МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

Пояснювальна записка

до дипломної роботи бакалавра

на тему:

Аналіз роботи металогідридного акумулятора для систем подачі водню до паливних комірок

Виконав: студент 4 курсу,
групи НФ-42 Воробйов М.В.

_____

Спеціальність: 144 «Теплоенергетика»
Освітня програма: «Моделювання енергетичних систем та енергоефективність»
Керівник: кандидат техн. наук, доцент
Чорна Н.А.

Харків – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики

Кафедра_____фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології_____

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень)_____бакалавр_____

Спеціальність _____144 Теплоенергетика _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ О.П.Кулик

підпис ініціали,прізвище

"____"_____20___року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

_____Воробйову Микиті Дмитровичу_____

(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема роботи «Аналіз роботи металогідридного акумулятора для систем подачі водню до паливних комірок»,

керівник роботи Чорна Наталя Анатоліївна

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

затверджені наказом по університету від "___"_____20__року №___

2. Строк подання студентом роботи_____

3. Перелік питань, які потрібно розробити: Аналіз перспектив застосування водню як альтернативного джерела енергії; дослідження металогідридних систем зберігання водню та класифікація паливних комірок; Порівняльний аналіз методів зберігання водню та розробка концепції енергетичної системи на основі металогідридних акумуляторів; розрахунок витрати водню для системи з паливною коміркою та металогідридним накопичувачем

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Аналіз перспектив застосування водню як альтернативного джерела енергії
2	Дослідження металогідридних систем зберігання водню та класифікація паливних комірок
3	Порівняльний аналіз методів зберігання водню та розробка концепції енергетичної системи на основі металогідридних акумуляторів
4	Розрахунок витрати водню для системи з паливною коміркою та металогідридним накопичувачем
5	Висновки

5. Дата видачі завдання _____

Студент _____ Воробйов М.Д.

підпис ініціали, прізвище

Керівник роботи _____ Чорна Н.А.

підпис ініціали, прізвище

Реферат

Кваліфікаційну роботу з освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавра виконано студентом Воробйовим Микитою Дмитровичем на тему:

«Аналіз роботи металогідридного акумулятора для систем подачі водню до паливних комірок»

Робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, 14 рисунків, 7 таблиць, список використаних джерел з 29 найменувань.

Об'єктом дослідження є процес накопичення та зберігання водню для енергетичних потреб.

Предметом дослідження є металогідридна система зберігання водню та їх інтеграція до систем паливних комірок, розрахована кількість водню для паливної комірки в залежності від її ККД.

Метою роботи є дослідження ефективності металогідридних акумуляторів та паливних комірок у складі автономних енергокомплексів для віддалених споживачів.

У ході роботи, було проведено аналіз особливостей водневих технологій, розраховано залежність маси водню та металогідридного матеріалу від потужності та ККД паливної комірки.

В результаті виконання дипломної роботи підтверджено доцільність використання металогідридних систем для безпечного, компактного та енергоефективного зберігання водню в умовах сучасних вимог до енергетичної стійкості та екологічної безпеки.

Ключові слова: ВОДЕНЬ, МЕТАЛОГІДРИДНИЙ АКУМУЛЯТОР, ПАЛИВНА КОМІРКА, ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ, ККД, ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА, АВТОНОМНІ СИСТЕМИ

Abstract

This bachelor's qualification work, completed by student Mykyta Dmytrovych Vorobyiov, is devoted to the topic:

“Analysis of Metal Hydride Battery Usage in Fuel Cell Systems.”

The work consists of an introduction, three chapters, conclusions, 14 figures, 7 tables, and a list of sources used with 29 names.

The object of the study is the process of hydrogen accumulation and storage for energy purposes.

The subject of the work is metal hydride hydrogen storage systems and their integration into fuel cell-based power systems.

The purpose of this research is to evaluate the efficiency of metal hydride batteries as part of hydrogen-based energy supply systems for creating autonomous, environmentally safe energy solutions.

The study includes an analysis of hydrogen storage technologies, calculations of hydrogen and metal hydride mass depending on the fuel cell's power and efficiency, and modeling of a hybrid energy system based on an electrolyzer, metal hydride storage, and a fuel cell. A case study of DHL's implementation of hydrogen solutions in logistics operations supports the practical relevance.

As a result, the study confirms the feasibility of using metal hydride systems for compact, efficient, and safe hydrogen storage to meet the requirements of modern energy sustainability and environmental standards.

Keywords: HYDROGEN, METAL HYDRIDE BATTERY, FUEL CELL, ENERGY STORAGE, EFFICIENCY, ECOLOGICAL SAFETY, AUTONOMOUS SYSTEMS.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ 7

ВСТУП 8

РОЗДІЛ 1 ВОДЕНЬ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНЕ ДЖЕРЕЛО ЕНЕРГІЇ 10

1.1 Перспективи використання водню в енергетиці 10

1.2 Металогідридні системи зберігання водню 16

1.3 Аналіз існуючих паливних комірок 19

РОЗДІЛ 2. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ. ВСТАНОВЛЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТАЛОГІДРИДНИХ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ 26

2.1 Структура існуючих систем накопичення та зберігання водню 26

2.2 Загальна концепція організації енергетичної системи на базі металогідридних акумуляторів та паливних комірок 31

3. РОЗРАХУНОК СПОЖИВАННЯ ВИТРАТИ ВОДНЮ ДЛЯ СПІЛЬНОЇ РОБОТИ ПАЛИВНИХ КОМІРОК І МЕТАЛОГІДРИДНОГО НАКОПИЧУВАЧА ВОДНЮ 35

3.1 Аналіз розрахункових досліджень щодо визначення кількості водню у водневих системах різної потужності 38

ВИСНОВКИ 43

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 45

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ВДЕ - відновлювальні джерела енергії;

ПК - паливна комірка;

МГА - металогідридний акумулятор;

H_2 - Водень (Hydrogen)

O_2 - Кисень (Oxygen)

CO_2 - Вуглекислий газ (Carbon Dioxide)

МГСВ -Металогідридні системи зберігання водню (Metal Hydride Storage Systems)

ПП - Паливні комірки (Fuel Cells)

IEC - Міжнародне енергетичне агентство (International Energy Agency)

ЕС - Європейський Союз (European Union)

НАН України - Національна академія наук України (National Academy of Sciences of Ukraine)

ГТСС - Газотранспортна система України (Gas Transmission System of Ukraine)

GKN - Назва компанії (GKN Hydrogen)

REMEDHYS - Європейський проект з водневими технологіями (Renewable Maritime Hydrogen Storage)

NREL - Національна лабораторія відновлюваної енергії США (National Renewable Energy Laboratory)

США - Сполучені Штати Америки (United States of America)

LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) - міжнародна система сертифікації енергоефективних та екологічно безпечних будівель, розроблена у США.

BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*) - британська система оцінки екологічної ефективності будівель, орієнтована на сталий розвиток.

LH_2 (Liquid Hydrogen) - рідкий водень

ККД - Коефіцієнт корисної дії

ВСТУП

На тлі глобального потепління, вичерпності викопних палив і зростаючих вимог до екологічності джерел енергії, сучасна енергетика активно шукає нові шляхи сталого розвитку. Одним із найперспективніших рішень у цій сфері є воднева енергетика, яка поєднує високу енергетичну щільність, універсальність застосування та відсутність шкідливих викидів при використанні водню як пального. Водень здатен забезпечити стабільну й екологічно чисту альтернативу традиційним видам палива в промисловості, транспорті та побуті.

Особливу увагу в цьому контексті привертають паливні комірки, що дозволяють перетворювати хімічну енергію водню безпосередньо в електричну.

Однак ефективність таких систем значною мірою залежить від технологій зберігання та подачі водню. Серед усіх існуючих методів особливої уваги заслуговують металогідридні акумулятори, які дозволяють зберігати водень у формі твердого стану завдяки утворенню хімічних сполук між воднем та металами. Такі системи вирізняються високою безпекою, компактністю, відносно низьким робочим тиском та можливістю багаторазової експлуатації без суттєвих втрат ємності.

Останні десятиліття відзначені активним розвитком водневої енергетики: у країнах Європейського Союзу, США, Японії, Південної Кореї та Китаї ухвалено національні стратегії розвитку водневої економіки, що передбачають масове впровадження водневих технологій у сферу транспорту, енергетики та інфраструктури. Це свідчить про перехід водневої енергетики від науково-дослідної фази до стадії активної комерціалізації. Розробка ефективних технологій зберігання водню є ключовим елементом цього переходу.

Водночас, в умовах геополітичної нестабільності та зростання потреб у енергетичній безпеці, розвиток автономних та екологічно чистих джерел енергії стає важливою складовою стратегії енергетичної незалежності держав. Для України це питання також є актуальним, адже інтеграція у європейський

енергетичний простір та декарбонізація економіки потребують активного впровадження водневих технологій, зокрема на основі паливних комірок та систем їх живлення.

Метою дипломної роботи є аналіз роботи металогідридного акумулятора в системах подачі водню до паливних комірок, а також дослідження їх ефективності, технічних характеристик, переваг і обмежень на прикладі реального підприємства. Практична частина роботи буде ґрунтуватися на аналізі діяльності міжнародної компанії DHL (Deutsche Post DHL Group) - одного з лідерів глобального логістичного ринку, який активно впроваджує водневі технології у свої транспортні та складські операції. Зокрема, компанія тестує та використовує водневі вантажівки, автоматизовані системи з паливними комірками, а також експериментує з технологіями зберігання водню, включаючи металогідридні рішення, у межах своєї стратегії "GoGreen".

Актуальність теми полягає у стрімкому зростанні зацікавленості до водневої енергетики на глобальному рівні, що підтверджується значними інвестиціями, розвитком відповідної інфраструктури, політичною підтримкою, а також науковими досягненнями у сфері матеріалознавства та систем зберігання енергії. Новизна даного дослідження полягає у поєднанні теоретичного аналізу металогідридних технологій із практичним вивченням досвіду компанії DHL, що дозволяє зробити обґрунтовані висновки щодо ефективності їхнього застосування в сучасних енергетичних та логістичних системах.

РОЗДІЛ 1 ВОДЕНЬ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНЕ ДЖЕРЕЛО ЕНЕРГІЇ

1.1 Перспективи використання водню в енергетиці

У XXI столітті людство постало перед серйозними викликами, пов’язаними з використанням традиційних джерел енергії - нафти, природного газу та вугілля. Ці ресурси не тільки обмежені у кількості, але й мають суттєвий негативний вплив на довкілля. Викиди парникових газів, зокрема CO_2, призводять до глобального потепління, кліматичних змін і загострення екологічних катастроф. Окрім цього, енергетична залежність від викопних ресурсів часто породжує геополітичну нестабільність, конфлікти за ресурси та економічну вразливість країн-імпортерів.

У відповідь на ці виклики все більше країн інвестують у розвиток альтернативних джерел енергії, які здатні забезпечити сталість енергетичної системи та мінімізувати шкоду для довкілля. До найпоширеніших джерел такого типу належать:

Сонячна енергія - потужний ресурс, який можна використовувати практично в будь-якому регіоні світу;

Вітрова енергія - ефективне джерело для північних країн та прибережних територій;

Геотермальна енергія - доступна у зонах з вулканічною активністю;

Біоенергетика - переробка органічних відходів у біогаз або біопаливо;

Воднева енергетика - одне з найперспективніших і найбільш універсальних рішень майбутнього.

Особливе місце серед цих джерел посідає водень - найлегший хімічний елемент у Всесвіті, але з величезним енергетичним потенціалом. Його головна перевага - екологічність: при використанні у паливних комірках єдиним "викидом" є водяна пара. Крім того, водень має високу енергоємність - майже

втричі більшу, ніж бензин, - що робить його ідеальним кандидатом для транспорту, промисловості та навіть житлового сектору.

Ще одна важлива риса - універсальність застосування: водень можна використовувати як паливо для автомобілів, зберігати надлишкову енергію від сонячних чи вітрових електростанцій, а також як сировину в хімічній промисловості. Таким чином, водень - не просто альтернатива викопному паливу, а реальний крок до енергетичного переходу.

У сучасних умовах зростаючої енергетичної кризи та необхідності переходу до сталих джерел енергії, все більше уваги приділяється водню як одному з найперспективніших альтернативних енергоносіїв. Його висока енергетична щільність, екологічна чистота при використанні, а також універсальність застосування в різних секторах економіки роблять водень ключовим елементом майбутнього енергетичного балансу. У цьому підрозділі розглянуто потенціал водневої енергетики, її переваги, виклики впровадження та перспективи розвитку на глобальному та національному рівнях.

Актуальність проблеми застосування водневих технологій в різних галузях промисловості та енергетиці викликає підвищену цікавість в багатьох країнах світу.

На рис. 1.1 представлено схематичне зображення ланцюга виробництва та використання "зеленого" водню - від генерації електроенергії з відновлюваних джерел до його застосування в різних секторах з нульовим викидом шкідливих речовин.

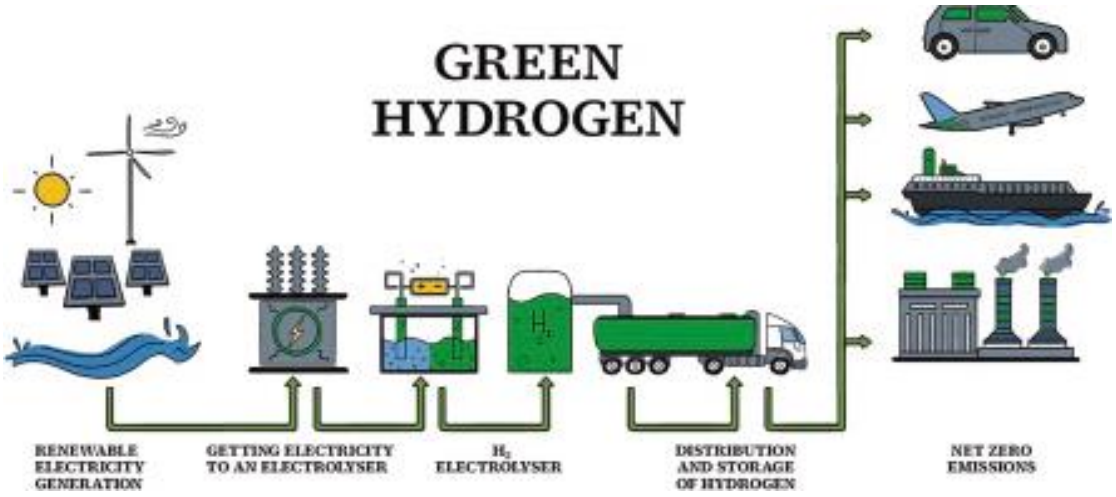


Рис. 1.1 - Перспективи використання водню у різних сферах

Renewable Electricity Generation - генерація електроенергії з відновлюваних джерел: сонячні панелі, вітрові турбіни та гідроелектростанції. Саме з цих джерел отримують екологічно чисту електроенергію для подальшого виробництва водню.

Getting Electricity to an Electrolyser - передача виробленої електроенергії до електролізера. Цей етап забезпечує подачу струму, необхідного для розкладу води на водень і кисень.

H_2 Electrolyser - електролізер, в якому відбувається розщеплення води (H_2O) на водень (H_2) та кисень (O_2) за допомогою електричного струму.

Distribution and Storage of Hydrogen - зберігання та транспортування водню.

Водень може бути стиснутим, скрапленим або абсорбованим у металогідридних матеріалах і транспортується до кінцевих споживачів.

Net Zero Emissions – використання водню в різних сферах:

- Транспорт (автомобілі, вантажівки, потяги, літаки),
- Житлово-комунальне господарство

Промисловість - як джерело тепла або сировина. Усі ці процеси не супроводжуються викидами CO_2, що відповідає цілям досягнення нульового рівня викидів (Net Zero Emissions).

На сучасному етапі розвитку енергетики особливу увагу привертають альтернативні джерела енергії, здатні зменшити залежність від викопного палива та знизити рівень викидів парникових газів. Водень, як універсальний і чистий енергоносій, займає центральне місце серед таких альтернатив завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям та екологічним перевагам [1].

До основних переваг застосування водню можна зазначити дані, які вказані в таблиці 1.1

Таблиця 1.1- Основні переваги використання водню в енергетиці

№	Перевага	Опис
1	Висока енергетична щільність	1 кг водню містить приблизно 120 МДж енергії – у 2,7 рази більше, ніж бензин
2	Відсутність шкідливих викидів	При згорянні або в паливних комірках утворюється лише вода, без CO_2 та токсичних газів.
3	Універсальність застосування	Використовується в електроенергетиці, транспорті, промисловості, системах накопичення енергії.

Таким чином, водень має низку важливих переваг, які роблять його привабливим енергоносієм для широкого спектра застосувань. Його висока

енергетична щільність, екологічна безпечність та універсальність використання відкривають значні перспективи для трансформації сучасної енергетичної системи в напрямку сталого розвитку. Саме ці фактори обумовлюють зростання інтересу до водневої енергетики як на рівні державної політики, так і серед провідних промислових компаній. У подальших підрозділах роботи буде розглянуто, як ці переваги реалізуються на практиці, зокрема через використання металогідридних систем зберігання водню та паливних комірок [2].

У 2020 році Міжнародне енергетичне агентство (IEA) представило "Hydrogen Roadmap", в якій водень визначається як ключовий елемент майбутньої енергетичної системи. Більшість розвинених країн уже розробили або впроваджують національні водневі стратегії, зокрема:

ЄС: стратегія передбачає інвестиції у водневу інфраструктуру до 470 млрд євро до 2050 року, з акцентом на "зелений" водень, отриманий за допомогою електролізу із відновлюваних джерел.

Німеччина: планує стати лідером у виробництві та експортуванні водню, вже інвестовано понад 9 млрд євро у водневу економіку.

Японія та Південна Корея: активно розвивають водневий транспорт та інфраструктуру для заправки, а також впроваджують паливні комірки у побуті.

США: ініціатива Hydrogen Shot має на меті знизити вартість "зеленого" водню до 1 долара за кілограм протягом наступного десятиліття [3].

Також є різні сфери застосування водню, одні з ключових це:

- **Електроенергетика** - водень може ефективно виконувати роль накопичувача енергії, що дозволяє згладжувати пікові навантаження в енергосистемі, а також забезпечувати збереження енергії, отриманої з відновлюваних джерел (сонячної, вітрової тощо).
- **Промисловість** - водень активно використовується у технологічних процесах, де складно уникнути викидів CO_2 при застосуванні традиційного викопного палива. Найбільше значення має в сталеплавильній промисловості, хімічному виробництві, а також у виготовленні мінеральних добрив.

- **Транспорт** - завдяки використанню водню у паливних комірках відкриваються нові можливості для декарбонізації транспорту. Зокрема, водневе паливо застосовується для живлення легкових автомобілів, вантажного транспорту, автобусів, поїздів, морських суден та навіть літальних апаратів.
- **Житлово-комунальний сектор** - паливні комірки на водні знаходять застосування в автономних системах електро та теплопостачання житлових і комерційних будівель, особливо у віддалених регіонах.

Україна має значний потенціал для розвитку водневої енергетики, що обумовлено наявністю ресурсів відновлюваної енергії, розвиненою газотранспортною інфраструктурою та стратегічним розташуванням поблизу Європейського Союзу.

Згідно з оцінками фахівців НАН України, за умови повного використання потенціалу відновлюваних джерел енергії, країна може виробляти до 337–505 млрд кубометрів водню щорічно, що значно перевищує внутрішні потреби та відкриває можливості для експорту до ЄС [4].

У 2023 році Міністерство енергетики України презентувало проєкт Водневої стратегії до 2050 року, яка передбачає будівництво до 10 ГВт електролізних потужностей для виробництва відновлюваного водню . Це сприятиме декарбонізації промисловості та інтеграції України в європейський водневий ринок [5].

Одним із ключових напрямків є модернізація газотранспортної системи для транспортування водню. Оператор ГТС України вже бере участь у ініціативі "Центральноєвропейський водневий коридор", що об'єднує Україну, Чехію, Словаччину та Німеччину . Це дозволить транспортувати "зелений" водень до країн ЄС, використовуючи існуючу інфраструктуру [5].

Крім того, в Україні реалізуються проєкти створення "водневих долин" в Одеській та Закарпатській областях, спрямовані на задоволення внутрішнього попиту та вихід на експортні ринки [6].

Таким чином, розвиток водневої енергетики в Україні не лише сприятиме енергетичній безпеці та декарбонізації економіки, але й зміцнить позиції країни як надійного партнера в європейському енергетичному просторі.

1.2 Металогідридні системи зберігання водню

Металогідридні системи зберігання водню - це технології, що базуються на здатності деяких металів і сплавів утворювати хімічні сполуки з воднем (металогідриди) при відповідних умовах температури та тиску. У таких системах водень адсорбується в кристалічну решітку металу, переходячи у зв'язаний стан. За потреби (наприклад, при нагріванні) водень десорбується і може бути поданий до споживача, зокрема до паливної комірки. Цей метод забезпечує безпечне, компактне й багаторазове зберігання водню при відносно низькому тиску.

Одним із ключових викликів у розвитку водневої енергетики є ефективне та безпечне зберігання водню. Через його дуже низьку густину у газоподібному стані водень займає великий об'єм, а спроби стискати його до високого тиску або зріджувати при наднизьких температурах пов'язані з високими витратами енергії та потенційними ризиками. У цьому контексті металогідридні системи виступають перспективною технологією, яка поєднує безпечність, компактність та ефективність [7].

Металогідриди - це сполуки водню з металами або сплавами**,** які утворюються при хімічній взаємодії водню з металевою решіткою. В процесі зберігання водень адсорбується в металі, фактично вбудовуючись у кристалічну структуру. Під час подачі енергії (наприклад, тепла), водень вивільняється та подається до споживача - наприклад, паливної комірки [8].

Структуровано ключові особливості металогідридних систем зображено на рис. 1.2



Рис. 1.2 - Металогідридні системи зберігання водню

Отже, металогідридні системи зберігання водню є однією з найбільш перспективних технологій у сфері водневої енергетики. Їхні головні переваги - безпечність, компактність, низький робочий тиск та можливість багаторазового використання - дозволяють успішно застосовувати ці системи як у стаціонарних, так і в мобільних енергетичних рішеннях. Різноманітність матеріалів, зокрема на основі лантану, титану, магнію чи натрію, дає змогу адаптувати системи до різних умов експлуатації - від побутових сонячних установок до військової техніки та космічних апаратів.

Перспективи розвитку металогідридних систем також виглядають позитивними. У найближчі роки очікується зниження вартості матеріалів, удосконалення процесів синтезу гідридів та розширення комерційного використання у сферах транспорту й розподіленої енергетики. Крім того, посилення державної підтримки екологічно чистих джерел енергії та глобальний перехід до декарбонізації стимулюють інвестиції у вдосконалення систем зберігання водню, зокрема металогідридного типу.

Наявним прикладом може стати компанія «GKN Hydrogen» в Німеччині. Вона спеціалізується на розробці та виробництві твердотільних систем зберігання водню на основі металогідридів. Їхні рішення забезпечують безпечне та ефективне зберігання водню при низькому тиску, що робить їх ідеальними для використання в автономних енергетичних системах, інфраструктурі та промисловості. У 2023 році компанія розпочала партнерство з Національною лабораторією відновлюваної енергії США (NREL) та SoCalGas для демонстрації системи зберігання водню, яка використовує відпрацьоване тепло від допоміжного обладнання [9].

На рис. 1.3 ми бачимо що, одним із сучасних прикладів практичного впровадження водневих технологій є європейський проєкт REMEDHYS, спрямований на зберігання та використання водню для потреб морського транспорту. Метою проєкту є створення компактних, безпечних та стійких альтернатив традиційним методам зберігання водню [10].

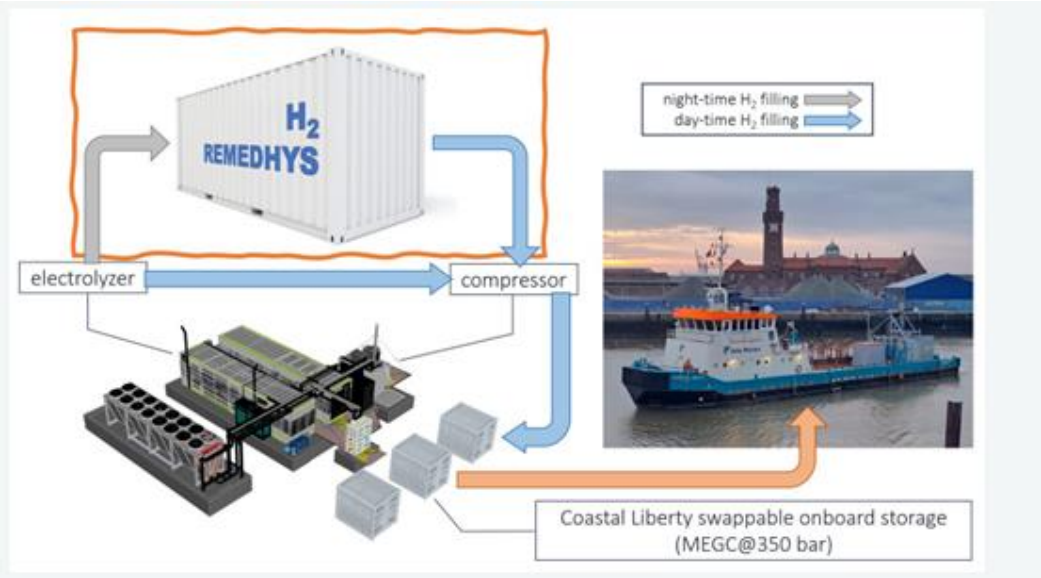


Рис. 1.3 - Концепція REMEDHYS

На рис.1.3 зображено концепцію, що включає:

- електролізер, який виробляє водень шляхом розщеплення води за допомогою електроенергії (переважно з відновлюваних джерел);

- компресор, що стискає водень для подальшого зберігання;
- металогідридні модулі зберігання (контейнери H_2 REMEDHYS), у яких водень перебуває в зв’язаному, безпечному вигляді;

Морське судно Coastal Liberty, обладнане змінними резервуарами для водню (MEGC @ 350 bar), які дозволяють здійснювати швидку заміну та дозаправлення.

Система функціонує за принципом циклічного наповнення воднем вдень і вночі, що забезпечує гнучкість та стабільність у роботі. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати водень як паливо в морському секторі, зменшуючи викиди парникових газів та залежність від викопного палива.

Цей приклад підтверджує перспективність металогідридних систем як ключового елементу у побудові безвуглецевого транспорту і сталого енергозабезпечення.

1.3 Аналіз існуючих паливних комірок

Паливні комірки - це пристрої, які генерують електричну енергію через електрохімічну реакцію між воднем (або іншим паливом) і киснем. Цей процес відбувається без спалювання палива, що робить паливні комірки ефективними та екологічно чистими джерелами енергії.

Основною перевагою паливних комірок є те, що вони виробляють електрику без шуму та викидів шкідливих речовин (як, наприклад, у традиційних двигунах внутрішнього згоряння). Замість викидів CO_2, їх єдиним відходом є вода у вигляді пару.

Принцип роботи полягає в тому, що паливна комірка працює за електрохімічним принципом: водень (або інше паливо) на аноді розщеплюється на протони і електрони. Протони переходять через електроліт до катода, де реагують з киснем, утворюючи воду. Електрони ж проходять через зовнішній контур, генеруючи електричний струм. Залежно від типу паливної комірки,

використовуються різні електроліти та каталітичні матеріали, які визначають їх ефективність і можливості [11].

Паливні комірки поділяються на декілька типів, які зображені в таблиці 1.2

Таблиця 1.2

Класифікація паливних комірок

Тип паливної комірки	Принцип роботи	Паливо	Температура роботи	Переваги	Недоліки	Приклад застосування
Протонно-обмінні мембранні (PEMFC)	Використовує протонно-обмінну мембрану для переносу протонів	Водень	60-100°C	Висока ефективність, швидкий запуск, компактність	Висока вартість, чутливість до забруднень	Транспорт (автомобілі Toyota Mirai, Hyundai Nexo), портативні пристрої
Алкалійні (AFC)	Використовує лужний електроліт для проведення реакції	Водень	50-250°C	Дешеві матеріали, хороша ефективність	Чутливість до вуглекислого газу, менша стабільність	Космічні технології (NASA використовує для польотів)
Фосфорні (PAFC)	Використовує фосфорну кислоту як електроліт	Водень	150-220°C	Стабільність при високих температурах, підходить для великих потужностей	Повільний запуск, висока вартість	Виробництво електричної енергії, великі промислові установки
Твердопаливні (SOFC)	Використовує тверді оксидні електроліти, працює при високих температурах	Водень, метан, біогаз	800-1000°C	Висока ефективність, можливість використовувати різні види палива	Високі температури, дорогі матеріали	Великі енергетичні установки, генерація електричної енергії
Молекулярно-селективні (MCFC)	Використовує карбонатні електроліти для проведення хімічної реакції	Метан, водень	600-700°C	Висока ефективність, здатність працювати на різних видах палива	Високі температури, складність обслуговування	Промислові енергетичні установки, великі генератори

З огляду на швидкий розвиток технологій і зростаючий інтерес до відновлюваних джерел енергії, паливні комірки мають потенціал стати однією з основних технологій майбутнього. Вони можуть не лише зменшити наш вплив на навколишнє середовище, а й забезпечити енергією мільйони людей по всьому світу, створюючи нові можливості для розвитку технологічних і економічних секторів [12].

З наявних прикладів можна навести Toyota Mirai (у перекладі з японської - «майбутнє») є одним із перших серійних автомобілів, що використовують водневі паливні комірки. Автомобіль оснащений синхронним електродвигуном змінного струму потужністю 113 кВт (154 к.с.) та двома високотисковими резервуарами для зберігання водню під тиском 70 МПа. При русі на низьких швидкостях Mirai працює як електромобіль, використовуючи енергію, накопичену в акумуляторі, який заряджається за допомогою рекуперативного гальмування. На високих швидкостях електродвигун живиться безпосередньо від паливної комірки. У випадках, коли потрібна додаткова потужність, наприклад, при різкому прискоренні, акумулятор підтримує паливну комірку, забезпечуючи додаткову енергію.

На рис. 1.4 ми бачимо цей автомобіль який демонструє практичність та ефективність водневої технології в повсякденному використанні [13].



Рис. 1.4 - Toyota Mirai

Наступним прикладом може стати Центри обробки даних Microsoft - тестування резервного живлення на основі SOFC. Microsoft активно досліджує можливості використання твердотільних оксидних паливних комірок (SOFC) як альтернативи дизельним генераторам для резервного живлення своїх центрів обробки даних. У співпраці з Національним дослідницьким центром паливних комірок при Каліфорнійському університеті в Ірвайні, компанія тестувала систему, яка використовує природний газ для виробництва водню через процес парового реформінгу метану при температурі близько 600°C. Цей підхід дозволяє генерувати електроенергію безпосередньо на місці, зменшуючи залежність від електромережі та підвищуючи енергоефективність.

На рис. 1.5 показано приклад водневих паливних комірок компанії Microsoft, яка вважає, що розвиток таких технологій може сприяти декарбонізації енергетичної інфраструктури та забезпечити більш стійке енергопостачання для своїх об'єктів [14].



Рис. 1.5 - Microsoft тестує водневі паливні комірки для резервного живлення в центрах обробки даних

Енергокомплекс POSCO Energy (Південна Корея) - велика електростанція на базі MCFC

Один із найвідоміших прикладів впровадження паливних комірок на розплавлених карбонатах (MCFC) - паливний парк Gyeonggi Green Energy,

розташований у місті Хвасон, Південна Корея. Цей об'єкт був побудований компанією POSCO Energy як флагманський проєкт у сфері екологічно чистої енергетики. Power TechnologyX

Основні характеристики:

- Тип паливних комірок: MCFC
- Паливо: природний газ
- Ефективність: висока, з можливістю когенерації тепла та електроенергії
- Потужність: одна з найбільших у світі станцій на базі MCFC

Парк демонструє потенціал технології MCFC для великомасштабного виробництва електроенергії з низьким рівнем викидів, використовуючи різноманітні види палива, включаючи природний газ та біогаз. Однак, як зазначає Renewable Energy World, проєкт зіткнувся з технічними труднощами: з 21 встановленого модуля приблизно третина вийшла з ладу протягом двох років, що призвело до значних фінансових втрат для POSCO Energy.Factor This™X

На рис. 1.6 ми бачимо, що цей приклад ілюструє, як можливості, так і виклики, пов'язані з впровадженням MCFC у великомасштабних енергетичних проєктах [15].



Рис. 1.6 - Паливний парк Gyeonggi Green Energy

Hyperion XP-1 - експериментальний суперкар на водневих паливних комірках

Hyperion XP-1 - це концептуальний суперкар, розроблений американською компанією Hyperion Motors. Автомобіль оснащений чотирма електродвигунами, які живляться від водневих паливних комірок, та має запас ходу до 1600 км на одному заправленні. Завдяки використанню ультраконденсаторів для зберігання енергії та легкого карбоново-титановому шасі, XP-1 досягає швидкості 100 км/год за 2,2 секунди та має максимальну швидкість понад 350 км/год. Дизайн автомобіля включає активні аеродинамічні елементи, які також функціонують як сонячні панелі, та інноваційний інтерфейс управління з 98-дюймовим дисплеєм, що реагує на жести.

На рис. 1.7 проілюстрован автомобіль від компанії Hyperion яка планує обмежене виробництво 300 одиниць цього суперкара, підкреслюючи потенціал водневої технології в автомобільній промисловості [16].



Рис. 1.7 - Hyperion XP-1 - експериментальний суперкар на водневих паливних комірках

Розгляд реальних прикладів впровадження паливних комірок дає змогу зробити висновок про стрімкий розвиток та практичну придатність цієї технології в різних сферах. Автомобільна промисловість, як у випадку з Toyota Mirai та Hyperion XP-1, демонструє здатність паливних комірок забезпечити ефективну та екологічну альтернативу двигунам внутрішнього згоряння. Центри

обробки даних, як показує досвід Microsoft, можуть використовувати паливні комірки для резервного живлення, зменшуючи вуглецевий слід і підвищуючи енергетичну незалежність. А великі енергетичні комплекси, подібні до Gyeonggi Green Energy у Південній Кореї, ілюструють потенціал технології для масштабного виробництва електроенергії з використанням різноманітних видів палива [17].

Усі наведені приклади свідчать про те, що паливні комірки є не лише перспективною, а вже й реалістичною альтернативою традиційним джерелам енергії. Водночас вони висвітлюють і певні виклики - технічні, економічні та інфраструктурні, які потребують подальших досліджень і вдосконалення. Загалом, впровадження паливних комірок може стати ключовим етапом у переході до сталих енергетичних систем майбутнього.

РОЗДІЛ 2. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ. ВСТАНОВЛЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТАЛОГІДРИДНИХ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ

2.1 Структура існуючих систем накопичення та зберігання водню

Сучасні системи накопичення та зберігання водню є критичним компонентом водневої енергетики, оскільки водень, через свою низьку об'ємну енергетичну щільність при нормальних умовах, потребує спеціальних методів для ефективного зберігання і транспортування.

Існуючі технології накопичення поділяються на три основні групи: фізичне зберігання, матеріалозалежне зберігання і хімічне зберігання представлення яких зображено на рис. 2.1 [18].



Рис. 2.1 - Елементи водневої економіки

Фізичне зберігання включає стиснення газоподібного водню під високим тиском або його зрідження при екстремально низьких температурах.

Компресоване зберігання є найпоширенішою технологією для транспортного сектору, де водень зберігається в балонах із композитних матеріалів (типу IV) при тиску 350 або 700 бар. Середні витрати енергії на компресію складають приблизно 10–15% від загальної енергії, що міститься у водні. Основними проблемами залишаються ризик вибуху при пошкодженні балона та необхідність регулярного технічного обслуговування [19].

Представлення глобального попиту на водень по секторам у вигляді діаграми зображено на рис. 2.2

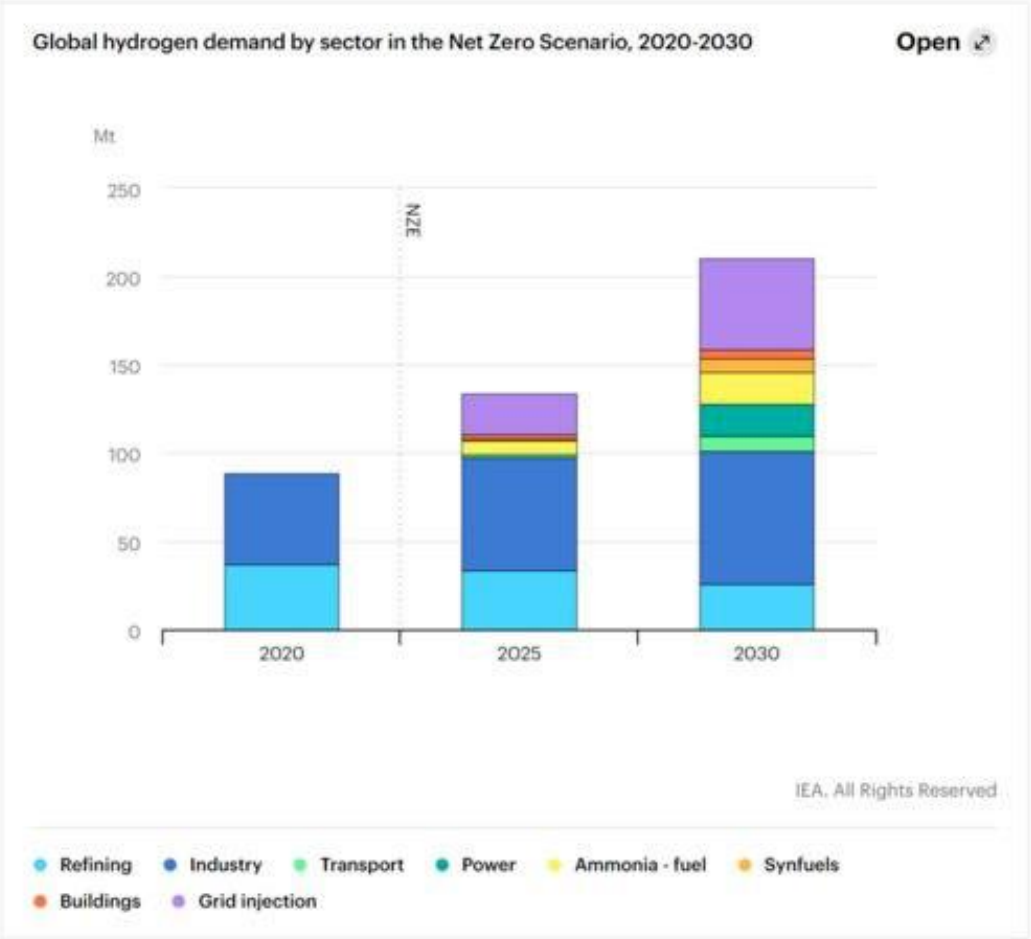


Рис. 2.2 - Глобальний попит на водень по секторам

Зрідження водню потребує охолодження до температури -253°C. Цей процес є енергоємним: на зрідження витрачається близько 30–40% енергії, що міститься у водні. Зріджений водень має високу об'ємну щільність (70,8 кг/м³), але вимагає використання дорогого ізотермічного обладнання і є вразливим до втрат через випаровування (ефект «boil-off»).

Матеріалозалежне зберігання передбачає поглинання або хімічне зв'язування водню з твердими матеріалами. Одним із найперспективніших рішень є металогідридні системи, де водень взаємодіє з металами (наприклад, $LaNi_5$, TiFe, Mg_2Ni), утворюючи стабільні гідриди. Такі системи працюють при низьких тисках (2–10 бар) і середніх температурах (20–100°C), що значно підвищує безпеку експлуатації. Металогідридні акумулятори також мають високу об'ємну енергетичну щільність - до 150 кг водню на м³[20].

Іншою формою матеріалозалежного накопичення є використання наноматеріалів, таких як вуглецеві нанотрубки чи пористі металоорганічні каркаси (MOF), які мають потенціал для ще більш високої щільності зберігання, проте ці технології перебувають на стадії досліджень[21].

Прикладом використання даної технології є компанія яка продемонстрована на рис. 2.3.



Рис. 2.3 - Завод Праксеір (Praxair) з виробництва водню

Хімічне зберігання водню реалізується через створення енергомістких рідин (LOHC – Liquid Organic Hydrogen Carriers), таких як толуол/метилциклогексанові системи. Водень у таких сполуках може зберігатися при нормальних умовах і вивільнятися через каталітичну реакцію. Хімічне зберігання забезпечує зручність транспортування, особливо на великі відстані, однак вимагає складного технологічного забезпечення для процесу деконверсії[22].

Щоб оцінити переваги й обмеження різних систем, наведемо узагальнену таблицю:

Таблиця 2.1 - Переваги і обмеження різних систем

Метод зберігання	Переваги	Недоліки	Показники
Стиснення (350–700 бар)	Невелика вага балонів, швидке заправлення	Низька енергетична щільність, ризик витоків	5–6% енерговитрат на заправку
Зрідження (-253°C)	Висока об'ємна щільність	Високі втрати енергії, дороговизна інфраструктури	30–40% енергетичних втрат на зрідження
Металогідридні системи	Низький тиск, безпечність, тривалий термін служби	Велика маса, повільне вивільнення	2–10 бар, енергетична щільність 150 кг/м³
Хімічне зберігання (LOHC)	Легкість транспортування, стабільність	Необхідність реакторів для вивільнення водню	Температура реакції 200–300°C

Важливим фактором розвитку систем зберігання водню є загальносвітова тенденція до декарбонізації транспортної галузі. За прогнозами McKinsey & Company, обсяг споживання водню у світовій енергетиці може досягти 660 мільйонів тонн до 2050 року, що вимагає інтенсивного розвитку інфраструктури зберігання [23].

Компанія DHL є однією з піонерів у впровадженні водневих рішень у логістиці. В рамках програми GoGreen Plus компанія інвестує у створення водневих вантажних хабів у Європі та розробку водневих тягачів для вантажних

перевезень на середні та довгі дистанції. Зокрема, DHL у партнерстві з виробниками технологій планує запровадити транспортні засоби на паливних комірках, які використовуватимуть металогідридні накопичувачі водню через їх високу безпеку і ефективність для тривалого зберігання.

За даними Hydrogen Council, у 2023 році понад 680 проєктів водневої інфраструктури було запущено по всьому світу, що включає системи зберігання, транспортування та розподілу водню. Середня вартість зберігання водню залежно від методу наразі становить: [24.]

Таблиця 2.2 - Методи зберігання водню

Метод зберігання	Орієнтовна вартість ($/кг водню)
Стиснення (700 бар)	2,0–2,5
Зрідження	3,5–4,5
Металогідридні системи	4,0–5,5
LOHC	2,5–3,5

У довгостроковій перспективі очікується зниження вартості за рахунок масштабування виробництва обладнання та оптимізації процесів.

Таким чином, структура систем накопичення водню є багатогранною і динамічною, із чітким фокусом на безпечність, ефективність і економічну доступність. Металогідридні системи залишаються особливо перспективними у сегменті логістичних перевезень і стаціонарного зберігання енергії, де вага системи має менше значення порівняно із надійністю та безпечністю експлуатації.

Отже, аналіз існуючих систем накопичення та зберігання водню свідчить про високу різноманітність технологій, кожна з яких має свої переваги і обмеження залежно від сфери застосування. Фізичні методи зберігання, такі як стиснення і зрідження, забезпечують високу мобільність і гнучкість у використанні, однак залишаються енерговитратними та вимагають спеціалізованої інфраструктури. Матеріалозалежні системи, зокрема

металогідридні накопичувачі, демонструють високий рівень безпеки та ефективності, особливо у стаціонарних умовах і в сфері логістики[25].

На прикладі діяльності компанії DHL видно, що металогідридні системи можуть стати ключовим елементом розвитку водневої інфраструктури в транспортній галузі, забезпечуючи стабільне, безпечне і тривале зберігання водню для живлення вантажного транспорту на паливних комірках. У найближчій перспективі очікується подальше вдосконалення технологій накопичення водню, зниження їх вартості та підвищення енергоефективності, що стане важливою передумовою для широкого впровадження водневої енергетики у світовій економіці[26].

2.2 Загальна концепція організації енергетичної системи на базі металогідридних акумуляторів та паливних комірок

Через інтенсивний розвиток поновлюваних джерел енергії (ВДЕ) - зокрема сонячної та вітрової - зростає необхідність у створенні високоефективних, масштабованих і адаптивних енергетичних систем, здатних забезпечувати стабільне електропостачання в умовах непостійної генерації. Стандартні електричні мережі не можуть повноцінно працювати без систем накопичення енергії, які згладжують коливання генерації, забезпечують баланс попиту і пропозиції, а також стабілізують параметри енергомережі. В цьому контексті перспективним рішенням виступає гібридна енергетична система (ГЕС), яка поєднує кілька типів накопичувачів енергії - швидкодіючі конденсатори та водневу систему довготривалого зберігання.

У такій системі електричні конденсатори типу EDLC (Electric Double Layer Capacitor) використовуються як перший рубіж реакції на швидкі зміни навантаження. Їхні переваги полягають у надвисокій швидкості заряджання/розряджання, великій кількості циклів роботи (до мільйона), високій енергетичній ефективності (до 98%) та мінімальному тепловому навантаженні.

EDLC дозволяють поглинати короткострокові імпульси перевантаження, що виникають у момент підключення або відключення великих споживачів. Це критично важливо для електромереж з великою кількістю ВДЕ, де потужність генерації може змінюватися протягом лічених секунд.

Другим, стратегічним рівнем накопичення енергії є воднева система, що включає електролізер, паливну комірку і два типи резервуарів: високотисковий (газовий) та металогідридний. Електролізер перетворює надлишки електроенергії в водень, який може зберігатися у стисненому стані або зв’язуватися у вигляді металогідридів. У періоди, коли сонячна генерація знижується (вночі, у хмарну погоду або взимку), водень використовується для генерації електроенергії в паливній комірці. Металогідридні накопичувачі забезпечують високу безпечність зберігання, оскільки водень у них знаходиться в хімічно зв’язаному стані. Крім того, вони дозволяють довгострокове акумулювання без значних втрат, характерних, наприклад, для зрідженого водню (через випаровування).

Окрему увагу варто приділити системам прогнозування та інтелектуального управління, які виступають критичним компонентом для ефективного функціонування ГЕС. На основі алгоритмів Калмана або нейромережевих методів здійснюється прогноз виробітку електроенергії від ВДЕ, споживчого навантаження, динаміки цін на електроенергію (в умовах енергетичного ринку), стану акумуляторів тощо. Це дозволяє системі приймати оптимальні рішення щодо заряду/розряду кожного типу накопичувача, перемикання між джерелами живлення та загальної оптимізації режиму роботи в реальному часі [27].

З економічної точки зору, впровадження таких гібридних систем має значний потенціал для зниження витрат на електроенергію, особливо у випадках, коли доступ до централізованих мереж обмежений або генерація відбувається за нестабільним тарифом (наприклад, у пікові години доби). Системи можуть працювати в режимі «вирівнювання пікового навантаження» (peak shaving), коли

енергія накопичується в години низького тарифу і споживається під час дорогих періодів, що дає змогу зменшити загальні рахунки.

Крім того, такі системи мають виражений екологічний ефект. Поєднання накопичення енергії на місці та використання ВДЕ дозволяє мінімізувати залежність від викопного палива, зменшити викиди CO_2 та інші шкідливі речовини. Зниження пікових навантажень на енергосистему також зменшує потребу в запуску резервних ТЕС, які зазвичай є малоефективними й екологічно шкідливими [28].

Порядок створення вартості зеленого водню виробленого методом електролізу води продемонстровано у вигляді діаграми на рис. 2.4

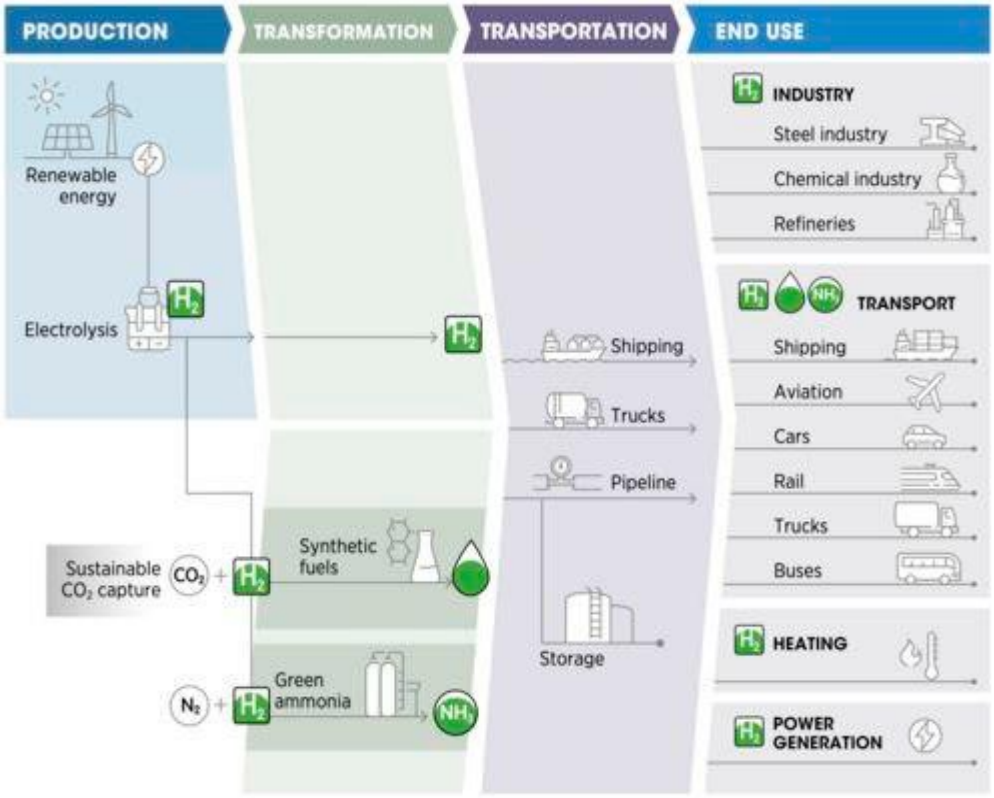


Рис. 2.4 - Діаграма етапів ланцюжка створення вартості зеленого водню виробленого методом електролізу води

Застосування гібридних систем є особливо перспективним для об'єктів критичної інфраструктури, логістичних центрів, промислових підприємств, а також енергетично автономних будівель і регіонів з нестабільним енергопостачанням. У військових, медичних та рятувальних сферах ГЕС здатні

забезпечити незалежне енергопостачання навіть у разі повного відключення зовнішньої електромережі.

У глобальному масштабі впровадження подібних систем узгоджується зі стратегіями енергетичного переходу, прийнятими в рамках Європейського зеленого курсу, стратегії Net-Zero, ініціатив Hydrogen Europe та рекомендацій IEA. Такі системи не лише відповідають сучасним вимогам до децентралізованої генерації, а й забезпечують платформу для створення водневих хабів, локальних мікромереж та енергонезалежних спільнот.

Отже, загальна концепція організації гібридної енергетичної системи ґрунтується на принципах динамічного балансування, ефективного зберігання, інтелектуального управління та сталого розвитку. Система, що об'єднує електричні конденсатори й водневі накопичувачі, дозволяє гнучко реагувати на зміну умов зовнішнього середовища, забезпечуючи високий рівень надійності, ефективності та екологічності. Її інтеграція у майбутні енергетичні моделі — це не лише технологічна доцільність, а й стратегічна потреба глобальної енергетичної трансформації.

Поєднання швидкодіючих EDLC з довгостроковими водневими накопичувачами (газовими та металогідридними) дозволяє компенсувати як короткотермінові, так і довгострокові коливання генерації, забезпечуючи стабільність і безперервність енергопостачання. Застосування прогнозуючих алгоритмів на базі фільтра Калмана дає змогу підвищити енергоефективність і знизити експлуатаційні витрати. Така система є гнучкою, безпечною та екологічно сталою, що робить її актуальною для автономних об’єктів, критичної інфраструктури, а також у рамках глобальної стратегії енергетичного переходу до вуглецево-нейтрального майбутнього [29].

3. РОЗРАХУНОК СПОЖИВАННЯ ВИТРАТИ ВОДНЮ ДЛЯ СПІЛЬНОЇ РОБОТИ ПАЛИВНИХ КОМІРОК І МЕТАЛОГІДРИДНОГО НАКОПИЧУВАЧА ВОДНЮ

У сучасних енергетичних системах, що базуються на відновлюваних джерелах, паливні комірки набувають все більшої популярності як високоефективні та екологічно чисті рішення. Зокрема, протонно-обмінні мембранні паливні комірки (PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell) забезпечують пряме перетворення хімічної енергії водню в електричну з утворенням лише водяної пари як побічного продукту. Однак для стабільної роботи необхідно не лише точно визначити витрату водню, але й забезпечити безперервне його постачання з накопичувача. У цьому зв'язку розглянемо деталізований розрахунок витрати водню для PEMFC потужністю 4 кВт та розрахуємо, яку ємність повинен мати металогідридний накопичувач для підтримки тривалої автономної роботи.

1. Загальні вихідні параметри

Потужність PEMFC – визначається номінальною вихідною електричною потужністю, яка становить 4 кВт.

ККД PEMFC – відношення електричної потужності до хімічної енергії, що виділяється під час окиснення водню. У нашому випадку $\eta = 55\ \%$.

Температура робочого середовища – оптимальна операційна температура PEMFC становить близько 60 °C, що забезпечує баланс між швидкістю протонного транспорту через мембрану та довговічністю матеріалів.

2. Визначення об'ємної витрати водню

Вища об'ємна теплота згоряння водню (тобто енергія, що виділяється при повному згорянні 1 м³ газу) становить $Q_{n2} = 13\ 000$ кДж/м³. Для того, щоб отримати 4 кВт·год електричної енергії, треба спершу привести кВт·годину до джоулів:

1 кВт·год = 3 600 кДж, отже

4 кВт·год = 4 × 3 600 = 14 400 кДж.

Якщо б паливна комірка була ідеальною (η = 100 %), спалюючи водень із вищою теплотою згоряння 13 000 кДж/м³, для отримання 14 400 кДж потрібно:

14 400кДж 13 000кДж/м³≈1,1 м³/год.

Однак з урахуванням ефективності 55 % реальна об’ємна витрата водню буде зростати відповідно до зниження корисного виходу, що ми врахуємо далі при масовому розрахунку.

3. Переведення об’єму в масу

За нормальних умов (0 °C, 1 атм) 1 м³ водню має масу приблизно 0,08988 кг, або 89,88 г. Отже, для об’єму 1,1 м³ отримаємо.

1,1 м³×89,88 г/м³=98,868 г≈99,56 г.

Ця маса водню містить усю необхідну хімічну енергію до урахування ККД. Щоб перевести масу у витрату в грамах на секунду, використаємо співвідношення об’єму у м³/годину, маси та перетворимо годину в секунди:

G H 2 = 3600 с 1,1 м³/год×1000 л/м³×99,56г/м³≈30,42г/с.

Це значення ілюструє швидкість витрачання водню для видачі 4 кВт·год при ідеальному перетворенні; далі ми деталізуємо з урахуванням реального ККД.

4. Урахування ККД у потужності

Для отримання електричного виходу 4 кВт паливній комірці необхідно спожити хімічну потужність, розраховану за формулою:

Nхім=Nелη=4000 Вт0,55≈7272,73 Вт

Таким чином, реальна теплова потужність, що підлягає забезпеченню воднем, складає близько 7,27 кВт, або 7 272,73 Вт у джоулях на секунду.

5. Фінальний розрахунок масової витрати

Теплота згоряння водню в масових одиницях - 119,96 кДж/г. Переведемо в джоулі:

119,96×1000=119960 Дж/г.

Масова витрата водню тоді:

GPEMFC=7272,73 Вт119 960 Дж/г≈0,061 г/с

Це значення відображає фактичну швидкість споживання водню паливною коміркою для утримання постійної вихідної потужності 4 кВт при ККД 55 %.

Визначення ємності металогідридного накопичувача

З огляду на розраховану витрату водню, важливо обрати або спроектувати накопичувач, здатний забезпечити цю витрату протягом необхідного часу роботи без підключення до зовнішніх джерел.

1. Вихідні дані для накопичувача

Маса водню, яку потрібно зберігати: 99,56 г (відповідно до обсягів, доступних у 1,1 м³).

Режим робочої температури накопичувача: 50 °C, що є характерним для промислових металогідридних систем, де температура десорбції підтримується теплообміном.

Робочий тиск: 3 бар - значення, достатнє для утримання водню в гідридній матриці та його стабільної десорбції.

Швидкість десорбції: 0,1 г/с - параметр, що визначається типом металогідриду та умовами нагрівання.

2. Час автономної роботи накопичувача

Час роботи без додаткової заправки можна обчислити як відношення запасеної маси до фактичної витрати паливною коміркою:

τ=99,56 г0,061 г/с≈1632,13 с≈0,45 години (приблизно 27 хвилин)

Цей розрахунок демонструє, що для автономної роботи системи протягом 27 хвилин металогідридний накопичувач повинен містити щонайменше 99,56 г водню.

3. Визначення маси металогідриду

Стандартний показник місткості металогідридних сполук у промислових застосуваннях становить близько 12 г водню на 1 кг гідриду. З урахуванням цього:

Маса гідриду=99,56г водню12г водню/кг гідриду≈8,3 кг металогідриду

Отже, для забезпечення зазначеного запасу водню необхідно використовувати близько 8,3 кг активного матеріалу накопичувача.

4. Оцінка можливості забезпечення витрати водню

Порівняльний аналіз швидкості десорбції та витрати паливною коміркою:

Швидкість десорбції: 0,1 г/с

Витрата PEMFC: 0,061 г/с

Очевидно, що показник десорбції перевищує фактичну потребу паливної комірки приблизно в 1,6 рази. Це дає достатній запас потужності десорбції для компенсації можливих коливань тиску та температури, а також врахування початкових невідповідностей у характеристиках гідриду.

Таким чином, металогідридний накопичувач, спроектований із 8,3 кг активного матеріалу та робочим тиском 3 бар при 50 °C, здатен забезпечити стабільне й безперервне постачання водню до PEMFC протягом мінімум 27 хвилин.

3.1 Аналіз розрахункових досліджень щодо визначення кількості водню у водневих системах різної потужності

У цьому підрозділі проведено розрахункове моделювання споживання водню та потреби в масі металогідридного матеріалу залежно від потужності паливної комірки та її ефективності (ККД). Метою є отримання узагальненої залежності, що дозволить уніфікувати проектування водневих енергетичних систем різного масштабу.

1. Залежність маси водню від потужності паливної комірки

При фіксованому коефіцієнті корисної дії (ККД) 55% та тривалості роботи 1 година, визначено, скільки грамів водню необхідно для живлення паливних комірок потужністю 2, 4 та 6 кВт.

Формула для розрахунку: $G_{H_2} = (P \cdot t)/(\eta \cdot Q)$

- P - потужність установки, Вт
- t - час роботи, с (3600 с = 1 год)
- η - ККД паливної комірки (у даному випадку 0,55)
- Q - теплота згоряння водню (119 960 Дж/г)

Таблиця 3.1

Потужність(кВт)	Необхідна маса H_2(г)
2	109,1
4	218,2
6	327,3

На рис. 3.1 показана залежність маси водню, яка потрібна для роботи паливної комірки в залежності від її потужності.

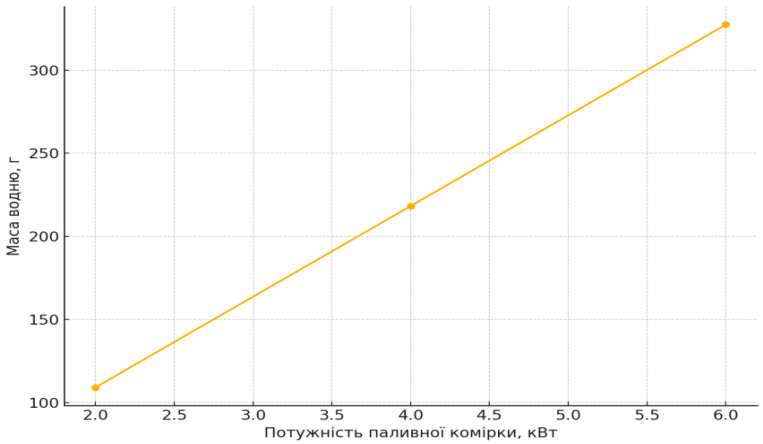


Рис. 3.1 - Залежність витраченої маси водню від потужності паливної комірки

2. Залежність споживання водню від ККД при фіксованій потужності

У другому дослідженні розглядається система потужністю 4 кВт, але з різним ККД: від 40% до 60%. Розраховано, скільки водню потрібно для годинної роботи кожної такої системи.

ККД %	Необхідна маса H_2
40	300,2
45	266,8
50	240,0
55	218,2
60	200,1

На рис. 3.2 показана необхідна маса водню для паливної комірки потужністю 4 кВт

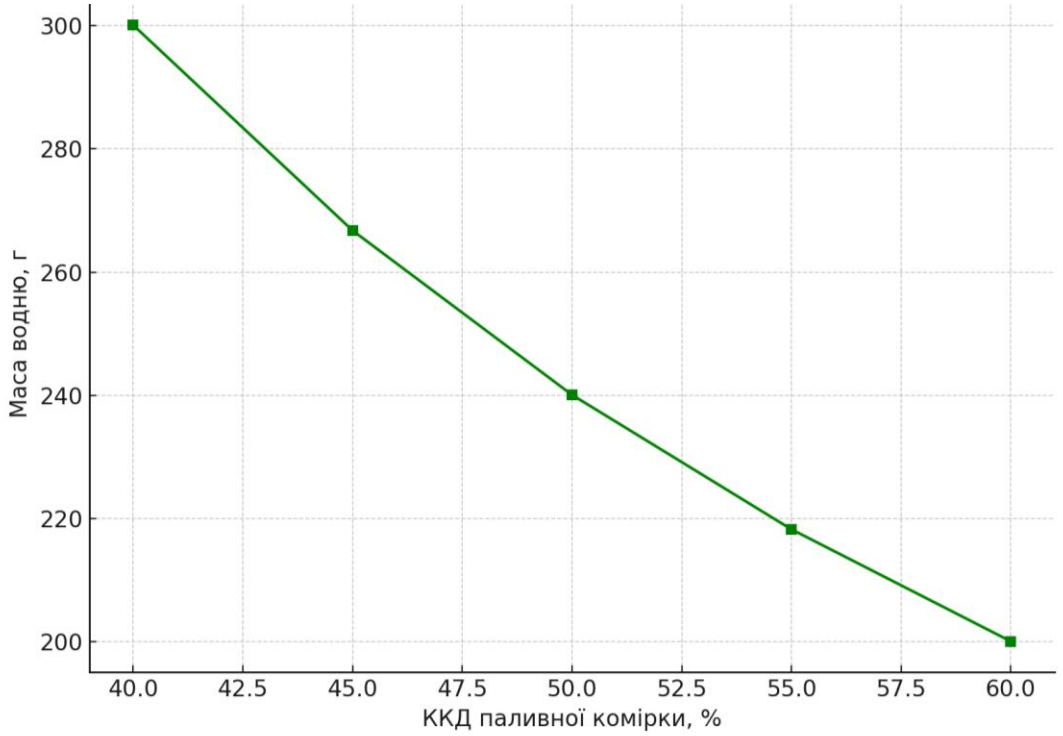


Рис. 3.2 - Необхідна маса водню для паливної комірки потужністю 4 кВт

На основі розрахованих значень маси водню визначається, скільки металогідридного матеріалу потрібно для його зберігання. Враховано, що 1 кг металогідридного матеріалу здатен зберігати від 10 до 15 г водню.

Розрахунок: $M_{гідриду} = G_{H_2}/12$

Таблиця 3.3

ККД (%)	Маса H_2 (г)	Маса металогідриду (кг)
40	300,2	25,02
45	266,8	22,23
50	240,0	20,00
55	218,2	18,18
60	200,1	16,68

На рис. 3.3 продемонстрована необхідна маса металогідридного матеріалу для зберігання водню для паливної комірки

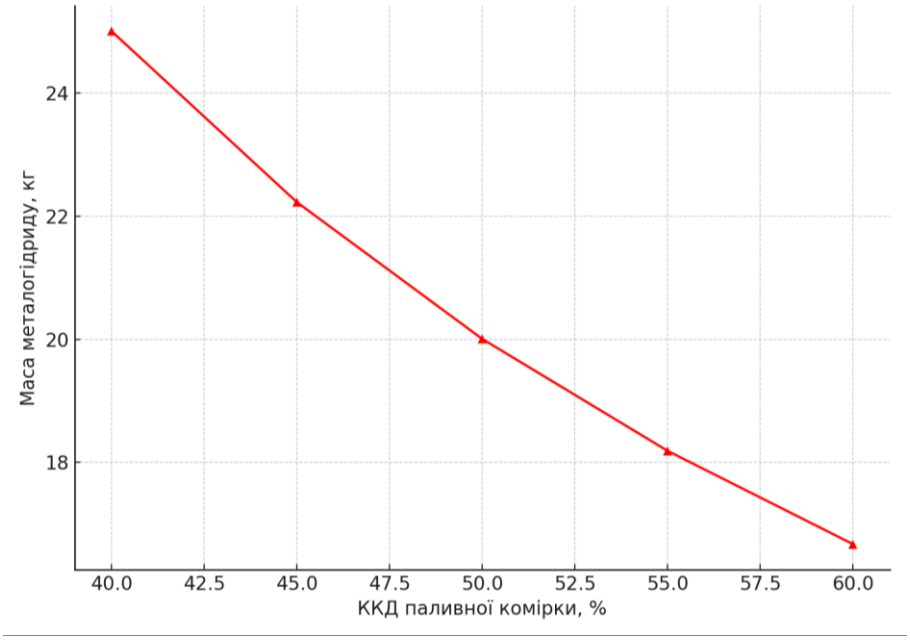


Рисунок 3.3 - Необхідна маса металогідридного матеріалу для зберігання водню для паливної комірки потужністю 4 кВт

Проведені розрахункові дослідження показали, що:

- Витрати водню прямо пропорційні потужності паливної комірки;
- Чим вищий ККД системи, тим менше водню необхідно, що знижує вимоги до обсягу накопичувача;
- Маса металогідридного матеріалу, необхідна для зберігання водню, також залежить від ККД і масштабу енергетичної системи.

Отримані залежності є основою для оптимізації конфігурацій водневих енергетичних систем, як мобільних, так і стаціонарних.

ВИСНОВКИ

У межах виконаної дипломної роботи було досліджено можливості застосування металогідридних систем зберігання водню у поєднанні з паливними комірками для створення ефективних та екологічно чистих енергетичних рішень.

Отримані результати дозволяють зробити такі висновки:

- Воднева енергетика є одним із найперспективніших напрямів сталого розвитку, що забезпечує високу енергетичну щільність та нульові викиди CO_2 при використанні водню у паливних комірках.
- Металогідридні системи зберігання водню продемонстрували високу безпечність, компактність та ефективність, особливо у стаціонарних або логістичних умовах, де маса системи є менш критичною.

У ході порівняльного аналізу було встановлено, що:

- фізичні методи (стиснення, зрідження) мають високі енерговитрати;
- металогідридні акумулятори забезпечують зберігання при низькому тиску та є придатними для довготривалого використання.

Проведені розрахункові дослідження підтвердили, що для живлення PEMFC потужністю 4 кВт із ККД 55% необхідно близько 99,56 г водню на годину роботи, що еквівалентно 8,3 кг металогідридного матеріалу.

Показано, що витрати водню прямо пропорційні потужності паливної комірки, а підвищення ККД дозволяє суттєво зменшити як масу водню, так і обсяг накопичувача.

Створення гібридної енергетичної системи (електролізер – металогідридний акумулятор – паливна комірка) є ефективним рішенням для забезпечення автономного та безпечного енергопостачання у сферах з високими вимогами до надійності.

Запропонована система забезпечує:

- екологічну безпечність;

- гнучкість в умовах змінних навантажень;
- енергонезалежність об'єктів інфраструктури, транспорту й побуту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hydrogen energy systems: Technologies, trends, and future prospects URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724037690

2. Водень у сучасному світі: використання та перспективи URL: https://anodnvp.com/index.php?route=blog/article&article_id=201&blog_category_id=76

3. 3.Європейська правда URL: https://www.eurointegration.com.ua/news/2024/04/10/7183509/

4. Українська енергетика + Еко Політика URL: https://ua-energy.org/uk/posts/vodneva-enerhetyka-okrim-planiv-z-rozvytku-potribni-pravyla

5. Енергетична асоціація “Українська Воднева Рада”. URL: https://hydrogen.ua/ua/novyny/1738-stan-ta-perspektivi-vikoristannya-vidnovlyuvanogo-vodnyu-v-ukrajini-vpliv-na-promislovist-ta-shlyakhi-dekarbonizatsiji-ekonomiki

6. Екополітика URL: https://ecopolitic.com.ua/ua/news/modernizaciya-gts-dozvolit-ukraini-stati-liderom-vodnevoi-energetiki-ievropi-riepkin/

7. Енергетична асоціація “Українська Воднева Рада” URL: https://hydrogen.ua/ua/novyny/1820-ukrajinska-vodneva-rada-visvitlyue-rol-krajini-u-globalnomu-energetichnomu-perekhodi-na-forumi-h2poland-netzero

8. Wikipedia URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_storage

9. Heavy Metal Debut: A World-Class Metal Hydride System URL: https://www.nrel.gov/news/program/2024/heavy-metal-debut-a-world-class-metal-hydride-system.html

10. Tech Etch URL: https://techetch.com/blog/the-different-types-of-fuel-cells/

11. Infinity PV URL: https://www.infinitypv.com/roll-to-roll-academy/comprehensive-guide-to-fuel-cells-types-applications-benefits-and-drawbacks

12. DHL Group. (2024). *About us*. Офіційний сайт DHL Group URL: https://www.dhlexpress.be/en/our-story/

13. Wikipedia URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Toyota_Mirai

14. Офіційний сайт Microsoft URL: https://news.microsoft.com/source/features/sustainability/hydrogen-datacenters/

15. Renewable Energy World. South Korea Flies Flag for Fuel Cells URL: https://www.renewableenergyworld.com/hydro-power/dams-civil-structures/feature-south-korea-flies-flag-for-fuel-cells/

16. REMEDHYS project Hydrogen storage for maritime use URL: https://hyship.eu/remedhys

17. Економічна правда URL: https://epravda.com.ua/projects/ekopromyslovist/2021/02/26/671344/

18. Sandia National Laboratories. Metal Hydride Hydrogen Storage Technology. URL: https://h2tools.org/

19. Hydrogen energy systems: Technologies, trends, and future prospects. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724037690

20. Hydrogen Storage. U.S. Department of Energy. URL: https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage

21. DHL Sustainability Roadmap. DHL Official Site. URL: https://www.dhl.com/global-en/home/about-us/sustainability.html

22. Nikola Tre FCEV – Hydrogen Truck Overview. Nikola Motor. URL: https://nikolamotor.com/vehicle/tre-fcev

23. DHL and Diageo Launch First Hydrogen Truck Partnership. YouTube. URL: https://www.youtube.com/watch?v=xyz123

24. The Future of Hydrogen. International Energy Agency (IEA). URL: https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen

25. Kovač, A., Zhang, Y. Hydrogen Storage Systems for Logistics Applications: A Review. Journal of Cleaner Logistics. URL: https://doi.org/10.1016/j.jclelog.2023.101114

26. Ball, M., & Weeda, M. The hydrogen economy – Vision or reality? // *International Journal of Hydrogen Energy* 2015, 40(25), 7903–7919. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319915008976?via%3Dihub

27. Джерела живлення накопичення електричної енергії та альтернативні енергоресурси. Касаткіна І.В. Бойко С.М. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/Kasatkina_2023_140.pdf

28. Сінчук О. Комплексне використання відновлюваних джерел енергії URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/Sinchuk_2021_204.pdf

29. Інститут відновлюваної енергетики НАН України : URL: https://www.ive.org.ua/?lang=en