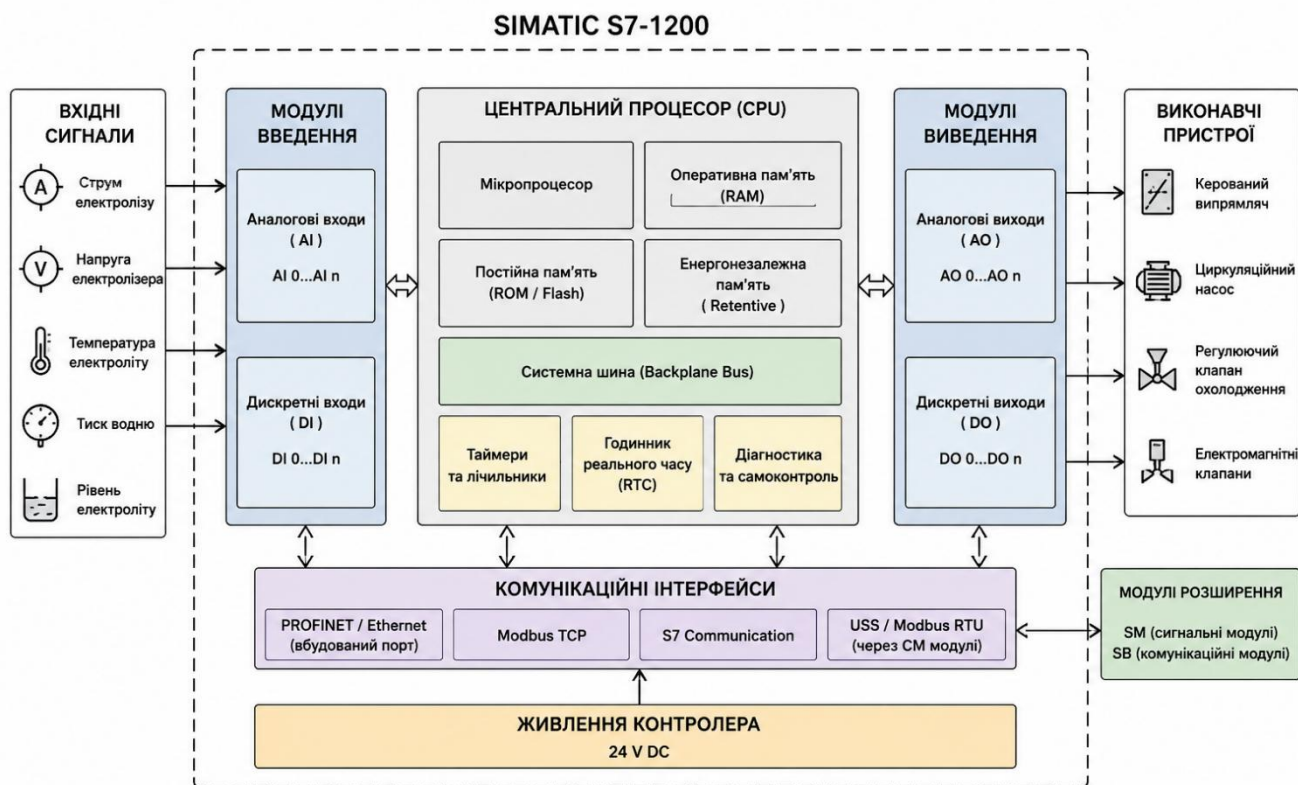


Рисунок 3.4 – Структура контролера SIMATIC S7-1200

Вбудований Ethernet-інтерфейс контролера забезпечує обмін даними з HMI/SCADA, що дозволяє реалізувати віддалений моніторинг та архівування параметрів електролізера.

Підтримка математичних операцій з дійсними числами дає змогу виконувати обчислення для реалізації LQI-регулятора в реальному часі.

Таким чином, Siemens SIMATIC S7-1200 повністю відповідає вимогам системи та дозволяє реалізувати сучасні алгоритми керування електролізом.

3.2.4 Конфігурація модулів введення-виведення

Після вибору центрального процесора визначено склад модулів I/O для взаємодії ПЛК з обладнанням електролізної установки, що забезпечує збір даних і формування керуючих сигналів.

У системі використовуються аналогові сигнали від датчиків струму, температури, тиску та рівня, а також дискретні сигнали для контролю стану обладнання, аварійних кіл і керування насосами та клапанами.

Аналогові входи обробляються модулем Siemens SM1231 AI (4–20 мА), а вихідні аналогові сигнали формуються модулем Siemens SM1232 AQ для керування випрямлячем і системою охолодження. Відповідність сигналів та адресація наведені в табл. 3.5 і 3.6.

Сформована конфігурація забезпечує виконання всіх функцій системи та можливість подальшого розширення без заміни CPU.

Таблиця 3.5 – Призначення каналів введення-виведення

Позначення сигналу	Тип сигналу	Призначення
AI0	Аналоговий вхід	Струм електролізу
AI1	Аналоговий вхід	Напруга електролізера
AI2	Аналоговий вхід	Температура електроліту
AI3	Аналоговий вхід	Тиск водню
AI4	Аналоговий вхід	Рівень електроліту
DI0	Дискретний вхід	Стан циркуляційного насоса
DI1	Дискретний вхід	Аварія випрямляча
DI2	Дискретний вхід	Стан клапана водню
DI3	Дискретний вхід	Сигнал аварійного вимкнення
AQ0	Аналоговий вихід	Керування випрямлячем
AQ1	Аналоговий вихід	Керування охолодженням
DO0	Дискретний вихід	Пуск насоса
DO1	Дискретний вихід	Клапан водню
DO2	Дискретний вихід	Клапан кисню
DO3	Дискретний вихід	Аварійна сигналізація

Таблиця 3.6 – Адресація сигналів PLC

Струм електролізу	IW64
Напруга електролізера	IW66
Температура електроліту	IW68
Тиск водню	IW70
Рівень електроліту	IW72
Керування випрямлячем	QW64
Керування охолодженням	QW66
Насос циркуляції	Q0.0
Клапан водню	Q0.1
Клапан кисню	Q0.2
Аварійна сигналізація	Q0.3

3.2.5 Організація обміну даними між PLC та SCADA

Сучасні системи керування мають багаторівневу структуру: нижній рівень (ПЛК і польові пристрої) та верхній рівень (SCADA, архівування та візуалізація). Для стабільної роботи електролізера необхідний безперервний обмін даними між контролером і операторською станцією, що дозволяє контролювати параметри та змінювати уставки в реальному часі.

Передача даних реалізується через Industrial Ethernet із використанням протоколу PROFINET, який підтримується Siemens SIMATIC S7-1200 без додаткових модулів.

До SCADA-системи передаються ключові параметри процесу: струм електролізу, температура, тиск, рівень електроліту, стан випрямляча, насосів, клапанів та аварійні сигнали.

Верхній рівень також виконує архівування даних, що дозволяє аналізувати ефективність роботи установки та виявляти довгострокові тенденції зміни параметрів. Це особливо важливо для систем, що працюють із змінним навантаженням від відновлюваних джерел енергії.

Такий підхід забезпечує централізований контроль і створює основу для подальшого впровадження дистанційного керування.

3.2.6 Реалізація алгоритмів захисту та аварійного відключення

Під час експлуатації систем виробництва водню ключове значення має безпека через вибухонебезпечність водню та його низьку енергію займання. Тому система автоматизації повинна не лише стабілізувати процес, а й виконувати захисні функції.

Основним завданням захисту є переведення установки в безпечний стан при відхиленнях від нормального режиму. Контролер безперервно контролює параметри процесу та при перевищенні температури, тиску, зниженні рівня електроліту або відмовах обладнання автоматично активує аварійний режим, включаючи також сигнал аварійної зупинки.

У разі спрацювання захисту спочатку знижується струм електролізу, після чого перекриваються газові клапани та вмикається аварійна сигналізація.

Таким чином, реалізована логіка забезпечує безпечну експлуатацію установки та відповідає вимогам промислової автоматизації.

3.3 Синтез системи керування електролізом

3.3.1 Розроблення математичної моделі лужного електролізера

Перед синтезом системи керування необхідна математична модель електролізера для адекватного опису процесів.

В електролізі одночасно протікають електрохімічні, теплові та електричні процеси, при цьому електрична енергія частково переходить у водень, частково — у тепло.

Струм визначається прикладеною напругою, електрохімічною складовою та внутрішнім опором, а інерційність процесу враховується еквівалентною індуктивністю.

Відповідно до другого закону Кірхгофа динаміка струму описується рівнянням:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{L} \cdot \left[U_{st} - N \cdot (U_0 + \eta_{акт} + \eta_{конц}) - I \cdot R_{st} \right], \quad (3.1)$$

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						70
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де I – струм електролізера, А; $L=1\cdot10^{-3}$ – еквівалентна індуктивність силового кола, Гн; U_{st} – напруга живлення електролізера, В; N – кількість електролізних комірок; $U_0=1,23$ – оборотна напруга розкладу води, В; $\eta_{акт}$ – активаційна поляризація, В; $\eta_{конц}$ – концентраційна поляризація, В; R_{st} – еквівалентний омичний опір електролізера, Ом.

У розробленій моделі використовується електролізер, що складається з двадцяти послідовно з'єднаних комірок ($N = 20$).

Під час зростання густини струму поблизу поверхні електродів виникає дефіцит реагентів, що призводить до появи концентраційної поляризації. Її величина суттєво залежить від температури та робочого струму.

$$\eta_{конц}(I, T) = \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{I_{lim}}{I_{lim} - I} \right), \quad (3.2)$$

де $R = 8,314$ – універсальна газова стала, Дж/(моль · К); $F = 96485$ – число Фарадея, Кл/моль; $I_{lim} = 200$ – граничний струм електролізера, А.

З аналізу рівняння (3.2) видно, що при наближенні струму до граничного значення концентраційна поляризація різко зростає, що відповідає реальним фізичним процесам у електролізних системах (рис. 3.5).

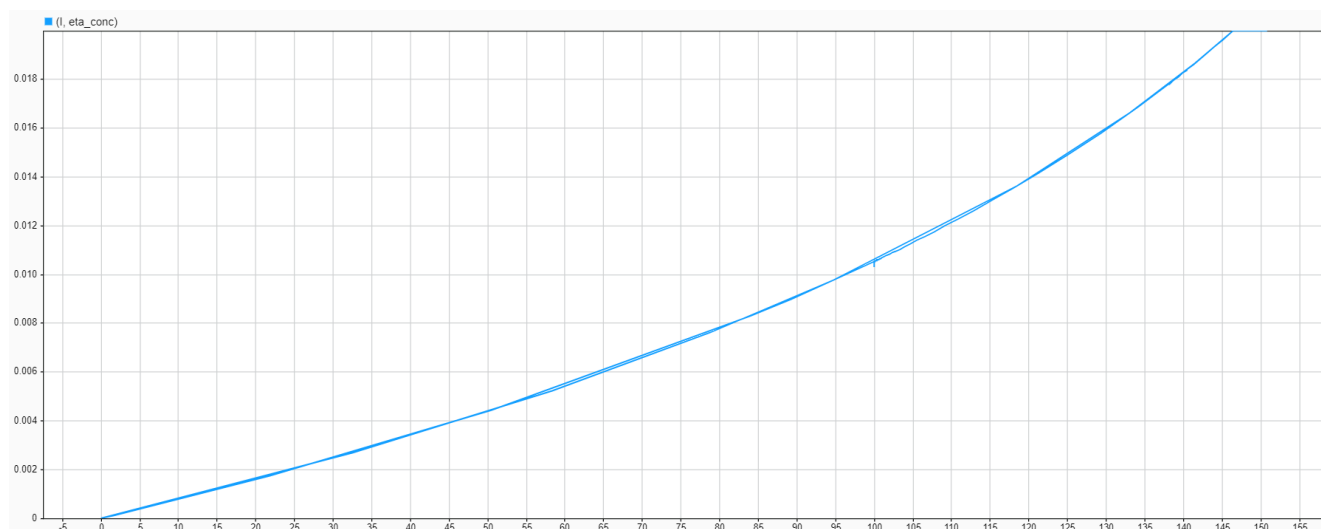


Рисунок 3.5 – Залежність $\eta_{конц}(I)$

Електрохімічна реакція потребує подолання енергетичного бар'єра на межі електрод–електроліт, що призводить до виникнення активаційної поляризації та зниження енергоефективності електролізера.

Фарадеївський струм визначається рівнянням Батлера–Фольмера:

$$I_F = I_0 \cdot \left[e^{\frac{\alpha \cdot n \cdot F}{R \cdot T} \cdot \eta_{акт}} - e^{-\frac{(1-\alpha) \cdot n \cdot F}{R \cdot T} \cdot \eta_{акт}} \right], \quad (3.3)$$

де $I_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ А; $\alpha = 0,5$; $n = 2$.

Динаміка активаційної поляризації описується рівнянням

$$\frac{d\eta_{акт}}{dt} = \frac{1}{C_{dl,st}} \cdot (I - I_F), \quad (3.4)$$

де $C_{dl,st} = 100$ Ф.

Рівняння (3.3)–(3.4) формують нелінійну підсистему електрохімічної кінетики (рис. 3.6).

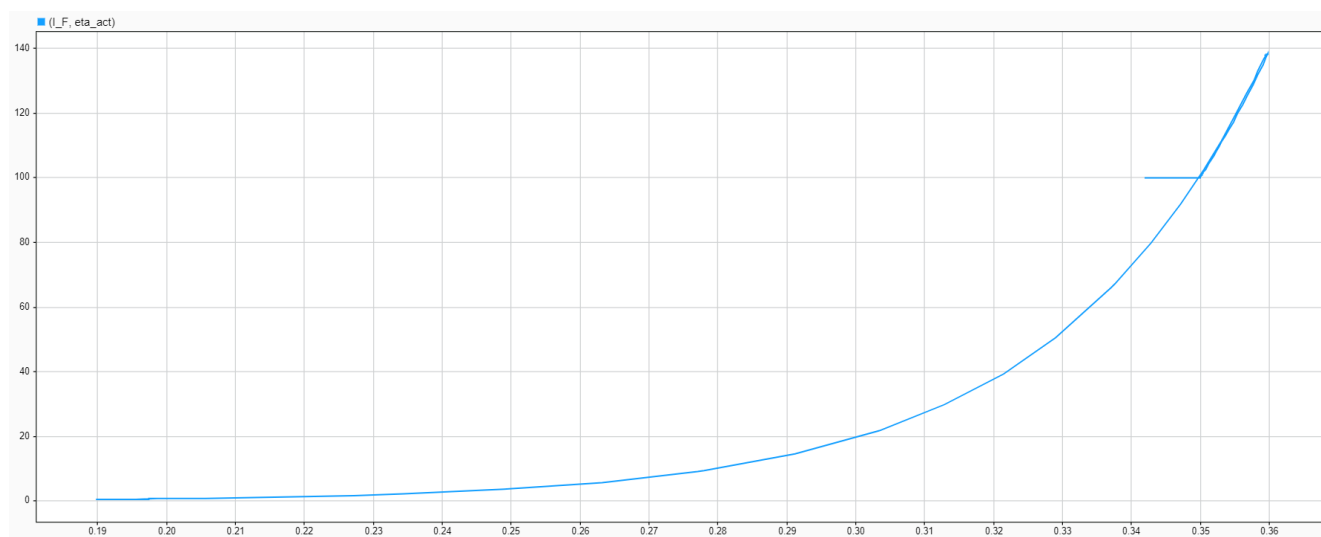


Рисунок 3.6 - Залежність $I_F(\eta_{акт})$

3.3.2 Теплова модель електролізера

Під час роботи лужного електролізера частина електричної енергії переходить у тепло, що впливає на ефективність процесу через зміну швидкості реакцій, опору та поляризаційних втрат. Тому при моделюванні необхідно

враховувати теплову підсистему, яка має значну інерційність і визначає довготривалу динаміку установки, на відміну від швидких електричних процесів.

У розробленій моделі тепла підсистема описується рівнянням теплового балансу

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_T} \cdot [I^2 \cdot R_{st}(T) - h \cdot (T - T_{env})], \quad (3.5)$$

де T – температура електроліту, К; $C_T = 1 \cdot 10^4$ – еквівалентна тепла ємність електролізера, Дж/К; I – струм електролізу, А; $h = 50$ – коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище, Вт/К; $T_{env} = 298$ – температура навколишнього середовища, К;

Перший доданок у правій частині рівняння (3.5) $I^2 \cdot R_{st}(T)$ характеризує джоулеві втрати, які виникають при проходженні струму через електроліт та струмопровідні елементи електролізера.

Другий доданок $h \cdot (T - T_{env})$ характеризує тепловий потік від електролізера до навколишнього середовища.

Таким чином, температура зростає доти, доки тепла потужність втрат перевищує потужність охолодження. Після досягнення рівноваги встановлюється стаціонарний тепловий режим роботи установки.

Відомо, що електропровідність лужного електроліту залежить від температури. Зі збільшенням температури рухливість іонів зростає, що призводить до зменшення електричного опору електроліту.

Для врахування цього ефекту в моделі використовується залежність:

$$R_{st}(T) = N \cdot R_0 \cdot [1 + \alpha_R \cdot (T - T_{ref})], \quad (3.6)$$

де $R_0 = 0,01$ – опір однієї електролізної комірки при номінальній температурі, Ом; $\alpha_R = -0,02$ – температурний коефіцієнт опору, K^{-1} ; $T_{ref} = 353$ – опорна температура, К.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						73
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Від'ємне значення коефіцієнта α_R відповідає фізичним властивостям лужного електроліту та свідчить про зменшення опору зі збільшенням температури і навпаки.

Температура істотно впливає на процеси в електролізері: зі зростанням зменшується опір електроліту та втрати напруги, покращується масоперенос.

Водночас перегрів призводить до деградації елементів і зростання витрат на охолодження. Тому її підтримують у робочому діапазоні, а в моделі вона розглядається як одна з ключових змінних разом зі струмом та активаційною поляризацією.

3.3.3 Формування повної системи диференціальних рівнянь електролізера

На основі розглянутих електричних, електрохімічних та теплових процесів математична модель електролізера може бути представлена у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь.

У якості змінних стану системи обрано:

$$x_1 = I \quad (3.7)$$

$$x_2 = \eta_{акт} \quad (3.8)$$

$$x_3 = T \quad (3.9)$$

$$u = U_{st}, \quad (3.10)$$

де U_{st} – напруга живлення електролізера, В.

Тоді система рівнянь стану набуває вигляду:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{L} \cdot [U_{st} - N \cdot (U_0 + \eta_{акт} + \eta_{конц}) - I \cdot R_{st}] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{C_{dl,st}} \cdot (x_1 - I_F) \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{C_T} \cdot [x_1^2 \cdot R_{st}(T) - h \cdot (x_3 - T_{env})] \end{cases} \quad (3.11-3.13)$$

У рівняннях (3.11-3.13) додатково використовуються нелінійні функції:

$$\eta_{конц}(x_1, x_3) = \frac{R \cdot x_3}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{I_{lim}}{I_{lim} - x_1} \right) \quad (3.14)$$

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						74
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та

$$I_F(x_2, x_3) = I_0 \cdot \left[e^{\frac{\alpha \cdot n \cdot F}{R \cdot x_3} \cdot x_2} - e^{-\frac{(1-\alpha) \cdot n \cdot F}{R \cdot x_3} \cdot x_2} \right] \quad (3.15)$$

Таким чином, отримана модель є нелінійною системою третього порядку з одним керуючим впливом та трьома змінними стану.

3.3.4 Лінеаризація математичної моделі та побудова моделі у просторі станів

Для синтезу оптимального регулятора застосовується лінеаризована модель об'єкта в околі номінального режиму. Хоча електролізер є нелінійною системою, у робочих режимах відхилення параметрів зазвичай невеликі, що дозволяє використовувати лінеаризацію для аналізу динаміки та проектування регулятора.

У даній роботі лінеаризація виконується поблизу номінального режиму роботи електролізера, який відповідає таким параметрам:

$$\begin{aligned} I_H &= 100 \text{ A} \\ \eta_{\text{акт.}H} &= 0,38 \text{ В} \\ T_H &= 353 \text{ К} \end{aligned} \quad (3.16-3.18)$$

Номінальний струм відповідає режиму, за якого електролізна установка працює з продуктивністю, близькою до розрахункової, а температура електроліту забезпечує високий коефіцієнт корисної дії процесу електролізу.

Для проведення лінеаризації використовується метод малих відхилень. Вводяться нові змінні:

$$\begin{aligned} \Delta I &= I - I_H \\ \Delta \eta_{\text{акт}} &= \eta_{\text{акт}} - \eta_{\text{акт.}H} \\ \Delta T &= T - T_H \\ \Delta U &= U_{st} - U_H \end{aligned} \quad (3.19-3.22)$$

Таким чином, усі подальші рівняння описують не абсолютні значення параметрів, а їх відхилення від номінального режиму.

Вектор стану системи має вигляд

$$x = \begin{bmatrix} \Delta I \\ \Delta \eta_{\text{акт}} \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (3.23)$$

а вектор керування:

$$u = \Delta U \quad (3.24)$$

Після лінеаризації система набуває стандартної форми простору станів

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A \cdot x + B \cdot u \\ \dot{y} &= C \cdot x + D \cdot u \end{aligned} \quad (3.25)$$

де A – матриця стану; B – матриця керування; C – матриця входу; D – матриця прямого входження.

Основною регульованою величиною є струм електролізу, тому вихідний вектор визначається як:

$$y = \Delta I \quad (3.26)$$

Отримана модель використовується для синтезу регулятора оптимального керування, який забезпечує підтримання заданого струму електролізу та компенсацію впливу внутрішніх і зовнішніх збурень.

Враховуючи наявність трьох координат стану, об'єкт може бути описаний вектором стану третього порядку. До складу координат включено електричну, електрохімічну та теплову підсистеми електролізера.

Вибір саме цих змінних обумовлений тим, що вони найбільш суттєво впливають на якість процесу електролізу та визначають динаміку виробництва водню.

3.3.5 Синтез LQI-регулятора

Одним із ключових завдань керування електролізером є стабілізація струму при зміні параметрів системи та зовнішніх збуреннях.

Для цього застосовується LQI-регулятор, який є модифікацією LQR із додаванням інтегральної складової.

Його основна перевага полягає в усуненні статичної похибки при збереженні оптимальної динаміки системи.

У класичному LQR-регуляторі керуючий вплив формується відповідно до закону:

$$u = -K \cdot x, \quad (3.27)$$

де K – матриця коефіцієнтів зворотного зв'язку; x – вектор стану системи.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						76
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліком такого підходу є можливість виникнення сталої похибки при дії постійних збурень.

Для усунення цього недоліку вводиться інтеграл похибки

$$x_I = \int e(t) dt, \quad (3.28)$$

де

$$e(t) = I_H - I, \quad (3.29)$$

Тоді закон керування набуває вигляду

$$u = -K_x \cdot x - K_I \cdot x_I, \quad (3.30)$$

де K_x – коефіцієнти зворотного зв'язку за станом; K_I – інтегральний коефіцієнт.

В результаті налаштування регулятора у середовищі Matlab були отримані наступні коефіцієнти:

$$\begin{aligned} K_1 &= 0,12 \\ K_2 &= 0,98 \\ K_3 &= 0,04 \\ K_I &= 5,4 \end{aligned} \quad (3.31-3.34)$$

Фізичний зміст цих коефіцієнтів полягає у визначенні ступеня впливу відповідних координат стану на керуючу напругу електролізера.

Коефіцієнт K_1 визначає вплив відхилення струму електролізу від заданого значення.

Коефіцієнт K_2 характеризує вплив активаційної поляризації на формування керуючого сигналу.

Коефіцієнт K_3 враховує вплив температури електроліту.

Інтегральний коефіцієнт K_I забезпечує компенсацію статичної похибки та підтримання заданого струму навіть за наявності зовнішніх збурень.

Таким чином, закон керування у даній роботі має вигляд:

$$U_{st} = U_H - 0,12 \cdot \Delta I - 0,98 \cdot \eta_{акт} - 0,04 \cdot \Delta T - 5,4 \int (I_H - I) dt \quad (3.35)$$

З рівняння (3.35) видно, що найбільший вплив на систему має активаційна поляризація. Це відповідає фізичним особливостям електролізера, оскільки саме

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						77
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електрохімічні процеси визначають основну частину втрат напруги під час електролізу.

3.3.6 Формування закону керування та аналіз стійкості системи

Після налаштування параметрів LQI-регулятора його було інтегровано в модель електролізера. Система керування формує вплив на основі поточного стану об'єкта та похибки регулювання, забезпечуючи підтримання заданого режиму.

Реалізацію виконано в MATLAB/Simulink у складі замкненої імітаційної моделі, де основною регульованою змінною є струм електролізу.

Аналіз перехідних процесів показав, що після збурення всі змінні залишаються обмеженими та виходять на усталений режим без коливань і розбігання, що підтверджує стійкість системи.

Інтегральна складова забезпечує усунення статичної похибки та підвищує точність регулювання навіть за наявності нелінійностей електролізера.

Отримані результати підтверджують працездатність структури регулятора та стійкість замкненої системи.

3.4 Дослідження технологічного процесу видобутку водню методом цифрового моделювання

Одним із ефективних способів дослідження динаміки електролізних установок є цифрове моделювання, яке дозволяє оцінити вплив параметрів без експериментів на реальному обладнанні.

У роботі використано MATLAB Simulink, що дає змогу реалізувати модель електролізера у вигляді взаємопов'язаних блоків, які описують фізичні процеси електролізу.

Під час моделювання враховувалися електричні, електрохімічні та теплові процеси, зокрема поляризаційні ефекти, зміна температури та внутрішнього опору.

Метою дослідження є оцінка динамічних характеристик системи та перевірка ефективності LQI-регулятора.

3.4.1 Розроблення імітаційної моделі лужного електролізера

Після розроблення математичної моделі електролізера та синтезу системи керування було побудовано імітаційну модель технологічного процесу в MATLAB

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						78
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Simulink. Це дозволило дослідити поведінку системи в різних режимах без фізичних експериментів, що зменшує витрати часу та ресурсів.

Розроблена модель (рис. 3.7) є цифровим двійником лужного електролізера та відтворює основні процеси електролізу води. Використано модульний підхід, де фізичні процеси реалізовані у вигляді взаємопов'язаних функціональних блоків.

Середовище моделювання забезпечує поєднання математичного опису динаміки з візуалізацією результатів і засобами синтезу систем автоматичного керування.

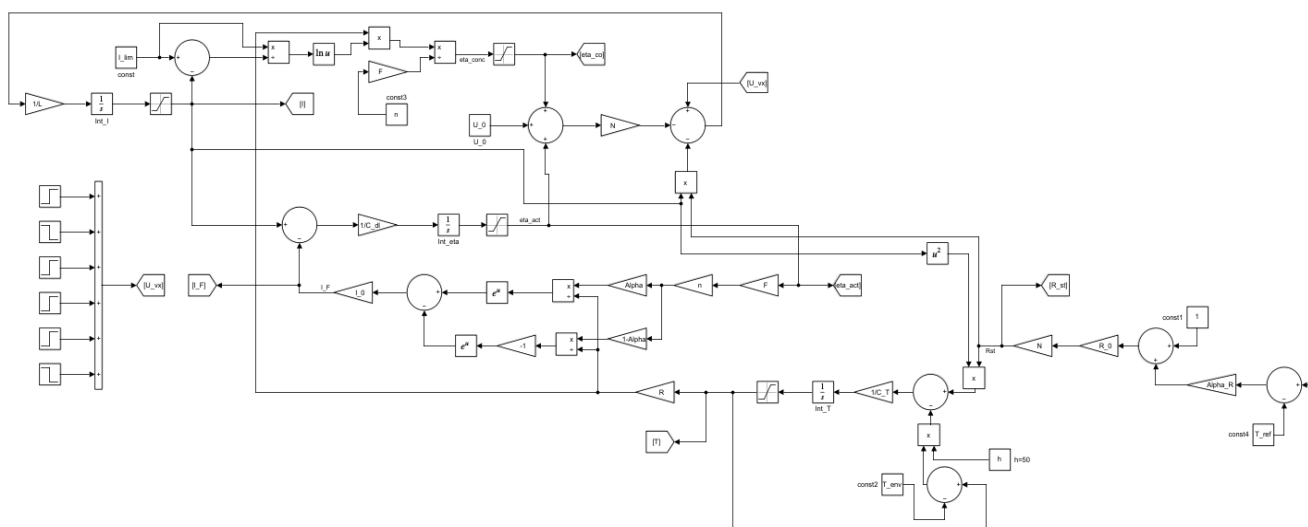


Рисунок 3.7 – Імітаційна модель лужного електролізера в середовищі Matlab Simulink

Структура моделі складається з функціональних підсистем, що описують основні фізичні процеси електролізу. Центральним елементом є підсистема електролізера, на яку подається напруга живлення, а виходом є струм, температура та поляризаційні втрати.

Математичні залежності реалізовано стандартними блоками MATLAB Simulink (інтегратори, суматори, підсилювачі та нелінійні функції), що забезпечує наочність і простоту модифікації моделі.

Модель враховує електричні, електрохімічні та теплові процеси, а також їх взаємний вплив. Для спостереження параметрів використовуються блоки Scope.

Контролюються основні величини: струм, напруга, поляризації, температура та внутрішній опір. На вхід подається ступінчаста напруга для аналізу перехідних процесів.

Отримана модель використовується як базова для порівняння роботи системи з LQI-регулятором і без нього.

3.4.2 Розроблення моделі автоматизованої системи керування електролізером

Після створення імітаційної моделі електролізера розроблено цифрову модель системи керування процесом електролізу. Її метою є стабілізація струму незалежно від змін параметрів об'єкта та його нелінійностей.

У реальних умовах струм визначає швидкість електрохімічних реакцій і продуктивність за воднем, однак залежить від температури, поляризаційних втрат та внутрішнього опору. Тому керування лише напругою живлення не забезпечує стабільного режиму роботи.

Для вирішення цієї задачі до складу моделі було інтегровано систему автоматичного керування на основі LQI-регулятора (рис. 3.8), синтез якого виконано у підрозділі 3.3.

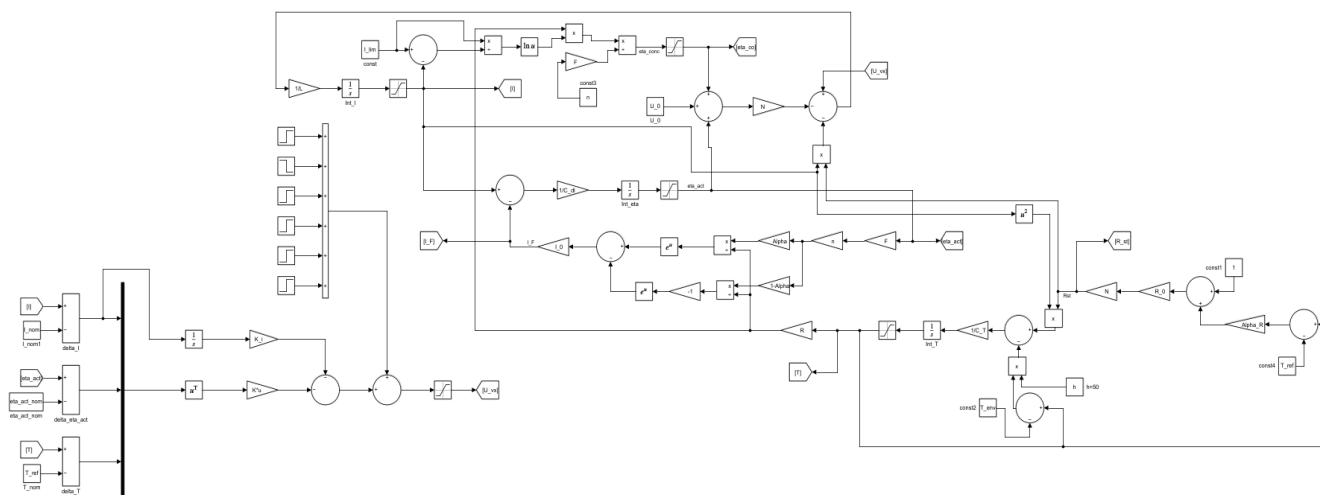


Рисунок 3.8 – Імітаційна модель автоматизованої системи керування електролізером

На відміну від базової моделі, дана структура містить замкнений контур керування з порівнянням заданого та фактичного струму і формуванням сигналу похибки. Далі регулятор обчислює керуючу напругу для компенсації відхилення.

Система використовує не лише струм, а й додаткові змінні — активаційну поляризацію та температуру електроліту, що дозволяє враховувати електрохімічні й теплові процеси (табл. 3.10). У моделі реалізовано інтегральну складову, яка усуває статичну похибку.

Керування здійснюється шляхом безперервної корекції напруги живлення. Для аналізу застосовано ступінчастий вплив і блоки Score, що дозволяє оцінити перехідні процеси та порівняти роботу системи з регулятором і без нього.

Таблиця 3.10 – Контрольовані параметри моделі автоматизованої системи керування

Параметр	Позначення	Одиниця вимірювання
Струм електролізу	I	А
Активаційна поляризація	$\eta_{акт}$	В
Концентраційна поляризація	$\eta_{конц}$	В
Температура електроліту	T	К
Внутрішній опір	R_{st}	Ом
Сигнал керування	U_{st}	В

3.4.3 Дослідження реакції електролізера на ступінчасту зміну напруги

Залиш без змін, просто додай посилання на рисунок у текст:

На відміну від базової моделі, дана структура містить замкнений контур керування з порівнянням заданого та фактичного струму і формуванням сигналу похибки.

Далі регулятор обчислює керуючу напругу для компенсації відхилення. Система використовує не лише струм, а й додаткові змінні — активаційну поляризацію та температуру електроліту, що дозволяє враховувати електрохімічні й теплові процеси. У моделі реалізовано інтегральну складову, яка усуває статичну похибку.

Керування здійснюється шляхом безперервної корекції напруги живлення. Для аналізу застосовано ступінчастий вплив і блоки Score, що дозволяє оцінити перехідні процеси та порівняти роботу системи з регулятором і без нього (рис. 3.9).

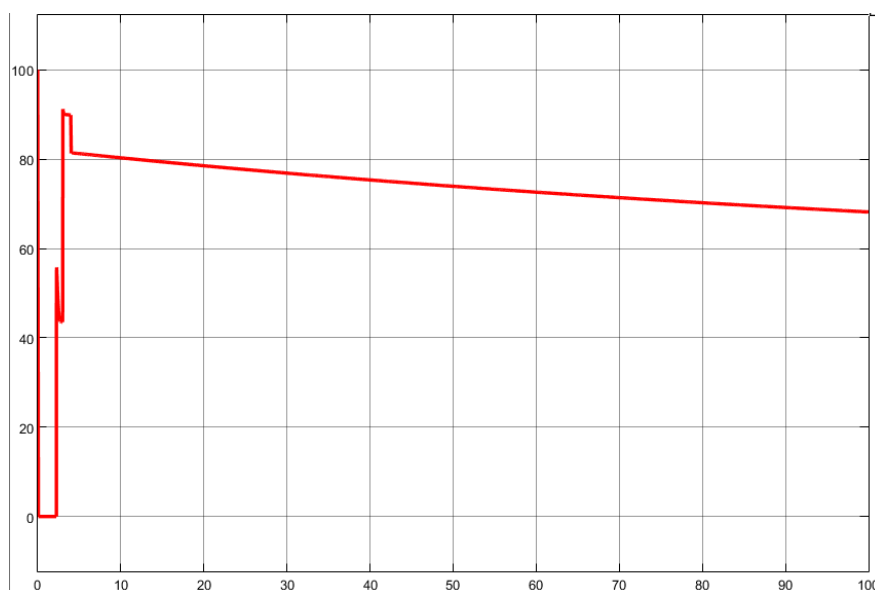


Рисунок 3.9 – Перехідний процес струму електролізу при ступінчастій зміні напруги

Аналіз характеристики дозволяє оцінити тривалість перехідного процесу та швидкодію електролізера як об'єкта керування.

Результати показують, що напруга електролізної батареї є динамічною величиною, яка залежить не лише від джерела живлення, а й від стану електрохімічної системи.

Активаційна поляризація відображає енергетичні втрати на електродах і є основним джерелом втрат енергії. Після зміни струму спостерігається її зростання через перебудову процесів на межі електрод–електроліт.

Згодом швидкість зміни зменшується, і система переходить до усталеного режиму (рис. 3.10).

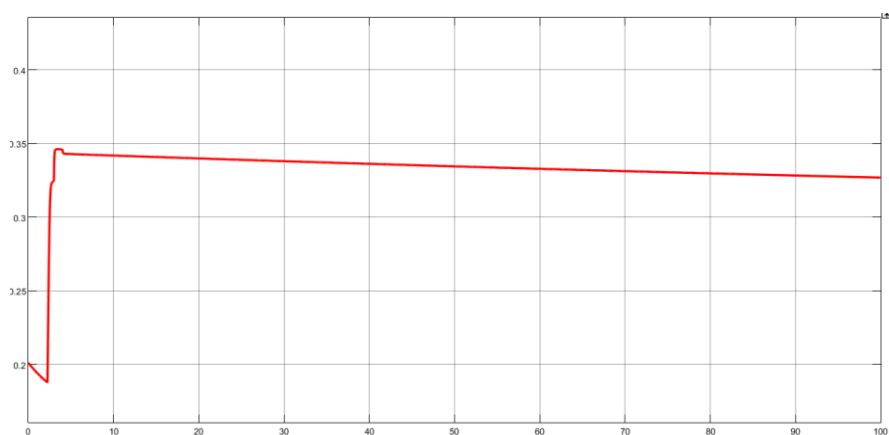


Рисунок 3.10 – Перехідний процес активаційної поляризації

Отримана характеристика показує наявність інерційності електрохімічних процесів, що визначає динаміку електролізера.

На відміну від активаційної складової, концентраційна поляризація пов'язана з масопереносом у приелектродних шарах і зростає через локальне виснаження реагентів при підвищенні струму.

У досліджуваному режимі вона змінюється менш інтенсивно, ніж активаційна, оскільки струм не досягає граничних значень, де масоперенос суттєво обмежує реакцію (рис. 3.11).

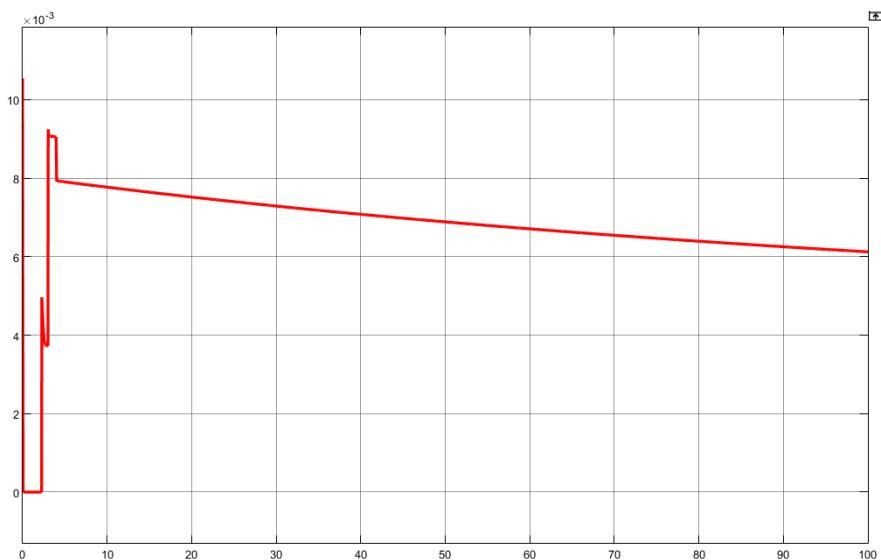


Рисунок 3.11 – Перехідний процес концентраційної поляризації

Аналіз графіка показує, що в номінальному режимі основний внесок у втрати напруги дає активаційна поляризація.

Частина електричної енергії під час проходження струму переходить у тепло, що призводить до підвищення температури електроліту.

Температура змінюється значно повільніше, ніж електричні та електрохімічні координати, через високу теплоємність системи.

Після ступінчастого впливу температура поступово зменшується (рис. 3.12).

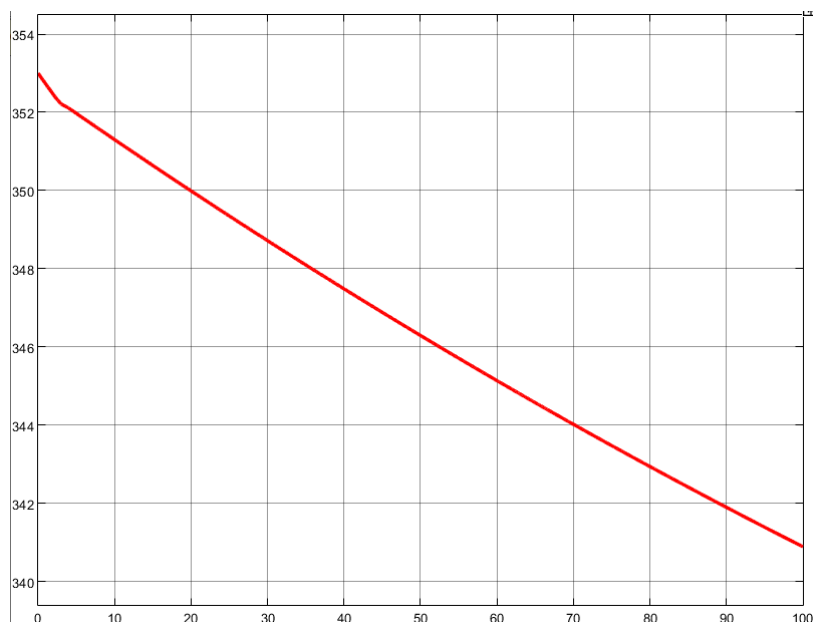


Рисунок 3.12 – Перехідний процес температури електроліту

Значна теплова інерційність електролізера вимагає врахування теплових процесів при синтезі системи керування.

Внутрішній опір залежить від температури електроліту: при її зниженні зменшується електропровідність лужного розчину, що збільшує омичні втрати.

Через повільну динаміку температури зміна опору також має інерційний характер (рис. 3.13).

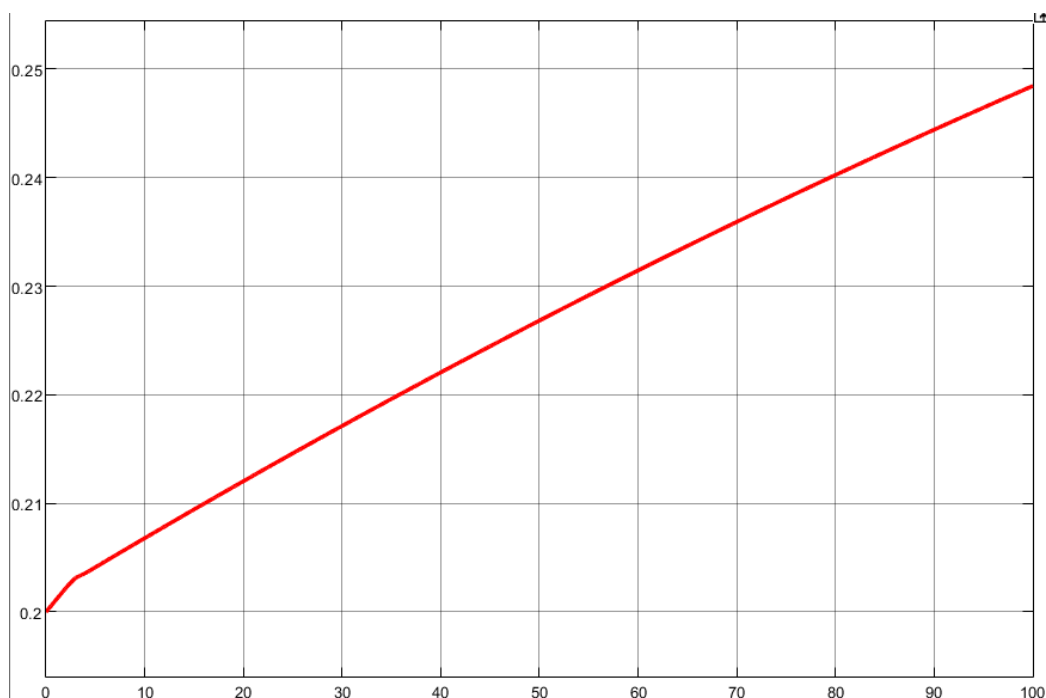


Рисунок 3.13 – Зміна внутрішнього омичного опору електролізера

Результати показують наявність зворотного зв'язку між тепловими та електричними процесами: зниження температури підвищує опір, що впливає на електричний режим роботи.

Дослідження дозволило визначити природну динаміку електролізера без системи керування та створити основу для подальшого аналізу замкненої системи й оцінки ефективності LQI-регулятора.

3.4.4 Дослідження роботи системи з LQI-регулятором

Після синтезу LQI-регулятора та його інтеграції в модель проведено дослідження роботи електролізної установки в замкненому контурі. Метою є перевірка здатності системи стабілізувати струм та компенсувати нелінійності об'єкта.

Під час моделювання на систему подавався сигнал завдання струму, після чого регулятор формував керуючий вплив з урахуванням поточного стану електролізера. Аналізувалися зміни струму, поляризацій, температури та омичного опору.

Особливістю LQI-регулятора є врахування не лише струму, а й внутрішніх електрохімічних і теплових змін, що покращує якість керування.

Струм після подачі завдання швидко досягає нового режиму та стабілізується поблизу 100 А (рис. 3.14).

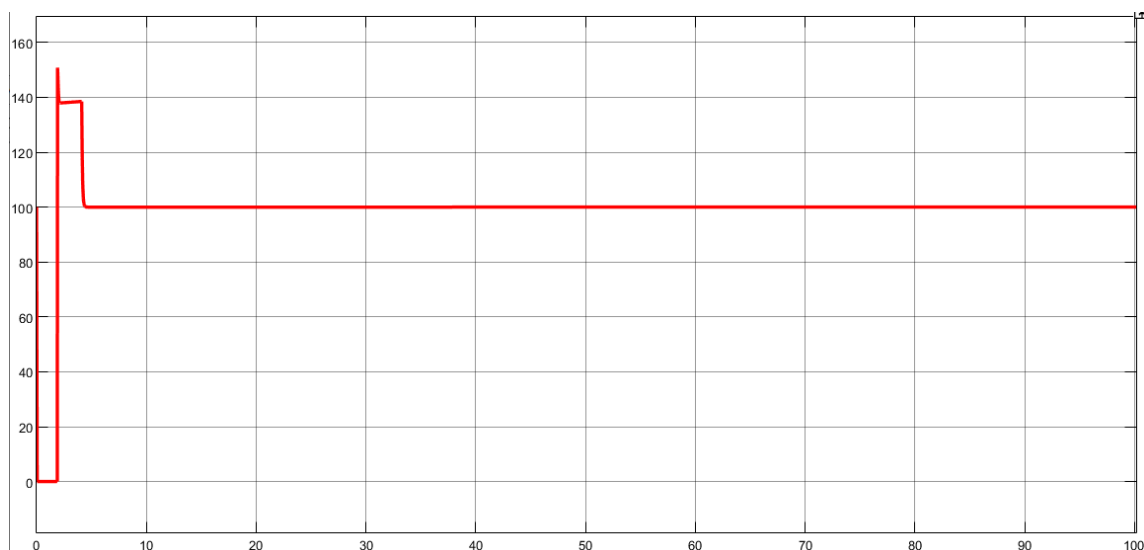
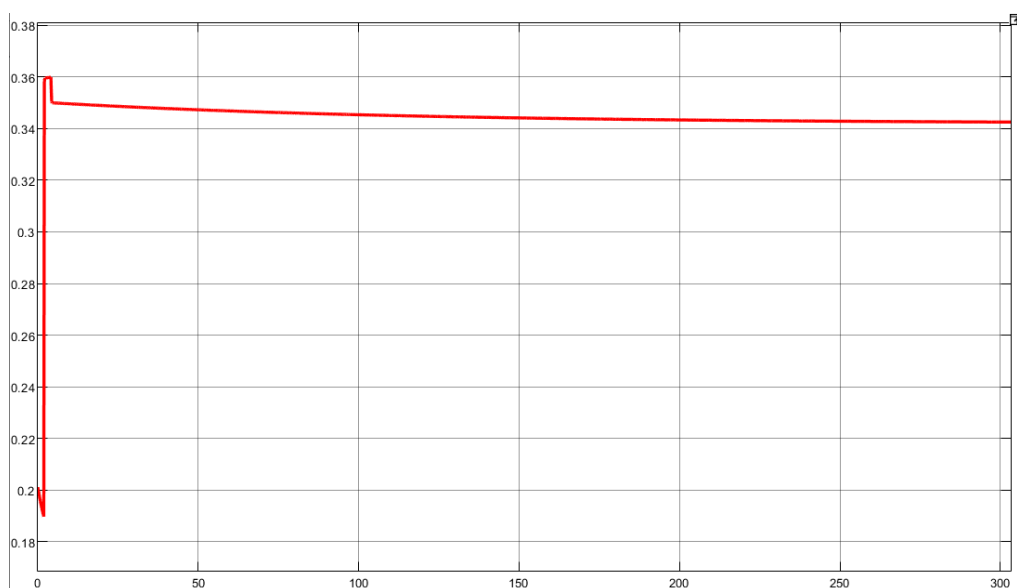


Рисунок 3.14 – Перехідний процес струму електролізу в системі з LQI-регулятором

На початковій ділянці спостерігається короткочасне перерегулювання до приблизно 150 А, після чого регулятор компенсує відхилення і система виходить на усталений режим без коливань. Це підтверджує стійкість замкненого контуру та ефективність зворотного зв'язку.

Також відсутня тривала статична похибка: після перехідного процесу струм стабілізується на заданому рівні завдяки інтегральній складовій LQI-регулятора.

На рис. 3.15 наведено зміну активаційної поляризації в процесі роботи системи керування.



Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП ОА21.02.000 ПЗ

Арк.

86

Рисунок 3.15 – Перехідний процес активаційної поляризації

Після зміни режиму роботи активаційна поляризація зростає приблизно з 0,19 В до 0,35 В. На початку спостерігається короткочасне перевищення усталеного значення через збільшення струму та прискорення електрохімічних реакцій.

Далі вона стабілізується близько 0,345 В, що відповідає новому стаціонарному режиму.

Концентраційна поляризація відображає вплив масопереносу на роботу електролізера, її перехідний процес наведено на рис. 3.16.

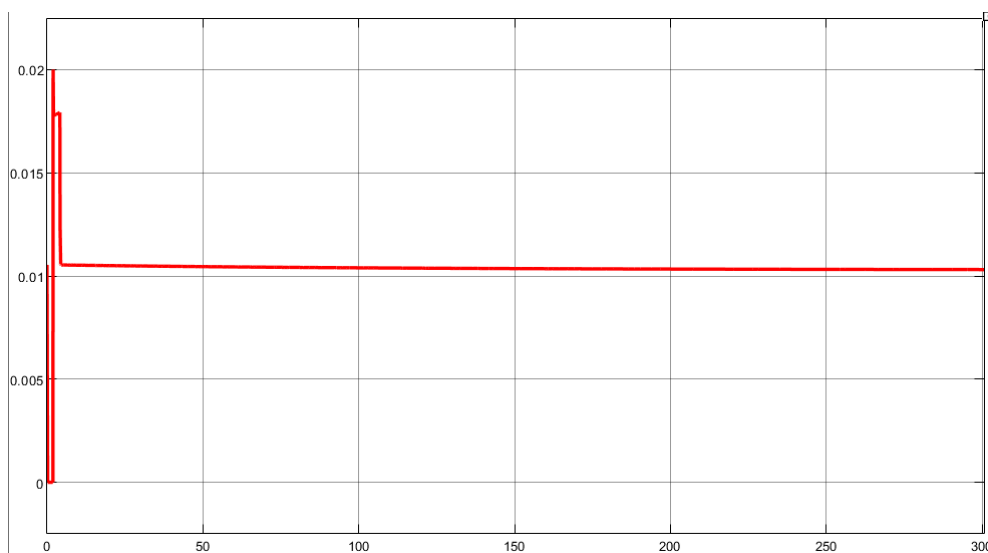


Рисунок 3.16 – Перехідний процес концентраційної поляризації

З графіка видно, що концентраційна поляризація змінюється в межах 0,01–0,02 В і є значно меншою за активаційну, що свідчить про другорядну роль масопереносу в енергетичних втратах у даному режимі.

Після короткого перехідного процесу вона стабілізується приблизно на рівні 0,010 В, що відповідає усталеній роботі установки.

Температура електроліту визначає електропровідність лугу та впливає на електричні характеристики електролізера. Її зміна наведена на рис. 3.17.

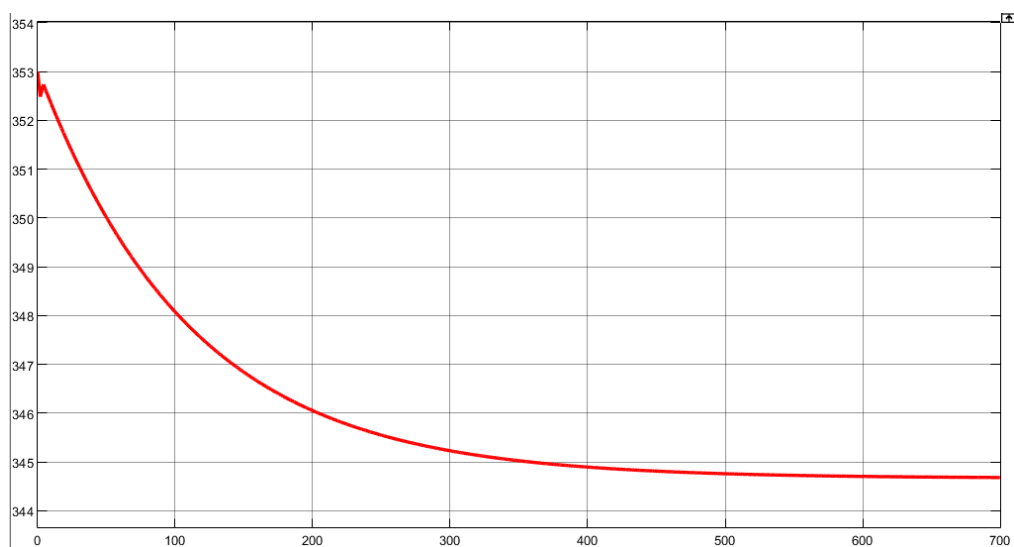


Рисунок 3.17 – Перехідний процес температури електроліту

Температура змінюється значно повільніше порівняно з електричними координатами та поступово знижується з приблизно 353 К до 345 К.

Це зумовлено переважанням тепловіддачі над тепловиділенням, унаслідок чого встановлюється новий тепловий баланс із нижчим рівнем температури.

Отримані результати підтверджують необхідність врахування теплових процесів у системах керування електролізом.

Зміна внутрішнього опору прямо залежить від температури електроліту (рис. 3.18).

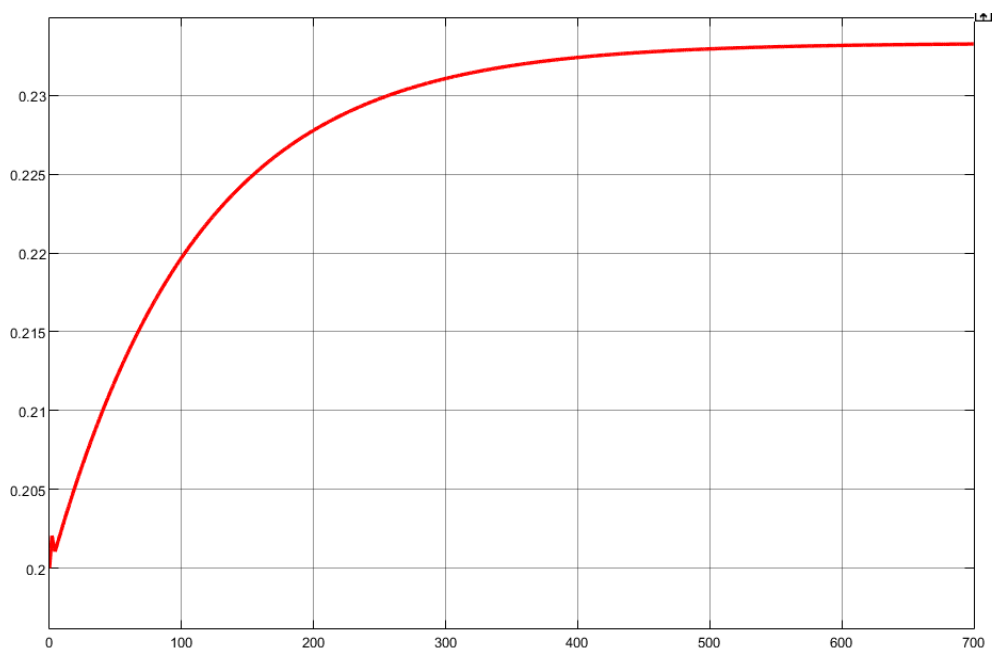


Рисунок 3.18 – Зміна внутрішнього омичного опору електролізера

У процесі моделювання опір зростає з 0,20 до 0,233 Ом через охолодження електроліту та зниження його провідності.

Характеристика має аперіодичний характер, що відображає теплову інерційність системи.

Результати підтверджують, що LQI-регулятор забезпечує стабільний струм і стійку роботу електролізера з урахуванням електрохімічних і теплових нелінійностей.

3.4.5 Порівняльний аналіз результатів моделювання

Після дослідження моделі в розімкненому та замкненому контурах виконано порівняння впливу LQI-регулятора на характеристики системи.

У розімкненому режимі після ступінчастого впливу струм поступово зменшується через охолодження електроліту та зростання омичного опору, а поляризації знижуються разом із інтенсивністю процесів.

У замкненому контурі струм швидко досягає заданого значення і стабілізується. Система залишається стійкою, попри коротке перерегулювання, і працює без коливань.

Інтегральна складова усуває статичну похибку, а зворотні зв'язки компенсують нелінійності, забезпечуючи стабільність режиму навіть при зміні температури та параметрів електроліту.

Для наочності результати порівняння наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Порівняння характеристик системи без регулятора та з LQI-регулятором

Показник	Без регулятора	З LQI-регулятором
1	2	3
Характер зміни струму	Монотонне зменшення	Вихід на заданий рівень
Статична похибка	Наявна	Відсутня
Стійкість режиму	Низька	Висока
Компенсація зміни опору	Відсутня	Наявна

Продовження табл. 3.4.

1	2	3
Компенсація температурних впливів	Відсутня	Наявна
Якість підтримання струму	Незадовільна	Задовільна
Наявність інтегральної корекції	Немає	Є
Адаптація до внутрішніх нелінійностей	Низька	Висока

Результати показують суттєве покращення роботи електролізера після впровадження LQI-регулятора. Основним ефектом є стабілізація струму, який визначає продуктивність водню.

Також зменшується вплив теплових і електрохімічних нелінійностей. Система зберігає стабільний режим навіть при зміні внутрішніх параметрів, що важливо для практичного застосування у водневих енергосистемах.

3.4.6 Аналіз впливу струму на продуктивність електролізера за воднем

Основним показником ефективності електролізної установки є продуктивність за воднем, яка визначає її застосування в енергетичних і промислових системах. Оскільки електроліз є електрохімічним процесом, швидкість утворення водню прямо залежить від струму.

У роботі основна увага приділяється стабілізації струму, оскільки його зміна безпосередньо впливає на кількість виробленого водню.

Зв'язок між струмом і продуктивністю описується першим законом Фарадея, згідно з яким молярна продуктивність електролізера визначається відповідним виразом:

$$\dot{N}_{H_2} = \frac{N \cdot I}{2 \cdot F}, \quad (3.36)$$

де $\dot{N}_{H_2}$ – молярна продуктивність за воднем, моль/с ;

З рівняння (3.36) випливає пряма пропорційність між продуктивністю електролізера та струмом: зі збільшенням струму зростає швидкість утворення водню, а зі зменшенням – відповідно, знижується.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						90
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для наочного аналізу побудовано залежність продуктивності від струму (рис. 3.19).

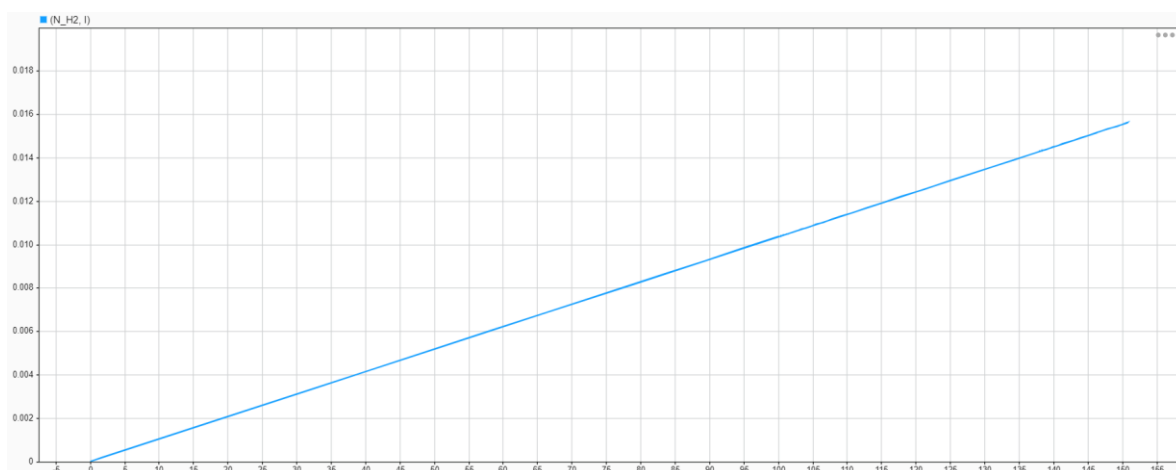


Рисунок 3.19 – Залежність $\dot{N}_{H_2}(I)$

Отримана залежність показує лінійне зростання продуктивності електролізера зі збільшенням струму, що відповідає законам електрохімії та підтверджує адекватність математичної моделі.

Для номінального режиму роботи електролізера, що відповідає струму

$$I_H = 100 \text{ A},$$

продуктивність за воднем становить

$$\dot{N}_{H_2} = \frac{20 \cdot 100}{2 \cdot 96485} = 10,3 \cdot 10^{-3} \text{ моль/с}$$

Для оцінювання практичної продуктивності установки доцільно також визначити масову швидкість утворення водню. Вона розраховується за формулою:

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{M_{H_2} \cdot N \cdot I}{2 \cdot F}, \quad (3.38)$$

де $M_{H_2} = 2,016 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярна маса водню.

Для номінального струму отримано:

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{2,016 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 100}{2 \cdot 96485} = 2,09 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с} = 75,2 \text{ г/год}$$

Результати підтверджують, що продуктивність електролізера визначається струмом, тому його стабілізація є ключовим завданням керування. У розімкненій

системі зменшення струму призводить до падіння продуктивності, тоді як LQI-регулятор забезпечує стабільний електричний режим і сталу швидкість утворення водню.

Отже, запропонована система покращує динаміку роботи електролізера та забезпечує стабільне виробництво водню в заданому режимі.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						92
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

У розділі розроблено автоматизовану систему продукування водню на основі лужного електролізера та досліджено її характеристики методом цифрового моделювання. Виконано вибір засобів автоматизації та обґрунтовано застосування ПЛК для реалізації керування.

Створено математичну модель, що враховує електричні, електрохімічні та теплові процеси, яка дозволила проаналізувати вплив основних параметрів на роботу установки.

Синтезовано LQI-регулятор, що забезпечує стабілізацію режиму та покращує якість керування порівняно з розімкненою системою. Моделювання підтвердило ефективність регулятора та його здатність підтримувати заданий режим електролізу.

Також встановлено лінійний зв'язок між струмом і продуктивністю водню відповідно до законів електрохімії.

Отримані результати підтверджують працездатність системи та можливість її використання для підвищення ефективності виробництва водню.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						93
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ТА ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ОХОРОНИ ПРАЦІ ЕЛЕКТРОЛІЗНОГО ЦЕХУ ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ

4.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів виробничого середовища

Електролізне виробництво водню являє собою складну техногенну систему, де інтегровані процеси підготовки води, електролізу лужного розчину та багатоступеневої компресії газів [19]. Об'єкт має загальну площу 1625 м², розподілену на хімічне відділення довжиною 20 м та машинне відділення довжиною 45 м при ширині будівлі 25 м. Така архітектурна структура зумовлена необхідністю просторового розділення процесів з різними типами ризиків. Узагальнена оцінка небезпечних факторів та рівнів ризику наведена в таблиці 4.1. Управління ризиками на виробництві здійснюється відповідно до принципів стандарту ISO 45001:2018 [20]. Організація безпечних умов праці на виробництві здійснюється відповідно до вимог чинного законодавства України [21].

Таблиця 4.1 – Оцінка ризиків виробництва водню

Небезпечний фактор	Причина виникнення	Можливі наслідки	Рівень ризику
Витік водню	Порушення герметичності	Вибух, пожежа	Високий
Утворення вибухонебезпечної суміші	Недостатня вентиляція	Детонація	Високий
Ураження електричним струмом	Пошкодження ізоляції	Травмування, смерть	Середній
Витік електроліту (луг)	Розгерметизація системи	Хімічні опіки	Середній
Підвищений шум	Робота компресорів	Погіршення слуху	Низький
Перегрів електрообладнання	Перевантаження	Пожежа	Середній

Основним небезпечним фактором є вибухопожежна безпека водню. Водень як горючий газ класифікується як вибухонебезпечне середовище відповідно до стандартів ІЕС 60079 [22]. Водень характеризується надзвичайно низькою енергією запалювання та широкими межами вибуховості в суміші з повітрям. Наявність у цеху електролізера потужністю 25 кВт та системи компресорів першого (12 кВт) і другого (18 кВт) ступенів створює зони потенційного накопичення газу. Особливу небезпеку становить «гримуча суміш» (суміш водню та кисню), яка може утворитися всередині електролізера при порушенні цілісності діафрагм або через перепад тиску між анодним та катодним простором. Висока леткість водню призводить до його концентрації у верхніх точках приміщення, що вимагає специфічного підходу до аналізу зон можливого займання.

Хімічні шкідливі фактори пов'язані з використанням лужного електроліту, найчастіше на основі гідроксиду калію (KOH) або натрію ($NaOH$). У хімічному відділенні зосереджені процеси циркуляції лужного розчину за допомогою насосів потужністю 1,6 кВт. Основними ризиками є хімічні опіки шкіри та слизових оболонок при випадкових викидах або протіканнях через ущільнення насосів та фланцеві з'єднання. Крім того, при електролізі утворюється лужний аерозоль, який при недостатній ефективності систем осушення та очищення водню може потрапляти в повітря робочої зони.

Фізичні шкідливі фактори в цеху електролізу представлені шумом, вібрацією, тепловим випромінюванням та електричними полями. Машинне відділення, де розташовано чотири компресорні установки (схема 1+1 для кожного ступеня) та два чилери системи охолодження по 4 кВт кожен, є зоною інтенсивного акустичного навантаження. Робота компресорів супроводжується вібрацією, яка передається через фундаменти та трубопроводи, створюючи ризик розвитку вібраційної хвороби у персоналу. Термічний фактор обумовлений виділенням джоулевого тепла в електролізних ваннах, що вимагає постійної роботи систем охолодження для запобігання перегріву та аварійного руйнування ізоляційних елементів.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						95
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Електрична небезпека є специфічною для даного виробництва через використання постійного струму великої сили. Випрямний агрегат, інтегрований в електролізер, створює ризики ураження персоналу при дотику до неізольованих шинопроводів. Розрахункові струми короткого замикання на стороні 0,4 кВ, що досягають 1,956 кА, вказують на високу енергоємність можливих дугових розрядів при аваріях. Наявність вологого середовища та лужних парів значно знижує опір людського тіла, підвищуючи ймовірність смертельного ураження навіть при порівняно низькій напрузі. Узагальнена класифікація небезпечних факторів, їх джерел та характеру впливу наведена в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Класифікація небезпечних та шкідливих факторів цеху

Категорія фактору	Джерело (Обладнання)	Характер впливу
Вибухонебезпечний	Електролізер, компресори, ресивер	Утворення вибухонебезпечних сумішей водню з повітрям
Хімічно агресивний	Насоси циркуляції, система підготовки води	Хімічні опіки лугом, подразнення дихальних шляхів
Акустичний	Компресори 1 та 2 ступенів, вентилятори	Перевищення рівнів шуму (понад 80 дБА)
Електричний	Випрямляч, шинопроводи, щит силовий	Ураження постійним та змінним струмом, дугові розряди
Термічний	Електролізні ванни, чилери	Перегрів обладнання, термічні опіки

4.2 Заходи попередження небезпек

Попередження небезпек у проектованому цеху базується на концепції глибокоєшелонованого захисту, що включає технічні, технологічні та організаційні рішення. Відповідно до ПУЕ та результатів розрахунків енергосистеми цеху з

виробництва водню, об'єкт віднесено до I особливої категорії надійності, що передбачає живлення від двох незалежних джерел (трансформатори ТМ-63/10) та резервного джерела для систем контролю. Це є фундаментальним заходом попередження аварій, оскільки раптове знеструмлення вентиляції або систем моніторингу може призвести до миттєвого накопичення водню до вибухонебезпечних концентрацій [23].

Технологічні заходи попередження включають автоматизацію контролю складу газів. Система газового контролю (0,6 кВт) здійснює безперервне вимірювання вмісту кисню у водні та водню у повітрі. При досягненні порогових значень (зазвичай 1% водню в повітрі) вмикається аварійна вентиляція, а при досягненні 2% – відбувається аварійне відключення живлення електролізера через автоматичні вимикачі АЗ721Б. Для стабілізації тиску та запобігання зворотним ударами полум'я використовуються буферні ресивери з автоматикою (0,15 кВт), що забезпечують плавне регулювання потоку газу.

Гідравлічна безпека забезпечується схемою резервування насосного обладнання. Для циркуляції електроліту та систем охолодження застосовується схема 1+1 (робочий + резервний агрегат), що дозволяє проводити технічне обслуговування без зупинки процесу. Використання системи підготовки води на основі зворотного осмосу (1,5 кВт) гарантує високу чистоту електроліту, що знижує ймовірність побічних реакцій та виділення небажаних домішок, які можуть пошкодити діафрагми електролізера.

Організаційні заходи спрямовані на регламентацію доступу та навчання персоналу. Проектування передбачає чітке розділення зон: хімічне відділення обладнане системами змиву луку, а машинне – шумопоглинальними екранами. Вентиляційна система цеху потужністю 12 кВт (2 робочих + 1 резервний вентилятор) розрахована на постійне видалення можливих мікровитоків водню, що є ключовим превентивним заходом згідно з НПАОП 24.11-1.03-78 [24].

Для мінімізації наслідків коротких замикань у проєкті обрано кабелі ВВГнг-LS, які не підтримують горіння та мають низький рівень димовиділення. Перерізи кабелів (наприклад, 25 мм² для магістралі та 16 мм² для електролізера) обрані з

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						97
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

урахуванням тривалого допустимого навантаження та перевірені на втрати напруги (до 3,314 В), що виключає перегрів ізоляції в нормальних та післяаварійних режимах.

Важливим елементом забезпечення безпеки є надійність електропостачання. Згідно з розрахунками, наведеними у розділі 2, електролізерний цех належить до споживачів І категорії надійності та забезпечується живленням від двох трансформаторів з можливістю роботи в післяаварійному режимі.

Безперервність електропостачання є критичною для функціонування систем вентиляції, газового контролю та автоматики. У разі зникнення напруги можливе накопичення вибухонебезпечних концентрацій водню, що значно підвищує ризик аварій.

4.3 Умови праці

Створення сприятливих умов праці в електролізному цеху є складним інженерним завданням через поєднання високих тепловиділень та значного акустичного навантаження. Згідно з ДСН 3.3.6.042-99, мікроклімат виробничих приміщень оцінюється за показниками температури, вологості та швидкості руху повітря [25].

4.3.1 Мікрокліматичні умови

Електроліз води супроводжується значним виділенням тепла (Q , Дж), що призводить до підвищення температури повітря у виробничому приміщенні. Робота обслуговуючого персоналу пов'язана з контролем технологічного процесу, періодичними обходами обладнання та виконанням операцій керування, тому за енерговитратами вона належить до категорії Іб (легка фізична робота). Для даної категорії робіт у теплий період року оптимальна температура повітря становить 22–24 °С, а допустима – до 28 °С. Система вентиляції цеху та чилери забезпечують підтримання нормативних параметрів мікроклімату. У разі відмови охолодження електроліту, температура в робочій зоні може перевищити допустимі межі, що вимагає впровадження автоматичних регламентованих перерв для персоналу.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						98
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.3.2 Акустичне середовище та вібрація

Машинне відділення цеху довжиною 45 м є основним джерелом шуму. Компресори першого ступеня (по 6 кВт) та другого ступеня (по 9 кВт) створюють широкосмуговий шум, рівень якого може досягати 85–92 дБА. Відповідно до ДСН 3.3.6.037-99, гранично допустимий рівень шуму для таких приміщень становить 80 дБА [26]. Для нормалізації акустичних умов передбачено:

- встановлення компресорів на антивібраційні опори.
- використання гнучких вставок на трубопроводах для запобігання передачі вібрації на стіни та перекриття.
- застосування звукоізолюючих кожухів для систем охолодження.

Вібрація від обертових механізмів контролюється згідно з ДСН 3.3.6.039-99 [27]. Для запобігання шкідливому впливу на операторів, які перебувають біля щитів керування, ці зони розміщуються на максимальній відстані від компресорних агрегатів.

4.3.3 Світлове середовище

Розрахунок освітлення показав необхідність встановлення 30 світильників типу РПЛ01 з лампами ЛБ-40. Загальна потужність системи становить 1,5 кВт. Вибір світильників обумовлений вибухонебезпечністю приміщення (категорія А). Метод коефіцієнта використання світлового потоку дозволив досягти нормованої освітленості 150 лк, що відповідає вимогам ДБН В.2.5-28 для приміщень з періодичним перебуванням персоналу [28]. Аварійне освітлення організовано окремими лініями, що живляться від джерела безперебійного живлення, забезпечуючи безпечну евакуацію при знеструмленні об'єкта. Основні параметри умов праці та їх відповідність нормативним значенням наведені в таблиці 4.3.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						99
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.3 – Порівняння нормативних та фактичних умов праці в електролізерному цеху

Параметр	Нормативне значення	Забезпечення в проєкті
Освітленість	150 лк (ДБН В.2.5-28 :2018)	30 світильників РПЛ01 (1.5 кВт)
Температура повітря	18–27 °С (ДСН 3.3.6.042-99)	Система вентиляції 12 кВт + Чилери 8 кВт
Рівень шуму	80 дБА (ДСН 3.3.6.037-99)	Звукоізоляція та регламентовані перерви
Вологість повітря	40–75 %	Осушувачі водню та загальнообмінна вентиляція

Освітлення виробничого приміщення розраховано у розділі 2. Отримані значення освітленості відповідають нормативним вимогам та забезпечують безпечні умови праці персоналу.

Рівень шуму від компресорного обладнання не перевищує допустимих значень за умови застосування шумопоглинаючих конструкцій та використання засобів індивідуального захисту.

4.4 Заходи з електробезпеки

Електробезпека в цеху електролізу є пріоритетним напрямком, оскільки технологія передбачає роботу з постійним струмом великої сили та змінною напругою 0,4 кВ. Розрахункова схема включає трансформатори ТМ-63/10, що живлять ГРЩ через магістральні кабелі ВВГнг-LS 3×25.

Електроживлення обладнання здійснюється від мережі напругою 0,4 кВ, що є потенційно небезпечною для персоналу. Для забезпечення електробезпеки передбачено:

- захисне заземлення всіх металевих частин обладнання;
- застосування автоматичних вимикачів для захисту від перевантаження та короткого замикання;

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						100
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- використання кабелів типу ВВГнг-LS, які мають підвищену пожежобезпечність;
- регулярний контроль стану ізоляції;
- застосування попереджувальних знаків безпеки.

Враховуючи розрахункові навантаження, отримані у розділі 2, можливе підвищення струмів у післяаварійному режимі роботи, що може призвести до перегріву обладнання. Тому необхідно передбачити контроль температури та струмів у мережі.

4.4.1 Технічні системи захисту

Основним заходом захисту від коротких замикань є селективний вибір автоматичних вимикачів АЗ721Б. Вони перевірені на комутаційну здатність при струмах КЗ до 1,956 кА, що гарантує надійне розірвання кола без руйнування самого апарата. Для дистанційного керування двигунами вентиляторів та насосів використовуються магнітні пускачі серії 8536, які мають захист від нульової напруги, що запобігає самовільному запуску обладнання після відновлення живлення.

Враховуючи наявність лужного середовища, особлива увага приділяється захисному заземленню. Опір заземлювального пристрою не повинен перевищувати 4 Ом. Усі металеві корпуси обладнання (компресори, ресивери, корпуси електролізерів) об'єднуються в єдиний контур. Для запобігання накопиченню статичної електрики, яка може стати джерелом іскри в водневому середовищі, усі трубопроводи газів мають металеві перемички на фланцевих з'єднаннях.

4.4.2 Організація безпечної експлуатації

Роботи в електроустановках цеху проводяться за нарядами-допусками. Проведення таких робіт регламентується вимогами НПАОП 0.00-1.21-98 [29]. Оперативне обслуговування здійснюється персоналом з групою з електробезпеки не нижче IV для змінного майстра та III для апаратника. Перед входом у зону електролізних серій персонал повинен використовувати діелектричні калоші та рукавички. Використання кабелів з маркуванням LS (Low Smoke) у проєкті є

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						101
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обґрунтованим заходом, оскільки при термічному впливі вони виділяють мінімальну кількість токсичних газів, що важливо для обмежених просторів цеху.

4.5 Пожежна безпека

Приміщення електролізерного цеху відноситься до категорії А за вибухопожежною небезпекою, оскільки у процесі виробництва утворюється водень, згідно з ДБН В.1.1-7 [30]. Це обумовлено здатністю водню утворювати вибухонебезпечні суміші, тиск вибуху яких може перевищувати 5 кПа.

Для забезпечення пожежної безпеки передбачено:

- систему примусової вентиляції;
- автоматичний контроль концентрації водню;
- застосування електрообладнання у вибухозахищеному виконанні;
- використання кабелів з низьким димо- та газовиділенням (ВВГнг-LS);
- автоматичне відключення живлення у разі аварійної ситуації;
- наявність первинних засобів пожежогасіння.

Вказані заходи відповідають вимогам Правил пожежної безпеки в Україні [31].

4.5.1 Архітектурні та конструктивні рішення

Будівля цеху спроектована з легкоскридними конструкціями у вигляді віконного засклення та спеціальних панелей покрівлі. У разі внутрішнього вибуху ці елементи руйнуються першими, скидаючи надлишковий тиск та зберігаючи цілісність несучих конструкцій (REI 150). Зонування цеху на хімічне та машинне відділення дозволяє локалізувати можливе займання. Класифікація зон за вибухонебезпечністю виконується відповідно до ДСТУ EN 60079-10-1 [32]. Протипожежна стіна між ними має межу вогнестійкості не менше 90 хвилин.

4.5.2 Системи автоматичного гасіння

Враховуючи, що в цеху знаходяться електроустановки під напругою та лужні розчини, використання води для гасіння є обмеженим. Пріоритет надається порошковим та газовим системам автоматичного пожежогасіння. Система газового контролю (0,6 кВт) інтегрована з пожежною сигналізацією: при виявленні витoku

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						102
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

водню понад 1 % об. автоматично вмикається аварійна витяжка, знеструмлюються силові ланцюги електролізера та подається сигнал на щит керування (0,5 кВт).

Для первинного гасіння використовуються вогнегасники типу ВВ-5 (вуглекислотні) біля електродвигунів та щитів. Весь персонал проходить щорічне навчання за програмою пожежно-технічного мінімуму з відпрацюванням навичок використання засобів гасіння та евакуації.

4.6 План ліквідації аварій

План локалізації та ліквідації аварійних ситуацій (ПЛАС) є ключовим документом для об'єктів I категорії надійності. Він визначає алгоритм дій персоналу при виникненні найімовірніших аварійних сценаріїв.

Сценарій 1: Пожежа у машинному відділенні

1. Спрацьовує пожежна сигналізація.
2. Автоматичне відключення живлення компресорів та електролізера через ГРЩ.
3. Ввімкнення аварійного освітлення та системи димовидалення.
4. Персонал евакуюється згідно з планом, використовуючи саморятівники.
5. Подача інертного газу (азоту) у внутрішні об'єми компресорів для витіснення водню.

Сценарій 2: Розгерметизація електролізної ванни (викид лугу)

1. Термінове вимкнення насосів циркуляції (1,6 кВт).
2. Локалізація розливу за допомогою сорбентів.
3. Одягання повних комплектів хімічного захисту (костюми, маски).
4. Промивання зони розливу водою з подальшою нейтралізацією в спеціальних ємностях.

Сценарій 3: Перевищення концентрації водню (загроза вибуху)

1. Спрацьовує датчик газового контролю (2% водню).
2. Автоматичний запуск резервного вентилятора (4 кВт).
3. Переведення системи в безпечний стан: скидання газу на «свічку» через автоматичні клапани ресивера.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						103
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Пошук та усунення місця витоку з використанням іскробезпечного інструменту.

ПЛАС регулярно відпрацьовується під час навчальних тривог. Наявність у проєкті джерел безперебійного живлення гарантує, що навіть при повному знеструмленні, системи управління аварійними клапанами залишаються працездатними, що є критичним для безпеки електролізного цеху.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						104
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

У розділі виконано аналіз умов праці та безпеки експлуатації електролізерного цеху з виробництва водню. Визначено основні небезпечні та шкідливі фактори, серед яких вибухонебезпечність водню, можливість утворення гримучих сумішей, наявність електроустановок напругою 0,4 кВ, використання лужних електролітів, а також вплив несприятливих мікрокліматичних умов і виробничого шуму.. Оцінка ризиків показала, що найбільш критичними є ризики витоку водню та порушення роботи систем вентиляції.

Для підвищення рівня безпеки запропоновано комплекс технічних та організаційних заходів, що включають вентиляцію, газовий контроль, автоматичний захист та герметизацію обладнання. Важливу роль відіграє надійність електропостачання, яке належить до І категорії та забезпечує безперебійну роботу систем контролю і захисту.

Встановлено, що умови праці, зокрема освітлення, шум та мікроклімат, відповідають нормативним вимогам за умови дотримання передбачених заходів.

Електробезпека забезпечується застосуванням заземлення, захисних апаратів та контролю стану ізоляції. Пожежна безпека враховує належність об'єкта до категорії А та реалізується за рахунок вентиляції, контролю концентрації водню та використання відповідного електрообладнання.

Таким чином, запропоновані рішення забезпечують безпечні умови праці, зниження ризиків аварій та надійну роботу електролізерного цеху.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						105
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті розроблено автоматизовану систему продукування водню на основі лужного електролізера та виконано комплексне дослідження технологічних, електротехнічних і керуючих аспектів її роботи.

У технологічній частині проаналізовано сучасні методи отримання водню та обґрунтовано вибір лужного електролізу як надійного й ефективного способу виробництва екологічного водню.

У розділі електропостачання виконано розрахунок навантажень і здійснено вибір основного електрообладнання, що підтвердило працездатність системи живлення.

У спеціальній частині обґрунтовано вибір засобів автоматизації, датчиків, виконавчих механізмів і ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200, сформовано структуру системи керування та алгоритми її роботи.

Розроблено математичну модель електролізера, виконано її лінеаризацію та синтезовано LQI-регулятор, який забезпечує стабілізацію режимів роботи. У MATLAB/Simulink створено імітаційну модель та підтверджено ефективність системи керування.

У розділі охорони праці проаналізовано небезпечні фактори та розроблено заходи безпеки для експлуатації обладнання.

Мету проєкту досягнуто: запропонована система забезпечує ефективне керування процесом електролізу, підвищує надійність та безпеку роботи й створює основу для подальшого розвитку водневих технологій.

					ДП ОА21.02.000 ПЗ	Арк.
						106
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Turner J. A. Sustainable hydrogen production // Science. – 2004. – Vol. 305. – P. 972–974.
2. Momirlan M., Veziroglu T. N. The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet // International Journal of Hydrogen Energy. – 2005. – Vol. 30, Issue 7. – P. 795–802.
3. Zeng K., Zhang D. Recent progress in alkaline water electrolysis // Progress in Energy and Combustion Science. – 2010. – Vol. 36. – P. 307–326.
4. Ursúa A., Gandía L. M., Sanchis P. Hydrogen production from water electrolysis // Proceedings of the IEEE. – 2012. – Vol. 100. – P. 410–426.
5. Buttler A., Spliethoff H. Current status of water electrolysis // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 82. – P. 2440–2454.
6. Milewski J. et al. Dynamic characteristics of alkaline electrolyzer // International Journal of Hydrogen Energy. – 2014. – Vol. 39, Issue 16. – P. 8922–8928..
7. PLC-based industrial automation systems: fundamentals and applications. – Siemens AG, 2016.
8. Olabi A. G. et al. Hydrogen production by electrolysis // Energy. – 2022.
9. SCADA systems for industrial automation. – Schneider Electric, 2019.
10. ISO 22734:2019 Hydrogen generators using water electrolysis – Industrial, commercial, and residential applications. – ISO, 2019.
11. Проектування електропостачання та електрообладнання машин і установок геотехнічних виробництв: Навчальний посібник для курсового та дипломного проектування [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Електромеханічні та мехатронні системи енергоємних виробництв» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: І. С. Рябенко, О. В. Мейта. – Електронні текстові данні (1 файл: X,XX Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 244 с.

- 12.Olabi A. G. et al. Hydrogen production by electrolysis: Review of alkaline water electrolysis technology // Energy. – 2022. – Vol. 239.
- 13.ISO 22734:2019. Hydrogen generators using water electrolysis – Industrial, commercial, and residential applications. – Geneva: International Organization for Standardization, 2019.
- 14.Brauns J., Turek T. Experimental evaluation of dynamic operating concepts for alkaline water electrolyzers powered by renewable energy // Electrochimica Acta. – 2022. – Vol. 404. – 139714.
- 15.Matos S. N., de Paula dos Reis G., Leal E. M., Figueiredo R. L., Euzébio T. A. M., Rêgo Segundo A. K. Cascade Proportional–Integral Control Design and Affordable Instrumentation System for Enhanced Performance of Electrolytic Dry Cells // Sensors. – 2024. – Vol. 24, No. 16. – 5427.
- 16.Siemens AG. SIMATIC S7-1200 Programmable Controller. System Manual. – 2022. – 1264 p.
- 17.Brauns J., Turek T. Experimental Evaluation of Dynamic Operating Concepts for Alkaline Water Electrolyzers Powered by Renewable Energy // Electrochimica Acta. – 2022. – Vol. 404. – Article 139714.
- 18.Malkapure H. G., Chidambaram M. Comparison of Two Methods of Incorporating an Integral Action in Linear Quadratic Regulator // IFAC Proceedings Volumes. – 2014. – Vol. 47, No. 1. – P. 663–668.
- 19.Кудінов В.А. Охорона праці в галузі. – Київ, 2020.
- 20.ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems.
- 21.Закон України «Про охорону праці».
- 22.IEC 60079. Explosive atmospheres.
- 23.ПУЕ. Правила улаштування електроустановок.
- 24.НПАОП 24.11-1.03-78. Виробництво водню. Вимоги безпеки.
- 25.ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми мікроклімату.
- 26.ДСН 3.3.6.037-99. Норми шуму на робочих місцях.
- 27.ДСН 3.3.6.039-99. Норми вібрації.
- 28.ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення.

					Диплом	Арк.
						108
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

29.НПАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

30.ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва.

31.Правила пожежної безпеки в Україні.

32.ДСТУ EN 60079-10-1: Вибухонебезпечні середовища.

					Диплом	Арк.
						109
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА

Додаток А

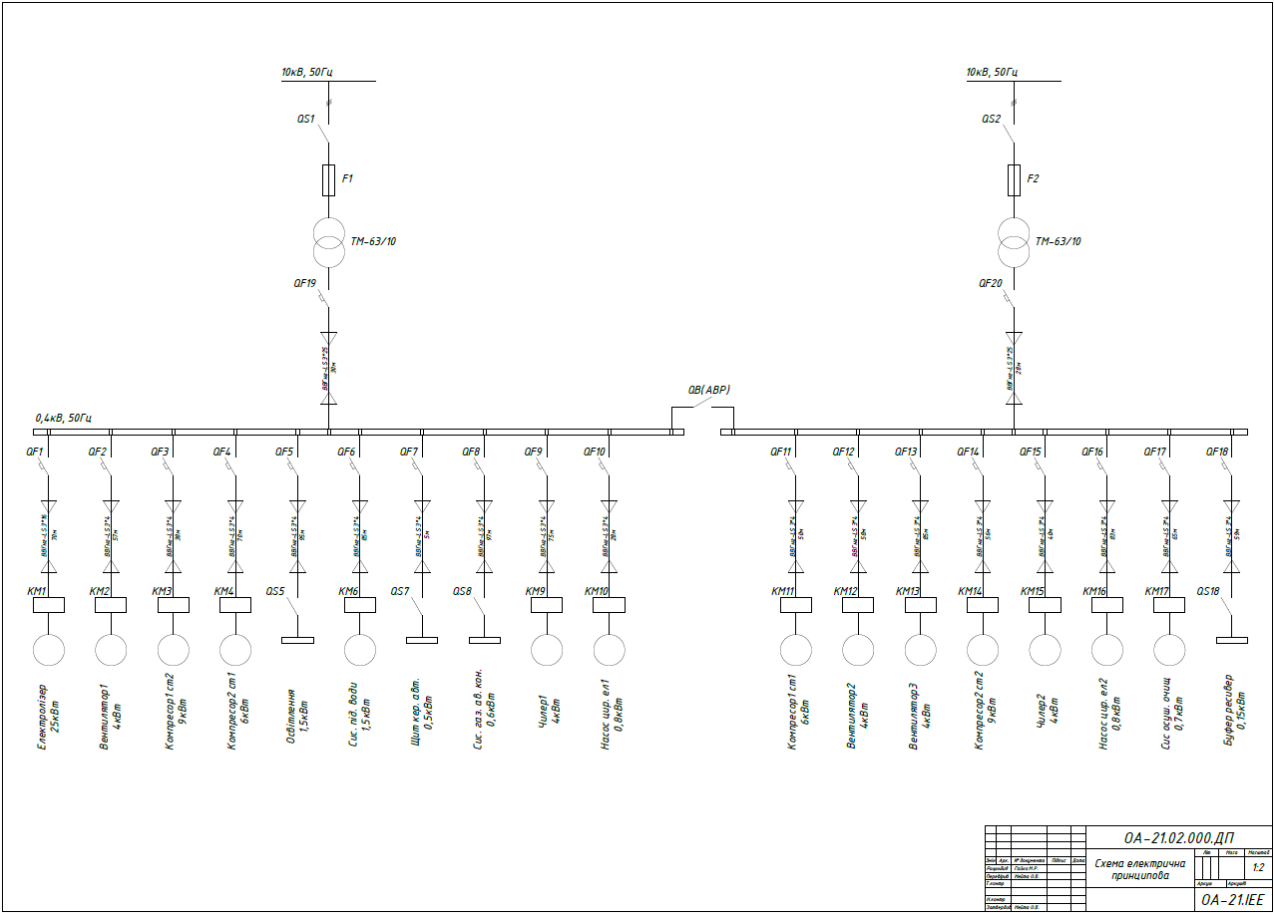


Рисунок 2.1 – Схема електрична принципова

Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Диплом

Арк.

110