

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ
ДЛЯ ГЕНЕРУВАННЯ ВОДНЮ**

Виконав студент IV курсу, групи ЕТс-41
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Карий Д.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Зінь М.М.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мовчан Л.Т.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Голотенко О.С.

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту Карому Денису Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання фотоелектричної станції для генерування водню

Керівник роботи к.т.н., доц. ЗіньМ.М.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «31» зрудня 2025 року № 4/7-1164

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 20.06.2026

3. Вихідні дані до роботи

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз виробництва водню

2. Опис моделі станції

3. Опис основних складових станції

4. Система зберігання водню

5. Моделювання та аналіз результатів

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

1. Аналіз граничних умов для визначення ціни на електроенергію у вартості виробництва водню

2. Модель виробництва водню

3. Схеми складових станції в Simulink

4. Модель балону для зберігання водню

5. Ефективність виробництва водню

6. Вхідні значення параметрів водню

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТс–41. – Т. : ТНТУ, 2026.

Стор. 62; рис. 23; табл. 6; креслень (презентацій) —; джерел 32.

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: «Моделювання фотоелектричної станції для генерування водню».

Метою роботи є розробка імітаційної моделі фотоелектричної станції для генерування водню шляхом електролізу, оцінка її характеристик та ефективності.

Розроблено модель фотоелектричної станції для виробництва водню, що складається з фотоелектричної батареї, трифазного інвертора на базі 3-рівневого IGBT-мосту з широтно-імпульсною модуляцією, понижувального трансформатора, електролізера PEM та системи зберігання водню на базі балонів низького тиску. Виробництво водню має лінійний характер зростання, що свідчить про стабільну роботу електролізера. Розраховано показник LCOE для окремих компонентів: фотоелектричні панелі, електролізер, система зберігання водню. Загальний показник LCOE комбінованої системи становить 0,29974 €/кВт·год.

Отримані результати підтверджують технічну можливість та економічну доцільність використання фотоелектричної станції для виробництва водню як відновлюваного джерела енергії. Розроблена модель може бути використана як інструмент проєктування при створенні реальних установок для виробництва зеленого водню.

Ключові слова: ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СТАНЦІЯ, ЗЕЛЕНИЙ ВОДЕНЬ, ЕЛЕКТРОЛІЗ, ВОДНЕВА ЕНЕРГЕТИКА

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	9
1.1 Стан виробництва водню з використанням фотоелектричних батарей.....	9
1.2 Перспективи виробництва водню.....	12
1.3 Методи виробництва водню.....	13
1.4 Електроліз води як метод отримання зеленого водню.....	14
1.5 Принцип роботи фотоелектричної системи	14
1.6 Інтеграція фотоелектричних систем з електролізерами.....	15
1.7 Електролізери для виробництва водню	16
1.8 Принцип роботи PEM електролізера	17
1.9 Висновки до розділу	18
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	14
2.1 Опис блок-схеми системи виробництва водню	20
2.2 Фотоелектрична батарея.....	21
2.3 Трифазний перетворювач з постійного в змінний струм.....	22
2.4 Система керування інвертором.....	23
2.5 Регулятор постійного струму.....	25
2.6 PLL та вимірювання.....	25
2.7 Вимірювання струму.....	26
2.8 Генерація опорної напруги.....	27
2.9 Трансформатор	28
2.10 Електролізний стек PEM	28
2.11 Система зберігання водню	30
2.12 Висновки до розділу	32
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	31
3.1 Вихідні дані для моделювання.....	31
3.2 Виробництво водню	35

3.3 Ефективність виробництва водню.....	36
3.4 Змінний струм.....	36
3.5 Напруга змінного струму	37
3.6 Потужність змінного струму.....	38
3.7 Напруга постійного струму та інтенсивність сонячного випромінювання	39
3.8 Потужність постійного струму	40
3.9 Струм електролізера	41
3.10 Розрахунок економічних показників системи.....	42
3.11 LCOE електролізера та водню	45
3.12 Дані для розрахунку економічних показників виробництва водню.....	47
3.13 Результати розрахунку економічних показників комбінованої системи	48
3.14 Висновки до розділу	49
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	51
4.1 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання.....	51
4.2 Причини електротравм, напруга кроку.....	52
4.3 Заходи безпеки при монтажі енергоустановок	54
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	56
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	58

ВСТУП

Актуальність теми.

Сьогодні світова енергетика переживає період глибокої трансформації, зумовленої необхідністю подолання наслідків зміни клімату, скорочення викидів парникових газів та поступової відмови від викопних джерел енергії. Відповідно до Паризької угоди та Європейського зеленого курсу, Україна, як і більшість розвинених країн, взяла на себе зобов'язання щодо досягнення вуглецевої нейтральності до 2050 року. У цьому контексті особливого значення набуває розвиток технологій виробництва, накопичення та використання водню як екологічно чистого енергоносія.

Водень посідає особливе місце серед альтернативних видів палива завдяки його унікальним властивостям: високій енергоємності (140 МДж/кг, що більш ніж удвічі перевищує показники традиційних твердих палив), екологічній чистоті продуктів згоряння (в результаті окиснення утворюється тільки вода) та можливості виробництва з відновлюваних джерел енергії. На сьогодні водень активно використовується у хімічній промисловості для виробництва аміаку, метанолу, у процесах гідрування та інших технологіях. Однак його роль як універсального енергоносія для енергетики, транспорту та побуту ще тільки формується.

Серед різних методів виробництва водню особливий інтерес представляє електроліз води з використанням електроенергії від фотоелектричних систем. Цей підхід дозволяє отримувати так званий "зелений водень", тобто водень з нульовим вуглецевим слідом, що повністю відповідає принципам сталого розвитку. Сонячна енергетика є однією з найдинамічніших галузей відновлюваної енергетики: за останнє десятиліття вартість фотоелектричних модулів знизилася більш ніж у 10 разів, а ККД комерційних кремнієвих панелей досяг рівня 20–22%. За прогнозами Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA), сонячна енергетика стане домінуючим джерелом електроенергії в світі до 2030 року.

Інтеграція фотоелектричних систем з електролізерами води створює синергетичний ефект: надлишкова електроенергія, вироблена в пікові години сонячної активності, може бути ефективно перетворена на водень і збережена для подальшого використання в періоди дефіциту генерації. Такі гібридні системи вирішують проблему переривчастості сонячної енергії, яка традиційно обмежувала масштабне впровадження фотоелектричних станцій. Дослідження вчених довели технічну можливість та економічну доцільність таких комплексних рішень.

Україна має значний потенціал для розвитку сонячної енергетики завдяки сприятливим кліматичним умовам (середньорічна кількість сонячних годин становить 1500–2200). Водночас енергетична система країни потребує диверсифікації джерел генерації та створення систем накопичення енергії для забезпечення балансу між попитом і пропозицією. Розробка та впровадження фотоелектричних станцій для виробництва водню можуть стати важливим елементом стратегії енергонезалежності та декарбонізації української економіки.

Таким чином, дослідження в галузі моделювання фотоелектричних станцій для генерування водню є надзвичайно актуальним, оскільки сприяє розвитку вітчизняної науково-технічної бази в сфері водневої енергетики, створенню ефективних інструментів проектування та оптимізації таких систем, а також підготовці кваліфікованих фахівців для роботи в цій перспективній галузі.

Мета кваліфікаційної роботи: розробка імітаційної моделі фотоелектричної станції для генерування водню шляхом електролізу, оцінка її характеристик та ефективності.

Відповідно до даної метою ставляться такі **завдання**:

1. Провести аналітичний огляд сучасних методів виробництва водню, зокрема з використанням відновлюваних джерел енергії.
2. Розробити структурну схему фотоелектричної станції для генерування водню, що включає фотоелектричну батарею, трифазний інвертор,

понижувальний трансформатор, електролізер із протонно-обмінною мембраною та систему зберігання водню.

3. Реалізувати розрахункову модель системи в середовищі MATLAB/Simulink та провести комп'ютерне моделювання роботи станції за різних умов експлуатації.

4. Провести аналіз результатів моделювання.

5. Виконати розрахунок показників економічної ефективності системи та визначити рівнозначну вартість електроенергії для окремих компонентів та комбінованої системи.

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 частин, висновків та переліку посилань.

Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – 62 арк. формату А4, графічна частина – ___ аркушів презентації.

Кваліфікаційна робота виконана відповідно до вимог [1].

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Стан виробництва водню з використанням фотоелектричних батарей

Світове споживання енергії стрімко зростає під впливом збільшення чисельності населення та підвищення рівня життя. Сьогодні, у зв'язку з підвищенням обізнаності щодо проблем глобального потепління та забруднення навколишнього середовища, люди усвідомлюють необхідність використання виключно відновлюваних джерел енергії [2,3]. Серед різних носіїв енергії водень видається потенційним чистим та стійким носієм, оскільки він виділяє лише воду, а не вуглець. Завдяки своїм привабливим властивостям та високій енергетичній щільності 140 МДж/кг — що більш ніж удвічі перевищує показник типових твердих палив (50 МДж/кг) — водень пропонує переконливе рішення для задоволення наших енергетичних потреб. Зростання населення, швидка урбанізація, збільшення попиту на енергію, вичерпання ресурсів викопного палива та вплив викидів парникових газів на навколишнє середовище прискорили розвиток систем чистої та відновлюваної енергії у всьому світі. Одним із широко визнаних методів є технологія сонячних фотоелектричних (PV) систем, яка безпосередньо перетворює сонячне світло на електроенергію [4-11]. Для прогнозування продуктивності сонячних фотоелектричних систем застосовуються різні підходи, включаючи прогнозування їхньої вихідної потужності та ефективності на основі таких ключових факторів, як інтенсивність сонячного світла, температура та рівень запиленості, а також аналіз їхніх характеристик струм-напруга (I-V) [10-12].

Зростання залежності від викопного палива висвітлює численні проблеми, що спонукало до переходу на більш масштабне та ефективне виробництво та використання чистої енергії. Більша частина нашої енергії походить з невідновлюваних джерел, таких як газ, нафта та вугілля, що спричиняє різні економічні, політичні та екологічні проблеми. Відповідно,

останніми роками зростає інтерес до водню як до чистого та ефективного джерела енергії. Водень має потенціал для зменшення негативного впливу на довкілля, пов'язаного зі споживанням викопного палива. Наразі водень переважно використовується у таких сферах, як виробництво аміаку, збагачення ґрунту та виробництво метанолу й інших хімікатів, але його роль як джерела чистої енергії також розширюється.

Відомо, що сонячне світло є важливим та екологічним джерелом енергії, і його кількість, що досягає Землі, достатня для задоволення всіх потреб людства. Занепокоєння щодо глобального потепління та зниження вартості нових фотоелектричних систем порівняно з традиційними призвели до зростання використання фотоелектричних елементів для виробництва чистої енергії. Хоча ефективність фотоелектричних елементів покращилася і зараз становить близько 29 відсотків, комерційні системи зазвичай працюють з ефективністю 10–20 відсотків, що не дозволяє їм повною мірою конкурувати з електроенергією, виробленою з викопного палива. Такі фактори, як температура та затінення, можуть впливати на ефективність фотоелектричних елементів, тому надзвичайно важливо точно прогнозувати та оцінювати ефективність за реалістичних погодних умов [12,15].

Шоклі та Квайссер (1961) провели експеримент з поєднанням перетворювача постійного струму (DC/DC) та регулятора витрати води для підвищення виходу водню в установці фотоелектричного електролізу. Вони виявили, що інтеграція перетворювача постійного струму (DC/DC) збільшила вихід електроенергії з фотоелектричних систем та покращила координацію з електролізом. Крім того, регулювання припливу води за допомогою регулятора потоку підвищило виробництво водню завдяки його підсиленню воднем. Дослідження Qi та ін. у 2019 році передбачало використання сонячного симулятора для вивчення впливу різних довжин хвиль сонячного світла на продуктивність фотоелектричних елементів, а також на виробництво водню. Було встановлено, що частина сонячного випромінювання поглинається при використанні відбивального дзеркала, внаслідок чого вихідна потужність

фотоелектричної системи знижувалася на 30 відсотків. Вчені також зазначили, що зміщення у бік коротших довжин хвиль дозволяє сфокусувати більше енергії, тим самим підвищуючи ефективність як фотоелектричної системи, так і електролізера [16].

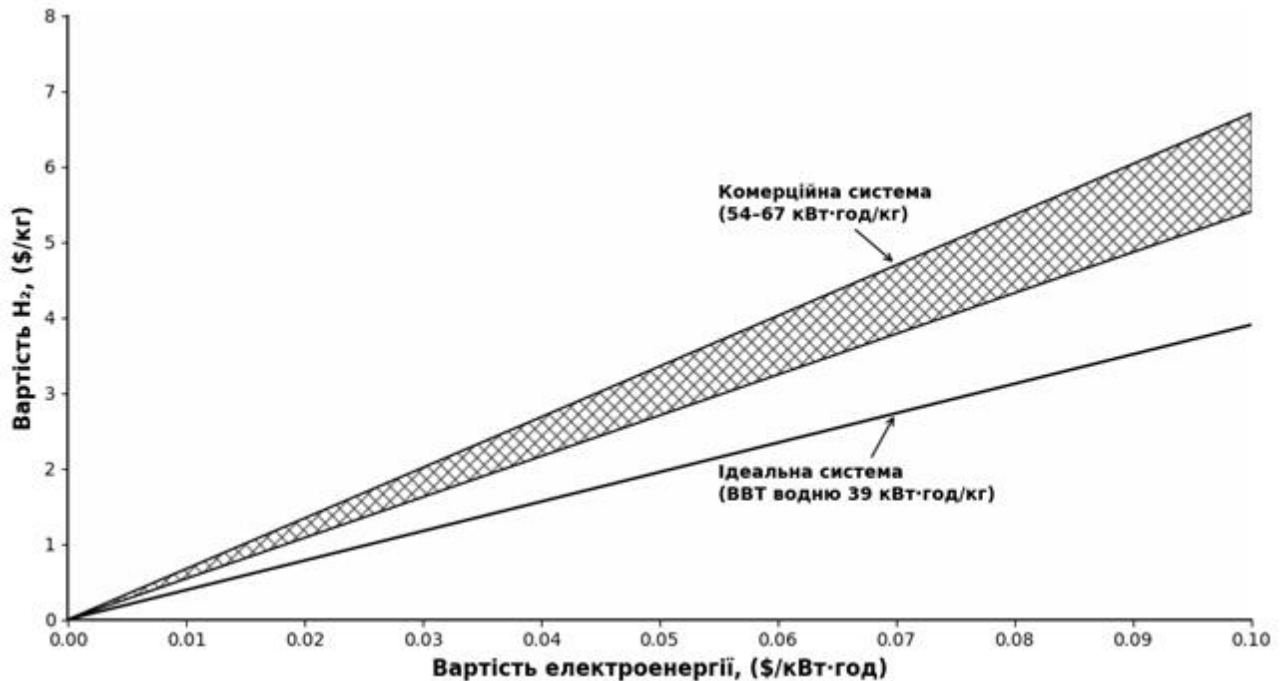


Рисунок 1.1 – Аналіз граничних умов для визначення ціни на електроенергію у вартості виробництва водню

Wang та ін. (2018) досліджували гібридну систему, засновану на використанні сонячного ставка, плоских колекторів та органічного циклу Ренкіна для електролітичного виробництва водню. Вони виявили, що поєднання сонячного ставка та плоского колектора підвищує температуру в системі та забезпечує кращу виробництво електроенергії. За умови максимального виробництва водню на початку дня, коли рівень сонячної радіації є високим, це дасть близько 2,25 кг водню на день [17].

Ці фактори обґрунтовують необхідність комплексних досліджень з технологічних, економічних та екологічних аспектів – від проектування до експлуатації гібридних фотоелектричних систем, побудованих на виробництві водню. Це допоможе визначити найкраще поєднання технологій

фотоелектричних систем та виробництва водню з точки зору ефективності системи, її вартості та впливу на довкілля.

1.2 Перспективи виробництва водню

Світове споживання енергії стрімко зростає під впливом збільшення чисельності населення та підвищення рівня життя. За даними Міжнародного агентства з енергетики (IEA), глобальне енергоспоживання зросло на понад 50% за останні два десятиліття, і ця тенденція зберігатиметься в майбутньому. Сьогодні, у зв'язку з підвищенням обізнаності щодо проблем глобального потепління та забруднення навколишнього середовища, постає нагальна необхідність переходу до використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Підписання Паризької угоди та прийняття Європейського зеленого курсу визначили чіткі орієнтири для скорочення викидів парникових газів та досягнення вуглецевої нейтральності до 2050 року [18]. Саме тому останніми роками значний інтерес проявляється до водню як до чистого та ефективного джерела енергії, яке має потенціал для зменшення негативного впливу на довкілля, пов'язаного зі споживанням викопного палива.

Водень є найбільш поширеним елементом у Всесвіті і відіграє ключову роль у хімічній промисловості. Наразі він переважно використовується у таких сферах, як виробництво аміаку, збагачення ґрунту та виробництво метанолу й інших хімікатів. Загальносвітове виробництво водню становить близько 95 млн тонн на рік, при цьому близько 96% цього обсягу виробляється з викопного палива, зокрема природного газу та вугілля, що призводить до значних викидів CO₂. Домінуючим методом залишається паровий риформінг метану, який виробляє так званий «сірий водень» з викидами приблизно 10 кг CO₂ на кілограм H₂. Проте роль водню як універсального енергоносія для енергетики, транспорту та промисловості стрімко розширюється, і саме цей напрям стає пріоритетним для багатьох країн світу.

Водень має найвищу енергоємність серед усіх відомих хімічних палив –

140 МДж/кг, що більш ніж удвічі перевищує показники традиційних твердих палив (близько 50 МДж/кг) та у три рази перевищує енергоємність бензину (46 МДж/кг) [19]. При окисненні водню в кисні утворюється тільки вода без жодних шкідливих викидів, що робить його ідеальним енергоносієм з екологічної точки зору [20]. Крім того, водень може бути ефективно використаний для накопичення та транспортування енергії, а також як сировина для виробництва синтетичного палива та аміаку.

1.3 Методи виробництва водню

Виробництво водню класифікують за джерелом сировини та технологією отримання. Загалом виділяють три основні категорії водню: сірий, синій та зелений [18]. Сірий водень виробляється шляхом парового риформінгу природного газу або газифікації вугілля. Цей процес супроводжується значними викидами вуглекислого газу – приблизно 10 кг CO₂ на кілограм водню. Синій водень виробляється тими самими методами, але з використанням технологій захоплення та зберігання вуглецю (Carbon Capture and Storage, CCS), що дозволяє зменшити викиди CO₂ до 2–3 кг на кілограм водню. Однак ці технології значною мірою залежать від викопного палива і не вирішують проблему його вичерпності.

Зелений водень виробляється шляхом електролізу води з використанням електроенергії від відновлюваних джерел, таких як сонячна та вітрова енергетика. Цей метод є повністю екологічно чистим, оскільки в процесі виробництва не утворюються викиди CO₂, а єдиним побічним продуктом є кисень, який може бути використаний у промисловості або просто випущений в атмосферу. Саме тому зелений водень розглядається як ключовий елемент стратегії декарбонізації енергетики та промисловості в рамках Європейського зеленого курсу та аналогічних ініціатив у світі.

1.4 Електроліз води як метод отримання зеленого водню

Електроліз води – це електрохімічний процес розкладу води на водень і кисень під дією електричного струму. Загальне рівняння реакції електролізу води має вигляд: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$. Теоретично для розкладу однієї молекули води необхідно 237 кДж енергії, що відповідає мінімальній напрузі 1,23 В при стандартних умовах (температура 25 °С, тиск 1 атм). Проте в реальних умовах для забезпечення прийнятної швидкості реакції необхідна значно вища напруга – 1,8–2,2 В, що пов'язано з наявністю різних типів поляризаційних втрат.

Ефективність процесу електролізу визначається кількома факторами: типом електролізера, матеріалами електродів, температурою, тиском та густиною струму. За сучасних технологій енергетична ефективність електролізу становить 60–80%, при цьому електричне споживання становить 4,5–5,5 кВт·год/нм³ водню. Існує три основні типи електролізерів: лужні (Alkaline Electrolyzer, AEL), електролізери з протонно-обмінною мембраною (Proton Exchange Membrane, PEM) та твердооксидні електролізери (Solid Oxide Electrolyzer Cell, SOEC) [21]. Кожен тип має свої переваги та обмеження.

1.5 Принцип роботи фотоелектричної системи

Фотоелектрична система перетворює сонячне випромінювання безпосередньо на електричну енергію завдяки фотоефекту в напівпровідникових матеріалах. Основним елементом системи є фотоелектричний модуль, який складається з послідовно з'єднаних сонячних елементів. Кожен сонячний елемент створений на основі р-п переходу кремнію, де під дією фотонів з енергією, що перевищує ширину забороненої зони, генеруються електрон-діркові пари, які розділяються вбудованим електричним полем.

Для моделювання роботи сонячного елемента використовують еквівалентну електричну схему, що складається з джерела фотоструму, діода,

паралельного та послідовного опорів. Вихідні параметри фотоелектричної системи (напруга холостого ходу U_{xx} , струм короткого замикання I_{ks} , максимальна потужність P_{max}) залежать від інтенсивності сонячного випромінювання та температури. При збільшенні інтенсивності освітлення пропорційно зростає фотострум, тоді як напруга холостого ходу змінюється незначно. Підвищення температури призводить до зменшення напруги холостого ходу та зниження ККД системи приблизно на 0,4–0,5% на кожен градус Цельсія.

Для отримання максимальної потужності від фотоелектричної батареї використовують алгоритм MPPT (Maximum Power Point Tracking) [23-27], який забезпечує роботу системи в точці максимальної потужності незалежно від зміни умов освітлення. Найпоширенішим є метод збурення та спостереження (Perturb and Observe), який періодично змінює робочу напругу та порівнює потужність на кожному кроці. Для перетворення постійного струму фотоелектричних панелей у змінний струм, придатний для роботи в паралелі з електромережею або живлення електролізера, використовують інвертори з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Сучасні інвертори досягають ефективності перетворення 95–98% .

1.6 Інтеграція фотоелектричних систем з електролізерами

Комбінація фотоелектричних систем з електролізерами води є перспективним рішенням для виробництва зеленого водню. Генерована фотоелектричною батареєю постійна напруга через DC/DC перетворювач надходить на інвертор, де перетворюється на змінний струм. Після понижувального трансформатора частина енергії надходить на електролізер для виробництва водню, а надлишок може бути відправлений до електромережі.

Пряме з'єднання фотоелектричної системи з електролізером дозволяє уникнути додаткових втрат на перетворення енергії, оскільки обидва пристрої працюють з постійним струмом. Однак переривчастий характер сонячної

енергії (цикли день/ніч, хмарність, сезонні зміни) створює значні виклики для стабільної роботи електролізера. Різкі коливання вхідної потужності можуть призводити до прискореної деградації каталізаторів та мембран. Для згладжування коливань потужності використовують системи накопичення енергії (літій-іонні батареї, суперконденсатори) або гібридні схеми з підключенням до електромережі.

Дослідження, проведені Wei та співавторами, показали, що використання алгоритму низькочастотної фільтрації дозволяє ефективно згладжувати коливання вихідної потужності фотоелектричної системи та оптимізувати конфігурацію системи накопичення енергії [28]. У дослідженні були протестовані чотири різні значення сталої часу фільтра (від 764 с до 6875 с), що дозволило зменшити максимальну зміну потужності за 1 годину з 4,31 МВт до 0,04 МВт при найбільшій сталій часу [28]. Такий підхід забезпечує стабільнішу роботу електролізера та продовжує термін його служби.

1.7 Електролізери для виробництва водню

Вибір типу електролізера є критичним фактором для ефективності всієї системи виробництва водню. Кожен тип електролізера має свої переваги та недоліки, які необхідно враховувати при проектуванні фотоелектричної станції. Правильний вибір електролізера визначає ККД системи, її вартість, надійність та можливість інтеграції з відновлюваними джерелами енергії.

Лужні електролізери (AEL) є найбільш зрілими комерційно та мають найбільший досвід експлуатації (понад 100 років). Вони використовують розчин калійної або натрієвої луги (концентрація 20–30%) як електроліт, працюють при температурі 60–80 °C та мають ККД 60–70%. Основними перевагами AEL є низька вартість обладнання, можливість роботи з великими потужностями (до декількох сотень мегават) та тривалий термін служби (понад 60 000 годин). Недоліками є повільна відповідь на зміну вхідної потужності (час реакції 5–10 хвилин), необхідність використання їдкого електроліту,

високий тиск на виході (до 30 бар) та обмежена щільність струму.

Твердооксидні електролізери (SOEC) працюють при високих температурах (700–900 °C) і мають найвищий теоретичний ККД (до 90%). Вони використовують керамічний електроліт на основі діоксиду цирконію, стабілізованого оксидом ітрія (YSZ) [21]. Висока температура роботи дозволяє зменшити енергетичні втрати та інтегрувати електролізер з системами теплопостачання, використовуючи відпрацьоване тепло для підігріву води. Проте SOEC ще перебуває на стадії досліджень і пілотних проєктів, а комерційна доступність обмежена через проблеми з деградацією керамічних матеріалів при високих температурах та при циклічних навантаженнях.

Електролізери з протонно-обмінною мембраною (PEM) поєднують переваги обох технологій. Вони працюють при температурі 50–80 °C, мають ККД 65–75% та забезпечують швидку відповідь на зміну вхідної потужності (час реакції менше 1 секунди), що робить їх ідеальними для інтеграції з фотоелектричними системами [29]. Компактна конструкція, висока щільність струму (до 2 А/см²), можливість роботи під тиском (до 350 бар) та використання твердого полімерного електроліту (немає потреби в їдкому розчині) є додатковими перевагами PEM електролізерів. Основним обмеженням залишається відносно висока вартість мембран на основі перфторованих сульфокислотних полімерів (Nafion) та каталізаторів на основі платини та ірію.

1.8 Принцип роботи PEM електролізера

PEM електролізер складається з двох електродів — аноду та катоду, розділених тонкою (50–200 мкм) протонно-обмінною мембраною з перфторованого сульфокислотного полімеру (наприклад, Nafion). На аноді відбувається реакція окиснення води з утворенням кисню, протонів та електронів: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$. Протони мігрують крізь мембрану до катоду, де відбувається їхнє відновлення з утворенням водню: $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$ [29]. Мембрана виконує подвійну функцію: електроліту, що проводить протони,

та бар'єру, що запобігає змішуванню водню та кисню.

Вольт-амперна характеристика PEM електродолізера має складну нелінійну залежність, яка визначається кількома фізичними процесами: активаційною поляризацією, омичними втратами та концентраційною поляризацією. Загальна напруга на електродах електродолізера визначається рівнянням: $U = U_{rev} + \eta_{act} + \eta_{ohm} + \eta_{conc}$, де U_{rev} – оборотна напруга (1,23 В), η_{act} – активаційне перенапруження, пов'язане з кінетикою електродних реакцій, η_{ohm} – омичне перенапруження, обумовлене опором мембрани та електродів, η_{conc} – концентраційне перенапруження, зумовлене обмеженням масопереносу реагентів до поверхні електродів [29].

Як видно з рисунку 1.3, при збільшенні температури роботи електродолізера його поляризаційні втрати зменшуються, що призводить до зниження робочої напруги при фіксованому струмі. Це обумовлено покращенням кінетики електродних реакцій та зменшенням питомого опору мембрани. Таким чином, оптимальна температура роботи PEM електродолізера становить 60–80 °С. Варто зазначити, що при температурі вище 100 °С мембрана Nafion втрачає свою провідність через зневоднення, тому для роботи при високих температурах необхідно використовувати спеціальні матеріали або підвищувати тиск.

1.9 Висновки до розділу

1. Проведено огляд сучасного стану виробництва водню у світі. Встановлено, що близько 96% водню наразі виробляється з викопного палива, що призводить до значних викидів CO₂.

2. Проаналізовано класифікацію водню за методом виробництва: сірий (з викопного палива), синій (з використанням технологій CCS) та зелений (електроліз води з використанням енергії відновлюваних джерел).

3. Встановлено, що теоретична мінімальна напруга електролізу становить 1,23 В, тоді як практична робоча напруга перебуває в діапазоні 1,8–2,2 В, що

обумовлено поляризаційними втратами. Енергетична ефективність сучасних електролізерів досягає 60–80%, а питоме електроспоживання становить 4,5–5,5 кВт·год/нм³ водню.

4. Розглянуто принцип роботи фотоелектричних систем, зокрема вплив інтенсивності сонячного випромінювання та температури на вихідні параметри.

5. Проаналізовано особливості інтеграції фотоелектричних систем з електролізерами води. Встановлено, що переривчастий характер сонячної енергії створює виклики для стабільної роботи електролізера. Для згладжування коливань потужності використовуються системи накопичення енергії (батареї, суперконденсатори) або гібридні схеми з підключенням до електромережі.

6. Проведено порівняльний аналіз трьох основних типів електролізерів: лужних (AEL), з протонно-обмінною мембраною (PEM) та твердооксидних (SOEC). Визначено, що PEM електролізери є найбільш придатними для інтеграції з фотоелектричними системами завдяки швидкій відповіді на зміну вхідної потужності, високому ККД, можливості роботи під тиском та компактній конструкції.

7. Проаналізовано принцип роботи PEM електролізера, який складається з аноду та катоду, розділених мембраною Nafion.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Опис блок-схеми системи виробництва водню

На рисунку 2.1 зображено сонячну електростанцію, інтегровану з електролізером для виробництва водню та підключенням до електромережі.

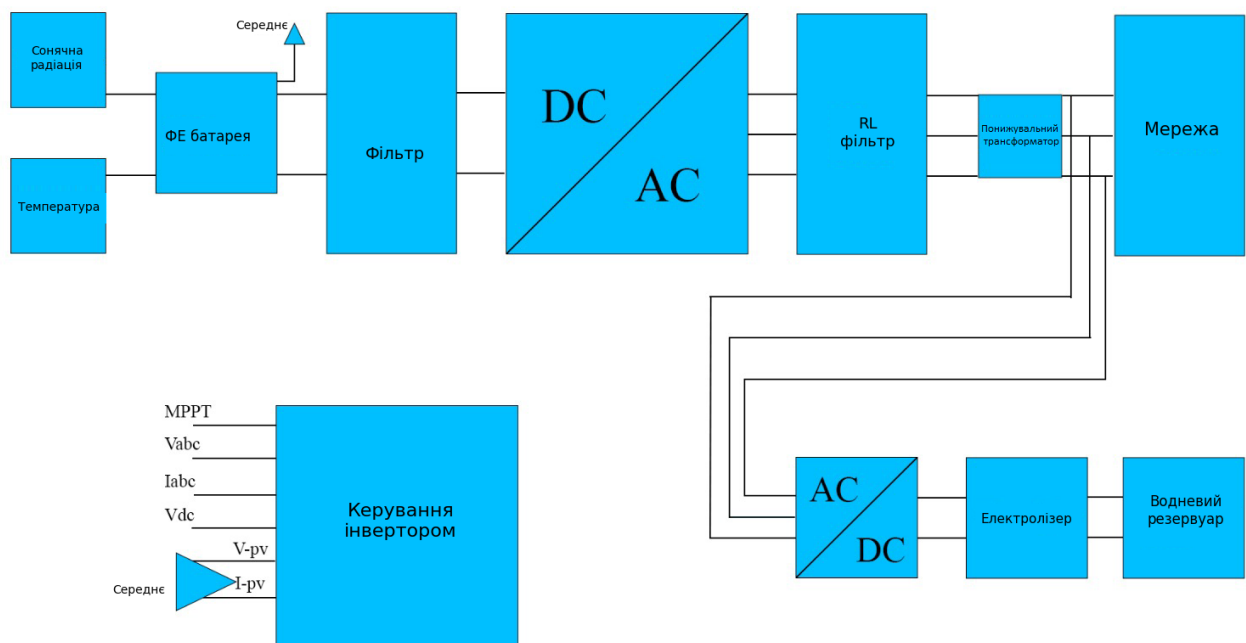


Рисунок 2.1 – Блок-схема системи виробництва водню на основі фотоелектричних систем

Фотоелектрична батарея перетворює сонячне випромінювання та температуру на електричну енергію; вихідний сигнал, проходячи через фільтр, вирівнюється для отримання постійного струму.

Перетворення постійного струму в змінний: Інвертор, DC/AC перетворювач, перетворює відфільтрований постійний струм у змінний струм, прийнятний для мережі.

Фільтрування змінного струму та інтеграція в мережу: Змінний струм проходить через RL-фільтр і понижуючий трансформатор, де відбувається стабілізація та регулювання напруги перед подачею в електромережу.

Виробництво водню: За потреби частину енергії з мережі змінного струму перетворюють знову на постійний струм для живлення електролізера. Електролізер розкладає воду на водень і кисень, а отриманий водень накопичується в резервуарі.

Управління інвертором: Система керування інвертором використовує вхідні параметри: MPPT (алгоритм відстеження точки максимальної потужності), V_{abc} (трифазна напруга), I_{abc} (трифазний струм), V_{dc} (напруга постійного струму), а також напругу та струм фотоелектричної системи. Мета керування – забезпечити максимально ефективно перетворення енергії та надійну інтеграцію з електромережою та електролізером.

2.2 Фотоелектрична батарея

Загальна продуктивність фотоелектричної системи залежить від конфігурації з'єднання сонячних панелей. Нижче наведено схему компонування батареї та описано її параметри. Вхідними даними для фотоелектричної батареї є інтенсивність сонячного випромінювання та температура навколишнього середовища.

Конфігурація фотоелектричної батареї

Послідовне з'єднання модулів: Наприклад, на рисунку 2.2 показано 7 модулів Sun Power SPR-415E, з'єднаних послідовно. При послідовному з'єднанні модулів загальна напруга в колі збільшується, оскільки напруги модулів додаються, тоді як струм одного модуля залишається незмінним.

Паралельні кола: Батарея містить 86 паралельних кіл. При паралельному з'єднанні загальний струм дорівнює сумі струмів усіх кіл, тоді як напруга на кожному ланцюзі залишається незмінною.

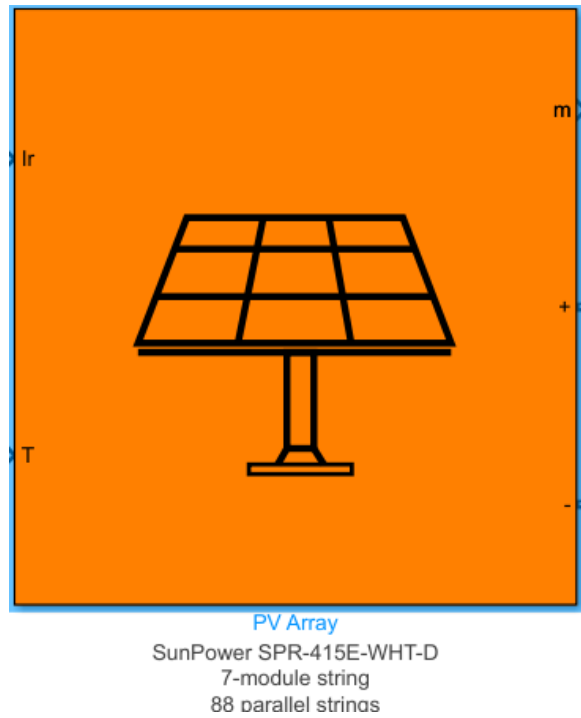


Рисунок 2.2 – Фотоелектрична батарея

2.3 Трифазний перетворювач з постійного в змінний струм

Трифазний перетворювач з постійного в змінний струм призначений для перетворення постійного струму, отриманого від фотоелектричних панелей, на змінний струм. Вироблену електроенергію можна споживати локально або експортувати в електромережу. Основними компонентами перетворювача є 3-рівневий IGBT-міст із широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) (рис. 2.3).

IGBT-міст інвертора. IGBT-транзистори (біполярні транзистори із ізольованим затвором) виконують функції ключів для перемикання та регулювання потужності. У 3-рівневому інверторі напруга може набувати трьох рівнів: додатного, нульового та від'ємного.

ШІМ-керування: ШІМ (Широтно-імпульсна модуляція) – це технологія, що використовується для регулювання кількості енергії, що подається на електричні пристрої, шляхом швидкого вмикання та вимикання живлення.

Індуктор (L): Дросель згладжує струм. Він зменшує пульсації, що виникають під час перемикання IGBT.

Резистор (R): Активний опір гасить коливання в колі та підтримує його стабільність, перетворюючи надлишкову електричну енергію на тепло.

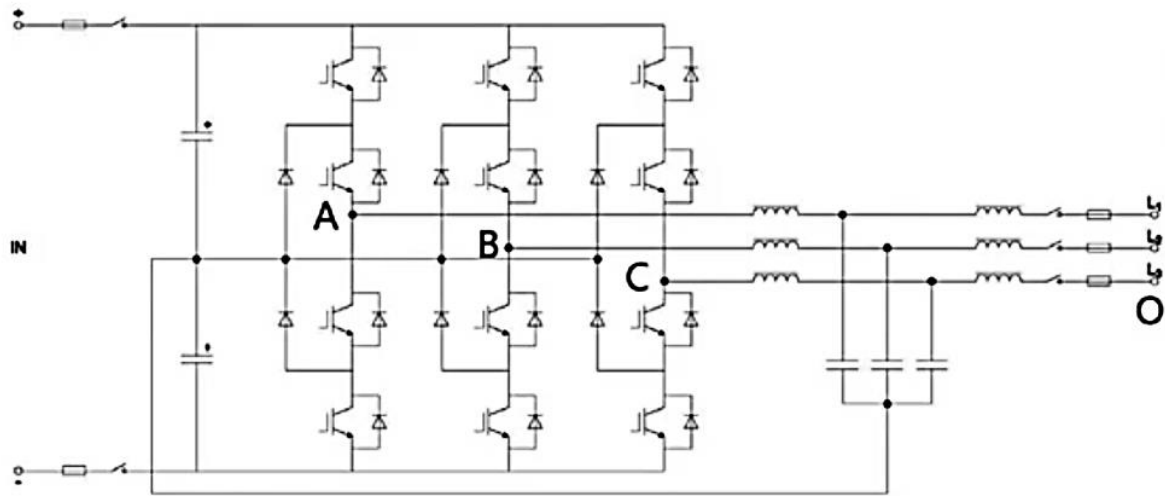


Рисунок 2.3 – Трифазний перетворювач з постійного в змінний струм

2.4 Система керування інвертором

Система керування інвертором забезпечує його стабільну та ефективну роботу, а також його синхронізацію з електромережею. Також вона забезпечує відстеження точки максимальної потужності (MPPT) у фотоелектричних батареях. Мета цієї функції полягає в максимізації вихідної потужності фотоелектричної батареї шляхом регулювання робочої точки. Метод який при цьому використовується називається методом збурення і спостереження (PO) (рис.2.4). Під час його виконання коригується напруга або струм, щоб визначити оптимальну точку – де фотоелектрична установка видає максимальну потужність.

```

function D = MPPT(Param, Enabled, V, I)

% MPPT контролер на основі алгоритму збурення та спостереження (Perturb & Observe).
%
% Вихід D = Опорне значення напруги DC шини (Vdc_ref)
%
% Вхід Enabled = 1 для ввімкнення MPPT контролера
% Вхід V = Термінальна напруга фотоелектричної панелі (В)
% Вхід I = Струм фотоелектричної панелі (А)
%
% Вхід Param:
Dinit = Param(1); % Початкове значення Vdc_ref
Dmax = Param(2); % Максимальне значення Vdc_ref
Dmin = Param(3); % Мінімальне значення Vdc_ref
deltaD = Param(4); % Значення приросту для збільшення/зменшення Vdc_ref
%

persistent Vold Pold Dold;

dataType = 'double';

if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Dold=Dinit;
end

P = V*I;
dV = V - Vold;
dP = P - Pold;

if dP ~= 0 && Enabled ~=0
    if dP < 0
        if dV < 0
            D = Dold + deltaD;
        else
            D = Dold - deltaD;
        end
    else
        if dV < 0
            D = Dold - deltaD;
        else
            D = Dold + deltaD;
        end
    end
end
else
    D = Dold;
end

if D >= Dmax || D <= Dmin
    D = Dold;
end

Dold = D;
Vold = V;
Pold = P;

```

Рисунок 2.4 – Код MPPT

2.5 Регулятор постійного струму

Регулятор постійного струму в фотоелектричній системі підтримує стабільну напругу кола постійного струму. Він робить це шляхом порівняння фактичної напруги з опорною напругою, виправлення відхилення та використання PI-регулятора для зміни опорного значення активного струму. Такий спосіб регулювання допомагає підтримувати напругу на оптимальному рівні, що важливо для ефективної передачі енергії та балансу системи. Регулятор змінюється у міру зміни умов, допомагаючи системі підтримувати стабільну вихідну потужність. Це покращує ефективність роботи фотоелектричної системи. Блок-схема ілюструє цю операцію. Вона підкреслює, наскільки важливе зворотне зв'язне регулювання для контролю змін напруги та отримання максимальної енергії від фотоелектричної батареї.

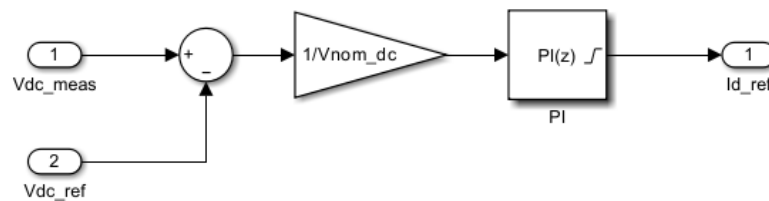


Рисунок 2.5 – Регулятор постійного струму

2.6 PLL та вимірювання

Блок-схема на рисунку 2.6 «PLL та вимірювання» обробляє трифазні вхідні сигнали напруги та струму, $V_{abcprim}$ та $I_{abcprim}$. Спочатку для вхідних сигналів обчислюються одиничні вектори, після чого вони перетворюються в обертову систему координат $dq0$ за допомогою фазового контуру (PLL). Вихідними сигналами системи є кутова частота (ω_t) перетворення, а також $dq0$ -компоненти напруги ($V_{dVqprim}$) і струму ($I_{dIqprim}$). Перетворення у систему $dq0$

спрощує керування інвертором, оскільки сигнали змінного струму набувають вигляду, подібного до постійного струму, що полегшує їх вимірювання та регулювання.

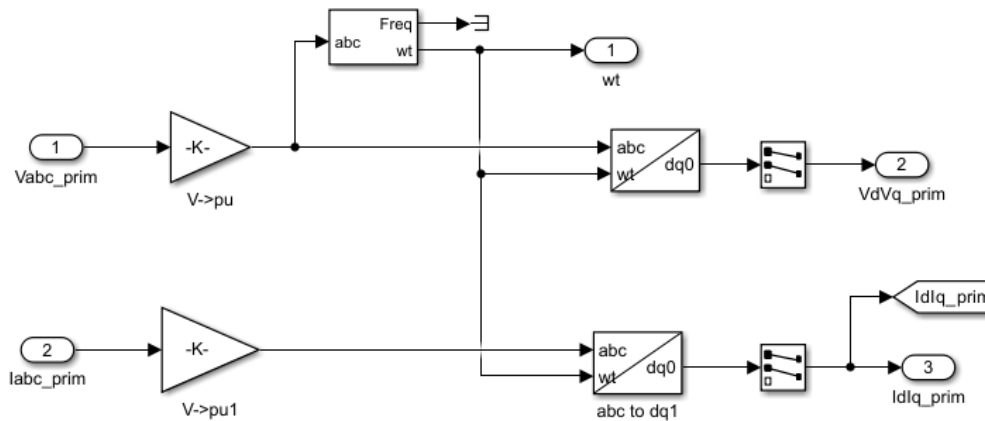


Рисунок 2.6 – Вимірювання PLL

2.7 Вимірювання струму

Блок-схема на рисунку 2.7 представляє систему регулювання струму. Виміряні струми $I_{dIq_{meas}}$ порівнюються з опорними значеннями $I_{dIq_{ref}}$. Різниця між ними формує сигнал помилки, який подається на PI-регулятор для компенсації відхилень. Сигнал керування сумується з прямими складовими та виміряними напругами $V_{dVq_{meas}}$ для формування вихідної напруги керування $V_{dVq_{conv}}$. Інтегральна складова регулятора забезпечує зворотний зв'язок для усунення статичної похибки. Таке поєднання прямого та зворотного зв'язку забезпечує точне регулювання струму та підвищує стабільність роботи системи.

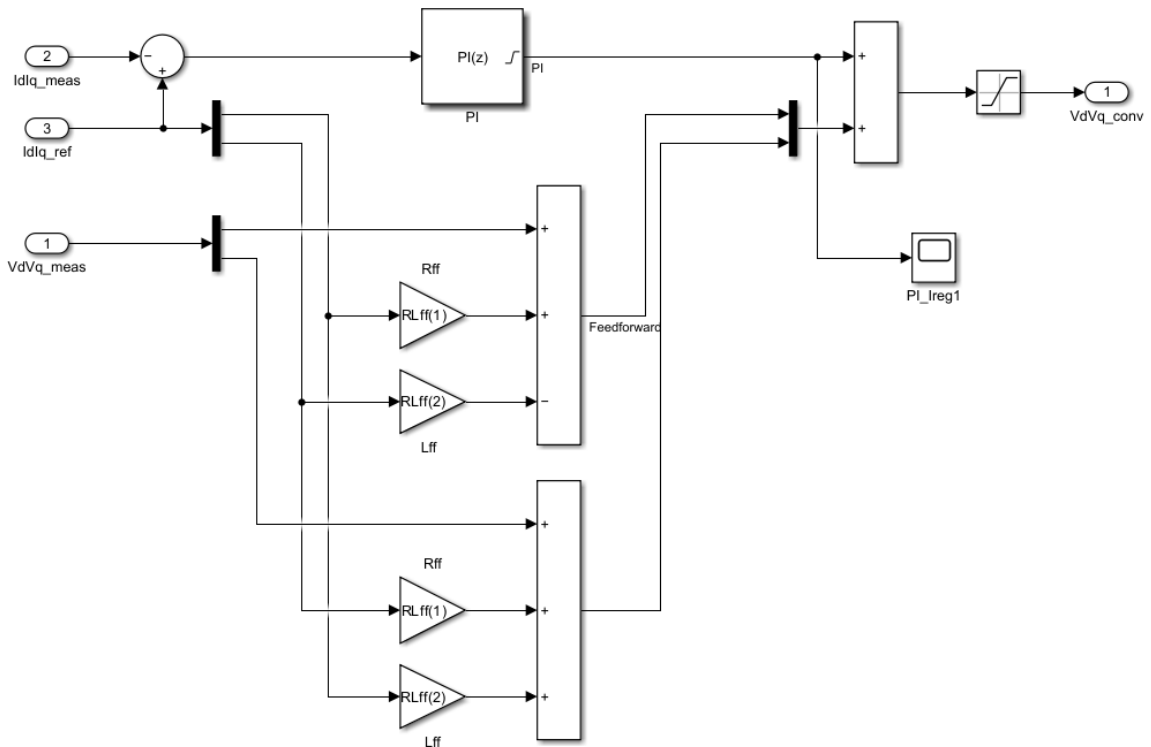


Рисунок 2.7 – Вимірювання струму

2.8 Генерація опорної напруги

Ця блок-схема (рисунок 2.7) описує формування опорної напруги (U_{abcref}) для формування керуючого сигналу інвертора. Система перетворює напруги постійного струму та їхні квадратурні складові V_d та V_q у комплексну форму. Обчислюються амплітуда та фаза сигналу з урахуванням схеми підключення трансформатора та часових затримок керування. За скоригованою фазою обчислюється синусоїдна функція, яка масштабується індексом модуляції для отримання кінцевої опорної напруги. Ця напруга є основою для генерації ШІМ-сигналів керування ключами інвертора, що забезпечує синхронізоване та ефективно перетворення енергії фотоелектричної установки. Врахування електричних і часових параметрів підвищує надійність роботи системи.

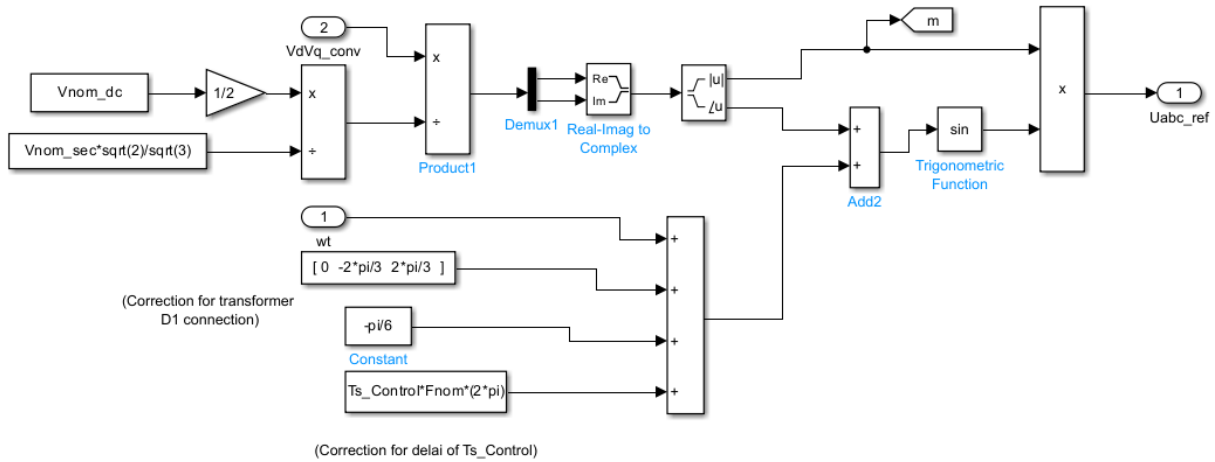


Рисунок 2.8 Генерація опорної напруги

2.9 Трансформатор

Трансформатор призначений для узгодження напруги, що генерується фотоелектричною системою, з параметрами електромережі. Це понижуючий трансформатор, який знижує напругу з 10 кВ до 0,4 кВ. Обмотки трансформатора з'єднані за схемою «зірка» із заземленням нейтралі, що забезпечує стабільність і безпеку роботи системи. Крім того, трансформатор виконує функцію гальванічної розв'язки між фотоелектричною установкою та мережею. Після трансформатора змінний струм подається на випрямляч, де перетворюється на постійний для живлення електролізера, який виробляє водень.

2.10 Електролізний стек PEM

Електролізер із протонно-обмінною мембраною (PEM) є перспективним рішенням для виробництва водню з відновлюваних джерел енергії. У електролітичному стеці PEM чистий водень виділяється на катоді внаслідок електрохімічної реакції розкладу води.

1. Реакція водню на катоді:



2. Реакція кисню на аноді шляхом електрохімічної реакції:

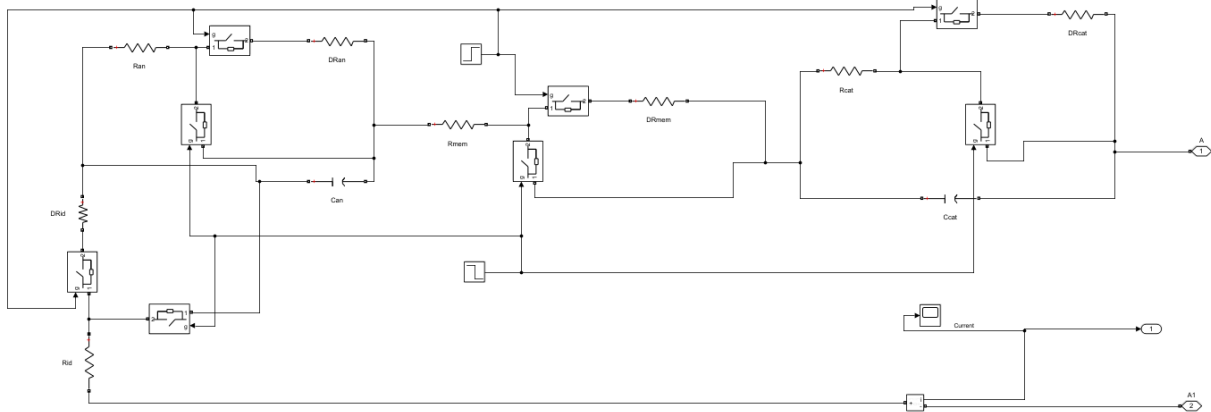


Рисунок 2.9 – Схема електролітичного стека PEM у Simulink [30]

На рисунку 2.9 представлена еквівалентна електрична схема електролізера PEM у середовищі Simulink. Модель містить набір реле, резисторів, конденсатор і вимірювач струму, які відтворюють фізичні процеси в електролітичному стеці.

Розглянемо призначення кожного елемента:

Реле (DRid, DRan, DRmem, DRcat)

Реле в моделі виконують функцію електронних ключів, що керують увімкненням відповідних кіл.

- DRid: реле ідеального струму (вмикає базове коло струму через резистор Rid);
- DRan: реле анодного процесу (вмикає коло, що моделює реакцію на аноді);
- DRmem: реле мембранного процесу (вмикає коло, що відтворює роботу протонної мембрани);
- DRcat: реле катодного процесу (вмикає коло, що моделює реакцію на катоді).

Резистори (R_{id} , R_{an} , R_{mem} , R_{cat} , C_{cat})

Резистори моделюють опір відповідних ділянок електролізера.

- R_{id} : резистор ідеального струму (визначає початковий струм у ланцюзі);
- R_{an} : резистор анодного процесу (моделює опір анодної ділянки);
- R_{mem} : резистор мембранного процесу (моделює опір протонної мембрани);
- R_{cat} : резистор катодного процесу (моделює опір катодної ділянки);
- C_{cat} : конденсатор катодного процесу (стабілізує напругу на катоді).

Вимірювання струму (Current)

Використовується для вимірювання струму, що проходить через коло, та для зворотного зв'язку з метою керування електролізером.

Принцип роботи

Початковий струм (DR_{id} та R_{id}): при замиканні реле DR_{id} струм протікає через резистор R_{id} , формуючи базовий струм кола.

Анодний процес (DR_{an} та R_{an}): при активації реле DR_{an} струм протікає через резистор R_{an} , що відтворює процес окиснення на аноді електролізера.

Мембранний процес (DR_{mem} та R_{mem}): увімкнення реле DR_{mem} дозволяє струму протікати через резистор R_{mem} , що моделює транспорт протонів через мембрану.

Катодний процес (DR_{cat} , R_{cat} та C_{cat}): при замиканні реле DR_{cat} струм протікає через резистор R_{cat} , а конденсатор C_{cat} забезпечує стабілізацію напруги на катоді.

Моніторинг струму

Пристрій моніторингу контролює протікання струму в колі та надає зворотний зв'язок для керування реле з метою забезпечення належної роботи.

2.11 Система зберігання водню

Система зберігання складається з балонів із газоподібним воднем під

низьким тиском (<20 бар). На рисунку 2.10 показано схему системи зберігання водню в середовищі Simulink.

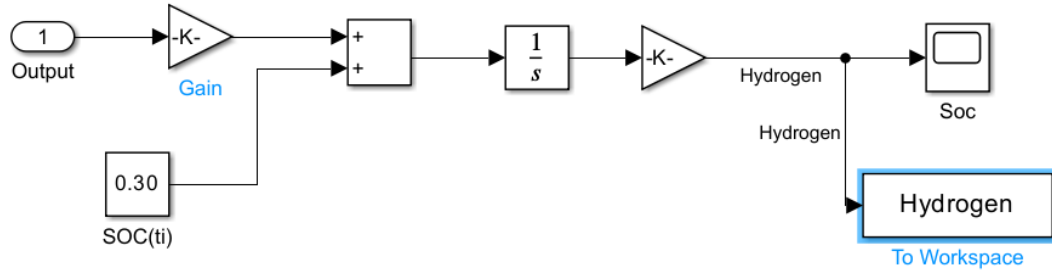


Рисунок 2.10 – Модель балону для зберігання водню [30]

Поточний стан заряду системи зберігання водню (SOC) визначається за формулою

$$SOC(t) = \frac{p(t)}{p_{max}} = SOC(t_i) + \frac{1}{N_{cyl} \cdot N_{mol,max}} \int_{t_i}^t F_{H_2,p}(t) dt \quad (2.3)$$

де $p(t)$ – миттєвий тиск у балонах;

p_{max} – максимальний робочий тиск;

$SOC(t_i)$ – початковий стан заряду в момент часу t_i ;

N_{cyl} – кількість балонів;

$N_{mol,max}$ – максимальна кількість молів водню в одному балоні [30].

Система електролізера PEM:

Електролізер PEM споживає електроенергію, $P_{el,in,sys}(I_s)$, для живлення допоміжних пристроїв та для виробництва і зберігання водню в балонах низького тиску. Ефективність виробництва водню системою електролізера PEM, $\eta_{H_2,prod}(I_2)$, обчислюється за формулою (2.4) [30]:

$$\eta_{H_2,prod}(I_2) = \frac{F_{H_2,p}(I_s) \cdot MW_{H_2} \cdot HHV}{P_{el,in,sys}(I_s)} \quad (2.4)$$

2.12 Висновки до розділу

1. У проектно-конструкторському розділі запропоновано модель фотоелектричної станції для виробництва водню, що складається з фотоелектричної батареї, трифазного інвертора, понижуючого трансформатора, електролізера PEM та системи зберігання водню. Кожен компонент системи описано та представлено у вигляді функціональних блок-схем у середовищі Simulink.

2. Фотоелектрична батарея сформована з 7 послідовно з'єднаних модулів SunPower SPR-415E та 86 паралельних кіл, що забезпечує отримання необхідних рівнів напруги й струму для подальшого перетворення. Вхідними параметрами батареї є інтенсивність сонячного випромінювання та температура, що дозволяє моделювати реальні умови експлуатації.

3. Трифазний перетворювач на базі 3-рівневого IGBT-мосту з ШІМ-керуванням забезпечує ефективне перетворення постійного струму фотоелектричних панелей у змінний струм, придатний для роботи в паралелі з електромережою. Система керування інвертором містить алгоритм MPPT, регулятор постійного струму, контур регулювання струму та генератор опорної напруги, що разом забезпечують максимальний ККД та стабільну синхронізацію з мережею.

4. Понижуючий трансформатор зі схемою з'єднання обмоток «зірка-зірка» виконує функцію узгодження параметрів електроенергії з електромережею та забезпечує гальванічну розв'язку між установкою та мережею. Частина енергії подається на випрямляч для живлення електролізера.

5. Електролізер із протонно-обмінною мембраною (PEM) здійснює процес електрохімічного розкладу води на водень і кисень. Еквівалентна електрична схема електролізера містить реле, резистори та конденсатор, які відтворюють фізичні процеси на аноді, катоді та в мембрані.

6. Система зберігання водню на базі балонів низького тиску дозволяє акумулювати вироблений газ, а поточний стан заряду розраховується за

формулою з урахуванням тиску та кількості балонів.

7. Отримана модель дає змогу проводити дослідження процесів виробництва водню з використанням сонячної енергії, оцінювати ефективність окремих компонентів та оптимізувати параметри системи в цілому.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Вихідні дані для моделювання

Моделювання системи виконано в середовищі Simulink®. Для аналізу роботи електролізера з протонно-обмінною мембраною (ПЕМ) використано відповідний обчислювальний інструмент. У таблиці 3.1 наведено основні вхідні параметри електролітичного блоку. Робочий струм блоку $I_{s(t)}$, змінюється в межах від мінімального значення, $I_{s,min}$, до максимального значення, $I_{s,max}$.

Таблиця 3.1 Параметри та їхні значення [30]

Параметр	Одиниця	Значення
$I_{s,min}$	А	4,5
$I_{s,max}$	А	24,5
$R_{id}(I_{s,min})$	Ом	0,8299
$\Delta R_{id}(I_{s,max})$	Ом	-0,6774
$R'_{an}(I_{s,min})$	Ом	0,0119
$\Delta R_{an}(I_{s,max})$	Ом	-0,0075
$R_{mem}(I_{s,min})$	Ом	0,1607
$\Delta R_{mem}(I_{s,max})$	Ом	-0,0001
$R_{cat}(I_{s,min})$	Ом	0,0465
$\Delta R_{cat}(I_{s,max})$	Ом	-0,0303
N_c	-	3
C_{cat}	Ф	0,05
$C_{an} Fa$	Ф	0,05

У таблиці 3.2 наведено основні вхідні параметри системи зберігання водню. Система складається з трьох балонів об'ємом 50 л кожен із максимальним робочим тиском 16 бар. Початковий стан заряду системи (SOC) встановлено на рівні 30%.

Таблиця 3.2 – Вхідні параметри системи зберігання H_2 [30].

Параметр	Одиниця	Значення
N_{cyl}	-	3
$N_{mol,max}$	моль	34
p_{max}	бар	16
V_{cyl}	л	50
$SOC(t_i)$	-	0,30

3.2 Виробництво водню

Залежність кількості виробленого водню від часу подано на рисунку 3.1. На графіку видно, що обсяг накопиченого водню зростає лінійно, що свідчить про стабільну роботу електролізера.

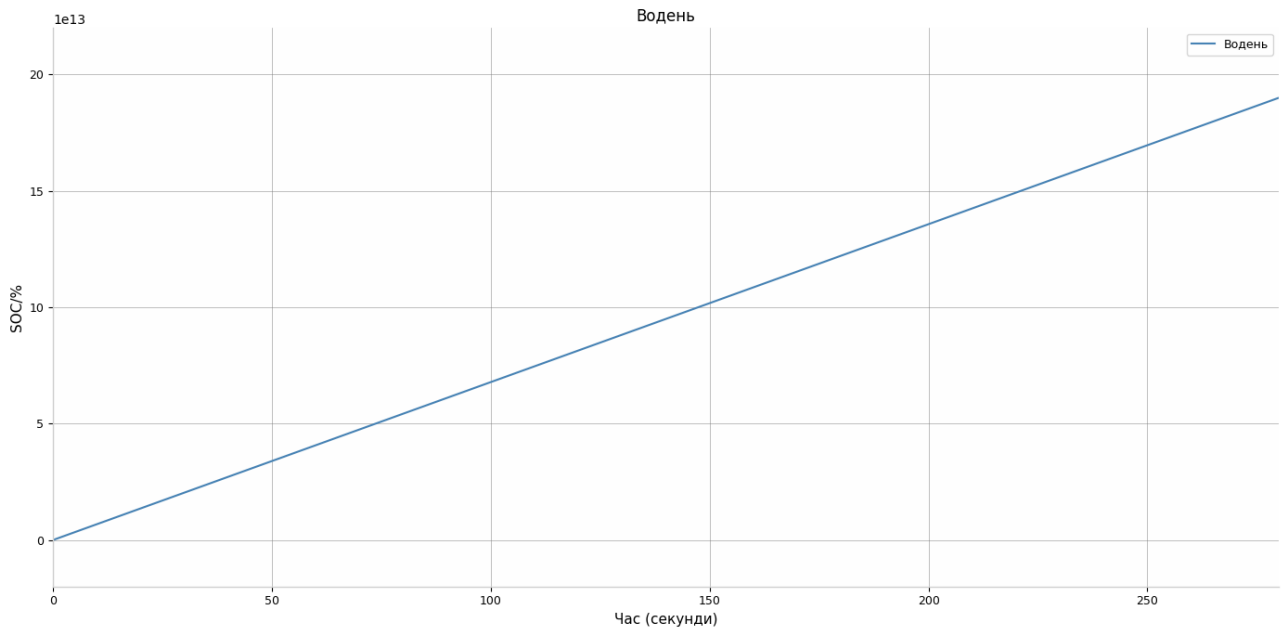


Рисунок 3.2 – Виробництво водню [31]

Лінійний характер зростання підтверджує, що фотоелектричні панелі генерують достатньо енергії для безперервної роботи електролізера. Така стабільність важлива для оцінки ефективності використання сонячної енергії в процесах виробництва водню та її ролі в переході до відновлюваної енергетики.

Рівномірне наростання обсягу водню свідчить про ефективне

перетворення електричної енергії сонячних панелей на водень при мінімальних втратах. Це підтверджує коректну роботу всієї установки та відсутність значних простоїв у процесі електролізу.

3.3 Ефективність виробництва водню

На рисунку 3.2 подано залежність ефективності виробництва водню (H_2) електролізера з протонно-обмінною мембраною (PEM) від величини струму блоку (I_s). Струм змінюється в діапазоні від 0 до 25 А, а коефіцієнт ефективності перебуває в межах від 0,35 до 0,75.

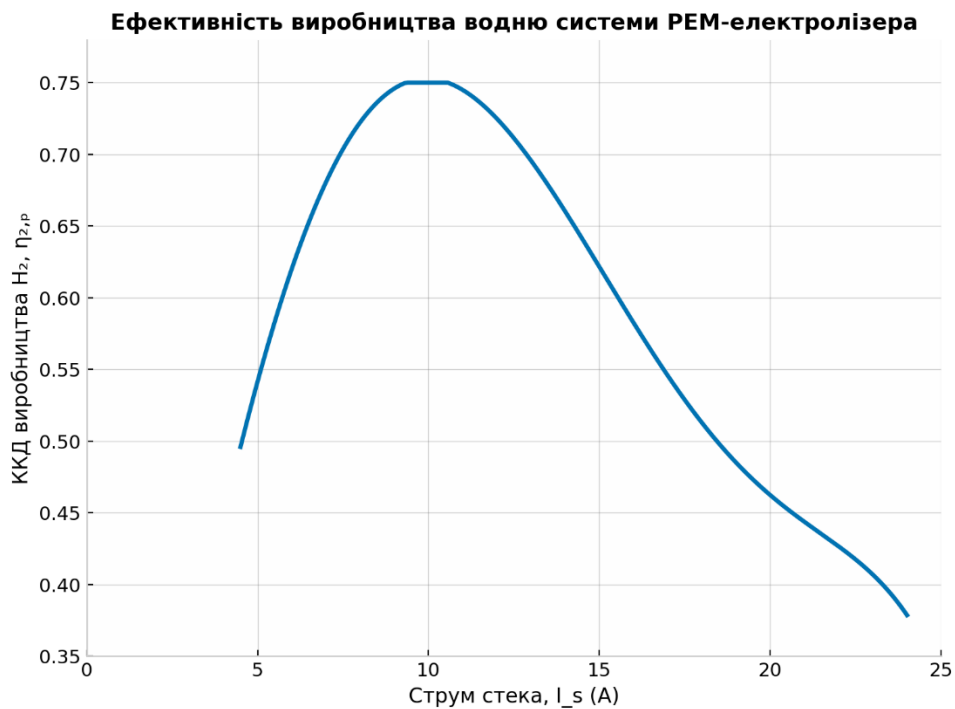


Рисунок 3.2 – Ефективність виробництва водню [31]

3.4 Змінний струм

На рисунку 3.3 подано форму хвилі змінного струму (АС) від часу. На початку роботи спостерігаються значні коливання амплітуди струму (I_{ac}) в діапазоні від -1000 А до 700 А, що свідчить про наявність потужного пускового струму – типового явища при вмиканні електричних систем. Цей початковий

процес має неперіодичний характер.

Через короткий час форма хвилі стабілізується: амплітуда коливань зменшується і наближається до нуля. Система переходить у стаціонарний режим роботи з характерною синусоїдальною формою хвилі змінного струму. Такі початкові перехідні процеси є нормальним явищем для електричних систем, і їх аналіз дає змогу оцінити стабільність установки на різних етапах роботи.

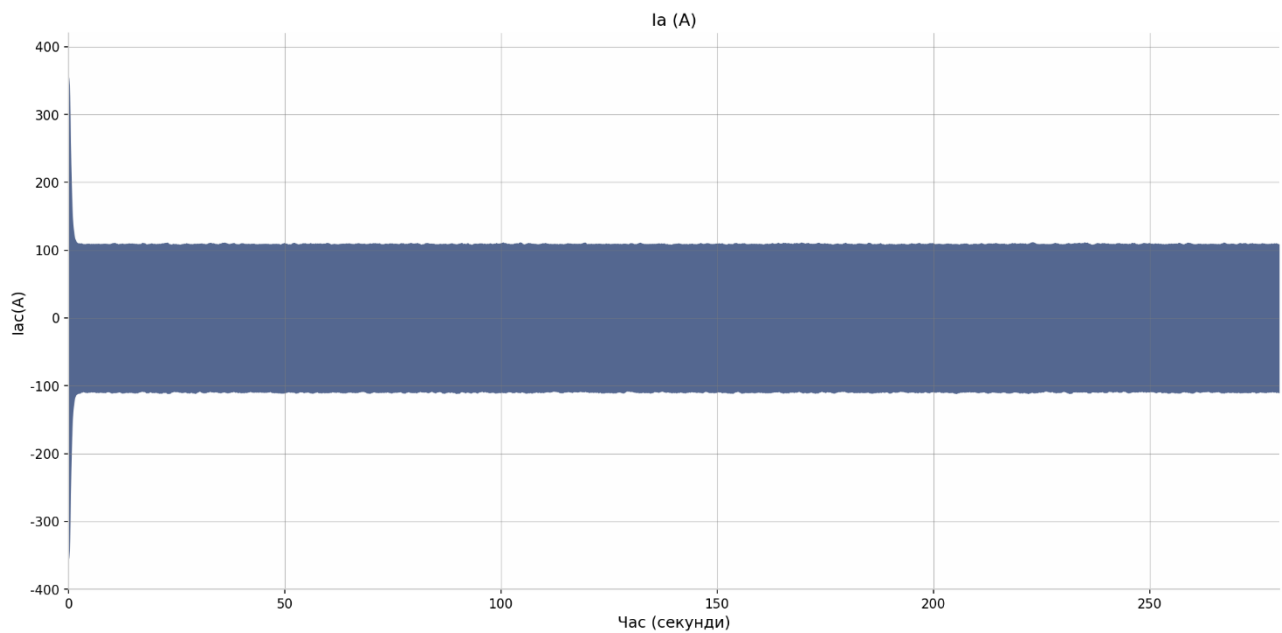


Рисунок 3.3 – Змінний струм

3.5 Напряга змінного струму

На рисунку 3.4 показано зміну напруги змінного струму з часом. У початковий період спостерігаються значні коливання напруги, зумовлені перехідними процесами при вмиканні системи. Згодом ці коливання поступово згасають, і система переходить у стабільний режим роботи. Такий характер зміни напруги є типовим для електричних систем під час пуску: початкові перехідні процеси змінюються стаціонарним режимом. Контроль стабільності напруги важливий для забезпечення безперебійної роботи всієї установки.

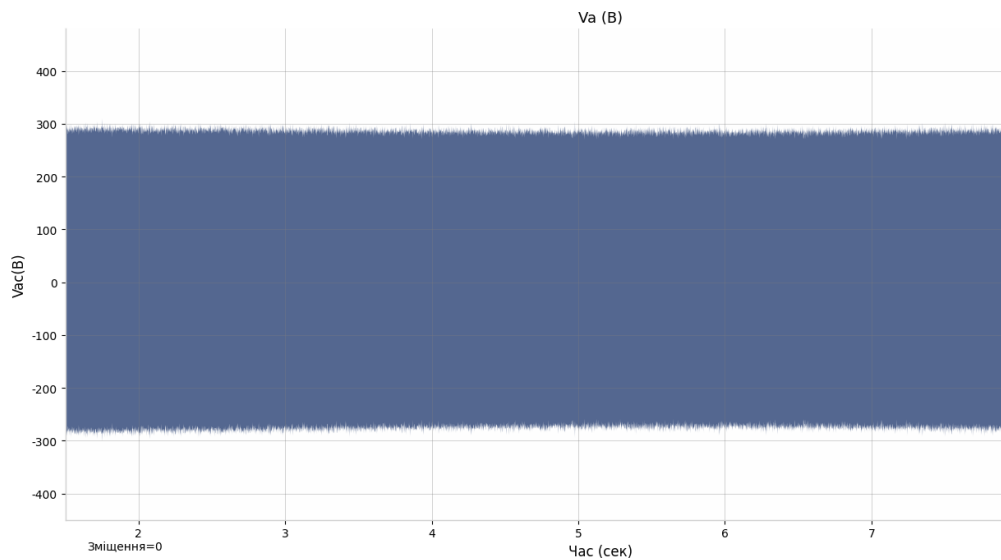


Рисунок 3.4 – Напряга змінного струму

3.6 Потужність змінного струму

На рисунку 3.5 подано графік зміни потужності з часом (вісь X – час, вісь Y – потужність).

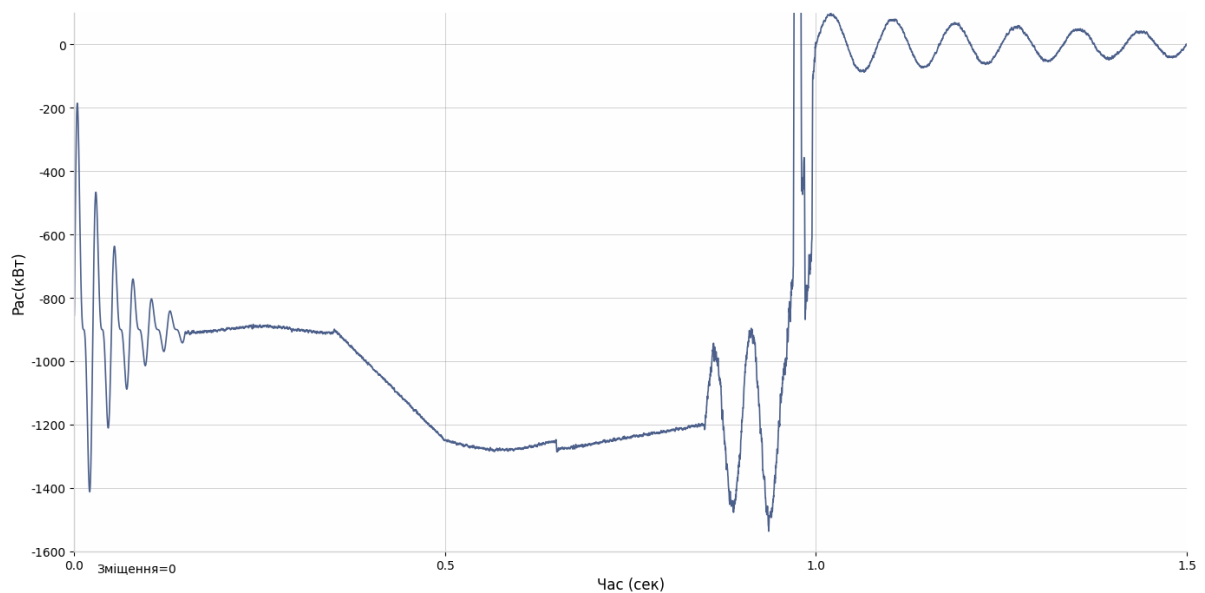


Рисунок 3.5 – Потужність змінного струму

У початковий період спостерігаються значні коливання потужності, зумовлені перехідними процесами при запуску системи. Згодом ці коливання зменшуються, і система переходить до стабільнішого режиму. Приблизно через

1 секунду моделювання відбувається ще один перехідний процес, пов'язаний із адаптацією системи до робочих умов. Після цього потужність стабілізується з коливаннями малої амплітуди. Аналіз таких перехідних процесів дає змогу оцінити стабільність енергосистеми та виявити можливі проблеми в роботі установки.

3.7 Напруга постійного струму та інтенсивність сонячного випромінювання

На верхньому графіку (рис. 3.6) показано інтенсивність сонячного випромінювання у ватах на квадратний метр ($\text{Вт}/\text{м}^2$) у залежності від часу. Отже, піки на цьому графіку показують періоди, протягом яких сонячне світло або інші джерела світла мають дійсно дуже високу інтенсивність. Ці піки сягають понад $1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$, можливо, це результат проходження Сонця через полудень. Між цими піками інтенсивність сонячного випромінювання падає до нуля, що вказує на відсутність світла. Цикл такого характеру вказує на контрольоване освітлення, найімовірніше, на експериментальну установку, в якій світло вмикається та вимикається через регулярні проміжки часу.

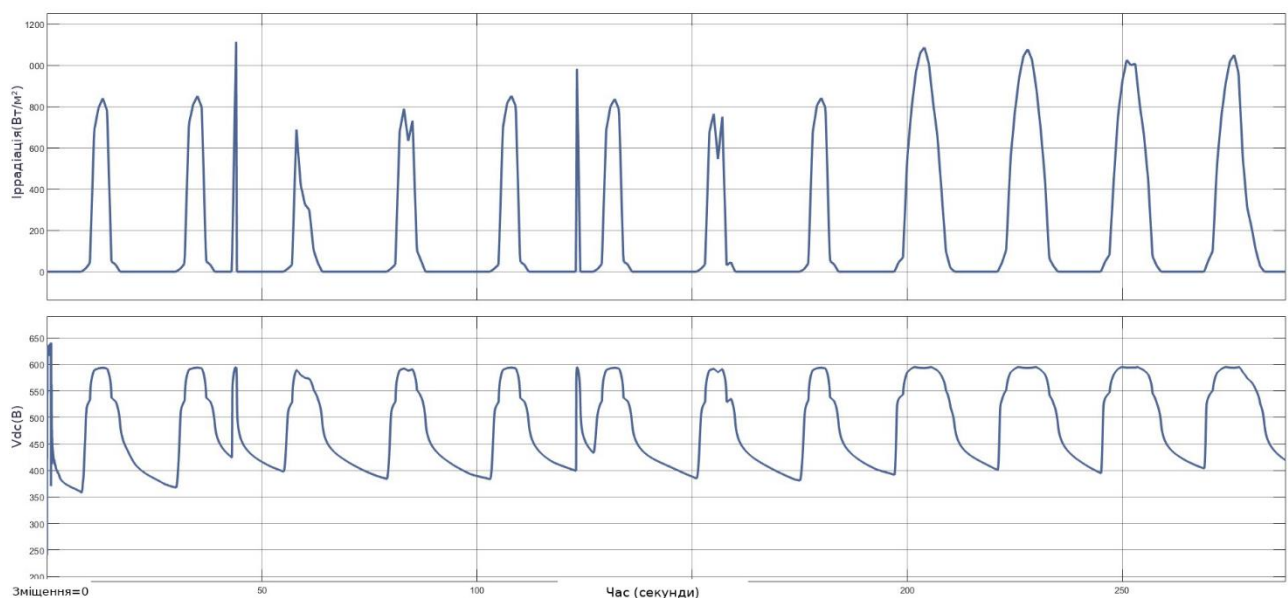


Рисунок 3.6 – Інтенсивність сонячного випромінювання та V_{dc}

Другий графік знизу показує середнє значення V_{dc} за той самий проміжок часу. Він також відображає періодичний характер рівнів напруги, де напруга, як показано, наростає та знижується відповідно до піків інтенсивності освітлення, представлених вище. Періоди високої інтенсивності освітлення мають відносно високі значення середнього V_{dc} , що означає, що вихідна напруга безпосередньо залежить від інтенсивності світла. Напруга коливається від приблизно 250 В до 600 В і вище. Це, таким чином, демонструє фотоелектричну систему або її еквівалент, на яку безпосередньо впливає інтенсивність світла. Кореляція між двома графіками, що розглядаються, показує, як зміни інтенсивності світла безпосередньо пов'язані з вихідною напругою в системі, що контролюється.

3.8 Потужність постійного струму

На рисунку 3.7 показано зміну потужності постійного струму (P_{dc}) у кВт від часу.

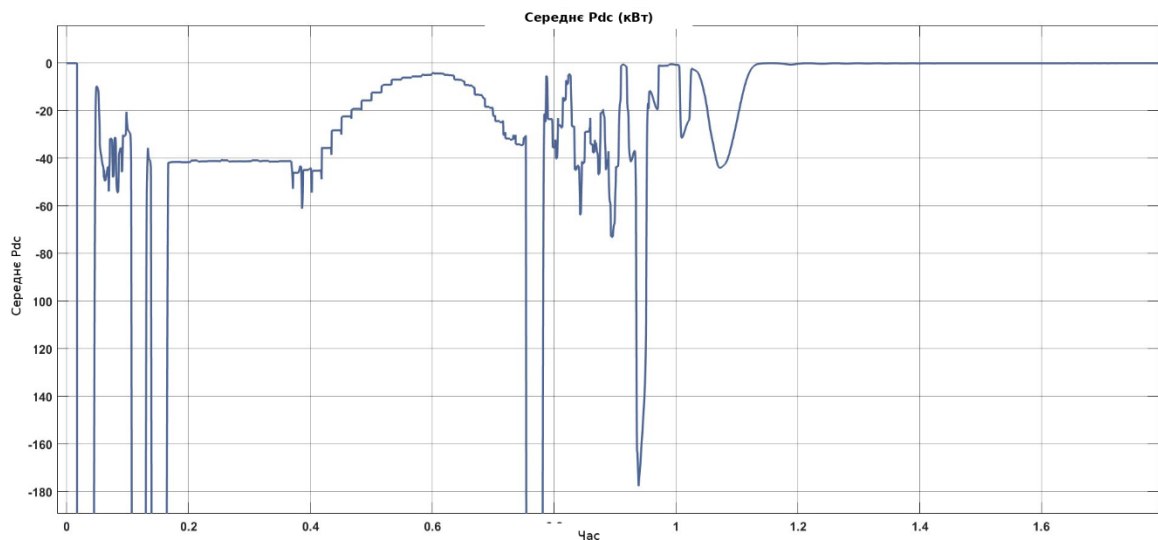


Рисунок 3.7 – Потужність постійного струму

На початку роботи спостерігаються значні коливання потужності в діапазоні від -150 кВт до 0 кВт, зумовлені перехідними процесами при запуску системи. Згодом потужність стабілізується біля рівня -50 кВт, що свідчить про вихід установки на стабільний режим роботи після завершення пускових процесів. У проміжку від 0,4 до 0,7 с потужність поступово зростає, досягаючи

піку близько 0 кВт, що може бути пов'язано зі зміною навантаження або покращенням умов роботи. Після досягнення максимуму відбувається зниження потужності, а в кінці періоду (0,75–0,8 с) коливання знову посилюються через перехідні процеси адаптації системи. Аналіз такої динаміки важливий для розуміння поведінки установки на різних етапах роботи та забезпечення її стабільної експлуатації.

3.9 Струм електролізера

На рисунку 3.8 подано графік струму, що проходить через електролізер, як функцію часу. У початковий період струм є нестабільним через перехідні процеси запуску. Після цього струм стабілізується і набуває періодичної форми з середнім значенням близько 17 А. Швидка стабілізація коливань свідчить про вихід електролізера на стаціонарний режим роботи. Невеликі періодичні коливання струму є нормальним явищем і зумовлені особливостями процесу електролізу та роботою системи керування. Стабільність струму підтверджує коректну роботу електролізера. Важливо стежити за поведінкою струму для забезпечення надійної та безперебійної роботи установки.

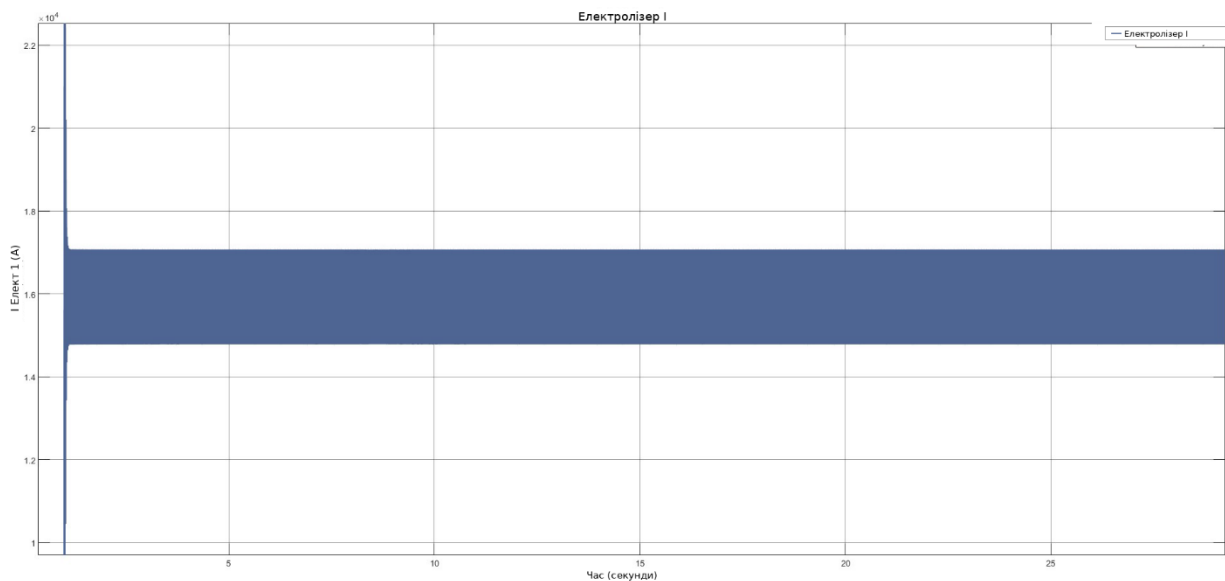


Рисунок 3.8 – Струм електролізера

3.10 Розрахунок економічних показників системи

При розрахунку економічних показників системи враховано капітальні (CAPEX) та операційні (OPEX) витрати на фотоелектричні панелі, електролізер і резервуар для зберігання водню. Капітальні витрати (CAPEX) – це витрати на придбання та монтаж обладнання. Вони розраховуються множенням питомої вартості (євро/кВт) на номінальну потужність компонента. Операційні витрати (OPEX) – це щорічні витрати на експлуатацію системи, які можуть бути фіксованими (залежать від потужності) або змінними (залежать від годин роботи).

Розрахунок загальних капітальних витрат (CAPEX):

$$\text{Загальні капітальні витрати (CAPEX)} = \text{Потужність фотоелектричної системи} \cdot \text{Капітальні витрати на 1 кВт} \quad (3.1)$$

Розрахунок загальних операційних витрат (OPEX) на рік:

$$\begin{aligned} \text{Загальні операційні витрати (OPEX)} = & (\text{Потужність фотоелектричної системи} \cdot \text{Операційні витрати на 1 кВт на рік}) + \\ & (\text{Загальні капітальні витрати} \cdot \text{Ставка страхування}) + \text{Вартість оренди землі} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Усереднена вартість електроенергії (LCOE): оцінена середня вартість виробництва однієї одиниці електроенергії протягом терміну експлуатації, зазвичай виражена в центах за кіловат-годину або євро за кВт·год, що генерується фотоелектричними панелями. LCOE розраховується таким чином, що всі витрати – CAPEX, OPEX та продуктивність системи, серед іншого – враховуються з урахуванням часу. Отже, LCOE можна обчислити, поділивши

загальні витрати на систему – тобто як CAPEX, так і OPEX – на загальний обсяг електроенергії, що генерується протягом терміну експлуатації системи.

Обчислення: LCOE обчислюється шляхом ділення загальних витрат на систему (як CAPEX, так і OPEX) на загальний обсяг електроенергії, що генерується протягом терміну експлуатації системи, за формулою, наведеною нижче.

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{OPEX_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Electricity\ Generation_t}{(1+r)^t}} \quad (3.3)$$

Фактори, що впливають на LCOE:

Ефективність системи: Панелі з вищою ефективністю генерують більше електроенергії з тієї ж площі поверхні, що, у свою чергу, знижує LCOE.

Початкові витрати: нижчі капітальні витрати (CAPEX) можуть знизити LCOE, якщо припустити, що система буде працювати добре протягом тривалого часу.

Експлуатаційні витрати: нижчі OPEX також допоможуть знизити LCOE.

Термін експлуатації системи: Більш тривалий термін експлуатації системи означає, що витрати розподіляться на довші роки, що, відповідно, знизить LCOE.

Виробництво енергії: Кількість сонячного світла (інсоляція) впливає як на загальний обсяг виробленої енергії, так і, відповідно, на LCOE. На рис. 3.9 показано загальні капітальні витрати (CAPEX), операційні витрати (OPEX) та обсяг виробництва фотоелектричних панелей.

Таблиця 3.3 – Параметри для розрахунку LCOE [30]

Параметр	Одиниця	Значення
Виробництво фотоелектричної енергії	<i>MВт·год/рік</i>	290
Потужність фотоелектричної системи	<i>кВт</i>	129
Вартість фотоелектричної системи (капітальні витрати)	<i>євро/кВт</i>	1600
Експлуатаційні витрати фотоелектричної системи	<i>євро/кВт/рік</i>	18
Страховання	<i>%/рік</i>	0,50 %
Оренда землі	<i>євро/рік</i>	20000
Період аналізу	<i>роки</i>	10
Ставка дисконту	<i>%</i>	3,50 %

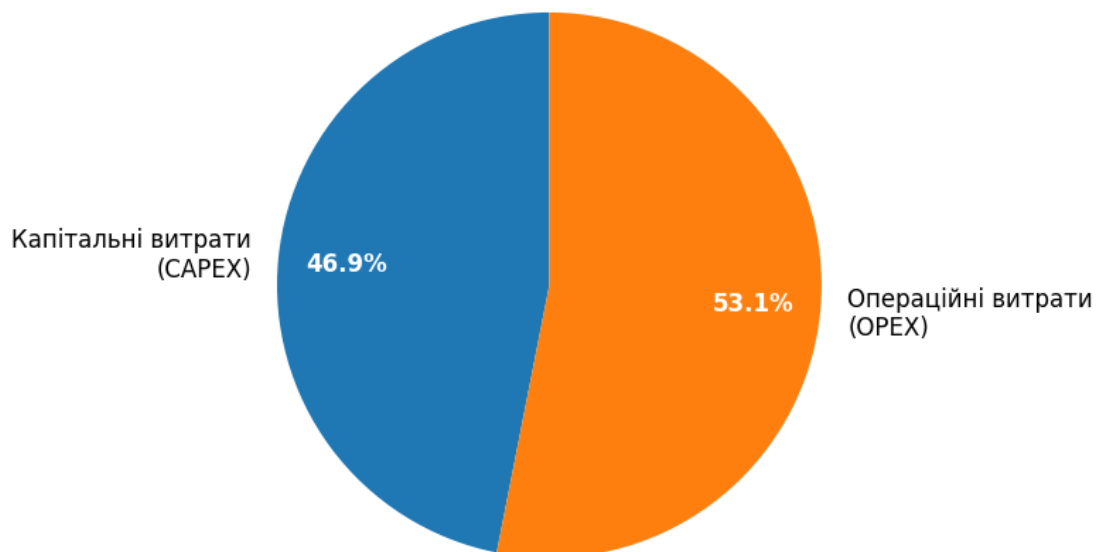


Рисунок 3.9 – Вартість фотоелектричної системи

Фотоелектрична система має значні початкові витрати та поточні операційні витрати, що призводить до LCOE на рівні 0,16611 €/кВт·год. Кругова діаграма показує розподіл капітальних та операційних витрат протягом терміну експлуатації системи.

3.11 LCOE електролізера та водню

Вхідні параметри

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики системи електролізера [31]

Параметр	Значення
Вхідна потужність електролізера	38 кВт
Лінійне виробництво водню	$7,49 \times 10^3$ кг/рік
Капітальні витрати на кВт	1188 євро
Експлуатаційні витрати на кВт на рік	15,84 євро
Відсоток витрат на монтаж	10% від CAPEX
Відсоток витрат на заміну стеків	35% від CAPEX
ККД	75%

Використана формула:

Загальний CAPEX

$$\text{Загальний CAPEX} = \text{Потужність електролізера} \cdot \text{CAPEX на кВт} \quad (3.4)$$

Витрати на монтаж:

$$\text{Витрати на встановлення} = \text{Загальні капітальні витрати} \cdot \text{Відсоток витрат на встановлення} \quad (3.5)$$

Загальні початкові інвестиції:

$$\text{Загальні початкові інвестиції} = \text{Загальні капітальні витрати} + \text{Витрати на встановлення} \quad (3.6)$$

Річні операційні витрати:

$$\text{Потужність електролізера} \cdot \text{Операційні витрати на кВт на рік} + \left(\frac{\text{Загальні капітальні витрати} \cdot \text{Заміна стеків} \cdot 2}{n} \right) \quad (3.7)$$

$$LCOE_{\text{Electrolyzer}} = \frac{\text{Загальні початкові інвестиції} + \sum_{t=1}^n \frac{\text{Annual OPEX}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{\text{Ефективна енергія для виробництва водню}}{(1+r)^t}} \quad (3.8)$$

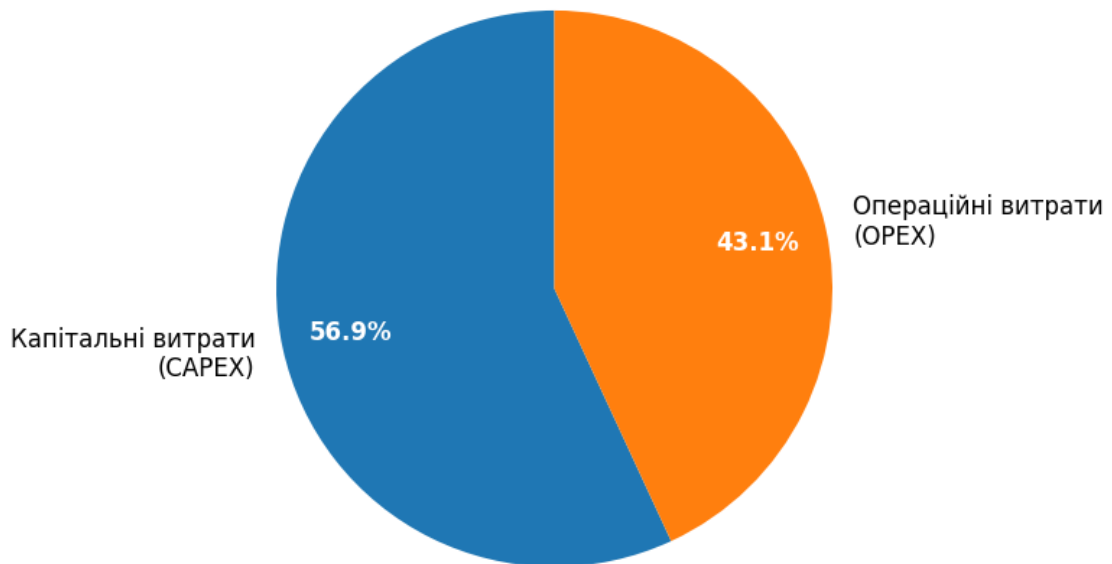


Рисунок 3.10 – Розподіл витрат на електролізер

Електролізер має значні капітальні та операційні витрати, що призводить до LCOE у розмірі 0,15191 євро/кВт·год. Кругова діаграма ілюструє розподіл витрат.

3.12 Дані для розрахунку економічних показників виробництва водню

Таблиця 3.5 – Параметри енергії та витрат для водню

Параметр	Значення
Енергетична цінність водню	33,33 кВт·год/кг
Капітальні витрати на кг H ₂	470 євро
Частка операційних витрат у капітальних витратах	2%
Ступінь зарядженості	30%

Ємність сховища:

$$\text{Ємність сховища} = \text{Річний обсяг виробництва водню} \cdot \text{Ступінь зарядженості} \quad (3.9)$$

Загальні капітальні витрати:

$$\text{Загальні капітальні витрати} = \text{Ємність сховища} \cdot \text{Капітальні витрати на кг H}_2 \quad (3.10)$$

Річні операційні витрати:

$$\text{Річні операційні витрати} = \text{Загальні капітальні витрати} \cdot \text{Частка операційних витрат у капітальних витратах} \quad (3.11)$$

LCOE:

$$LCOE_{Storage} = \frac{\text{Загальні початкові інвестиції} + \sum_{t=1}^n \frac{\text{Annual OPEX}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{\text{Виробництво водню} \cdot \text{Енергетична цінність водню}}{(1+r)^t}} \quad (3.12)$$



Рисунок 3.11 – Розподіл витрат на зберігання водню

Зберігання водню має найвищі витрати серед трьох систем, що призводить до LCOE у розмірі 0,59328 €/кВт·год. Кругова діаграма надає наочний розподіл витрат.

3.13 Результати розрахунку економічних показників комбінованої системи

Таблиця 3.6 – Фінансові та виробничі показники

Параметр	Значення
Загальні капітальні витрати (CAPEX)	1 295 094,21 €
Загальні операційні витрати (OPEX) на рік	54 526,54 €
LCOE	299,74 €/MВт·год (або 0,29974 €/кВт·год)
Загальний обсяг виробництва водню за 10 років	74 901,60 кг
Загальний обсяг енергії, виробленої фотоелектричними системами за 10 років	2 900 MВт·год

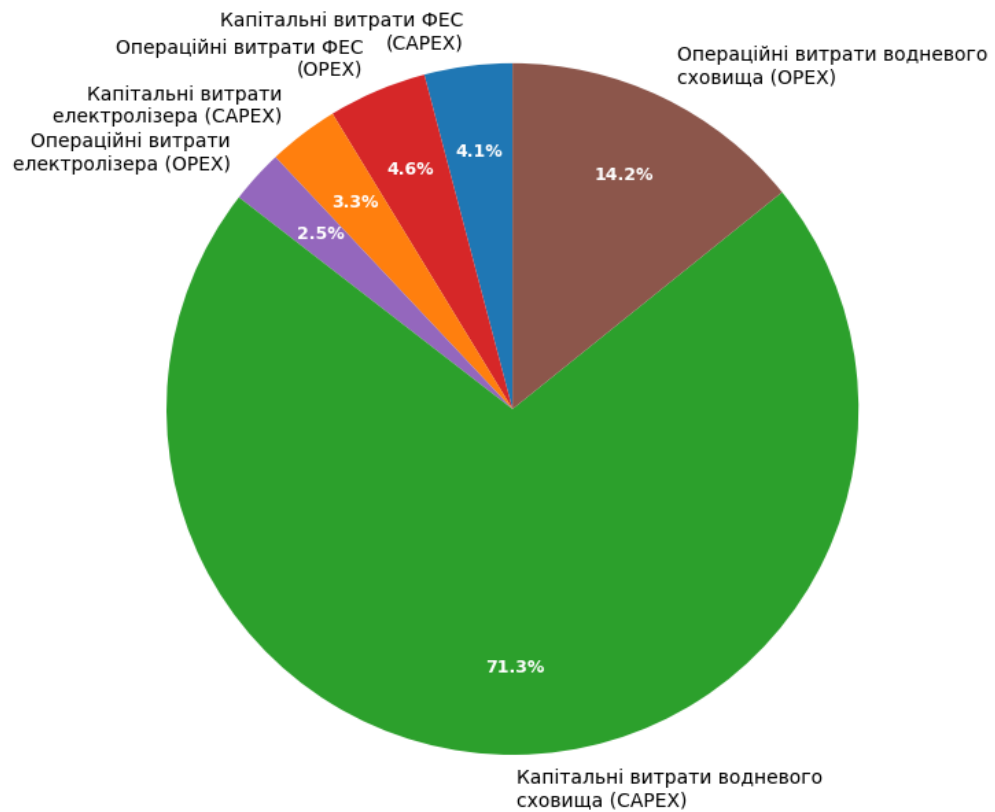


Рисунок 3.12 – Розподіл сукупних витрат

Сукупна система має загальні капітальні (CAPEX) та операційні (OPEX) витрати, що складаються з окремих компонентів, що дає сукупну LCOE на рівні 0,29974 €/кВт·год. Кругова діаграма показує загальний розподіл витрат, а гістограма LCOE порівнює LCOE кожної окремої системи та сукупної системи.

3.14 Висновки до розділу

У результаті виконаного моделювання фотоелектричної станції для генерування водню отримано такі основні результати:

1. Розрахункову модель системи реалізовано в середовищі Simulink®. Проведено аналіз роботи електролізера з протонно-обмінною мембраною, визначено основні вхідні параметри електролітичного блоку та системи зберігання водню.

2. Виробництво водню має лінійний характер зростання, що свідчить про стабільну роботу електролізера та ефективне використання електроенергії від фотоелектричних панелей. Ефективність виробництва водню в діапазоні струму 1–25 А перебуває в межах 0,35–0,75.

3. Проаналізовано перехідні процеси в системі змінного та постійного струму. Встановлено, що початкові коливання струму, напруги та потужності, зумовлені пусковими режимами, швидко затухають, і система переходить у стаціонарний режим роботи.

4. Визначено показник LCOE для кожного компонента системи: фотоелектричні панелі — 0,16611 €/кВт·год, електролізер — 0,15191 €/кВт·год, система зберігання водню — 0,59328 €/кВт·год. Загальна вартість електроенергії для комбінованої системи становить 0,29974 €/кВт·год.

5. За 10 років експлуатації загальний обсяг виробництва водню становить 74 901,60 кг при загальних капітальних витратах 1 295 094,21 € та річних операційних витратах 54 526,54 €.

6. Отримані результати підтверджують технічну можливість та економічну доцільність використання фотоелектричної станції для виробництва водню як відновлюваного джерела енергії.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання

Загальні вимоги безпеки до конструкції виробничого обладнання встановлені ДНАОП.

Безпека виробничого обладнання забезпечується [32]:

- при проектуванні - дотриманням принципів технологічності і ергономічності конструкції, застосуванням раціональних кінематичних схем, принципу безперервності процесу, дистанційного або автоматичного управління, забезпеченням запобіжними та захисними системами;
- при виготовленні - застосуванням сучасних технологій машинобудування, дотриманням передбачених допусків та посадок;
- при збірці та монтажі - точним дотриманням технології;
- при експлуатації - своєчасним обслуговуванням та профілактичними оглядами, дотриманням експлуатації, тощо.

Виробниче обладнання має бути пожежо- і вибухобезпечним. Воно не повинно створювати небезпеки в результаті дії вологості, сонячної радіації, механічних коливань, високих і низьких тисків і температур, агресивних речовин і мікроорганізмів.

Важливою умовою безпечної експлуатації обладнання є дотримання вимог санітарних норм і правил, галузевих стандартів і правил техніки безпеки щодо розмірів виробничих приміщень, галерей і тунелів, мінімальної висоти до низу виступаючих будівельних конструкцій, ширини проходів.

Рухомі частини обладнання, що є джерелом небезпеки, повинні бути огорожені, за виключенням частин, огороження яких не допускається за їх функціональним призначенням. У цих випадках передбачається сигналізація, що попереджує про пуск машин в роботу, засоби зупинки і відключення джерел енергії. При наявності машин значної довжини (наприклад, транспортерів)

засоби зупинки повинні розміщуватись не рідше як через кожні 10 м їх довжини.

Елементи конструкцій виробничого обладнання не повинні мати гострих кутів, кромок і поверхонь з нерівностями, що становлять собою джерело небезпеки, якщо їх наявність не визначається функціональним призначенням обладнання.

Конструкція обладнання повинна виключати можливість випадкового дотику працюючих до гарячих і переохолоджених частин. Виділення і поглинання обладнанням тепла, а також виділення їм вологи у виробничих приміщеннях не повинно перевищувати гранично допустимі! рівні (концентрації) в межах робочої зони.

4.2 Причини електротравм, напруга кроку

Як і при інших видах травм, при електротравмах виділяють технічні, організаційно-технічні, організаційні і організаційно-соціальні їх причини [32].

До технічних причин належать: недосконалість конструкції електроустановки і засобів захисту, допущені недоліки при виготовленні, монтажі і ремонті електроустановки.

До основних організаційних причин електротравм належать:

- відсутність (непризначення наказом) на підприємстві особи, відповідальної за електрогосподарство або невідповідність кваліфікації цієї особи чинним вимогам;
- недостатня укомплектованість електротехнічної служби працівниками відповідної кваліфікації;
- відсутність на підприємстві посадових інструкцій для електротехнічного персоналу та інструкцій із безпечного обслуговування та експлуатації електроустановок;
- недостатня підготовленість персоналу з питань електробезпеки, несвоєчасна перевірка знань, невідповідність групи з електробезпеки персоналу

характеру робіт, що виконуються;

- недотримання вимог щодо безпечного виконання робіт в електроустановках за нарядами-допусками, розпорядженнями та в порядку поточної експлуатації;

- неефективний нагляд, відомчий і громадський контроль за дотриманням вимог безпеки при виконанні робіт в електроустановках та їх експлуатації.

До основних організаційно-соціальних причин електротравм належать: змушене виконання не за спеціальністю електробезпечних робіт; негативне ставлення до виконуваної роботи, обумовлене соціальними чинниками; залучення працівників до понадурочних робіт; порушення виробничої дисципліни; залучення до роботи осіб віком до 18 років.

При переміщенні людини в зоні розтікання струму в землі її ноги будуть торкатися ділянок землі з різними потенціалами, а на людину буде діяти напруга, яка визначається різницею цих потенціалів і відома під назвою *напруга кроку* - різниця потенціалів між двома точками на поверхні землі в зоні розтікання струму, які знаходяться на відстані кроку (0,8 м) одна від одної. З наближенням до місця замикання на землю величина напруги кроку буде зростати, і вона може досягти небезпечних для людини значень вже при напрузі електроустановок 0.4 кВ, а в сиру погоду та за зволоженого ґрунту і при меншій напрузі. Тому Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів при наявності замикання на землю забороняють наближатися до місця замикання ближче 8 м поза приміщенням і 4 м в приміщенні без застосування засобів захисту - діелектричні боти, галоші, суха дошка, сухе гумове взуття тощо.

У цілому, заходи захисту людини від дії напруги кроку зводяться до розірвання мережі струму через людину по петлі "нога-нога", або різкого збільшення опору в цій петлі за рахунок використання різних підручних засобів. За необхідності невідкладного входу в зону небезпечних напруг кроку для надання допомоги потерпілим і т.ін. і відсутності під рукою засобів

захисту, доцільно переміщуватися в цій зоні обережно, пересуваючи ступні по землі так, щоб вони постійно торкались одна другої.

4.3 Заходи безпеки при монтажі енергоустановок

Роботи в електроустановках, що стосується заходів безпеки, діляться на три категорії [16,17]: 1) зі зняттям напруги; 2) без зняття напруги на струмовідних частинах і поблизу них; 3) без зняття напруги не на струмовідних частинах, що знаходяться під напругою.

У випадку одночасної роботи в електроустановках напругою до і понад 1000 В категорії робіт визначаються як для установок більше 1000 В.

До робіт, які виконуються зі зняттям напруги, належать роботи, які здійснюються в електроустановці (або її частини), в якій з струмопровідних частин знято напругу і доступ в електроустановки (або їх частини), що знаходяться під напругою, стало неможливим.

До робіт, які виконуються без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них, належать роботи, що проводяться безпосередньо на цих частинах. Роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них слід виконувати не менше як двом працівникам, з яких керівник робіт повинен мати групу IV, інші - групу III.

В електроустановках напругою понад 1000 В роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них слід виконувати із застосуванням засобів захисту для ізоляції працівника від струмопровідних частин або від землі. У випадку ізоляції працівника від землі роботи слід виконувати згідно спеціальних інструкцій або технологічними картами, в яких передбачені необхідні заходи безпеки.

Під час роботи в електроустановках напругою до 1000 В без зняття напруги на струмопровідних частинах або поблизу від них необхідно:

- захистити розташовані поблизу робочого місця інші струмопровідні частини, які знаходяться під напругою, і до яких можливо випадковий дотик;

- працювати в діелектричній взуття, стоячи або на ізолювальних підставці або на діелектричному килимі;

- застосовувати інструмент з ізолювальними рукавами (у викруток, крім того, повинен бути ізолюваний стрижень); за відсутності такого інструменту слід користуватися діелектричними рукавичками.

Під час виконання робіт без зняття напруги на струмопровідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно:

- Тримати ізолювальні частини засобів захисту за рукави до обмежувального кільця;

- Розміщувати ізолювальні частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмопровідними частинами двох фаз чи замикання на землю;

- Користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям.

У разі виявлення порушень лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту користування ними забороняється.

У процесі роботи із застосуванням електрозахисних засобів (ізолювальні штанги та кліщі, електровимірювальні кліщі, покажчики напруги) допускається наближення працівника до струмопровідних частин на відстань, яка визначається довжиною ізолювальної частини цих коштів.

Всі працівники, які знаходяться у приміщеннях з чинним електрообладнанням електростанцій і підстанцій (за винятком щитів керування релейних та їм подібних приміщень), в ЗРУ, ВРУ, в колодязях, тунелях і траншеях зобов'язані користуватися захисними касками.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналітичний огляд сучасних технологій виробництва водню. Встановлено, що електроліз води з використанням енергії фотоелектричних систем є одним із найперспективніших методів отримання «зеленого» водню, який повністю відповідає принципам сталого розвитку та декарбонізації енергетики.

2. Розроблено модель фотоелектричної станції для генерування водню, що включає фотоелектричну батарею, трифазний інвертор на базі 3-рівневого IGBT-мосту з широтно-імпульсною модуляцією, понижувальний трансформатор, електролізер із протонно-обмінною мембраною та систему зберігання водню на базі балонів низького тиску. Кожен компонент системи описано представлено у вигляді функціональних блоків у середовищі Simulink.

3. Реалізовано розрахункову модель у середовищі MATLAB/Simulink та проведено комп'ютерне моделювання роботи системи. Встановлено, що виробництво водню має лінійний характер зростання, що свідчить про стабільну роботу електролізера.

4. Встановлено, що коефіцієнт ефективності виробництва водню перебуває в межах 0,35-0,75.

5. Проаналізовано перехідні процеси в системі: початкові коливання струму, напруги та потужності швидко затухають, і система переходить у стаціонарний режим роботи з синусоїдальною формою змінного струму.

6. Розраховано показники економічної ефективності системи за методикою LCOE. Отримано такі значення: для фотоелектричних панелей – 0,166 €/кВт·год, для електролізера – 0,152 €/кВт·год, для системи зберігання водню – 0,59 €/кВт·год. Загальний показник LCOE для комбінованої системи становить 0,3 €/кВт·год. За 10 років експлуатації загальний обсяг виробництва водню становить 74 901,60 кг при загальних капітальних витратах 1295094,21 € та річних операційних витратах 54 526,54 €.

7. Отримані результати підтверджують технічну можливість та економічну доцільність використання фотоелектричної станції для виробництва водню як відновлюваного джерела енергії.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.
2. Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій— присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. — С. 294.
3. Коваль В.П. Інтегрування електроавтомобіля у систему електроживлення будинку // В.П. Коваль, к.т.н. доц; А.В. Слободян; К.В. Слободян / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 36-37.
4. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10
5. Філюк Я. О. Автономне живлення зовнішнього освітлення з використанням світлодіодних джерел світла / Ярослав Філюк, Вадим Коваль // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», 19–21 травня 2015 року — Т. : ТНТУ, 2015 — С. 191-192.
6. Orobchuk B. Development and research of Wi-Fi network for receiving and transmitting telemechanical information in the training laboratory / Bogdan

Orobchuk, Vadym Koval // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2020. — Vol 99. — No 3. — P. 124–132.

7. Герега С. Збільшення ефективності використання сонячних панелей / Степан Герега, Вадим Коваль, Ярослав Філюк // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 202.

8. Коваль В. П. Енергоефективність системи позиціонування фотоелектричних батарей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, Ю. О. Пилипчук // Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 16-17 листопада 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — Том 3. — С. 139.

9. Коваль В.П. Фотоелектрична станція для забезпечення власних потреб // В.П. Коваль, Д.Ф.Паловці, Abul Kalam Azad / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С .

10. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing / Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin // ICAAEIT 2021, 15-17 December 2021. — Tern.: TNTU, Zhytomyr «Publishing house „Book-Druk“» LLC, 2021. — P. 14–19.

11. Коваль В.П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів / В.П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Я.М. Осадца, Л.М. Костик // Вісник Хмельницького національного університету – 2022. - №5. – С.168–173

12. Іме А.Н. Підвищення ефективності сонячних панелей шляхом використання водяного охолодження/Аях Нсікак Іме, В.П. Коваль//Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій —, 25-26 листопада 2020 року.— Т.: ТНТУ, 2020.—Том 2.— С. 80–81

13. Грицюк М.Я. Переваги концентруючих фотоелектричних електростанцій // М.Я. Грицюк; В.П. Коваль / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 29-30.

14. Робота фотоелектричної станції на основі гібридного інвертора з різною ємністю системи накопичення електроенергії. Коваль, В., Оробчук, Б., Буняк, О., Гетманюк, В. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки. 343(6(1), (2024). С. 208-214. Галузь науки: технічні (17.03.2020)

15. Bohdan Orobchuk, Oleh Buniak, Ivan Sysak, Serhii Babiuk, Ihor Bodnarchuk, Vadym Koval (2024) Development of Software for the Implementation of Automated Reserve Input Modes Operation. 2nd International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 12-14, Vol. 3742, Pages 316-336

16. Qu, W., Hong, H., & Jin, H. (2019). A spectral splitting solar concentrator for cascading solar energy utilization by integrating photovoltaics and solar thermal fuel. *Applied Energy*, 248, 162-173.

17. Wang, Y., Li, Q., Li, D., & Hong, H. (2018). Thermodynamic analysis for a concentrating photovoltaic-photothermochemical hybrid system. *Energy*, 148, 528-536.

18. Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., & Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111180.

19. Awasthi, A., Scott, K., & Basu, S. (2011). Dynamic modeling and simulation of a proton exchange membrane electrolyzer for hydrogen production. *International journal of hydrogen energy*, 36(22), 14779-14786.

20. Bocklisch, T. (2015). Hybrid energy storage systems for renewable energy applications. *Energy Procedia*, 73, 103-111.

21. Maka, A. O., & Ghalut, T. (2025). An overview and perspective of solar photovoltaic-green hydrogen production system. *Fuel*, 400, 135760.
22. Акумуляція електроенергії у автономних освітлювальних установках / В.П.Коваль, В.А. Андрійчук, К.М.Козак// Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи», 23-27 лютого 2015 р., Тернопіль, Яремче (УКРАЇНА) – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2015.– С. 98-99.
23. Гнатюк В.В. Роль систем зберігання електроенергії для енергосистеми // В.В. Гнатюк; В.І. Кузьмич; В.П.Коваль / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 21-22.
24. Малушенко А.С. Перспектива зарядки електромобілів від відновлювальних джерел енергії // А. С. Малушенко; М.Б. Горват; В. П. Коваль / Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6-7 грудня 2023) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. – С. 225.
25. Енергоощадна інтелектуальна система керування механічною системою / Богдан Оробчук, Іван Сисак, Ярослав Осадца, Вадим Коваль, Сергій Бабюк // МММТЕС, 22-23 листопада 2022 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. — С. 128–130.
26. Керя Ю.Б. Роль системи накопичення енергії у електроенергетичній системі //Ю.Б.Керя, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 68.

27. Коваль В.П. Вплив ємності акумулятора на ефективність роботи фотоелектричної станції//В.П.Коваль / Інноваційні технології в світлотехніці та електроенергетиці : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 16–17 трав. 2024 р. / Нац. акад. наук вищ. освіти України, Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, Нац. наук. центр «Ін-т метрології» [та ін.]. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – С. 75-77.

28. Wei, D., Li, H., Ren, Y., Yao, X., Wang, L., & Jin, K. (2022). Modeling of hydrogen production system for photovoltaic power generation and capacity optimization of energy storage system. *Frontiers in Energy Research*, 10, 1004277.

29. Görgün, H. (2006). Dynamic modelling of a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer. *International journal of hydrogen energy*, 31(1), 29-38.

30. De Lorenzo, G., Agostino, R. G., & Fragiaco, P. (2022). Dynamic electric simulation model of a proton exchange membrane electrolyzer system for hydrogen production. *Energies*, 15(17), 6437.

31. Marocco, P., Gandiglio, M., Audisio, D., & Santarelli, M. (2023). Assessment of the role of hydrogen to produce high-temperature heat in the steel industry. *Journal of Cleaner Production*, 388, 135969.

32. Гандзюк, М. П. Основи охорони праці [Текст] : підручник / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський ; за ред. М. П. Гандзюка ; МОН України. – 4-е видання. – К. : Каравела, 2008. – 384 с.