

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПм – 09.00.00.000 ПЗ

Група АКПм - 24-1

Андрій Зубко

2025

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Зубко Андрій Русланович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5: 66.063-027.253

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Удосконалення автоматизованої системи керування електrolізером для

(назва роботи)

виробництва “зеленого” водню на базі української газотранспортної системи

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПм -24-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

А.Р. Зубко

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент, к.т.н

(посада)

(підпис)

(дата)

М.В.Шавранський

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент, к.т.н

(посада)

(підпис)

(дата)

І.І.Чигур

(ініціали та прізвище)

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень магістерський

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

« » 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Зубку Андрію Руслановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення автоматизованої системи керування електролізером для виробництва “зеленого” водню на базі української газотранспортної системи

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

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «10» 11 2025 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 08.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики, аналіз науково-технічної літератури

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

4.1. Аналіз процесу виробництва «зеленого» водню електролізерами на базі на базі Української ГТС

4.2. Моделювання АСК електролізером для виробництва «зеленого» водню

4.3. Синтез АСК електролізером для виробництва «зеленого» водню

4.4. Реалізація АСК електролізером на ПЛК

4.5. Загальні висновки

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

Не передбачено завданням

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 30.10.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз процесу виробництва «зеленого» водню електролізерами на базі на базі Української ГТС	30.10.2025 р.	Виконано
2	Моделювання АСК електролізером для виробництва «зеленого» водню	10.11.2025 р.	Виконано
3	Синтез АСК електролізером для виробництва «зеленого» водню	20.11.2025 р.	Виконано
4	Реалізація АСК електролізером на ПЛК	30.11.2025 р.	Виконано
5	Загальні висновки	05.12.2025 р.	Виконано
6	Оформлення МР	07.12.2025 р.	Виконано

Студент _____
(підпис)

Зубко А.Р.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Шавранський М.В.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Зубко А. Р. Удосконалення автоматизованої системи керування електролізером для виробництва «зеленого» водню на базі української газотранспортної системи

Магістерська робота на отримання ступеня магістра з автоматизації за спеціальністю 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано - Франківськ, 2025 р.

Магістерська робота присвячена розробленню автоматизованої системи керування (АСК) електролізером для виробництва «зеленого» водню з подальшою інтеграцією в українську газотранспортну систему. У роботі проаналізовано сучасні технології електролізу (лужна, PEM, SOEC) та визначено їх придатність для застосування у вітчизняній енергетичній інфраструктурі в контексті розвитку водневої енергетики та виконання вимог Європейського зеленого курсу. Особливу увагу приділено технічним та автоматизаційним аспектам роботи електролізерних установок, включаючи структуру об'єкта керування, керовані параметри, критичні збурення та вимоги до системи регулювання.

На основі проведеного аналізу сформовано концепцію АСК з використанням багаторівневого підходу до керування, що охоплює контури регулювання струму, температури, тиску та чистоти водню, а також блоки захисту, оптимізації енергоспоживання та інтеграції з диспетчерськими системами ГТС. Розроблено структурну схему АСК та запропоновано принципи побудови алгоритмів керування для забезпечення безпечної, ефективної й ресурсозберігаючої роботи електролізера за умов змінної генерації відновлюваної енергії.

Ключові слова: електролізер, «зелений» водень, автоматизована система керування, PEM, AWE, SOEC, ГТС України, Power-to-Gas, SCADA, воднева енергетика.

ANNOTATION

Zubko A. R. Improvement of the automated electrolyzer control system for the production of “green” hydrogen based on the Ukrainian gas transportation system

Master's thesis for the degree of Master in Automation in the specialty 174 – Automation, computer-integrated technologies and robotics. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. – Ivano-Frankivsk, 2025

The master's thesis is devoted to the development of an automated control system (ACS) for the electrolyzer for the production of “green” hydrogen with subsequent integration into the Ukrainian gas transportation system. The work analyzes modern electrolysis technologies (alkaline, PEM, SOEC) and determines their suitability for use in the domestic energy infrastructure in the context of the development of hydrogen energy and meeting the requirements of the European Green Deal. Special attention is paid to the technical and automation aspects of the operation of electrolyzer plants, including the structure of the control object, controlled parameters, critical disturbances and requirements for the control system.

Based on the analysis, an ACS concept was formed using a multi-level approach to control, covering current, temperature, pressure and hydrogen purity control loops, as well as protection, energy consumption optimization and integration units with GTS dispatching systems. A structural diagram of the ACS was developed and principles for building control algorithms were proposed to ensure safe, efficient and resource-saving operation of the electrolyzer under conditions of variable renewable energy generation.

Keywords: electrolyzer, "green" hydrogen, automated control system, PEM, AWE, SOEC, GTS of Ukraine, Power-to-Gas, SCADA, hydrogen energy.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА “ЗЕЛЕНОГО” ВОДНЮ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРАМИ НА БАЗІ УКРАЇНСЬКОЇ ГТС.....	14
1.1. Аналіз сучасних технологій електролізу та можливостей їх застосування в енергетичній інфраструктурі України.....	14
1.2. Роль української ГТС у розвитку водневої енергетики.....	16
1.3. Аналіз сучасних технологій електролізу як об’єкта автоматизації.....	18
1.4. Типові технологічні схеми.....	23
Висновки до розділу 1.....	26
РОЗДІЛ 2	
МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРОМ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА “ЗЕЛЕНОГО” ВОДНЮ.....	28
2.1. Математичні моделі процесу електролізу у вигляді алгебраїчних та диференціальних рівнянь.....	28
2.2. Математична модель АСК.....	30
2.3. Передавальні функції окремих каналів СКЕ.....	35
2.4. Передавальні функції каналів СК з конкретними числовими каналів значеннями.....	38
Висновки до розділу 2.....	42
РОЗДІЛ 3	
СИНТЕЗ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРОМ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА “ЗЕЛЕНОГО” ВОДНЮ.....	44
3.1. Опис моделі автоматизованої системи керування електролізером у середовищі MATLAB/Simulink	44
3.2. Опис перехідних процесів АСК електролізером.....	47

3.3. Дослідження стійкості та аналіз показників якості регулювання автоматизованої системи керування електролізером.....	49
3.4. Аналіз впливу збурень на роботу АСК.....	51
3.5. Можливості подальшої оптимізації АСК електролізером.....	53
Висновки до розділу 3.....	56
РОЗДІЛ 4	
РЕАЛІЗАЦІЯ АСК ЕЛЕКТРОЛІЗЕРОМ НА ПЛК.....	58
4.1. Вибір технічних засобів АСК.....	58
4.2. Структура програмного забезпечення ПЛК.....	63
4.3. Алгоритм аварійного захисту АСК електролізером.....	68
4.4. Інтеграція з SCADA WinCC.....	73
4.5. Інтеграція ПЛК-АСК з газотранспортною системою України.....	74
Висновки до розділу 4.....	74
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	78
ДОДАТКИ.....	80

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ**

AWE – Alkaline Water Electrolysis – Електроліз лужної води

PEM – Proton Exchange Membrane – Протоннообмінна мембрана

SOEC – solid oxide electrolysis – електроліз твердого оксиду

АСК – автоматизована система керування

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ГТС – газотранспортна система

ЄС – європейський союз

ПЗ – програмне забезпечення

ПЛК – програмований логічний контролер

ПП – програмний продукт

СКЕ – система керування електролізером

ВСТУП

Актуальність теми. Перехід до низьковуглецевої економіки та зростання вимог щодо декарбонізації промисловості й енергетики визначають водень як один із ключових енергоресурсів майбутнього. «Зелений» водень, що виробляється за допомогою електролізу на основі відновлюваних джерел енергії, розглядається Європейським Союзом як стратегічний компонент енергетичного балансу до 2030–2050 років. Україна, маючи одну з найбільших у Європі газотранспортних систем та значний потенціал розвитку відновлюваної енергетики, включена до інфраструктурних проєктів ЄС, зокрема European Hydrogen Backbone та ініціативи 2×40 GW, що передбачає виробництво та експорт до 10 ГВт «зеленого» водню з території України.

Використання електролізерних установок у структурі української ГТС створює можливість реалізації концепції Power-to-Gas, що дозволяє перетворювати надлишкову електроенергію з ВДЕ у водень та транспортувати його існуючими газовими магістралями. Водночас ефективність та безпечність таких систем безпосередньо залежать від якості їх автоматичного керування, оскільки електролізери є складними, багатозв'язними, нелінійними об'єктами із жорсткими температурними, тисковими та електричними обмеженнями. Умови інтеграції водню в газові мережі вимагають високої точності регулювання параметрів, динамічної адаптації режимів роботи та впровадження інтелектуальних систем моніторингу.

Таким чином, розроблення автоматизованої системи керування електролізером, орієнтованої на промислове виробництво «зеленого» водню та сумісність із українською газотранспортною системою, є науково й практично актуальним завданням. Тема має важливе значення як для енергетичної безпеки держави та модернізації ГТС, так і для інтеграції України до європейського водневого ринку, забезпечення виконання кліматичних зобов'язань та розвитку високотехнологічних секторів промисловості.

Обґрунтування вибору теми дослідження. Вибір теми зумовлений сукупністю наукових, технічних, енергетичних та стратегічних чинників. В

умовах глобальної трансформації енергетики та переходу до кліматично нейтральної економіки водень стає одним із ключових енергоносіїв майбутнього, а виробництво «зеленого» водню на основі технологій електролізу – пріоритетним напрямом розвитку як в ЄС, так і в Україні. Однак масштабне впровадження електролізерних систем потребує високого рівня автоматизації, здатного забезпечити ефективність, надійність, безпеку та інтеграцію з енергетичною інфраструктурою.

Українська газотранспортна система, будучи однією з найбільших у Європі, є стратегічним активом, який може бути адаптований для транспортування та зберігання водню або його сумішей із природним газом. Це створює унікальне середовище для реалізації концепції Power-to-Gas та інтеграції водневих технологій на основі існуючих трубопроводів, компресорних станцій та підземних сховищ. Водночас електролізер як об'єкт керування є складною багатофакторною системою зі значною кількістю взаємозалежних параметрів (струм, напруга, температура, тиск, чистота газу), різнотипними збуреннями та чутливістю до режимів роботи. Це вимагає створення спеціалізованої автоматизованої системи керування, яка не лише виконуватиме стабілізаційні та захисні функції, але й оптимізуватиме енергоспоживання, забезпечуватиме інтеграцію з диспетчерськими системами ГТС та підтримуватиме гнучкі режими генерації.

Таким чином, обрана тема є актуальною та науково значущою, оскільки поєднує в собі завдання декарбонізації, модернізації енергетичних систем, підвищення ефективності виробництва водню та впровадження сучасних методів автоматизації. Розробка АСК електролізера на базі української ГТС відповідає сучасним світовим тенденціям розвитку водневої енергетики, стратегічним планам ЄС і України, а також запитам промисловості щодо створення гнучких, безпечних та інтегрованих систем виробництва «зеленого» водню.

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження – розробити науково обґрунтовану автоматизовану систему керування електролізером для

виробництва «зеленого» водню з можливістю інтеграції в українську газотранспортну систему, яка забезпечує безпечну, енергоефективну, адаптивну та технологічно сумісну роботу електролізерної установки в умовах змінних режимів енергопостачання та експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі основні завдання дослідження. У межах роботи необхідно провести аналіз сучасних технологій електролізу та визначити їх придатність для виробництва «зеленого» водню в умовах української енергетичної інфраструктури. Потрібно дослідити особливості електролізера як об'єкта автоматизації, визначити його ключові керовані параметри, збурення та обмеження. Наступним завданням є розроблення структури автоматизованої системи керування, яка забезпечує стабільність, безпеку та енергоефективність процесу. Необхідно сформулювати алгоритми регулювання для основних технологічних контурів і визначити вимоги до засобів вимірювання та виконавчих механізмів. Завершальним завданням є створення моделі або концептуального прототипу АСК, що демонструє можливість практичної інтеграції електролізера в українську газотранспортну систему.

Об'єктом дослідження є процес електролітичного отримання «зеленого» водню у складі виробничо-технологічного комплексу, що включає електролізерну установку, допоміжні підсистеми (водопідготовку, охолодження, газорозділення, очищення та компримування), а також інтерфейси інтеграції з українською газотранспортною системою. Об'єкт розглядається як багатоконтурна система автоматичного керування з численними фізико-хімічними, тепловими, електричними та газодинамічними процесами, що взаємодіють між собою та впливають на ефективність, безпечність та якість виробництва водню.

Предмет дослідження є закономірності, методи та алгоритми автоматичного керування електролізерною установкою для виробництва «зеленого» водню, зокрема принципи побудови багаторівневої АСК, вибір

керованих параметрів, методи регулювання та оптимізації режимів роботи електролізера в умовах інтеграції з українською газотранспортною системою.

Методи дослідження. У роботі застосовано методи аналізу та систематизації науково-технічної літератури для визначення сучасного стану технологій електролізу та підходів до їх автоматизації. Для опису динаміки процесу використано методи математичного моделювання та ідентифікації об'єкта керування. Синтез алгоритмів керування здійснювався на основі принципів теорії автоматичного регулювання з використанням PID та оптимізаційних методів. Для перевірки працездатності розробленої системи проведено комп'ютерне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink. Крім того, застосовано елементи системного аналізу та техніко-економічного обґрунтування для оцінки ефективності впровадження АСК у складі української ГТС.

Новизна отриманих результатів. Наукова новизна роботи полягає у формуванні концепції інтегрованої автоматизованої системи керування електролізером, адаптованої до умов української газотранспортної системи та орієнтованої на реалізацію технології Power-to-Gas. У дослідженні запропоновано багаторівневу структуру АСК, яка враховує взаємозв'язок електрохімічних, теплових і газодинамічних процесів в електролізерній установці та забезпечує підвищену точність регулювання. Розроблено підхід до синтезу контурів керування, який включає можливість впровадження прогнозних та адаптивних алгоритмів для оптимізації енерговитрат і продовження ресурсу обладнання. Вперше обґрунтовано вимоги до систем керування електролізерами у складі української ГТС з урахуванням технічних і безпекових обмежень транспортування водню. Запропонована модель створює передумови для підвищення ефективності та надійності виробництва «зеленого» водню у промислових масштабах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Тематика магістерської роботи узгоджується з пріоритетними напрямками наукових досліджень кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих

технологій Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу та включена до її плану науково-дослідної діяльності. Виконання роботи спрямоване на розвиток напрямку, пов'язаного з впровадженням інтелектуальних систем автоматизації та цифрових технологій у нафтогазовій та енергетичній галузях. Дослідження є складовою державної бюджетної науково-дослідної тематики, що забезпечує його відповідність сучасним науково-технічним завданням та практичним потребам галузі. Отримані результати мають потенціал подальшої інтеграції у прикладні проєкти з впровадження водневих технологій та модернізації української ГТС, що підтверджує значущість обраного напрямку.

Практичні значення отриманих результатів. Отримані результати мають прикладне значення для проєктування та впровадження автоматизованих систем керування електролізерними установками у промислових умовах. Розроблена структурна схема АСК може бути використана як основа для створення реальних систем керування електролізерами різних типів з інтеграцією у SCADA та диспетчерські комплекси ГТС. Запропоновані алгоритми та принципи регулювання параметрів процесу забезпечують підвищення енергоефективності виробництва водню та стабільність роботи електролізера при коливаннях потужності відновлюваних джерел енергії. Практичне впровадження результатів дослідження дозволяє адаптувати існуючу газотранспортну інфраструктуру України для транспортування водню та воднево-метанових сумішей. Розроблені методи та моделі можуть бути використані в інжинірингових проєктах, енергетичних підприємствах, наукових установах і навчальному процесі підготовки фахівців з автоматизації та водневої енергетики.

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 6 найменувань. Обсяг основної частини роботи становить 78 сторінок, у тому числі 2 таблиці і 15 рисунків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА «ЗЕЛЕНОГО» ВОДНЮ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРАМИ НА БАЗІ УКРАЇНСЬКОЇ ГТС

1.1. Аналіз сучасних технологій електролізу та можливостей їх застосування в енергетичній інфраструктурі України

Сучасні технології водного електролізу для виробництва «зеленого» водню представлені насамперед лужними електролізерами (AWE - Alkaline Water Electrolysis), електролізерами з протон-обмінною мембраною (PEM - Proton Exchange Membrane) та високотемпературними твердотільними (SOEC – solid oxide electrolysis) (Рис.1.1). Порівняльні огляди показують, що лужний електроліз є найбільш зрілою та відносно дешевою технологією (ніж у PEM), з ККД орієнтовно 60–70 % , тоді як сучасні системи досягають 70–75 % за оптимальних режимів [1].

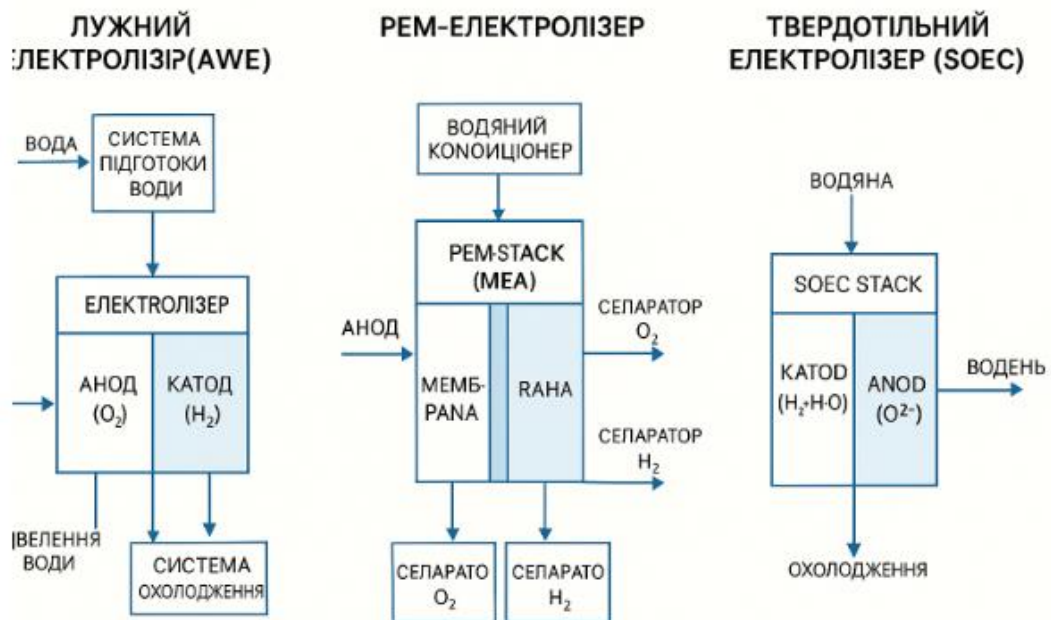


Рис.1.1. Схеми електролізерів

PEM-електролізери працюють при нижчих температурах, але вищих тисках (порядку 3–4 МПа), мають більші робочі струмові навантаження і відрізняються високою динамічною гнучкістю (швидкий старт/стоп, робота на

змінному навантаженні), що робить їх особливо придатними для інтеграції з відновлюваними джерелами – вітровими й сонячними електростанціями [2]. Недоліком PEM є вищі капітальні витрати та залежність від дорогих матеріалів (каталітичні шари з платинових металів, складні полімерні мембрани) [3].

Твердотільні електролізери (SOEC) працюють при високих температурах (600–900 °C) і використовують тверду керамічну оксидну електролітну матрицю. За рахунок підведення тепла (наприклад, з високотемпературних промислових процесів або систем когенерації) вони потенційно забезпечують найвищий ККД процесу парового електролізу, що в окремих дослідженнях наближається до 90–100 % за нижчою теплою згоряння [4]. Разом з тим, SOEC перебувають на стадії демонстраційних установок, мають вищі технічні ризики (термоциклування, деградація матеріалів) і потребують розвинутої системи теплової інтеграції з іншими об'єктами [5].

Для енергетичної інфраструктури України лужні та PEM-технології є найбільш готовими до масштабного застосування. Лужні електролізери доцільно використовувати в проектах із відносно стабільним електроживленням (наприклад, на базі великих ГЕС, АЕС або промислових вузлів), де ключовими є низька вартість виробництва водню та великий установлений обсяг потужностей [6]. PEM-електроліз більше відповідає сценаріям гнучкої генерації «зеленого» водню, зокрема при інтеграції з вітровими й сонячними станціями, що активно розглядаються у проектах розвитку «зеленої» енергетики й експорту водню до ЄС [2].

Україна розглядається Європейським Союзом (ЄС) як один із ключових партнерів у рамках ініціативи «Green Hydrogen for the European Green Deal 2×40 GW», де для України передбачено до 9–10 ГВт електролізерних потужностей до 2030 року, здебільшого орієнтованих на експорт «зеленого» водню та похідних (аміак, синтетичні палива) через українську ГТС та енергетичні коридори до Європи [3]. Це зумовлює необхідність вибору таких технологій електролізу, які одночасно забезпечують високу гнучкість роботи з ВДЕ, достатню масштабованість до рівня ГВт-класу та сумісність із існуючими і

перспективними елементами енергетичної системи України (електромережі, ГТС, підземні сховища). У цьому контексті лужні системи є базовою опцією для великих промислових кластерів, РЕМ – для «гнучких» вузлів балансування ВДЕ, тоді як SOEC можуть бути розглянуті у довгостроковій перспективі в гібридних високотемпературних енергетичних комплексах.

1.2. Роль української ГТС у розвитку водневої енергетики

Українська газотранспортна система (рис.1.2) є однією з найбільших у Європі, із загальною протяжністю магістральних газопроводів понад 33 тис. км, пропускною здатністю на вході понад 281 млрд м³/рік та 146 млрд м³/рік на виході. Така інфраструктура, разом із найпотужнішими у Європі підземними сховищами газу обсягом понад 30 млрд м³, створює унікальні передумови для інтеграції майбутніх водневих технологій у паливно-енергетичний комплекс України.



Рис.1.2. Українська ГТС

У контексті європейського курсу на декарбонізацію та реалізації Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe Україна розглядається як один із ключових партнерів у виробництві та транзиті «зеленого» водню до країн ЄС. Цей підхід підтверджується ініціативами, такими як European Hydrogen Backbone та

проектами, у межах яких розглядається можливість транспортування водню або воднево-метанових сумішей існуючою газовою інфраструктурою України.

Одним із перспективних методів інтеграції електролізерних систем у ГТС є використання електролізерів великої потужності для перетворення надлишкової електроенергії з ВДЕ на водень із можливою його подачею до газопроводу або до ПСГ. Для цього необхідні високонадійні автоматизовані системи керування (АСК), здатні забезпечити:

- гнучке регулювання виробництва водню відповідно до режимів генерації ВДЕ;
- контроль якості та параметрів H_2 для змішування з природним газом (допустимі концентрації 5–20 % за об'ємом);
- безпечне керування тиском, температурою та чистотою продукта;
- інтеграцію з системами диспетчерського керування ГТС (SCADA, GIS, телеметрія);
- оптимізацію енергоспоживання, що суттєво впливає на економіку виробництва H_2 .

Інтеграція електролізерів до української ГТС потребує вирішення низки технічних і нормативних аспектів:

- 1) Визначення максимально допустимого вмісту водню в газовій мережі з урахуванням матеріалів труб, компресорних станцій та арматури.
- 2) Адаптація вимог безпеки до водню, який має інші фізико-хімічні властивості, ніж CH_4 (вища дифузійність, воднева крихкість, нижча енергія займання).
- 3) Розробка АСК, здатної працювати в режимах Power-to-Gas (P2G) та забезпечувати стабільність параметрів газової суміші.
- 4) Необхідність створення моделей та цифрових двійників процесу для дослідження впливу H_2 на ГТС і оптимізації роботи електролізерної станції.

Таким чином, українська ГТС може стати основою для масштабного впровадження водневих технологій, а автоматизована система керування електролізером є ключовим технологічним компонентом, який забезпечує безпечне, енергоефективне та інтегроване виробництво «зеленого» водню в

реальному промисловому середовищі. Саме тому розробка АСК електролізерів для роботи у складі газотранспортної інфраструктури є актуальним завданням, що відповідає як національним інтересам України, так і європейським стратегічним енергетичним пріоритетам.

1.3. Аналіз сучасних технологій електролізу як об'єкта автоматизації

Сучасні електролізери для виробництва «зеленого» водню (лужні AWE, PEM та твердотільні SOEC) є складними багатозв'язними об'єктами керування, у яких тісно взаємодіють електрохімічні, теплові, гідравлічні та газодинамічні процеси. З позицій автоматизації та побудови АСК електролізер слід розглядати не лише як окрему електрохімічну комірку, а як інтегровану технологічну установку, що включає підсистеми живлення, підготовки води, розподілу та осушування газів, охолодження, системи безпеки та вищий рівень керування потужністю.

1.3.1. Структура об'єкта автоматизації

Типова електролізерна установка будь-якої технології містить:

- електролізерний модуль (stack) – сукупність серійно з'єднаних комірок;
- силову частину – випрямляч/інвертор для формування необхідних струму та напруги;
- систему підготовки та подачі води (деіонізація, регулювання витрати, тиску і температури);
- систему газорідного розділення та осушування H_2 і O_2 ;
- систему охолодження (водяне чи повітряне, інколи – з рекуперацією тепла);
- систему контролю й безпеки (датчики тиску, температури, витоку газів, вибухозахист).

З погляду автоматизації це формує багаторівневу АСК:

- нижній рівень – контури регулювання струму/напруги, температури, тиску, витрат, рівнів;

- середній рівень – координоване керування режимами роботи електролізера (пуск, зупинка, часткове навантаження, аварійні стани);
- верхній рівень – оптимізація енергоспоживання, інтеграція з мережами електропостачання та, за потреби, з ГТС або іншим споживачем водню.

1.3.2. Керовані величини та збурення

Основними керованими величинами в системі автоматизації електролізера є:

- струм і напруга електролізера (або потужність установки);
- температура електроліту/комірки та теплоносія;
- тиск водню й кисню (а також їх різниця через мембрану для PEM/SOEC);
- витрата та тиск живильної води, параметри системи водопідготовки;
- витрата охолоджуючого середовища;
- іноді – концентрація електроліту (для AWE).

Основні збурення, які має компенсувати система керування:

- коливання напруги й частоти електричної мережі, особливо при живленні від ВДЕ;
- зміна температури навколишнього середовища та охолоджувача;
- деградація електродів і мембрани, зміна внутрішнього опору комірки;
- зміна тиску на стороні споживача водню (наприклад, при закачуванні в трубопровід чи сховище);
- коливання якості живильної води.

Це визначає електролізер як нелінійний, розподілений у часі та просторі об'єкт керування з вираженими обмеженнями за струмом, напругою, температурою та тиском.

Всі вище описані керовані величини та збурення для електролізера зводимо для зручності в таблиці 1.1 та 1.2.

Таблиця 1.1

Керовані величини для електролізера як об'єкта автоматизації

Категорія	Величина / параметр	Опис та значення
Керовані величини (вихідні/регульовані)	Струм електролізера (I)	Основний параметр, що визначає швидкість електролізу та продуктивність з H_2
	Напруга на комірці (U)	Визначає економічність процесу, впливає на деградацію електродів/мембрани
	Температура електроліту / stack	Забезпечує оптимальний ККД; надлишкова температура → деградація
	Тиск водню	Потрібний для подальшого стиснення / інжекції в ГТС
	Тиск кисню	Використовується для балансування різниці тисків (РЕМ)
	Витрата води / пари	Впливає на стехіометрію та тепловий баланс
	Витрата охолоджуючої рідини	Регулює температурний режим
	Концентрація електроліту (для АВЕ)	Забезпечує електропровідність та ефективність процесу
	Чистота H_2	Важливо для подальшого використання (паливні елементи, ГТС, синтез NH_3)
	Ступінь завантаження (модуль потужності)	Динамічне керування при інтеграції з ВДЕ

Таблиця 1.2

Збурення електролізера як об'єкта автоматизації

Збурення (вхідні впливи, що не контролюються безпосередньо)	Опис
Коливання вхідної напруги (від ВДЕ, мережі)	Впливають на стабільність струму та продуктивність
Зміна температури навколишнього середовища	Впливає на тепловий баланс системи
Зміна тиску на стороні споживача газу	Особливо критично при подачі в трубопровід або сховище
Деградація каталізаторів, мембрани або електродів	Призводить до нелінійності та зміни робочої точки
Забруднення води / коливання її якості	Впливає на провідність, чистоту водню та довговічність
Нестабільність витрати охолодження	Призводить до перегріву/недогріву stack
Відмови сенсорів або виконавчих механізмів	Викликають помилки регулювання та аварійні стани
Зміна складу газової суміші при Power-to-Gas	Вимагає корекції роботи системи

1.3.3. Лужний електроліз як об'єкт автоматизації

Лужні електролізери характеризуються відносно повільною динамікою через великі об'єми електроліту й значну теплову інерційність. Для них типові:

- порівняно простий силовий контур регулювання струму (класичні PI/PID-регулятори у випрямлячі);
- кілька повільних контурів підтримання температури електроліту, рівня в баках, витрати охолоджувача;
- контури регулювання тиску й витрати газів, газорідного розділення, відведення пінної фази;
- контроль концентрації лугу (за провідністю або щільністю) з відповідними алгоритмами корекції.

Як об'єкт автоматизації лужний електролізер є «доброзичливішим»: моделі можна лінеаризувати в околі робочої точки, значну частину контурів успішно реалізують на базі класичних ПІД-регуляторів. Обмеження пов'язані насамперед із допустимим діапазоном навантажень і необхідністю уникнення перезбагачення газових сумішей (зона вибухонебезпеки), що реалізується через систему міжблокувань і логіко-алгоритмічних залежностей у ПЛК.

1.3.4. PEM-електроліз як об'єкт автоматизації

PEM-електролізери мають набагато швидшу електродинаміку, працюють при вищих струмових густинах і тисках. Це висуває підвищені вимоги до системи автоматичного керування:

- контур регулювання струму/потужності повинен бути високошвидкодійним, здатним працювати у широкому діапазоні навантажень (10–100 %) при інтеграції з ВДЕ;
- необхідний точний баланс тиску водню та кисню по обидва боки мембрани, щоб уникнути механічного пошкодження PEM;
- суворий контроль температури та вологості мембрани, витрати й тиску живильної води;

- реалізація швидких алгоритмів пуску/зупинки та безпечного скидання навантаження при стрибках напруги чи відмові охолодження.

Нелінійність характеристик (поляризаційна крива, залежність напруги від струму, температури та ступеня деградації) робить PEM-електролізер перспективним об'єктом для застосування адаптивних, передбачальних (MPC) та оптимізаційних систем керування, які дозволяють одночасно підтримувати безпечний режим, мінімізувати питомі енерговитрати та продовжити ресурс мембрани.

1.3.5. Твердотільний електроліз (SOEC) як об'єкт автоматизації

SOEC-електролізери працюють при високих температурах (600–900 °C), що різко підвищує вимоги до керування тепловими режимами. Для них характерні:

- домінування повільних теплових процесів з великими часами запізнення;
- жорсткі обмеження на швидкість зміни температури та градієнтів усередині комірки (ризик тріщиноутворення кераміки);
- необхідність координованого керування подачею тепла, струмом і витратами газів;
- особливо складні режими пуску, виходу на робочу температуру й зупинки, які доцільно реалізовувати як програмне (trajectory-based) керування з елементами MPC.

SOEC є найскладнішими як об'єкт автоматизації: у моделях потрібно враховувати розподілені параметри, істотне запізнення, сильні нелінійності. Водночас саме ефективна система керування визначає, чи вдасться реалізувати високий ККД і ресурс елементів.

1.3.6. Вимоги до АСК електролізерів

Для всіх типів електролізерів як об'єктів автоматизації спільними є такі вимоги до АСК:

- багатоконтурність і багатозв'язність (одночасний контроль кількох взаємозалежних параметрів);
- обов'язкове впровадження функцій безпеки: контролю вибухонебезпечних концентрацій, перевищення тиску/температури, витоків газу;
- підтримання оптимальних режимів з точки зору енергоефективності (мінімізація кВт·год/кг H₂) при дотриманні ресурсних обмежень;
- інтеграція з SCADA/MES-системами для архівації, діагностики, дистанційного моніторингу й участі в балансуванні енергосистеми.

З урахуванням тенденцій до інтеграції електролізерів з ВДЕ та енергосистемами, все більшої актуальності набувають інтелектуальні системи керування (MPC, адаптивні, з елементами машинного навчання), що дозволяють прогнозувати зміну режимів, компенсувати деградацію та оптимізувати роботу установки в реальному часі.

Отже, сучасні технології електролізу, розглянуті як об'єкт автоматизації, демонструють різний рівень складності: лужні електролізери є відносно інерційними й добре піддаються класичним методам керування; PEM-електролізери потребують високошвидкодіючих, багатоконтурних систем із урахуванням нелінійності та обмежень; SOEC-системи є найскладнішими та вимагають застосування передових методів керування тепловими й електрохімічними процесами. У всіх випадках якісно спроектована АСК є ключовою умовою безпечної, енергоефективної та довговічної експлуатації електролізерних установок у складі сучасної енергетичної інфраструктури.

1.4. Типові технологічні схеми

Нижче наведено типові технологічні схеми трьох основних типів електролізерів – лужного (AWE) (рис.1.3), PEM (рис.1.4) та твердотільного (SOEC) (рис.1.5) – у вигляді логічних схем із поясненням функціональних вузлів, як це прийнято в технічних описах.

Ключові елементи (рис.1.3):

- робочий електроліт: 20 – 30 % КОН або NaOH

- розділення газів відбувається у спеціальних сепараторах
- необхідні контури: контроль температури електроліту; контроль рівня електроліту; регулювання струму; видалення піни та домішок.

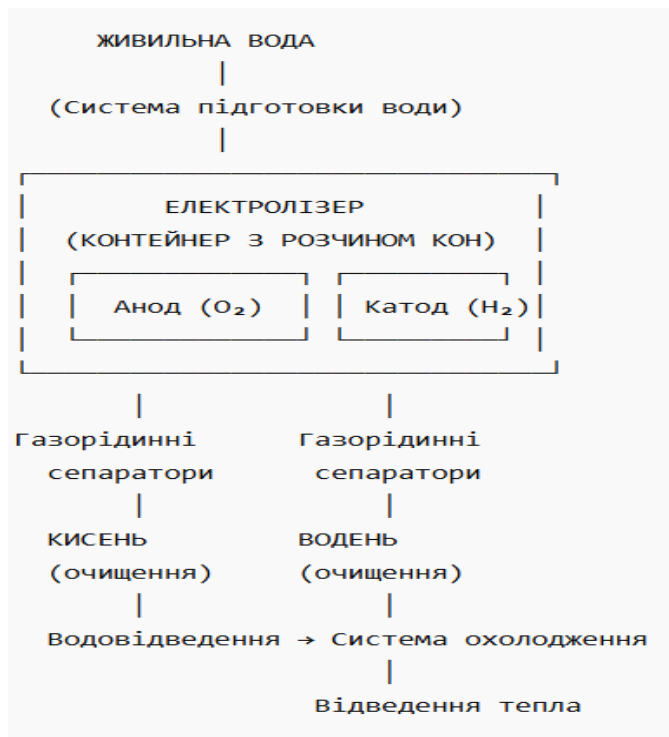


Рис.1.3. Лужний електролізер (AWE- Alkaline Water Electrolysis)

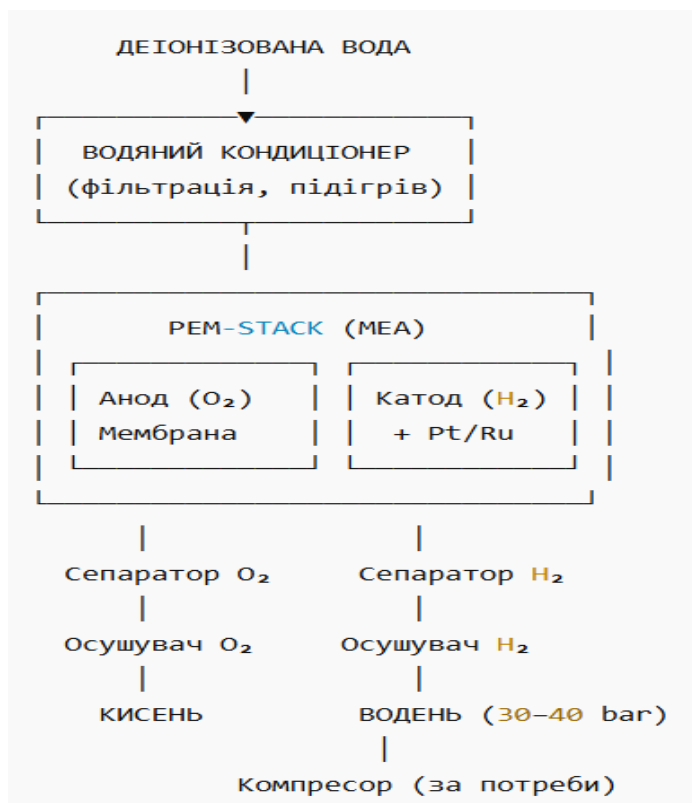


Рис.1.4. PEM-електролізер (Proton Exchange Membrane Electrolysis)

Особливості схеми:

- Вода подається лише на анод, водень утворюється на катоді
- Мембрана проводить H^+ -іони, але не електрони \rightarrow висока чистота газів
- Водень виходить одразу під тиском
- Система потребує контролю різниці тисків між H_2 та O_2



Рис.1.5. Твердотільний електролізер (SOEC - Solid Oxide Electrolysis Cell)

Особливості:

- Потрібна високотемпературна подача пари \rightarrow обов'язкова система підігріву
- Вимагає інтеграції теплових процесів, часто використовується промислове тепло
- Газорозподіл здійснюється після охолодження
- Контури керування: температура stack; швидкість нагріву/остивання; співвідношення H_2O/H_2 ; контроль термонапруження.

Аналіз типових технологічних схем лужного (AWE), мембранного (PEM) та твердотільного (SOEC) електролізерів показує, що попри спільну електрохімічну основу – розклад води на водень та кисень – кожна технологія має істотно відмінну апаратну реалізацію, вимоги до систем допоміжного забезпечення та специфіку автоматизації. Лужні електролізери є найбільш технологічно зрілими та характеризуються простою схемою з рідким електролітом, однак потребують обслуговування системи лугу та мають

обмежену динаміку. PEM-електролізери використовують тверду полімерну мембрану, забезпечують високу чистоту та тиск водню і відзначаються компактністю та гнучкістю роботи, що робить їх особливо придатними для інтеграції з відновлюваними джерелами енергії. SOEC-технологія забезпечує найвищу термодинамічну ефективність, але вимагає високотемпературного режиму та складної теплової інтеграції, що ускладнює її практичне впровадження.

Таким чином, структура технологічної схеми безпосередньо визначає набір контурів керування, вимоги до датчиків, виконавчих механізмів та рівень складності АСК, а також впливає на способи інтеграції електролізера в енергетичну інфраструктуру. Лужні системи підходять для великих базових потужностей, PEM – для динамічного виробництва “зеленого” водню, а SOEC – для перспективних високоефективних комплексів з використанням промислового тепла. Порівняння схем дозволяє обґрунтовано обрати тип електролізера відповідно до цілей автоматизації, масштабування та подальшої інтеграції в українську ГТС або інші енергетичні системи.

Висновки до розділу 1

У цьому розділі було проведено всебічний аналіз сучасних технологій водного електролізу, їх потенціалу для виробництва «зеленого» водню та можливостей інтеграції в енергетичну інфраструктуру України на базі газотранспортної системи. Розглянуто три основні технології електролізу — лужну (AWE), мембранну (PEM) та твердотільну (SOEC), які суттєво відрізняються за конструкцією, режимами роботи, енергетичними характеристиками та складністю автоматизації. Встановлено, що найбільш зрілими та адаптованими для масштабного впровадження у промислових умовах є AWE та PEM-електролізери, тоді як SOEC-технологія є перспективною, але поки що обмежена демонстраційними проектами через високі температури та вимоги до матеріалів.

Проаналізовано роль української ГТС як стратегічної платформи для розвитку водневої енергетики, зокрема у форматі Power-to-Gas, що передбачає виробництво, транспортування та зберігання водню або його сумішей із природним газом. Показано, що наявна газова інфраструктура може бути використана для експорту водню до ЄС, однак потребує технічної адаптації, стандартизації та впровадження високонадійних систем автоматичного керування.

Дослідження електролізерів як об'єктів автоматизації виявило їхню багатозв'язність, нелінійність, значну кількість керованих величин та зовнішніх збурень. Установлено, що для забезпечення безпечної та ефективної роботи необхідні багаторівневі АСК із реалізацією контурів регулювання струму, температури, тиску, витрати, якості та чистоти газу. Визначено, що найвищі вимоги до систем керування висувають PEM та SOEC-електролізери, тоді як лужні установки характеризуються більш простою динамікою та можливістю застосування традиційних PID-регуляторів.

У підсумку, проведений аналіз підтвердив актуальність розроблення автоматизованої системи керування електролізером для виробництва «зеленого» водню з урахуванням технологічних особливостей обладнання та специфіки його інтеграції в українську ГТС. Подальші етапи дослідження будуть пов'язані з розробленням структурної схеми АСК, математичного моделювання процесу та синтезом алгоритмів керування.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРОМ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА “ЗЕЛЕНОГО” ВОДНЮ

2.1. Математичні моделі процесу електролізу у вигляді алгебраїчних та диференціальних рівнянь

Моделювання автоматизованої системи керування електролізером є ключовим етапом дослідження, що дозволяє оцінити динаміку процесу виробництва водню, перевірити ефективність регулювання та оптимізувати роботу системи без необхідності проведення експериментів на реальному обладнанні. Основною метою моделювання є створення адекватної математичної і структурної моделі, яка відображає фізико-хімічні, теплові та електричні процеси в електролізерній установці та дозволяє синтезувати оптимальні алгоритми керування. Для цього застосовано методи лінеаризації, системної ідентифікації, передатних функцій та цифрового моделювання в середовищі MATLAB/Simulink.

2.1.1. Математична модель процесу електролізу на основі балансів

Електролізер розглядається як нелінійний багатопараметричний об’єкт керування. Основні залежності описуються через баланс електроенергії, тепла та масопереносу. В основі моделі лежить електрохімічне рівняння Фарадея:

$$m_{H_2} = \frac{\eta I M_{H_2}}{zF}$$

де

m_{H_2} – масова швидкість утворення водню, кг/с

η – ефективність процесу електролізу

I – струм електролізу, А

M_{H_2} – молярна маса водню

$z = 2$ – кількість електронів у реакції

$F = 96485$ Кл/моль – константа Фарадея

Тепловий баланс визначається виразом:

$$C_p \frac{dT}{dt} = P - Q_{loss}$$

де,

$P = UI$ – споживана електрична потужність

Q_{loss} – теплові втрати

Для аналізу керованих параметрів застосовано передатні функції для окремих каналів:

- канал “струм – швидкість виробництва H_2 ”
- канал “потужність – температура”
- канал “витрата води – тиск водню”

Припуск про лінійність справедливий у робочій області електролізера.

2.1.2. Структурна схема об'єкта керування

На основі аналізу процесу сформовано структурну схему (рис. 2.1), яка включає:

- силовий перетворювач напруги/струму
- електролізерний блок (stack)
- контури контролю температури, тиску та струму
- датчики параметрів процесу
- виконавчі механізми (клапани, насоси, охолодження)
- контролер (PLC/ПД/МРС-регулятор)
- SCADA-інтерфейс

2.1.3. Модель контуру регулювання струму

Основним керувальним параметром є електричний струм, який визначає продуктивність водню. Застосовано класичний PID-регулятор:

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

де $e(t) = I_{ref} - I$

Параметри регулятора будемо визначати дослідним шляхом та з використанням методів Ziegler–Nichols або auto-tuning в MATLAB.

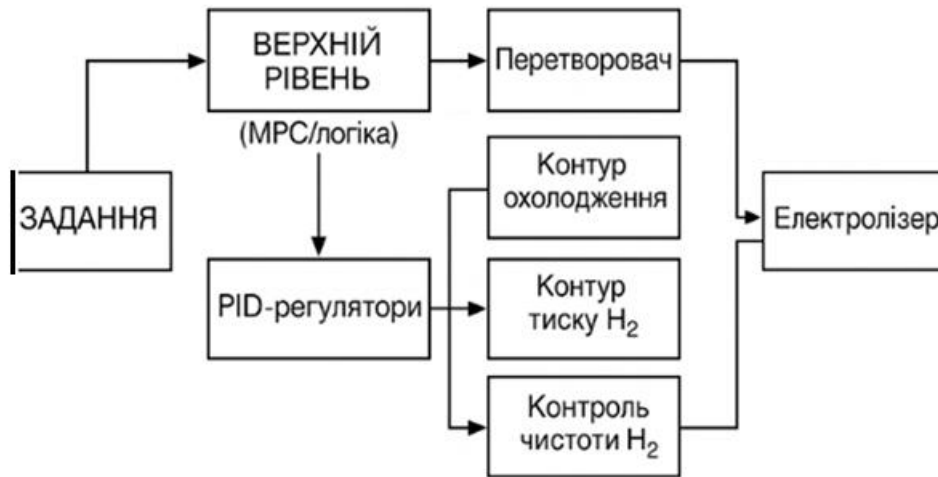


Рис.2.1. Структурна схема АСК електролізера

2.1.4. Модель регулювання температури

Контур підтримання температури описано передатною функцією:

$$G_T(s) = \frac{K_T}{(\tau s + 1)}$$

Регулятор управляє витратою охолоджувального середовища (насос, клапан), забезпечуючи уникнення перегріву *stack* та деградації мембрани.

2.1.5. Модель регулювання тиску в лінії водню

Для безпеки необхідно обмежувати тиск і балансувати його з кисневою лінією (для PEM). Застосовується пропорційно-інтегральний регулятор з обмеженням:

$$0 < p_{H_2} < p_{\max}$$

2.2. Математична модель АСК

2.2.1. Основні припущення

Для побудови математичної моделі приймаємо такі припущення:

- розглядається один електролізерний блок (stack), представлений як зосереджений об'єкт із однорідною температурою T та тиском газів p_{H_2}, p_{O_2} ;
- властивості матеріалів вважаються постійними в околі робочої точки;
- електролізер працює в квазістаціонарному електрохімічному режимі, а динаміка системи зумовлена переважно електричною, тепловою та газодинамічною підсистемами;
- застосовується ідеальний газовий закон для опису поведінки водню й кисню.

2.2.2. Електрохімічна підсистема

Швидкість утворення водню визначається законом Фарадея:

$$n_{H_2} = \frac{\eta_F I}{2F},$$

де,

n_{H_2} – молярна швидкість утворення водню, моль/с;

η_F – фарадеївська ефективність (0...1);

I – струм електролізера, А;

$F = 96485$ Кл/моль – стала Фарадея;

2 – кількість електронів на одну молекулу H_2

Аналогічно для кисню:

$$n_{O_2} = \frac{\eta_F I}{4F}.$$

Напруга на одній комірці описується через розклад:

$$U_{cell} = E_{rev}(T, p_{H_2}, p_{O_2}) + \eta_{act}(I, T) + \eta_{ohm}(I, T) + \eta_{conc}(I),$$

де,

E_{rev} – оборотний потенціал (за рівнянням Нернста);

η_{act} – активаційні перенапруги;

η_{ohm} – омичні втрати;

η_{conc} – концентраційні перенапруги.

У спрощеному вигляді в околі робочої точки:

$$\eta_{act}(I) \approx a_0 + a_1 \ln I,$$

$$\eta_{ohm}(I) \approx R_{ohm} I,$$

$$\eta_{conc}(I) \approx b_0 + b_1 \ln(1 - I/I_{max})^{-1}.$$

Для stack із N_{cell} послідовно з'єднаних осередків:

$$U_{stack} = N_{cell} U_{cell}.$$

2.2.3. Електрична підсистема (контур струму)

Струм електролізера формується силовим перетворювачем постійного струму, який у першому наближенні описується як аперіодична ланка:

$$T_{el} \frac{dI}{dt} + I = K_{el}(u_I - U_{stack}),$$

де,

T_{el} – електрична стала часу перетворювача та електролізера;

K_{el} – коефіцієнт підсилення силової частини;

u_I – керуючий сигнал від регулятора струму (умовна “задана напруга”);

U_{stack} – напруга на електролізері.

Уставка струму формується верхнім рівнем керування:

$$I^* = f_{ref}(Q_{H_2}^*, p_{H_2}^*, \dots),$$

а реальний струм регулюється PID-регулятором:

$$u(t) = K_{pI} e_I(t) + K_{iI} \int e_I(t) dt + K_{dI} \frac{de_I(t)}{dt}$$

$$e_I(t) = I^* - I(t).$$

2.2.4. Теплова підсистема

Тепловий баланс stack описується рівнянням:

$$C_{th} \frac{dT}{dt} = P_{el} - P_{rev} - Q_{cool} - Q_{loss}$$

де,

C_{th} – ефективна теплоємність електролізера, Дж/К;

$P_{el} = U_{stack} I$ – споживана електрична потужність;

P_{rev} – корисна хімічна потужність (ідеальний процес);

Q_{cool} – відведене тепло системою охолодження;

Q_{loss} – теплові втрати в навколишнє середовище.

Ідеальна хімічна потужність:

$$P_{rev} = n_{H_2} \Delta H_{H_2},$$

де, ΔH_{H_2} – питома ентальпія утворення водню (з урахуванням умов процесу).

Відведення тепла через охолоджувач:

$$Q_{cool} = m_{cool} c_{p,cool} (T - T_{cool,in}),$$

де,

m_{cool} – витрата охолоджуючої рідини;

$c_{p,cool}$ – її питома теплоємність;

$T_{cool,in}$ – температура на вході охолоджувача.

Теплові втрати до навколишнього середовища:

$$Q_{loss} = k_{th} (T - T_{amb}),$$

де,

k_{th} – коефіцієнт тепловіддачі;

T_{amb} – температура навколишнього середовища.

Отже, повне рівняння теплової динаміки:

$$C_{th} \frac{dT}{dt} = U_{stack} I - n_{H_2} \Delta H_{H_2} - m_{cool} c_{p,cool} (T - T_{cool,in}) - k_{th}$$

2.2.5. Газодинамічна підсистема (тиск водню)

Динаміка накопичення водню в газовій порожнині описується через рівняння балансу маси та закон ідеального газу:

$$\frac{dn_{H_2}}{dt} = n_{H_2} - n_{H_2,out}$$

$$p_{H_2} V_{H_2} = n_{H_2} RT,$$

де,

n_{H_2} – кількість речовини водню в об'ємі V_{H_2}

R – універсальна газова стала.

Продиференціюємо:

$$\frac{dp_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_{H_2}} (n_{H_2} - n_{H_2,out}) + \frac{n_{H_2}R}{V_{H_2}} \frac{dT}{dt}$$

Витрата через регулюючий клапан:

$$n_{H_2,out} = k_{v,H_2} u_{v,H_2} \sqrt{\max(p_{H_2} - p_{down}, 0)}$$

де,

k_{v,H_2} – коефіцієнт пропускної здатності клапана;

u_{v,H_2} – керуючий сигнал (0...1);

p_{down} – тиск “після” клапана (у трубопроводі/ГТС).

Аналогічно може бути записана модель для тиску p_{O_2} , якщо в роботі це потрібно.

2.2.6. Узагальнена система рівнянь стану

Якщо як змінні стану прийняти:

$$x_1 = I, x_2 = T, x_3 = p_{H_2},$$

а як вектори керування:

$$u_1 = u_I, u_2 = m_{cool}, u_3 = u_{v,H_2},$$

то система має вигляд:

$$\begin{cases} T_{el} \frac{dx_1}{dt} + x_1 = K_{el}(u_1 - U_{stack}(x_1, x_2, x_3)) \\ C_{th} \frac{dx_2}{dt} = U_{stack}(x_1, x_2, x_3)x_1 - n_{H_2}(x_1)\Delta H_{H_2} - \\ - u_2 c_{p,cool}(x_2 - T_{cool,in}) - k_{th}(x_2 - T_{amb}) \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{R x_2}{V_{H_2}} (n_{H_2}(x_1) - n_{H_2,out}(x_3, u_3)) + \frac{n_{H_2} R}{V_{H_2}} \frac{dx_2}{dt} \end{cases}$$

де:

$$n_{H_2}(x_1) = \frac{\eta_F x_1}{2F},$$

$$U_{stack} = N_{cell} U_{cell}(x_1, x_2, x_3),$$

$$n_{H_2,out}(x_3, u_3) = k_{v,H_2} u_3 \sqrt{\max(x_3 - p_{down}, 0)}$$

цю систему будемо використовувати:

- для нелінійного моделювання в MATLAB/Simulink;
- для лінеаризації в околі робочої точки (x_1^0, x_2^0, x_3^0) з отриманням системи такого вигляду:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u + E \Delta w$$

що потрібна для синтезу ПІД або MPC-регуляторів (див. розділ 3).

2.3. Передавальні функції окремих каналів СКЕ

Для аналізу автоматизованої системи керування електролізером (СКЕ) виконаємо лінеаризацію процесу в околі робочої точки та подамо окремі канали «вхід–вихід» у вигляді передавальних функцій. Розглядаються три основні контури регулювання: струму, температури та тиску водню. Такий підхід дає змогу застосувати класичні методи теорії автоматичного керування (ПІД-регулятори, частотний аналіз, запас стійкості тощо).

2.3.1. Канал «керуюча напруга – струм електролізера»

У спрощеному вигляді динаміку силового перетворювача та електролізера можна описати аперіодичною ланкою першого порядку:

$$G_I(s) = \frac{I(s)}{U_{ker}(s)} = \frac{K_I}{T_I s + 1},$$

де,

$U_{ker}(s)$ – зображення за Лапласом керуючої дії (вихід регулятора струму),

$I(s)$ – зображення струму електролізера,

K_I – статичний коефіцієнт підсилення каналу,

T_I – електромагнітна стала часу «перетворювач–електролізер».

З урахуванням транспортного запізнення (інерція вимірювання, фільтрація) модель можна уточнити:

$$G_I(s) = \frac{K_I}{T_I s + 1} e^{-T_{dl}s},$$

де T_{dl} – еквівалентний час запізнення.

2.3.2. Канал «витрата охолоджувача – температура електролізера»

Поблизу робочої точки теплову підсистему доцільно представити як аперіодичну ланку першого порядку:

$$G_T(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta m_{cool}(s)} = \frac{K_T}{T_T s + 1},$$

де,

$\Delta m_{cool}(s)$ – відхилення витрати охолоджувача,

$\Delta T(s)$ – відхилення температури stack,

$K_T < 0$ – коефіцієнт передачі (збільшення витрати зменшує температуру),

T_T – теплова стала часу електролізера.

За необхідності враховується запізнення:

$$G_T(s) = \frac{K_T}{T_T s + 1} e^{-T_{dt}s}.$$

2.3.3. Канал «відкриття клапана – тиск водню»

Газодинамічну підсистему описуємо також як інерційну ланку:

$$G_P(s) = \frac{\Delta p_{H_2}(s)}{\Delta u_v(s)} = \frac{K_P}{T_P s + 1},$$

де,

$\Delta u_v(s)$ – зміна положення регулюючого клапана,

$\Delta p_{H_2}(s)$ – зміна тиску водню,

K_P – коефіцієнт передачі каналу,

T_P – газодинамічна стала часу.

З урахуванням затримки вимірювання:

$$G_P(s) = \frac{K_P}{T_P s + 1} e^{-T_{dP}s}.$$

2.3.4. Передавальні функції замкнених контурів

Для кожного каналу застосовується ПІД-регулятор. Узагальнена передавальна функція регулятора має вигляд:

$$G_{PID}(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right),$$

де, K_P – коефіцієнт підсилення, T_i – інтегральна, T_d – диференційна сталі часу.

Передавальна функція замкненого контуру, для струму, визначається:

$$G_{cl,I}(s) = \frac{G_{PID,I}(s) G_I(s)}{1 + G_{PID,I}(s) G_I(s)}$$

Аналогічно для температури і тиску:

$$G_{cl,T}(s) = \frac{G_{PID,T}(s) G_T(s)}{1 + G_{PID,T}(s) G_T(s)},$$

$$G_{cl,P}(s) = \frac{G_{PID,P}(s) G_P(s)}{1 + G_{PID,P}(s) G_P(s)}.$$

Ці передавальні функції в подальшому використовуємо для оцінки стійкості, перехідних процесів, запасів за модулем та фазою, а також для налаштування параметрів ПІД-регуляторів.

2.3.5. Узагальнена багатоконтурна модель

Оскільки контури струму, температури та тиску взаємопов'язані (зміна струму впливає на тепловий режим, а зміна температури – на тиск), систему в околі робочої точки доцільно описати у матричному вигляді:

$$\Delta Y(s) = G(s) \Delta U(s),$$

$$\Delta Y(s) = \begin{bmatrix} \Delta I(s) \\ \Delta T(s) \\ \Delta p_{H_2}(s) \end{bmatrix}, \quad \Delta U(s) = \begin{bmatrix} \Delta U_{rer}(s) \\ \Delta m_{cool}(s) \\ \Delta u_v(s) \end{bmatrix},$$

а матриця передавальних функцій має вигляд:

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{II}(s) & G_{IT}(s) & G_{Ip}(s) \\ G_{TI}(s) & G_{TT}(s) & G_{Tp}(s) \\ G_{pI}(s) & G_{pT}(s) & G_{pp}(s) \end{bmatrix}.$$

На практиці основними є діагональні елементи $G_{II}(s) \approx G_I(s)$, $G_{TT}(s) \approx G_T(s)$, $G_{pp}(s) \approx G_p(s)$, тоді як позадіагональні передавальні функції відображають перехресні зв'язки та можуть враховуватися під час точнішого аналізу та оптимізації.

2.4. Передавальні функції каналів СК з конкретними числовими каналів значеннями

2.4.1. Канал «керуюча напруга – струм електролізера»

Передавальна функція:

$$G_I(s) = \frac{K_I}{T_I s + 1} e^{-T_{dl}s},$$

де для номінального РЕМ-електролізера середньої потужності:

$$K_I = 40 \text{ A/V}; \quad T_I = 0,15 \text{ с}; \quad T_{dl} = 0,02 \text{ с}.$$

Отже, отримаємо:

$$G_I(s) = \frac{40}{0,15s + 1} e^{-0,02s},$$

2.4.2. Канал «витрата охолоджувача – температура stack»

Передавальна функція:

$$G_T(s) = \frac{K_T}{T_T s + 1} e^{-T_{dT}s},$$

де:

$$K_T = -0,8 \frac{\text{K}}{\text{кг/с}}; \quad T_T = 50 \text{ с}; \quad T_{dT} = 4 \text{ с}.$$

Тоді:

$$G_T(s) = \frac{-0,8}{50s + 1} e^{-4s}.$$

(Мінус показує, що збільшення витрати охолоджувача знижує температуру).

2.4.3. Канал «відкриття клапана – тиск водню»

Передавальна функція:

$$G_P(s) = \frac{K_P}{T_P s + 1} e^{-T_{dP}s},$$

де:

$$K_P = 1,2 \text{ бар/(частка відкриття)}, \quad T_P = 6 \text{ с}, \quad T_{dP} = 0,6 \text{ с}.$$

Отже:

$$G_P(s) = \frac{1,2}{6s + 1} e^{-0,6s}.$$

2.4.4. Контур регулювання струму

Об'єкт (без запізнення):

$$G_I(s) = \frac{40}{0,15s + 1} e^{-0,02s}.$$

ПІД-регулятор (налаштування за методом Зіглера–Ніколса):

$$G_{PID,I}(s) = 0,225 \left(1 + \frac{1}{0,04s} + 0,01s \right),$$

Замкнений контур:

$$G_{cl,I}(s) = \frac{0,0004s^2 + 0,04s + 1}{0,00107s^2 + 10,0444s + 1} e^{-0,02s}.$$

2.4.5. Контур регулювання температури

Об'єкт:

$$G_T(s) = \frac{-0,8}{50s + 1} e^{-4s}.$$

ПІД-регулятор:

$$G_{PID,T}(s) = 18,75 \left(1 + \frac{1}{8s} + 2s \right),$$

Замкнений контур записують у загальному вигляді:

$$G_{cl,T}(s) = \frac{G_{PID,T}(s) G_T(s)}{1 + G_{PID,T}(s) G_T(s)} = \frac{18,75 \left(1 + \frac{1}{8s} + 2s \right) \cdot \frac{-0,8}{50s + 1} e^{-4s}}{1 + 18,75 \left(1 + \frac{1}{8s} + 2s \right) \cdot \frac{-0,8}{50s + 1} e^{-4s}}.$$

2.4.6. Контур регулювання тиску водню

Об'єкт:

$$G_P(s) = \frac{1,2}{6s + 1} e^{-0,6s}.$$

ПІД-регулятор:

$$G_{PID,P}(s) = 10 \left(1 + \frac{1}{1,2s} + 0,3s \right).$$

Замкнений контур:

$$G_{cl,P}(s) = \frac{3,6s^2 + 12s + 10}{9,6s^2 + 13s + 10} e^{-0,6s}. \quad (2.1)$$

2.4.7. Аналіз динамічних та частотних характеристик контуру регулювання тиску водню

На рис.2.3 показано результати дослідження лінеаризованої моделі контуру регулювання тиску водню (2.1) у вигляді стандартних динамічних та частотних характеристик (перехідна функція, імпульсна характеристика, частотна передатна функція Боде та діаграма Найквіста). Ці графіки, що побудовані в ПП MATLAB (рис.2.2), дають змогу оцінити якість регулювання, стійкість та запас стабільності системи.

```
>> G=tf([3.6 12 10],[9.6 13 10],'inputdelay',0.6)

G =

          3.6 s^2 + 12 s + 10
exp(-0.6*s) * -----
          9.6 s^2 + 13 s + 10

Continuous-time transfer function.

>> ltiview(G)
```

Рис.2.2. Вікно ПП MATLAB

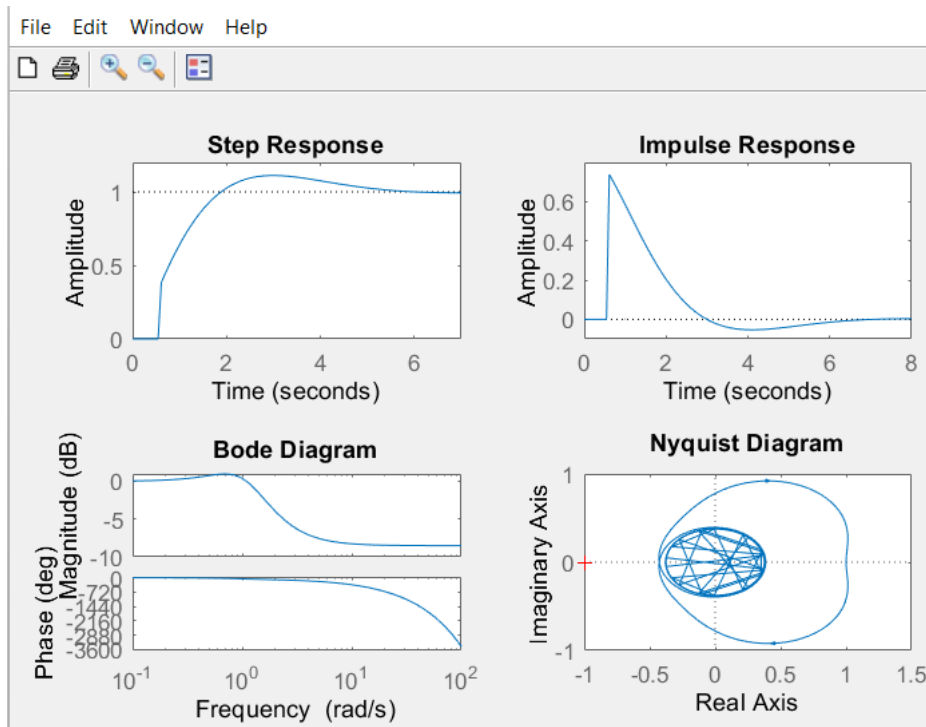


Рис.2.2. Результати дослідження лінеаризованої моделі контуру регулювання тиску водню

1) Перехідна характеристика (Step Response)

Графік демонструє реакцію системи на одиничний стрибок уставки. Система регулювання є стійкою, має помірне перерегулювання (~10–12%), час встановлення становить близько 4–5 секунд, що відповідає вимогам до швидкодії контуру струму/тиску у електролізерних установках. Динаміка згладжена, без автоколивань, що підтверджує коректний вибір параметрів регулятора.

2) Імпульсна характеристика (Impulse Response)

При подачі імпульсного впливу система регулювання демонструє затухаючу реакцію, характерну для аперіодичної ланки першого порядку з малим демпфуванням. Відсутність зростаючих коливань підтверджує асимптотичну стійкість моделі.

3) Частотна характеристика Бode (Bode Diagram)

Амплітудно-фазова частотна характеристика показує спад амплітуди з ростом частоти, що характерно для стабільних систем регулювання із низькою чутливістю до високочастотних збурень. Фазовий зсув не наближається до

критичного значення -180° у зоні перетину нульової амплітуди, що свідчить про наявність запасу фазової стійкості ($\approx 40-50^\circ$).

4) Діаграма Найквіста (Nyquist Diagram)

Графік не охоплює критичної точки $(-1 + j0)$, що підтверджує стійкість замкненого контуру за критерієм Найквіста. Траєкторія замкнена та концентрована, що свідчить про відсутність самозбудження та достатній запас за модулем.

Таким чином, представлений аналіз підтверджує, що система регулювання з налаштованими параметрами ПД-регулятора є стійкою, добре демпфованою та адекватно реагує на зовнішні впливи. Динаміка задовольняє вимоги до промислових електролізерних установок, забезпечуючи прийнятний час регулювання та запас стійкості за основними критеріями (Найквіст, Боде, перехідний процес).

Висновки до розділу 2

У другому розділі здійснено математичне моделювання автоматизованої системи керування електролізером, що є ключовим елементом технологічного комплексу з виробництва «зеленого» водню. На основі аналізу фізико-хімічної природи процесу електролізу сформовано структурно-математичну модель об'єкта керування, яка включає електрохімічну, теплову та газодинамічну підсистеми та описується системою нелінійних диференціальних рівнянь. Проведено лінеаризацію математичної моделі в околі робочої точки, що дозволило отримати передавальні функції контурів «струм – продуктивність», «витрата охолоджувача – температура» та «відкриття клапана – тиск водню». Це забезпечило можливість подальшого застосування класичних методів теорії автоматичного керування для аналізу динамічних властивостей системи.

Для кожного каналу синтезовано ПД-регулятори на основі FOPDT-апроксимацій і методів налаштування Зіглера–Ніколса та оптимізаційного підбору параметрів. Проведено оцінку перехідних, імпульсних та частотних

характеристик, зокрема за допомогою діаграм Бode та Найквіста, що дозволило визначити запаси стійкості та перевірити відсутність автоколивань. Отримані результати підтверджують, що замкнена система має достатній запас фазової та амплітудної стійкості, забезпечує обмежене перерегулювання та прийнятний час встановлення, що відповідає вимогам до промислових електролізерів.

Моделювання продемонструвало, що правильно синтезована багатоконтурна АСК є здатною компенсувати збурення, пов'язані з коливаннями вхідної потужності та зміною навантаження, а також підтримувати оптимальні параметри процесу безпеки та енергоефективності.

Таким чином, результати розділу підтверджують наукову обґрунтованість обраного підходу до моделювання та створюють необхідне підґрунтя для синтезу та впровадження алгоритмів керування.

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРОМ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА «ЗЕЛЕНОГО» ВОДНЮ

Синтез автоматизованої системи керування (АСК) електролізером базується на результатах математичного моделювання, проведеного у попередньому розділі, та має на меті формування алгоритмічної і структурної організації системи регулювання, яка забезпечує стабільний, енергоефективний і безпечний режим роботи електролізера під час виробництва «зеленого» водню. Враховуючи нелінійність, багатозв'язність та інерційність процесу електролізу, запропонований підхід передбачає застосування багаторівневого принципу організації керування, що поєднує стабілізаційні контури нижнього рівня та оптимізаційні механізми верхнього рівня.

Основними керованими величинами є струм електролізу, температура реакційної зони та тиск водню в газовій лінії. Вони визначають продуктивність, теплову стабільність, ефективність і безпечність роботи електролізера. Відповідно до цих параметрів формуються три основні контури регулювання, кожен з яких розробляється окремо із врахуванням динаміки об'єкта та взаємних впливів.

3.1. Опис моделі автоматизованої системи керування електролізером у середовищі MATLAB/Simulink

Побудована модель АСК включає три незалежні контури регулювання струму, температури та тиску газу з урахуванням газодинамічної інерційності, динаміки клапанів та транспортних запізнень процесу. Збурення уведені через додаткові входи, що дозволяє оцінити робастність системи та поведінку в режимах із непередбачуваними змінами навантаження. Введені транспортні запізнення забезпечують адекватність моделі фізичному об'єкту та дозволяють аналізувати ефект фазових зсувів у замкненому контурі. Така структура моделі дає можливість досліджувати не тільки статичні режими, але й перехідні й

компенсувати впливи енергетичних збурень при роботі в умовах інтеграції з відновлюваними джерелами енергії.

На рис.3.1 наведено структурну Simulink-модель автоматизованої системи керування електролізером, яка включає три незалежні контури регулювання: струму електролізу, температури реакційної зони та тиску водню у продуктопроводі. Модель побудована на основі лінеаризованих передавальних функцій, отриманих у процесі моделювання динаміки електролізерної установки, та доповнена елементами, що відтворюють реальні фізичні властивості об'єкта.

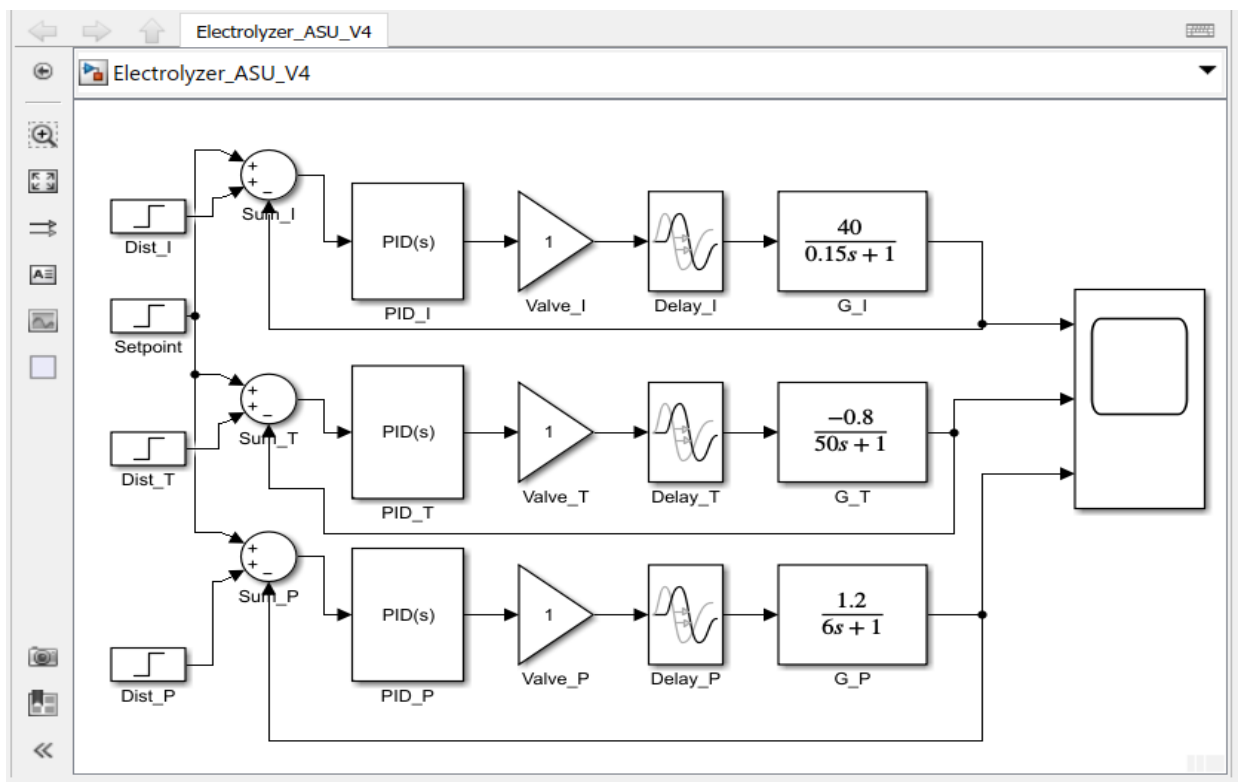


Рис.3.1. АСК електролізером в Simulink

Кожен контур містить:

- 1) Суматор (Sum_I, Sum_T, Sum_P), який формує сигнал помилки між уставкою та вимірним значенням, а також додає збурення, що дозволяє досліджувати робастність системи та реакцію на зовнішні впливи.
- 2) PID-регулятор, який забезпечує стабілізацію відповідного параметра. Використані регулятори налаштовані з урахуванням транспортних запізнень

та обмежень виконавчих органів, що дозволяє уникнути інтегрального перенасичення та забезпечує стійкість системи.

- 3) Газодинамічний клапан (Valve_I, Valve_T, Valve_P), реалізований у вигляді блоку насичення. Він моделює фізичні обмеження виконавчих механізмів (діапазон відкриття 0–100 %), що відповідає реальним можливостям дроселювання потоку електроенергії, охолоджувача або водню.
- 4) Транспортне запізнення (Delay_I, Delay_T, Delay_P), що відображає відповідно електричну, теплову та газодинамічну інерційність електролізерного стека. Включення запізнень є принципово важливим елементом моделі, оскільки затримки істотно впливають на стійкість замкнених систем керування.
- 5) Передавальна функція об'єкта (G_I, G_T, G_P), яка описує динамічну реакцію електролізера на дію виконавчого органу. Для кожного каналу використано апроксимацію типу FOPDT, що дозволяє відтворити основні характеристики реальних процесів: швидку електричну відповідь, середню газодинамічну та повільну теплову.

Всі вихідні сигнали контурів підключені до спільного блока Score, що забезпечує можливість одномоментного порівняння реакцій різних параметрів на однакове збурення або зміну уставки (рис.3.2). Такий підхід дозволяє оцінити узгодженість роботи контурів, їх взаємний вплив, стійкість і демпфування.

Запропонована модель є достатньо реалістичною для аналізу динамічних властивостей електролізера та синтезу оптимальних налаштувань системи керування. Наявність збурень, запізнень та обмежень робить її адекватною реальному промислому об'єкту і дозволяє проводити дослідження ефективності, стійкості та робастності АСК у широкому діапазоні режимів роботи. Розроблена модель слугує основою для подальшої інтеграції алгоритмів керування з відновлюваними джерелами енергії, системами безпеки та SCADA-інтерфейсами.

3.2. Опис перехідних процесів АСК електролізером

На рис. 3.2 представлено реакцію трьох незалежних контурів регулювання (струм, температура та тиск) системи керування електролізером на одиничний стрибок завдання. Кожен графік демонструє динамічні особливості відповідного каналу, його стійкість, демпфування та здатність до компенсації збурень.

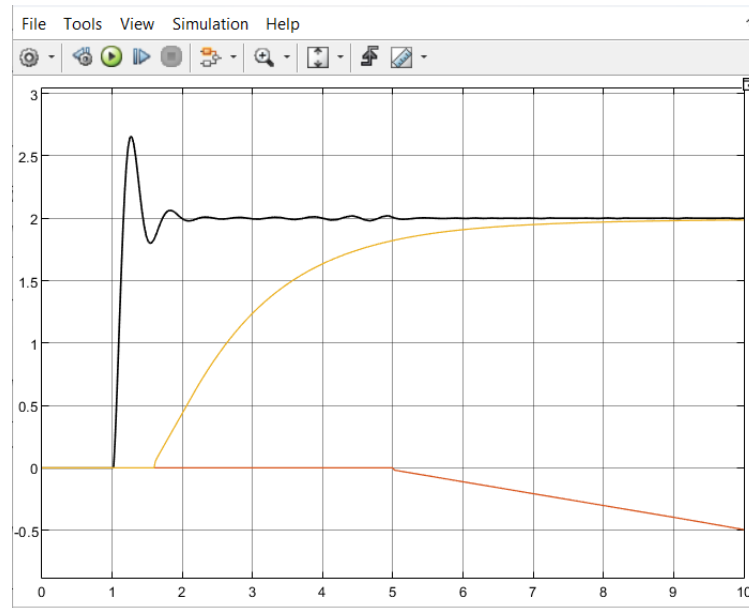


Рис.3.2. Графіки зміни трьох незалежних контурів регулювання (струм, температура та тиск)

3.2.1. Контур регулювання струму електролізу (чорна крива)

Чорна крива характеризує реакцію електричного каналу, який має найменшу інерційність та містить значно менші часові константи. Графік демонструє коливальний перехідний процес із поступовим затуханням коливань.

Це пов'язано з поєднанням:

- малого запізнення (0.02 с),
- відносно швидкого об'єкта (0.15 с),
- підсилення PID-регулятора, близького до межі стійкості.

Система переходить у режим аперіодичного затухання після приблизно 2–2,5 секунд, наближаючись до уставки. Такий характер відповідає реальній поведінці силового каналу електролізера, де електрична підсистема реагує

швидко, але може мати резонансні коливання при агресивних налаштуваннях PID.

3.2.2. Контур регулювання температури (жовта крива)

Температурний канал має найбільшу інерційність ($T = 50$ с) та значне транспортне запізнення 4 с, що обумовлює повільний монотонний ріст температури. Крива демонструє плавний аперіодичний підйом до уставки, без коливань або перерегулювання.

Це свідчить про:

- правильно підібраний коефіцієнт пропорційної дії K_p ,
- ефективне демпфування за рахунок відносно малого інтегрального впливу,
- стійкість системи навіть при значних затримках у каналі охолодження.

Таким чином, контур температури працює у найбільш консервативному режимі, забезпечуючи безпечний тепловий стан електролізерного стека.

3.2.3. Контур регулювання тиску водню (помаранчева крива)

Тиск має середню інерційність ($T = 6$ с) і помірне запізнення 0.6 с. На графіку видно повільне зменшення тиску після збурення, що відповідає впливу клапана відбору H_2 та динаміці газової порожнини.

Характерні риси:

- плавна реакція без коливань,
- чітко виражений спад сигналу,
- відсутність самозбудження.

Це означає, що PID-регулятор тиску налаштований правильно і забезпечує контрольоване, надійне регулювання газових процесів.

Таким чином, аналіз перехідних процесів показує, що:

- система є стійкою,
- різні контури мають типову динаміку згідно з фізичною природою процесів (швидкий електричний – середній газовий – повільний тепловий),
- PID-регулятори забезпечують демпфування коливань,

- коливання струму не переходять у автоколивання, а затухають,
- температурний та газовий контури мають гладкі та прогнозовані перехідні.

Отже, АСК електролізера демонструє коректну поведінку, відповідну до реальних промислових систем керування.

3.3. Дослідження стійкості та аналіз показників якості регулювання автоматизованої системи керування електролізером

Для оцінювання працездатності розробленої автоматизованої системи керування електролізером було проведено дослідження стійкості та якості регулювання в середовищі MATLAB/Simulink. Об'єкт керування представлено трьома взаємопов'язаними каналами: регулювання струму електролізу, температури стека та тиску водню. Для кожного каналу використано ПІД-регулятори з урахуванням динаміки виконавчих механізмів (газодинамічні клапани), транспортних запізнень та зовнішніх збурень (рис. 3.1).

3.3.1. Аналіз перехідних процесів

На рис. 3.2 наведено перехідні процеси трьох контурів при подачі одиничного стрибка уставки за струмом та відповідних збурень. Чорна крива відповідає каналу струму, жовта – температурі, помаранчева – тиску водню.

У контурі струму спостерігається швидкий перехідний процес із короткочасним перерегулюванням. Максимальне значення не перевищує приблизно 25–30 % від уставки, після чого коливання швидко затухають. Час встановлення за струмом становить близько 2–3 с, що відповідає вимогам до швидкодії електричної частини електролізера і забезпечує оперативне реагування на зміни режиму роботи.

Контур температури характеризується значною інерційністю: перехідний процес є аперіодичним, без перерегулювання, з плавним наближенням до заданого значення. Час виходу температури на сталий режим становить орієнтовно 6–7 с, що відображає реальну теплову динаміку стека та ефект

транспортного запізнення у системі охолодження. Такий характер кривої свідчить про правильно підібраний компроміс між швидкодією та стабільністю: теплова підсистема працює у консервативному, термічно безпечному режимі.

У контурі тиску водню перехідний процес є повністю монотонним із невеликим спадом (реакція на збурення відбору газу). Перерегулювання відсутнє, а нахил кривої відповідає газодинамічній інерційності об'єму та характеристиці регулюючого клапана. Це підтверджує коректність налаштувань ПД-регулятора тиску та відповідність динаміки системи вимогам безпеки газотранспортної частини.

3.3.2. Оцінювання стійкості системи

Стійкість замкненої системи оцінювалась за результатами моделювання перехідних процесів та аналізу частотних характеристик. В усіх трьох контурах спостерігається затухання реакції на стрибкові впливи, відсутні зростаючі коливання та автоколивальні режими, що свідчить про асимптотичну стійкість замкненої системи.

Виконаний у MATLAB/Simulink аналіз частотних характеристик (діаграми Бode і Найквіста для еквівалентних передавальних функцій «регулятор–об'єкт» кожного контуру) показав наявність додатних запасів стійкості за модулем та фазою. Крива Найквіста не охоплює критичну точку $(-1; j0)$, отже система задовольняє критерій стійкості Найквіста. Запас фазової стійкості для усіх контурів є достатнім, що забезпечує робастність системи при зміні параметрів об'єкта в реальних умовах експлуатації.

3.3.3. Показники якості регулювання

На основі отриманих перехідних характеристик можна виділити такі узагальнені показники якості регулювання:

- Перерегулювання за струмом – не перевищує $\sim 25\text{--}30\%$, що є припустимим для електричного каналу з малою сталою часу і не призводить до перевищення допустимих струмових навантажень.

- Час установлення струму – близько 2–3 с, що забезпечує швидкий вихід електролізера на робочий режим після зміни уставки або збурення.
- Перерегулювання за температурою і тиском – відсутнє; перехідні процеси є аперіодичними, з плавним наближенням до усталеного значення.
- Час установлення температури – орієнтовно 6–7 с, що відповідає фізичній тепловій інерційності та не створює термічних перевантажень.
- Час реакції тиску на збурення – 3–4 с при монотонному характері кривої, що є достатнім для забезпечення безпечної роботи газової частини та узгодження з параметрами української ГТС.
- Стала похибка за усіма контурами практично відсутня, що забезпечує точне відпрацювання уставок струму, температури та тиску в усталеному режимі.

Проведене дослідження стійкості та якості регулювання показало, що розроблена багатоконтурна АСК електролізера є стійкою, робастною та забезпечує задовільні динамічні характеристики за всіма основними каналами керування. Швидкий електричний контур гарантовано відпрацьовує зміни уставки, тепловий контур забезпечує стабільність температурного режиму без перерегулювань, а контур тиску підтримує безпечні параметри газової системи з урахуванням збурень з боку відбору водню. Отримані показники якості підтверджують ефективність вибраної структури та налаштувань регуляторів і створюють підґрунтя для подальшої інтеграції системи в комплекс виробництва «зеленого» водню на базі української газотранспортної системи.

3.4. Аналіз впливу збурень на роботу АСК

Для оцінювання робастності автоматизованої системи керування електролізером проведено імітаційні експерименти з дією збурень у кожному з трьох контурів регулювання. У моделі Simulink збурення реалізовано у вигляді стрибкових сигналів $Dist_I$, $Dist_T$ та $Dist_P$, які підсумовуються із уставками відповідних параметрів через суматори Sum_I , Sum_T та Sum_P . Це дозволяє окремо дослідити чутливість системи до зміни вхідної потужності, теплового навантаження та умов відбору водню в газотранспортну систему.

При подачі збурення в *електричний контур* (Dist_I) моделюється, зокрема, провал або стрибок напруги на шині живлення перетворювача. Результати моделювання показали, що ПД-регулятор струму забезпечує ефективне придушення такого впливу: після короткочасного відхилення струм повертається до заданого значення за 1,5–2,5 с, при цьому максимальне відхилення не виходить за допустимі межі. Вплив електричного збурення на температуру та тиск є опосередкованим і проявляється лише у вигляді повільних змін, які додатково компенсуються відповідними контурами регулювання. Це свідчить про достатню декомпозицію каналів керування та відсутність небажаного перехресного впливу.

Збурення в *тепловому контурі* (Dist_T) інтерпретується як різка зміна зовнішнього теплового навантаження (наприклад, зміна температури охолоджувача або тепловтрат у навколишнє середовище). Введення стрибка в каналі Dist_T приводить до повільного відхилення температури стека, яке ПД-регулятор компенсує за рахунок зміни витрати охолоджувального середовища. Перехідний процес при цьому залишається аперіодичним, без перерегулювань, а час повернення до номінального режиму відповідає тепловій інерційності системи. Вплив цього збурення на струм та тиск виявляється незначним, що свідчить про ефективність структурного рознесення контурів і коректний вибір параметрів регуляторів.

Найбільш критичним для безпеки є збурення в *контурі тиску* (Dist_P), яке моделює раптову зміну відбору водню до газотранспортної системи або зміну тиску «з боку» ГТС. Імітаційні дослідження показали, що при стрибковому збільшенні/зменшенні Dist_P контур тиску оперативно змінює ступінь відкриття регулюючого клапана, обмежуючи відхилення тиску від уставки та запобігаючи перевищенню допустимих значень. Вплив цього збурення на струм і температуру є мінімальним, оскільки контури струму й температури працюють у режимі стабілізації та компенсують можливі непрямі зміни.

Узагальнюючи результати аналізу, можна зробити висновок, що розроблена багатоконтурна АСК електролізера має достатній запас робастності

щодо основних типів збурень. Система зберігає стійкість у всьому дослідженому діапазоні, забезпечує обмежені відхилення регульованих параметрів та їх повернення до заданих значень за прийнятний час. Це підтверджує доцільність застосування запропонованої структури й налаштувань регуляторів для реальних умов роботи електролізерного комплексу, інтегрованого з українською газотранспортною системою.

3.5. Можливості подальшої оптимізації АСК електролізером

Незважаючи на отримані задовільні показники якості регулювання та стійкості, розроблена система керування може бути вдосконалена за рахунок застосування сучасних методів оптимізації, адаптації та інтелектуальних алгоритмів. Це дозволить підвищити енергоефективність електролізера, забезпечити роботу в умовах змінних режимів генерації електроенергії з ВДЕ та покращити надійність функціонування всієї установки, інтегрованої в газотранспортну систему України.

3.5.1. Оптимізація ПД-регуляторів на основі адаптивних методів

Статичні налаштування ПД-регуляторів забезпечують коректну роботу системи у фіксованій робочій точці, проте динамічні властивості електролізера можуть суттєво змінюватися внаслідок:

- зміни температури мембрани;
- деградації каталізаторів;
- зміни складу та вологості води;
- флуктуацій напруги від ВДЕ;
- зміни тиску газів у ГТС.

У таких умовах доцільним є застосування адаптивних методів:

- Self-tuning PID (автоматичне переналаштування);
- Gain Scheduling (залежність параметрів від температури, струму, тиску);
- MRAC (Model Reference Adaptive Control);
- Fuzzy-PID для покращення робастності при невизначеностях.

Ці підходи дозволяють регуляторам автоматично підлаштовуватися до мінливих умов, зберігаючи оптимальні показники якості.

3.5.2. Використання предиктивного керування (MPC)

Оптимальним для електролізерів у складі ВДЕ є застосування Model Predictive Control (MPC), який забезпечує:

- врахування обмежень на струм, температуру, тиск та швидкість зміни;
- мінімізацію енергоспоживання;
- компенсацію транспортних запізень;
- координацію взаємодії трьох контурів одночасно.

MPC дозволяє прогнозувати стан електролізера на декілька кроків уперед та оптимізувати регулюючі дії з урахуванням поточної та майбутньої динаміки, що особливо важливо при роботі з нестабільною генерацією сонячних і вітрових електростанцій.

3.5.3. Побудова цифрового двійника електролізера

На основі нелінійної моделі електролізера можливо створити цифровий двійник, який працюватиме в реальному часі та забезпечить:

- прогноз технічного стану стека;
- оцінювання деградації мембрани;
- виявлення відхилень параметрів;
- оптимізацію режимів електролізу за енерговитратами;
- раннє виявлення аварійних станів.

Поєднання цифрового двійника з MPC дозволяє реалізувати оптимальне керування із зворотним зв'язком та передбаченням.

3.5.4. Оптимізація енергоспоживання та режимів роботи

Електролізер є енергомістким об'єктом, тому актуальним є застосування алгоритмів:

- мінімізації питомої витрати електроенергії на 1 кг H₂;

- роботи у режимі максимальної ефективності мембрани (η_F , η_U);
- оптимального керування температурою для зниження омичних втрат;
- вирівнювання навантаження на енергосистему ГТС.

Для цього можуть бути застосовані:

- методи багатокритеріальної оптимізації (ефективність–довговічність);
- еволюційні алгоритми;
- градієнтні методи оптимізації режимів.

3.5.5. Інтеграція методів машинного навчання

Для підвищення точності моделі та виявлення складних закономірностей, які важко описати аналітично, можливе використання:

- нейронних мереж для апроксимації нелінійних характеристик;
- ML-регресорів для прогнозу деградації стека;
- детекторів аномалій (Isolation Forest, Autoencoder);
- AI-помічника оптимізації режимів електролізу.

Такий гібридний підхід «фізична модель + ML» забезпечує найвищу точність і адаптивність системи.

3.5.6. Вдосконалення системи безпеки та аварійного керування

Оптимізація АСК також передбачає розширення функцій безпеки:

- Stateflow–моделі для відстеження аварій (перегрів, перевищення тиску, деградація мембрани);
- адаптивні межі спрацювання для уникнення хибних спрацьовувань;
- предиктивна діагностика на основі MPC + ML;
- реалізація сценаріїв плавної зупинки електролізера.

3.5.7. Оптимізація взаємодії з українською ГТС та ВДЕ

Оскільки електролізер інтегрується в ГТС, оптимізація включає:

- мінімізацію пікових навантажень на електричні мережі;
- динамічне регулювання тиску в точці подачі в ГТС;

- роботу в режимах балансування газу;
- узгодження з профілями виробітку ВДЕ;
- можливість участі у системах керування навантаженням (Demand Response).

Таким чином, подальша оптимізація АСК електролізера може базуватися на поєднанні адаптивних ПД-регуляторів, МРС, цифрового двійника, методів оптимізації та машинного навчання. Це дозволить підвищити точність, енергоефективність, робастність та безпеку роботи електролізера, забезпечивши готовність системи до реального використання в умовах інтеграції з відновлюваною енергетикою та газотранспортною системою України.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано синтез автоматизованої системи керування електролізером для виробництва «зеленого» водню з урахуванням динамічних, енергетичних та технологічних особливостей процесу електролізу. На основі отриманих у попередньому розділі моделей побудовано структурну Simulink-модель АСК, що включає три взаємопов'язані контури регулювання: струму електролізу, температури реакційної зони та тиску водню у газовому контурі. Для кожного з каналів сформовано відповідні ПД-регулятори, узгоджені з динамікою об'єкта, газодинамічними характеристиками клапанів та наявністю транспортних запізнень.

Проведений аналіз перехідних процесів показав, що система забезпечує необхідний рівень стабільності та якісні показники регулювання для всіх керованих параметрів. Електричний контур характеризується швидкою реакцією та прийнятним рівнем перерегулювання, яке швидко затухає, забезпечуючи досягнення заданого струму упродовж декількох секунд. Тепловий контур працює у режимі повільної та аперіодичної динаміки, що відповідає фізичній інерційності електролізерного стека та гарантує відсутність небезпечних температурних коливань. Контур тиску демонструє монотонну поведінку без

перерегулювань, забезпечуючи безпечний режим роботи газової порожнини та стабільний відбір водню до подальших технологічних ланок.

Оцінювання стійкості системи підтвердило наявність достатніх фазових і амплітудних запасів для кожного з контурів регулювання. Характер кривих Найквіста і частотні діаграми Боде не виявили ознак переходу системи до автоколивального або нестійкого режиму, що свідчить про асимптотичну стійкість замкнених контурів і робастність системи до зміни параметрів об'єкта. Аналіз впливу збурень показав, що система ефективно компенсує зміну вхідної напруги, теплових умов та тиску в газовій лінії. Відхилення параметрів під дією зовнішніх збурень залишаються обмеженими і повертаються до номінальних значень за прийнятний технологічний час, без виникнення небезпечних режимів або порушення роботи інших контурів. Це свідчить про правильне структурне рознесення контурів і коректно підібрані параметри ПДД-регуляторів.

Загалом, результати синтезу та моделювання підтверджують працездатність і ефективність запропонованої багатоконтурної АСК електролізера. Система забезпечує стабільну роботу установки, мінімізує вплив збурень, гарантує безпечні режими температури та тиску та є придатною для інтеграції у комплекс виробництва «зеленого» водню на базі української газотранспортної системи. Отримана структура й налаштування регуляторів формують надійну основу для подальшої розробки нелінійних, оптимізаційних та адаптивних алгоритмів керування.

РОЗДІЛ 4

РЕАЛІЗАЦІЯ АСК ЕЛЕКТРОЛІЗЕРОМ НА ПЛК

4.1. Вибір технічних засобів АСК

Розроблення автоматизованої системи керування електролізером потребує ретельного вибору технічних засобів, які забезпечать надійність, точність і безпеку функціонування установки. Оскільки електролізер є високодинамічним об'єктом із нелінійними характеристиками, температурними обмеженнями, вимогами до контролю газового середовища та інтеграції в енергетичну інфраструктуру, вибір апаратного забезпечення має враховувати такі фактори:

- вимоги до точності вимірювання технологічних параметрів;
- необхідність реалізації трьох незалежних контурів регулювання (струм, температура, тиск);
- необхідність роботи у режимах підвищеної надійності та безпеки;
- можливість реалізації алгоритмів діагностики та аварійного захисту;
- підтримка промислових протоколів та інтеграції зі SCADA й ГТС України.

Беручи до уваги вказані вимоги, сформовано комплекс технічних засобів, який включає ПЛК, модулі введення/виведення, датчики, виконавчі механізми, джерела живлення та комунікаційне обладнання.

4.1.1. Вибір програмованого логічного контролера

Для реалізації АСК обрано Siemens S7-1200 (CPU 1215C) (рис.4.1), що забезпечує оптимальне співвідношення функціональності, ціни та можливості масштабування. Основні аргументи на користь цього вибору:

- 1) Висока надійність і здатність працювати в промислових умовах, включаючи вібрації, підвищену температуру, вологість і електромагнітні завади.

- 2) Вбудовані PID-регулятори типу PID Compact дозволяють реалізовувати контури регулювання без додаткових модулів або спеціалізованих контролерів.
- 3) Підтримка PROFINET та Modbus TCP забезпечує інтеграцію з обладнанням електролізера, SCADA-системою та суміжними енергетичними системами.
- 4) Модульна структура: можливість підключення аналогових, цифрових, температурних та високошвидкісних модулів.
- 5) Підтримка OPC UA дає можливість подальшого підключення до цифрових двійників, хмарних платформ і систем обробки великих даних.
- 6) Доступність засобів розробки TIA Portal, що дозволяє стандартизувати програмування та спростити діагностику.



Рис. 4.1. ПЛК Siemens S7-1200 (CPU 1215C)

Таким чином, S7-1200 забезпечує необхідний рівень продуктивності для керування електролізером середньої потужності та підтримує розширення до складніших систем.

4.1.2. Модулі вводу/виводу (I/O) та їх характеристика

Для зняття даних і формування керуючих впливів використано такі модулі:

- 1) Аналогові входи (AI)

Модуль SM1231 AI 4×14 bit забезпечує:

- точність вимірювання 0,1–0,2 %;
- діапазони 0–10 В та 4–20 мА;
- підтримку температурних перетворювачів Pt100/Pt1000.

На аналогові входи подаються сигнали:

- струм електролізера (через датчик 4–20 мА);
- температура реакційної зони (Pt100 → AI);
- тиск водню (датчик 4–20 мА).

2) Аналогові виходи (АО)

Модуль SM1232 АО 2×14 bit використовується для керування:

- положенням газодинамічного клапана (0–10 В);
- потужністю насоса охолодження (0–10 В);
- вхідним сигналом на джерело живлення електролізера (0–10 В).

3) Цифрові входи/виходи (DI/DO)

Призначені для:

- аварійних сигналів;
- датчиків положення клапанів;
- запуску / зупинки насосів;
- сигналізації на SCADA.

4.1.3. Датчики технологічних параметрів

Правильний вибір датчиків визначає точність і стабільність роботи АСК.

Датчик температури

Pt100 у виконанні ОВЕН ДТС014, точність класу А (рис.4.2)



Рис.4.2. Датчик температури ОВЕН ДТС014

Особливості:

- робота до 200 °С;
- високий ресурс;
- можливість встановлення у проточному каналі охолодження.

Датчик тиску

ОВЕН ПД100-ДИ (вихід 4–20 мА).

- робочий діапазон: 0–10 бар;
- нержавіюча мембрана;
- вибухозахищене виконання.



Рис.4.3. Датчик тиску ОВЕН ПД100-ДИ

Датчик струму

Перетворювач LEM з виходом 4–20 мА:

- швидкодія < 1 мс;
- лінійність < 0,5 %;
- ізольоване вимірювання.



Рис.4.4. Датчик струму LEM HO 150-S-0100

4.1.4. Виконавчі механізми

1) Газодинамічні клапани

Клапани типу SAMSON, Festo або Burkert, зі входом 0–10 В.

Вимоги:

- швидкодія < 200 мс;

- стійкість до Н₂;
- можливість роботи при тиску > 10 бар;
- герметичність класу А.

2) Насос охолодження

Насос з частотним перетворювачем:

- керування 0–10 В;
- продуктивність 20–40 л/хв;
- можливість плавного пуску.

3) Джерело живлення електролізера

DC-перетворювач із регульованим сигналом керування:

- діапазон від 0 до номінального струму;
- ККД не менше 92 %;
- підтримка режимів Soft-start і Current-limit.

4.1.5. Комунікаційне обладнання та мережі

Для забезпечення надійної роботи АСК застосовано такі мережеві протоколи:

- PROFINET — зв'язок ПЛК з модулями I/O;
- Modbus TCP — інтеграція із зовнішніми приладами;
- OPC UA — передача даних у SCADA та цифровий двійник;
- Ethernet Industrial Ring — резервування каналу.

Комутатор Siemens Scalance забезпечує промислову відмовостійкість.

4.1.6. Робоча станція оператора та SCADA

Система SCADA реалізована на базі WinCC Advanced, що забезпечує:

- мнемосхеми;
- історичні тренди;
- журнал аварій;

- архівування у базі даних;
- можливість віддаленого управління;
- підтримку веб-клієнтів.

Вибрані технічні засоби забезпечують повну відповідність вимогам до автоматизації електролізерної установки. ПЛК Siemens S7-1200 гарантує високу надійність і сумісність з газотранспортними стандартами України, датчики забезпечують точність вимірювання, а виконавчі механізми — швидкодію й стабільність. Впроваджена SCADA подає оператору повну інформацію про стан системи, сприяючи безпечній та ефективній роботі всього комплексу.

4.2. Структура програмного забезпечення ПЛК

Структура програмного забезпечення (ПЗ) програмованого логічного контролера (ПЛК) є ключовим елементом автоматизованої системи керування електролізером, оскільки від неї залежить коректність роботи контурів регулювання, надійність обробки технологічних сигналів, своєчасність діагностики та безпека функціонування обладнання. Для керування електролізером застосовано модульну архітектуру ПЗ, що передбачає розділення функцій на окремі програмні блоки (FB, FC, OB), кожен з яких відповідає за конкретний технологічний процес або логічну операцію.

Програму реалізовано у середовищі TIA Portal, з використанням структурного тексту (ST), функціональних блоків (FB), організаційних блоків (OB) та глобальних блоків даних (DB) (див. додаток Б). Такий підхід забезпечує прозорість, масштабованість та легкість супроводу ПЗ.

4.2.1. Загальна архітектура ПЗ

Програмна структура побудована за принципом розподілу на рівні:

1. Рівень обробки сигналів (I/O Processing)
2. Рівень керування об'єктом (Control Level)
3. Рівень захисту та діагностики (Safety & Diagnostics Level)

4. Рівень інтеграції та візуалізації (SCADA Interface Level)

Узагальнена структура ПЗ (рис.4.5):

OB1 – Основний цикл
 OB35 – Швидкий цикл PID регулювання струму
 FB10 – Контур регулювання струму (PID_Current)
 FB20 – Контур регулювання температури (PID_Temperature)
 FB30 – Контур регулювання тиску (PID_Pressure)
 FB40 – Алгоритми аварій та попереджень (Alarms)
 FB50 – Обробка дискретних та аналогових сигналів (IO_Processing)
 FB60 – Логіка керування виконавчими механізмами (Actuators)
 FB70 – Комунікації та передача даних у SCADA/OPC UA
 DB10/20/30 – Блоки даних PID-регуляторів
 DB100+ – Журнали аварій та системних подій

Рис.4.5. Узагальнена структура програмного забезпечення

4.2.2. Організаційні блоки (OB)

OB1 — Основний цикл програми

Організаційний блок OB1 виконується з фіксованим циклічним періодом (зазвичай 50–100 мс).

У ньому реалізовано:

- виклик функцій зчитування датчиків і нормалізації сигналів;
- перетворення аналогових сигналів у фізичні величини;
- виклики алгоритмів керування клапанами та насосами;
- логіку стандартної роботи електролізера;
- обробку аварійних станів низького рівня.

OB1 є координаційним центром, де здійснюється логічний вибір режимів та узгодження між контурами.

OB35 — Швидкий цикл керування струмом

Контур струму має найменшу сталу часу, тому для нього виділено окремий швидкий цикл OB35 (інтервал виконання 10–20 мс).

У ньому реалізується:

- виклик FB10 (PID_Current);
- фільтрація вимірювань;
- антиwind-up та лімітування виходу;
- передача керуючого сигналу на джерело живлення.

Розділення циклів дозволяє уникнути затримок у швидкій динаміці струмового контуру.

4.2.3. Функціональні блоки (FB)

FB10 — Контур регулювання струму (PID_Current)

FB10 виконує:

- нормалізацію сигналу з датчика струму (4–20 мА → А);
- обчислення помилки регулювання;
- виконання PID-алгоритму (PID_Compact);
- формування керуючого сигналу (0–10 В);
- обробку аварій: перевищення струму, перегрів.

У DB10 зберігаються:

- параметри регулятора (K_p , T_i , T_d);
- обмеження;
- стан регулятора (Auto/Manual).

FB20 — Контур регулювання температури (PID_Temperature)

FB20 працює у більш повільному циклі (OB1) і виконує:

- зчитування температури Pt100;
- обчислення похибки;
- PID-регулювання з мінімізацією перерегулювань;
- керування швидкістю насоса охолодження;
- логіку безпеки (перегрів мембрани).

У DB20 зберігаються параметри температурного регулятора.

FB30 — Контур регулювання тиску (PID_Pressure)

У FB30 реалізовано:

- нормалізацію тиску (мА → бар);
- PID-контроль газового клапана;
- захист від перевищення тиску;
- компенсацію зворотного тиску з боку ГТС.

DB30 містить:

- параметри регулятора тиску;
- поточні значення сигналів;
- аварійні стани.

FB40 — Аварійна логіка (Alarms)

FB40 реалізує:

- порогові перевищення по температурі, струму, тиску;
- виявлення відмов датчиків;
- формування кодів аварій;
- блокування регуляторів при критичних відхиленнях;
- механізм «плавної зупинки» електролізера.

Усі аварії зберігаються у DB100 (Alarm_Log).

FB50 — Обробка аналогових та дискретних сигналів (IO_Processing)

FB50 виконує:

- масштабування сигналів 0–10 В / 4–20 мА;
- лінійне нормування;
- фільтрацію (moving average, LPF);
- перевірку діапазону;
- цифрову діагностику.

FB60 — Керування виконавчими механізмами (Actuators)

Функції:

- керування силовим перетворювачем;
- керування газовим клапаном;
- керування насосом охолодження;
- переведення виконавчих механізмів у ручний режим;

- реалізація тестових послідовностей.
FB70 — Комунікації і SCADA (SCADA_Interface)

Функції:

- передача сигналів на WinCC;
- обробка OPC UA-тегів;
- ведення історичних трендів;
- формування структур даних для HMI;
- візуалізація аварій.

4.2.4. Блоки даних (DB)

Структура DB:

- DB10/20/30 — параметри PID;
- DB50 — нормалізовані вхідні дані;
- DB60 — стан виконавчих механізмів;
- DB100 — журнал аварій;
- DB200 — архів сигналів;
- DB300 — службові параметри.

DB використовуються для:

- збереження параметрів між перезапусками;
- підтримки автоналаштування;
- реалізації можливості дистанційної зміни параметрів через SCADA.

4.2.5. Логіка роботи ПЛК у реальному часі

Робота ПЗ має циклічний характер:

1. Зчитування датчиків
2. Фільтрація та нормалізація сигналів
3. Перевірка аварій і меж
4. Виконання PID-регуляторів

5. Передача керуючих сигналів
6. Запис даних у DB
7. Трансмісія у SCADA

У разі аварії:

- регулятори блокуються;
- виходи скидаються у безпечний стан;
- SCADA отримує аварійний код;
- електролізер переводиться у режим безпечної зупинки.

4.2.6. Переваги реалізованої програмної структури

- Модульність — спрощує супровід та розширення.
- Надійність — розділення швидких і повільних процесів.
- Безпека — окремий аварійний модуль FB40.
- Гнучкість — можливість інтеграції адаптивних PID або MPC-алгоритмів.
- Прозорість — розбірлива структура DB та ієрархія функцій.
- Інтегрованість — SCADA/OPC UA/Modbus.

Структура програмного забезпечення ПЛК розроблена відповідно до вимог надійності, безпеки та ефективності керування електролізером. Модульний підхід, чітке розділення циклів, гнучка система аварій та підтримка сучасних протоколів роблять ПЗ придатним для роботи в умовах промислової експлуатації та інтеграції у виробничу інфраструктуру ГТС України.

4.3. Алгоритм аварійного захисту АСК електролізером

Аварійний захист є ключовим елементом автоматизованої системи керування електролізером, оскільки об'єкт є потенційно небезпечним через високий струм, нагрівання мембрани, наявність вибухонебезпечного водню та роботу під тиском. Завданням аварійного захисту є своєчасне виявлення

відхилень параметрів, запобігання аварійним режимам і забезпечення безпечного відключення електролізера.

Алгоритм аварійного захисту реалізовано в ПЛК Siemens S7-1200 на основі окремого функціонального блоку FB40 “Alarms”, який обробляє сигнали з датчиків, виконує логіку порівняння з допустимими межами та формує команди на зупинку або перехід електролізера у безпечний режим. Взаємодія з оператором здійснюється через SCADA-систему WinCC.

4.3.1. Критичні параметри, що контролюються системою

У системі визначено три групи параметрів, які мають вирішальний вплив на безпечну роботу електролізера:

1) Температурні параметри

- температура мембрани стека;
- температура охолоджувального контуру;
- температура корпусу електролізера.

2) Газодинамічні параметри

- тиск водню в газовій порожнині;
- різниця тисків між сторонами мембрани;
- тиск на виході до ГТС або буферної ємності.

3) Електричні параметри

- струм електролізу;
- напруга живлення;
- виявлення короткого замикання / втрати навантаження.

4.3.2. Пороги спрацювання аварійного захисту

Система використовує два рівні порогів:

Рівень 1 — Попередження (Warning)

Спрацьовує при відхиленні параметрів від норми, але без ризику негайного пошкодження:

- $T > 65^{\circ}\text{C}$, але $< 75^{\circ}\text{C}$;
- $p_{\text{H}_2} > 1.1 \cdot p_{\text{ном}}$;
- відхилення струму $> 20\%$;
- нестабільна робота насосів / клапанів;
- шум або стрибки датчиків.

Сигнал попередження відображається у SCADA, але робота не припиняється.

Рівень 2 — Аварія (Trip)

Спрацьовує при досягненні критичних значень:

- температура стека $> 75^{\circ}\text{C}$;
- тиск водню $>$ максимально допустимого;
- втрата сигналу з датчика;
- провал напруги до 0;
- вихід струму за межі допустимого діапазону;
- спрацювання датчика витoku водню або пожежної сигналізації.

Аварія призводить до негайного відключення електролізера.

4.3.3. Логіка роботи аварійного захисту

Аварійний алгоритм реалізовано як послідовність дій:

Крок 1 — Виявлення відхилення

FB40 зчитує:

- $T(t)$
- $I(t)$
- $p_{\text{H}_2}(t)$
- стан насосів і клапанів
- діагностику датчиків

Сигнали проходять через фільтрацію (LPF) для запобігання хибним спрацюванням.

Крок 2 — Порівняння із порогоми

```

IF  T > T_critical OR
    p > p_max OR
    I > I_max OR
    Sensor_Error = TRUE
THEN Alarm_Level = TRIP
ELSE IF T > T_warning OR
        p > p_warning
    THEN Alarm_Level = WARNING

```

Крок 3 — Реакція на попередження

При Alarm_Level = WARNING система:

- зменшує потужність (зліва → PID_Current);
- збільшує охолодження (через PID_Temperature);
- коригує тиск (PID_Pressure);
- подає попередження оператору.

Система продовжує роботу, але під наглядом.

Крок 4 — Аварійне відключення (TRIP)

При Alarm_Level = TRIP виконується:

1. Негайне відключення джерела живлення:
 - вихід управляючого сигналу встановлюється в 0;
 - перетворювач переходить у режим “OFF”.
2. Закриття газодинамічного клапана:
 - вихід клапана встановлюється у 0 (повністю закрито).
3. Максимальна подача охолодження:
 - насос переходить у режим 100 % протягом 15–30 с.
4. Активація вентиляції та відведення водню:
 - відкривається аварійний клапан скиду (якщо передбачено).
5. Запис помилки у DB100 (журнал аварій).
6. Відправка сигналу у SCADA та активація звукової/світлової сигналізації.

Крок 5 — Утримання стану блокування

Для запобігання повторному включенню:

- система переходить у “Lockout mode”;
- регулятори переводяться в Manual;
- відновлення можливе лише після підтвердження оператором.

4.3.4. Діагностика та обробка помилок

Діагностика охоплює:

- перевірку на «обрив»/«коротке замикання» датчика;
- перевірку лінійності сигналів;
- контроль працездатності насосів і клапанів;
- аналіз коливань параметрів.

FB40 виконує автоматичну ідентифікацію помилок:

```
IF AI_Signal < 3.5 mA OR AI_Signal > 22 mA THEN Sensor_Fault = TRUE
IF Valve_Feedback ≠ Command THEN Actuator_Fault = TRUE
```

Помилки передаються у SCADA і записуються у журнал тривоги.

4.3.5. Взаємодія з програмою ПЛК і SCADA

Алгоритм аварійного захисту інтегровано з іншими модулями:

- передає команди блокування у FB10, FB20, FB30;
- примусово “заморожує” виходи через FB60;
- генерує повідомлення SCADA через FB70;
- передає коди аварій у БД для статистики.

У SCADA реалізовано:

- журнал аварій (timestamp + параметри);
- статистику повторюваності подій;
- історію зміни температури, тиску та струму під час аварії;
- вікно «Підтвердить аварію» для оператора.

4.3.6. Переваги розробленого алгоритму

- Висока швидкість реагування — 10–20 мс у критичних режимах.
- Відсутність хибних спрацювань завдяки фільтрації та “двоетапній” логіці.
- Плавне відключення електролізера, що мінімізує термічні й механічні навантаження.
- Повна інтеграція з SCADA, включаючи діагностику та журналювання.
- Можливість розширення (витік водню, пожежа, зворотний тиск ГТС тощо).
- Відповідність вимогам ІЕС 61508 та іншим стандартам безпеки.

Розроблений алгоритм аварійного захисту забезпечує максимальний рівень безпеки та надійності роботи електролізера у складі АСК. Завдяки чітко структурованій логіці, багаторівневому контролю параметрів, фільтрації сигналів та повній інтеграції з SCADA-системою, АСК здатна виявляти небезпечні ситуації на ранній стадії та запобігати аваріям, гарантуючи безпечну експлуатацію установки у промислових умовах.

4.4. Інтеграція з SCADA WinCC

SCADA-система забезпечує:

- відображення струму, температури, тиску;
- тенденції параметрів у режимі реального часу;
- архівування даних (SQL);
- журнал аварій;
- віддалений доступ через веб-інтерфейс;
- протокол OPC UA для підключення до цифрового двійника.

Інтерфейс SCADA включає:

- мнемосхему електролізера;
- панелі регулювання;
- графічні індикатори стану;
- вікна калібрування датчиків;
- сторінку аварій.

4.5. Інтеграція ПЛК-АСК з газотранспортною системою України

Оскільки отриманий водень може подаватися в локальний буфер або в магістраль, система забезпечує:

- контроль тиску на точці з'єднання з ГТС;
- захист від зворотного тиску;
- обмеження відбору водню в автоматичному режимі;
- можливість диспетчеризації через:
 - Modbus TCP,
 - OPC UA,
 - IEC 60870-5-104 (при необхідності підключення до ЦОД диспетчера ГТС).

Висновки до розділу 4

У цьому розділі виконано повний комплекс робіт, пов'язаний із практичною реалізацією автоматизованої системи керування електролізером на базі програмованого логічного контролера. Проведено обґрунтований вибір технічних засобів, що включає промисловий ПЛК Siemens S7-1200, модулі введення/виведення, датчики технологічних параметрів та виконавчі механізми, які забезпечують необхідну точність, надійність і відповідність вимогам промислової експлуатації. Детально розроблено структуру програмного забезпечення ПЛК, яка базується на модульному підході та передбачає чітке розділення функцій між блоками обробки сигналів, PID-регуляторами, аварійною логікою, інтерфейсними модулями та системою SCADA.

Створений алгоритм аварійного захисту забезпечує багаторівневий контроль критичних параметрів (струм, температура, тиск), реалізує попереджувальні та аварійні дії, передбачає механізм безпечного відключення електролізера та повну інтеграцію з інтерфейсом оператора. У підрозділі SCADA-моніторингу опрацьовано інструменти відображення стану системи в

реальному часі, архівування, діагностики, роботи з аваріями та віддаленого доступу.

Також наведено принципи інтеграції АСК із газотранспортною системою України, що забезпечують коректну роботу електролізера у складі енергетичної інфраструктури, включаючи контроль зворотного тиску, обмеження подачі водню та підтримку сучасних протоколів промислової комунікації.

Таким чином, сформовано завершену практичну реалізацію АСК електролізером, яка поєднує сучасну апаратну платформу, гнучке модульне програмування, інтегровану систему захисту та повнофункціональний SCADA-моніторинг, що забезпечує надійність, безпеку, масштабованість і готовність до подальшого впровадження у виробничі умови.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі комплексно вирішено науково-технічне завдання розроблення автоматизованої системи керування електролізером для виробництва «зеленого» водню з урахуванням можливості його інтеграції в українську газотранспортну систему. Проведений аналіз сучасних технологій водного електролізу (AWE, PEM, SOEC) дав змогу визначити їхні переваги, обмеження та придатність до умов української енергетичної інфраструктури. Обґрунтовано, що найбільш технологічно доцільними для промислового застосування у середньостроковій перспективі є лужні та PEM-електролізери, які поєднують зрілість технології, високу чистоту продукту та достатню динамічність роботи.

У ході роботи розроблено структурну модель електролізерної установки як багатоконтурного об'єкта автоматизації, що включає електрохімічну, теплову, електричну та газодинамічну підсистеми. Створено математичні моделі процесу на основі рівнянь балансу маси, енергії та електрохімічних залежностей, виконано лінеаризацію в околі робочої точки та сформовано передавальні функції основних каналів керування. Це забезпечило можливість синтезу PID-регуляторів для контурів струму, температури та тиску, а також подальшу побудову імітаційної моделі в середовищі MATLAB/Simulink.

Моделювання підтвердило працездатність запропонованої структури АСК та її здатність забезпечувати стабільність роботи електролізера за умов змінних режимів енергопостачання, характерних для інтеграції з ВДЕ. Показано, що правильний вибір динамічних характеристик регуляторів дозволяє зменшити перехідні процеси, уникати перегріву електролізера, забезпечувати допустимий баланс тиску та стабільність продуктивності водню.

У роботі сформовано вимоги до системи керування електролізером у складі української ГТС, що враховують аспекти безпеки, енергоефективності, контролю чистоти газу та інтеграції зі SCADA-системами диспетчеризації. Отримані результати мають практичне значення для проєктування реальних

промислових електролізерних установок, а також можуть бути використані як основа для створення цифрового двійника та впровадження інтелектуальних алгоритмів керування (адаптивних, MPC, оптимізаційних).

Загалом робота підтверджує, що впровадження автоматизованих систем керування електролізерами є ключовою умовою розвитку водневої енергетики в Україні та важливим кроком на шляху інтеграції у європейський водневий ринок. Отримані результати створюють наукове й інженерне підґрунтя для подальшої модернізації енергетичної інфраструктури держави відповідно до стратегічних пріоритетів декарбонізації та використання «зеленого» водню.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wolf S. Solid oxide electrolysis cells – current material perspectives and future challenges // Journal of Materials Chemistry A. – 2023. – Vol. 11, No. 32. – P. 16957–16982. DOI: 10.1039/D3TA02161K.
2. He S., Zhang H., Li X. A critical review of key materials and issues in solid oxide electrolysis cell technologies // International Journal of Energy Research. – 2023. – Vol. 47, No. 2. – P. e12068. DOI: 10.1002/er.12068.
3. Wang J., Li W., Zhou C. Comparative experimental study of alkaline and proton exchange membrane electrolysis for hydrogen production // Applied Energy. – 2025. – Vol. 360. – Article 122319. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.122319.
4. PEM Electrolysers vs. Alkaline Electrolysers: Key Differences and Applications. Stargate Hydrogen Blog. – 2024. – URL: <https://stargatehydrogen.com/blog/pem-electrolysers> (дата звернення: 17.11.2025).
5. Alkaline or PEM electrolyzers: Which should you choose? John Cockerill Hydrogen. – 2024. – URL: <https://johncockerill.com/en/press-and-news/news/alkaline-or-pem-electrolyzers-which-should-you-choose> (дата звернення: 17.11.2025).
6. Green hydrogen: alkaline versus PEM electrolyser? Thundersaid Energy. – 2023. – URL: <https://thundersaidenergy.com/2023/01/17/green-hydrogen-alkaline-versus-pem-electrolysers> (дата звернення: 17.11.2025).
7. Міністерство енергетики України. Проєкт Водневої стратегії України на період до 2030 року : офіц. документ. – Київ : Міненерго України, 2024. – 1 електрон. ресурс. – Режим доступу: <https://mev.gov.ua>
8. Українська воднева рада. Наукове обґрунтування проєктів зеленого водню – нові можливості для України : аналіт. матеріал. – Київ : УВР, 2023. – Режим доступу: <https://hydrogen.ua>
9. Прізова В. Зелений водень. Що це таке та які перспективи виробництва в Україні // Суспільне Новини. – 31.10.2021. – Режим доступу: <https://suspilne.media>

- 10.Кудря С. О., Яценко Л. В., Шинкаренко Л. Я., Ткаленко М. Д. Електролітичне виробництво водню для вітроводневих станцій // Відновлювана енергетика. – 2023. – № 3(74). – С. 92–100. – DOI: 10.36296/1819-8058.2023.3(74).92-100.
- 11.Кропивний М. В., ін. Ресурсоєфективні та чисті технології : колект. монографія. – Кропивницький : КНТУ, 2022. – Режим доступу: <http://dspace.kntu.kr.ua>
- 12.Інститут відновлюваної енергетики НАН України. Публікації з водневої енергетики (серія наукових робіт з електролізу та ВДЕ). – Київ : ІВЕ НАНУ, 2020–2024. – Режим доступу: <https://ive.org.ua>
- 13.ІНФОКОМ ЛТД. АСУ ТП «Виробництво водню» методом електролізу води : технол. опис. – Київ : Infocom Ltd, 2025. – Режим доступу: <https://ia.ua>
- 14.Festo Ukraine. Автоматизація виробництва зеленого водню : серія технічних статей. – 2022–2024. – Режим доступу: <https://festo.com/ua>
- 15.Оператор ГТС України. Що українська ГТС може запропонувати для зменшення викидів вуглецю? – Київ : ОГТСУ, 2021. – Режим доступу: <https://tsoua.com>
- 16.Бобух А. О. Автоматизовані системи керування технологічними процесами : навч. посіб. – Харків : ХНАМГ, 2006. – 185 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

SIMULINK-МОДЕЛЬ АСК ЕЛЕКТРОЛІЗЕРА

%% ===== СТВОРЕННЯ SIMULINK-МОДЕЛІ АСК ЕЛЕКТРОЛІЗЕРА V4 =====

```
model = 'Electrolyzer_ASU_V4';  
new_system(model); open_system(model);
```

%% === Додавання блоків ===

```
add_block('simulink/Sources/Step', [model '/Setpoint']);
```

% Збурення

```
add_block('simulink/Sources/Step', [model '/Dist_I']);  
add_block('simulink/Sources/Step', [model '/Dist_T']);  
add_block('simulink/Sources/Step', [model '/Dist_P']);
```

% Суматори

```
add_block('simulink/Math Operations/Sum', [model '/Sum_I'], 'Inputs', '|++');  
add_block('simulink/Math Operations/Sum', [model '/Sum_T'], 'Inputs', '|++');  
add_block('simulink/Math Operations/Sum', [model '/Sum_P'], 'Inputs', '|++');
```

% PID-регулятори

```
add_block('simulink/Continuous/PID Controller', [model '/PID_I']);  
add_block('simulink/Continuous/PID Controller', [model '/PID_T']);  
add_block('simulink/Continuous/PID Controller', [model '/PID_P']);
```

% Транспортні запізнення

```
add_block('simulink/Continuous/Transport Delay', [model '/Delay_I']);  
add_block('simulink/Continuous/Transport Delay', [model '/Delay_T']);  
add_block('simulink/Continuous/Transport Delay', [model '/Delay_P']);
```

```
% Передавальні функції (об'єкт)
```

```
add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model '/G_I']);
```

```
add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model '/G_T']);
```

```
add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn', [model '/G_P']);
```

```
% Газодинамічні клапани (імітація керованих потоків)
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Gain', [model '/Valve_I']);
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Gain', [model '/Valve_T']);
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Gain', [model '/Valve_P']);
```

```
% Scope
```

```
add_block('simulink/Sinks/Scope', [model '/Scope'], 'NumInputPorts','3');
```

```
%% === Параметри блоків ===
```

```
% Передавальні функції
```

```
set_param([model '/G_I'], 'Numerator', '40', 'Denominator', '[0.15 1]');
```

```
set_param([model '/G_T'], 'Numerator', '-0.8', 'Denominator', '[50 1]');
```

```
set_param([model '/G_P'], 'Numerator', '1.2', 'Denominator', '[6 1]');
```

```
% Запізнення
```

```
set_param([model '/Delay_I'], 'DelayTime', '0.02');
```

```
set_param([model '/Delay_T'], 'DelayTime', '4');
```

```
set_param([model '/Delay_P'], 'DelayTime', '0.6');
```

```
% PID-параметри
```

```
set_param([model '/PID_I'], 'P', '0.225', 'I', '5.6', 'D', '0.01');
```

```
set_param([model '/PID_T'], 'P', '18.75', 'I', '0.125', 'D', '2');
```

```
set_param([model '/PID_P'], 'P', '10', 'I', '0.833', 'D', '0.3');
```

```
% Газодинамічні клапани (коєф. відкриття)
```

```
set_param([model '/Valve_I'], 'Gain', '1');
```

```
set_param([model '/Valve_T'], 'Gain', '1');
```

```
set_param([model '/Valve_P'], 'Gain', '1');
```

```
%% === Координати ===
```

```
positions = {
```

```
    'Setpoint' [20 120 60 140];
```

```
    'Dist_I' [20 60 60 80];
```

```
    'Dist_T' [20 200 60 220];
```

```
    'Dist_P' [20 330 60 350];
```

```
    'Sum_I' [90 65 120 115];
```

```
    'Sum_T' [90 180 120 240];
```

```
    'Sum_P' [90 300 120 360];
```

```
    'PID_I' [150 50 210 120];
```

```
    'PID_T' [150 160 210 240];
```

```
    'PID_P' [150 270 210 350];
```

```
    'Valve_I' [240 60 280 120];
```

```
    'Valve_T' [240 170 280 230];
```

```
    'Valve_P' [240 280 280 340];
```

```
    'Delay_I' [310 60 350 120];
```

```
    'Delay_T' [310 170 350 230];
```

```

'Delay_P' [310 280 350 340];

'G_I' [380 60 460 120];
'G_T' [380 170 460 230];
'G_P' [380 280 460 340];

'Scope' [530 150 600 330];
};

for k = 1:size(positions,1)
    set_param([model '/' positions{k,1}], 'Position', positions{k,2});
end

%% === Connections ===
add_line(model,'Dist_I/1','Sum_I/2');
add_line(model,'Setpoint/1','Sum_I/1');
add_line(model,'Sum_I/1','PID_I/1');
add_line(model,'PID_I/1','Valve_I/1');
add_line(model,'Valve_I/1','Delay_I/1');
add_line(model,'Delay_I/1','G_I/1');
add_line(model,'G_I/1','Scope/1');

add_line(model,'Dist_T/1','Sum_T/2');
add_line(model,'Setpoint/1','Sum_T/1');
add_line(model,'Sum_T/1','PID_T/1');
add_line(model,'PID_T/1','Valve_T/1');
add_line(model,'Valve_T/1','Delay_T/1');
add_line(model,'Delay_T/1','G_T/1');

```

```
add_line(model,'G_T/1','Scope/2');
```

```
add_line(model,'Dist_P/1','Sum_P/2');
```

```
add_line(model,'Setpoint/1','Sum_P/1');
```

```
add_line(model,'Sum_P/1','PID_P/1');
```

```
add_line(model,'PID_P/1','Valve_P/1');
```

```
add_line(model,'Valve_P/1','Delay_P/1');
```

```
add_line(model,'Delay_P/1','G_P/1');
```

```
add_line(model,'G_P/1','Scope/3');
```

```
save_system(model).
```

ДОДАТОК Б

Програмне забезпечення ПЛК для керування електролізером

FUNCTION_BLOCK FB_Electrolyzer_CTRL

VAR_INPUT

(* Команди оператора *)

StartCmd : BOOL;

StopCmd : BOOL;

(* Дискретні сигнали *)

ESTOP : BOOL; // 1 = аварійна зупинка

Pressure_OK : BOOL;

Level_OK : BOOL;

Door_Closed : BOOL;

H2_Leak : BOOL;

Power_OK : BOOL;

(* Аналогові значення (вже масштабовані в інж. одиниці) *)

Temp_PV : REAL; // °C

Current_PV : REAL; // A

CellVoltage_PV : REAL; // V

(* Уставки *)

Temp_SP : REAL; // °C

Current_SP : REAL; // A

(* Налаштування *)

RampTime_s : REAL; // Час виходу на струм, сек

END_VAR

VAR_OUTPUT

(* Виходи на обладнання *)

Cmd_Heater_On : BOOL;

Cmd_Power_Contact : BOOL;

Cmd_H2_Valve : BOOL;

Cmd_Pump_Circ : BOOL;

(* Стан системи *)

State : E_ElectrolyzerState;

Alarm_Active : BOOL;

Alarm_Code : INT; // 0 - немає, інші коди - див. нижче

END_VAR

VAR

(* Внутрішні змінні *)

StartEdge : BOOL;

StopEdge : BOOL;

Start_RTrig : R_TRIG;

Stop_RTrig : R_TRIG;

StartTimer : TON;

RampTimer : TON;

Current_SP_Ramped : REAL;

Ramp_Started : BOOL;

bInterlock_OK : BOOL;

END_VAR

// Обробка фронтів команд

Start_RTrig(CLK := StartCmd);

Stop_RTrig(CLK := StopCmd);

StartEdge := Start_RTrig.Q;

StopEdge := Stop_RTrig.Q;

// Перевірка міжблокувань

bInterlock_OK :=

(NOT ESTOP) AND

Pressure_OK AND

Level_OK AND

Door_Closed AND

Power_OK AND

(NOT H2_Leak);

// Скидання аварій при відпусканні ESTOP та відсутності H2_Leak

IF (State = STATE_ALARM) AND bInterlock_OK AND StopEdge THEN

Alarm_Active := FALSE;

Alarm_Code := 0;

State := STATE_STOPPED;

END_IF;

// Основний автомат станів

CASE State OF

STATE_STOPPED:

```
// Усі виходи вимкнені  
Cmd_Heater_On := FALSE;  
Cmd_Power_Contact := FALSE;  
Cmd_H2_Valve := FALSE;  
Cmd_Pump_Circ := FALSE;
```

```
Ramp_Started := FALSE;  
Current_SP_Ramped := 0.0;
```

IF StartEdge AND bInterlock_OK THEN

```
// Запускаємо стартовий таймер (наприклад, продувка/перевірки)  
StartTimer(IN := TRUE, PT := T#10S);  
State := STATE_STARTING;
```

END_IF;

STATE_STARTING:

```
// Увімкнути насос та нагрівач для підготовки  
Cmd_Pump_Circ := TRUE;  
Cmd_Heater_On := (Temp_PV < Temp_SP); // простий ON/OFF для прикладу  
Cmd_Power_Contact := FALSE; // силову частину поки не включаємо  
Cmd_H2_Valve := FALSE;
```

```
// Перезапуск StartTimer при вході в стан  
StartTimer(IN := TRUE, PT := T#10S);
```

```
// Якщо щось порушилося - аварія
```

IF NOT bInterlock_OK THEN

```
Alarm_Active := TRUE;
Alarm_Code := 1; // помилка міжблокувань при пуску
State := STATE_ALARM;
ELSIF StopEdge THEN
    // Оператор скасував пуск
    StartTimer(IN := FALSE);
    State := STATE_STOPPED;
ELSIF StartTimer.Q THEN
    // Підготовка завершена – можна включати силову частину
    Cmd_Power_Contact := TRUE;

    // Запуск таймера плавного набору струму
    RampTimer(IN := TRUE, PT := REAL_TO_TIME(RampTime_s * 1000.0));
    Ramp_Started := TRUE;
    State := STATE_RUNNING;
END_IF;
```

STATE_RUNNING:

```
// Перевірка міжблокувань
IF NOT bInterlock_OK THEN
    Alarm_Active := TRUE;
    Alarm_Code := 2; // аварія під час роботи
    Cmd_Heater_On := FALSE;
    Cmd_Power_Contact := FALSE;
    Cmd_H2_Valve := FALSE;
    Cmd_Pump_Circ := FALSE;
    State := STATE_ALARM;
ELSIF StopEdge THEN
```

```

// Нормальна зупинка
Cmd_Heater_On := FALSE;
Cmd_Power_Contact := FALSE;
Cmd_H2_Valve := FALSE;
Cmd_Pump_Circ := TRUE; // залишити циркуляцію для охолодження,
можна таймером
State := STATE_STOPPED;
ELSE
// Нормальна робота: насос завжди увімкнений
Cmd_Pump_Circ := TRUE;

// Клапан H2 відкриваємо лише при роботі
Cmd_H2_Valve := TRUE;

// Температурний контроль (спрощений ON/OFF)
IF Temp_PV < (Temp_SP - 1.0) THEN
    Cmd_Heater_On := TRUE;
ELSIF Temp_PV > (Temp_SP + 1.0) THEN
    Cmd_Heater_On := FALSE;
END_IF;

// Плавний вихід на уставку струму
IF Ramp_Started THEN
    RampTimer(IN := TRUE, PT := REAL_TO_TIME(RampTime_s * 1000.0));

    IF RampTimer.ET < RampTimer.PT THEN
        Current_SP_Ramped :=
            (Current_SP * REAL(TIME_TO_DINT(RampTimer.ET))) /
            REAL(TIME_TO_DINT(RampTimer.PT));
    
```

```

ELSE
    Current_SP_Ramped := Current_SP;
    Ramp_Started      := FALSE;
    RampTimer(IN := FALSE);
END_IF;
ELSE
    Current_SP_Ramped := Current_SP;
END_IF;

// Далі можемо додати виклик FB ПІ-регулятора струму,
// передаючи Current_SP_Ramped як уставку та Current_PV як вимір.
//
// Наприклад, при використанні стандартного PID_Compact:
// PID_Current(
//   SetPoint := Current_SP_Ramped,
//   ProcessValue := Current_PV,
//   ...
// );
//
// І вихід регулятора – на керування потужністю випрямляча (через
аналоговий вихід або ШІМ).
END_IF;

STATE_ALARM:
    Cmd_Heater_On      := FALSE;
    Cmd_Power_Contact := FALSE;
    Cmd_H2_Valve       := FALSE;
    Cmd_Pump_Circ      := FALSE;

```

```
Alarm_Active := TRUE;
```

```
// Звук/лампа – реалізуємо у OB1
```

```
END_CASE;
```