

ЕЛЕКТРОЛІТИЧНЕ ВИРОБНИЦТВО ВОДНЮ ДЛЯ ВІТРОВИДНЕВИХ СТАНЦІЙ

Отримано 30 черв. 2023 р.; рекомендовано до публікації 2 лип. 2023 р.
Доступно онлайн 30 вер. 2023 р.

**С. О. Кудря¹, Л. В. Яценко², Л. Я. Шинкаренко³,
М. Д. Ткаленко⁴**

Автор для кореспонденції: Любов Яценко,
e-mail: renewable@ukr.net

¹ член-кореспондент НАН України,
д-р техн. наук., професор.
<https://orcid.org/0000-0002-4798-6853>

² науковий співробітник.
<https://orcid.org/0000-0001-7022-1579>

³ молодший науковий співробітник.
<https://orcid.org/0000-0003-2018-3329>

⁴ старший науковий співробітник.
<https://orcid.org/0000-0003-0698-5739>

^{1, 2, 3, 4} Інститут відновлюваної енергетики
НАН України, м. Київ, Україна

Проблематика розвитку вітровидневої енергетики України полягає в необхідності створення ефективної водневої інфраструктури – систем виробництва, акумулювання, зберігання, транспортування та перетворення водню на енергію необхідної якості. Застосування водневих технологій дає змогу оптимізувати вітроенергетичну систему та досягти більшої економічної ефективності за рахунок використання надлишкової енергії, зниження втрат від вимушених зупинок вітроелектричного обладнання, оскільки забезпечується неперервність роботи генерувальної системи.

Обладнання для отримання водню є одним із основних елементів вітровидневих комплексів, вдалий вибір якого забезпечує високу енергетичну та економічну ефективність енергосистем. Результати вивчення технічних характеристик і технологічних параметрів установок з виробництва водню показують, що найприйнятнішими для вирішення задач у комплексі з вітровими енергоустановками сьогодні є електролізні установки, на яких водень отримують методом розкладу води. Перспективи отримання та використання зеленого водню сприяли появі нових технік і технологій електролітичного розкладу води, вибір яких допоможе під час проектування та створення вітровидневих станцій. Завдяки достатній простоті й надійності отримання електролітичного водню, високій чистоті вироблених водню й кисню, великому ресурсу установок і можливості автоматизації процесу електролізу води використання сучасних технічних засобів сприятиме підвищенню енергетичної та економічної ефективності енергосистем.

Використання водню, отриманого як універсальне паливо, що може замінити нафту й природний газ, сприятиме зменшенню залежності України від країн-постачальників. Особливо привабливим є масштабне виробництво електролітичного водню за допомогою офшорної вітрової енергії. Повоєнний розвиток вітровидневої енергетики забезпечить зміну структури паливно-енергетичного комплексу України шляхом збільшення в ньому вітрової енергії, підвищення стабільності роботи вітроелектричного обладнання, ефективності та надійності електропостачання, а також матиме позитивний вплив на довкілля. Бібл. 24.

Ключові слова: вітроенергетика, воднева енергетика, акумулювання, електроліз води.

ELECTROLYTIC PRODUCTION OF HYDROGEN FOR WIND HYDROGEN STATIONS

Received June 30, 2023; accepted July 2, 2023

Available online Sept. 30, 2023

S. Kudrya¹, L. Yatsenko², L. Shynkarenko³,
M. Tkalenko⁴Author for correspondence: Lyubov Yatsenko,
e-mail: renewable@ukr.net¹ corresponding member of NAS of Ukraine,
Doctor of Technical Sciences, Professor.
<https://orcid.org/0000-0002-4798-6853>² researcher.
<https://orcid.org/0000-0001-7022-1579>³ junior researcher.
<https://orcid.org/0000-0003-2018-3329>⁴ researcher fellow.
<https://orcid.org/0000-0003-0698-5739>^{1, 2, 3, 4} Institute of Renewable energy, NAS of
Ukraine, Kyiv, Ukraine

The problem of development of wind hydrogen energy in Ukraine is the need to create an efficient hydrogen infrastructure - systems of production, accumulation, storage, transportation and conversion of hydrogen into energy of the required quality. The use of hydrogen technologies allows to optimize the wind energy system and achieve greater economic efficiency through the use of excess energy, reducing losses from forced shutdowns of wind power equipment, as it ensures the continuity of the generating system.

Equipment for hydrogen production is one of the main elements of wind hydrogen complexes, the successful choice of which ensures high energy and economic efficiency of power systems. The results of the study of technical characteristics and technological parameters of hydrogen production plants show that the most acceptable for solving problems in combination with wind power plants are currently electrolysis plants, in which hydrogen is obtained by the method of water decomposition. Prospects for the production and use of "green" hydrogen have contributed to the appearance of new techniques and technologies for electrolytic decomposition of water, the choice of which will help in the design and construction of wind hydrogen farms. Due to the sufficient simplicity and reliability of electrolytic hydrogen production, high purity of hydrogen and oxygen produced, high resource installations and the ability to automate the process of water electrolysis, the use of modern technical means will increase energy and economic efficiency of power systems.

The use of hydrogen as a universal fuel, which can replace oil and natural gas, will help reduce Ukraine's dependence on supplier countries. Large-scale production of electrolytic hydrogen using offshore wind energy is particularly attractive. The development of wind hydrogen energy will change the structure of the fuel and energy complex of Ukraine by increasing wind energy, increasing the stability of wind power equipment, efficiency and reliability of electricity supply, and will have a positive impact on the environment. Ref. 24.

Keywords: wind power, hydrogen power, storage, electrolysis of water.

Перелік позначень та скорочень

ВЕУ – вітроелектроустановка

ВЕС – вітроелектростанція

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

IRENA – Міжнародне агентство з відновлюваних
джерел енергії

РЕМ – протонообмінні мембрани

нм³ – нормальний метр кубічнийН₂ – воденьСО₂ – вуглекислий газ

ЕТК – енерготехнологічний комплекс

Вступ. Серйозну проблему при експлуатації вітроелектричних установок (ВЕУ) та вітроелектростанцій (ВЕС) створює необхідність накопичення й зберігання електроенергії, оскільки електростанції найефективніше працюють за умов постійної потужності й повного навантаження, тоді як попит на електроенергію є змінною

величиною. Створення та експлуатація вітроводневих станцій є перспективним напрямом розвитку як вітроелектричної галузі України, так і вітчизняної енергетики загалом за рахунок забезпечення стабільності діючих енергосистем та надійності енергопостачання. Вітроводнева енергетика сприятиме зменшенню залежності від

країн-постачальників та підвищенню рівня декарбонізації енергетичної галузі України [1].

Використання водню як універсального палива, що може замінити нафту й природний газ, матиме позитивний вплив на довкілля й, відповідно, на рівень економічного розвитку.

Застосування водневих технологій дозволяє оптимізувати вітроенергетичну систему та досягти більшої економічної ефективності за рахунок використання надлишкової енергії, зниження втрат від вимушених зупинок вітроелектричного обладнання, оскільки забезпечується неперервність роботи генеруючої системи. Водень накопичується для подальшого використання та використовується в разі пікових навантажень. Окремим напрямом є створення вітроводневих станцій безпосередньо для виробництва водню й подальшого його різноманітного використання в межах зеленого енергетичного переходу. Великий інтерес становлять енергосистеми з виробництва водню у великих обсягах для віддалених від ліній електропередачі районів з високим енергетичним потенціалом вітрової енергії, оскільки такі енергосистеми можуть бути конкурентними традиційним.

Виробництво електроенергії за допомогою вітроенергетичного обладнання не супроводжується шкідливими викидами в атмосферне повітря. Так, робота одного вітрогенератора потужністю 1 МВт скорочує щорічні викиди в атмосферу на 1800 т CO₂, 9 т SO₂, 4 т оксидів азоту. За оцінками Global Wind Energy Council до 2050 року світова вітроенергетика дасть змогу скоротити щорічні викиди CO₂ на 1,5 млрд т. Робота вітрогенератора потужністю 1 МВт за 20 років дозволяє заощадити приблизно 29 тис. т вугілля або 92 тис. барелів нафти [2].

Масштабне використання зеленого водню в комплексі з вітроенергетичним обладнанням сприятиме додатковому скороченню викидів парникових газів і вирішенню проблеми зміни клімату. За інформацією Міжнародного енергетичного агентства додавання лише 20 % водню в європейську газову мережу скоротить викиди CO₂ на 60 млн т на рік (наприклад: стільки ж вуглекислого газу утворюється в Данії за рік) [3].

Результати вивчення технічних характеристик і технологічних параметрів установок з виробництва водню показують, що найприйнятнішими для вирішення задач у комплексі з вітровими енергоресурсами сьогодні є електролізні установки, на яких водень отримують методом розкладу води. Інфраструктура вітроводневої енергетики складається з вітроелектричного обладнання, електролізної установки, систем зберігання й транспортування водню, систем використання водню. За наявності вітру вітроелектрична установка виробляє електроенергію для потреб споживачів і одночасно створюється запас водню, а за відсутності вітру використовується накопичений водень, подаючи споживачеві енергію необхідної якості [4, 5].

Для забезпечення ефективної сумісної роботи електролізера та вітрової електричної установки необхідно враховувати особливості як вітроустановки, так і електролізера, що за рахунок електроенергії від ВЕУ виробляє водень. На продуктивність вітроустановки крім її характеристик суттєво впливає характеристика вітрового потенціалу в місці її розташування. Оскільки потужність вітроустановки має змінний характер, режим роботи електролізера потребує особливої уваги – процес електролізу вимагає дотримання низки умов, основні з яких представлені в технічних умовах обладнання. Для досягнення максимальної продуктивності під час вибору електролізера слід враховувати цілу низку факторів: режим споживання електроенергії та проходження електрохімічних процесів, умови роботи тощо.

Постановка завдання. Значний технічно досяжний енергетичний потенціал вітроенергетичної галузі України, придатний для широкомасштабного отримання електролітичного водню [6], потребує створення вітроводневої інфраструктури. Одним із основних елементів вітроводневих комплексів є електролізне обладнання, вдалий вибір якого забезпечить високу енергетичну та економічну ефективність енергокомплексів. Перспективи отримання та використання зеленого водню сприяли появі нових техніки й технологій електролітичного розкладу води, розгляд яких допоможе під час проектування й створення вітроводневих станцій.

Завдяки достатній простоті й надійності отримання електролітичного водню, високій чистоті вироблених водню й кисню, високому ресурсу установок і можливості автоматизації процесу електролізу води його застосовує цілий ряд промислових підприємств різних галузей, зокрема й енергетики. Електролізери використовують електроенергію для розщеплення води на водень і кисень, технологія добре розроблена і комерційно доступна. Різні електролізери працюють по-різному, в основному через використання різних типів електроліту.

Для електролізу води використовується постійний струм, за допомогою якого вода розкладається на водень та кисень. Як сировина використовується вода. Теоретично для виробництва 1 кг водню потрібно 8,9 л води й 39 кВт год електроенергії при температурі 25 °C та атмосферному тиску. Процес виробництва водню електролізом води вигідно відрізняється від інших методів одностадійністю й відносно простим апаратним і технологічним оформленням [4].

Використання електроенергії, отриманої із застосуванням вітроелектричного обладнання, для виробництва водню може бути реалізовано в різних варіантах, найприйнятнішим серед яких є пряме під'єднання через випрямляч для живлення електролізера. Досить перспективним може бути передача електроенергії від ВЕС до електромережі, коли її використання для виробництва водню відбувається на певній відстані.

Електролізери для отримання водню й кисню можна класифікувати за способом включення електродів, за

устроєм корпусу, за способом поділу газів, а також за тиском. За способом включення електродів електролізери поділяються на монополярні й біполярні. До складу монополярних електролізерів входить комплект монополярних електродів, електрично з'єднаних паралельно. Біполярні електролізери містять набір біполярних електродів, розміщених між монополярними електродами. У цьому разі біполярні електроди включені послідовно. Біполярні електроди характеризуються тим, що в них одна сторона поляризована позитивно (працює як анод), а інша негативно (катод).

За устроєм корпусу електролізери поділяються на ящикові та фільтр-пресні. Залежно від способу поділу газів розрізняють електролізери з колоколами, діафрагменні чи з іонообмінними мембранами. З метою зменшення втрат напруги в розчині електроліту за рахунок зниження його газонаповнення розроблені електроди з виносними робочими елементами – сітчасті, перфоровані чи просічені, подвійні електроди – перфоровані чи просічені, жалюзійні, пластинчасті та ін. У промисловості найбільшого поширення одержали біполярні електроди з виносними робочими елементами. При цьому всі конструкції належать до фільтр-пресного типу [7].

Технологічна схема електролізу води включає такі основні вузли і стадії: вузол приготування електроліту; стадія очищення води на механічному й іонообмінному фільтрах; стадія електролізу із системами охолодження і циркуляції електроліту, регулювання рівня електроліту та підтримки рівня тиску газів в осередку; стадії сушіння й очищення газів.

Електролітичний водень має відповідати таким вимогам: вміст H_2 – не менше 99,7 об'ємних %, вміст O_2 – не більше 0,3 об'ємних %. Основні задачі щодо удосконалення процесу електролізу води полягають у зниженні питомих витрат енергії, збільшенні одиничної потужності електролізерів та у зниженні капітальних вкладень. Для удосконалення процесу може бути використано:

- зниження перенапруги на електродах за допомогою активування поверхні електродів каталітичними добавками;
- розвиток робочої електродної поверхні при розробці спеціальних конструкцій електродів (наприклад, пористі електроди), що забезпечують відведення газів із зони електролізу;
- підвищення робочої температури електролізу;
- підвищення тиску в електролізері;
- застосування нових конструкційних і захисних матеріалів.

Традиційні електролізні системи для виробництва водню мають енергоспоживання в середньому $4,8 \text{ кВт год/нм}^3$, що значно вище теоретичних мінімальних витрат (3 кВт год/нм^3 водню). Сучасні

удосконалені електролізери лужного типу працюють при тиску 3 МПа (30 атм) і споживають $4,3\text{--}4,6 \text{ кВт год/нм}^3$ водню; мембранні, з перегородкою, що проводить протони, та високотемпературні парові споживають $3,2 \text{ кВт год/нм}^3$ водню. Основною проблемою при створенні удосконалених електролізерів лужного типу, що працюють при температурах $100\text{--}120^\circ\text{C}$ і тиску $0,1\text{--}0,5 \text{ МПа}$, є створення нових електродних та сепараційних матеріалів [4].

За видом використовуваного електроліту електролізери поділяються на три основних типи:

- з водним лужним електролітом (робоча температура – до 500 K);
- з твердим полімерним електролітом (робоча температура – до 423 K);
- з твердим оксидним електролітом (робоча температура – до 1300 K).

Лужний електроліз води є основним методом великомасштабного виробництва електролітичного водню. Однак результати досліджень і розробок останніх років показали, що незабаром конкурентоздатними можуть стати електролізери з твердополімерним електролітом [8].

Серед закордонних фірм, що працюють у сфері електролізу води, таких як Proton Energy Systems Inc., HSSI Electrolyzer, H_2 Gen Innovation Inc. та інші, найбільший об'єм продажу мають фірми, орієнтовані на лужні електролізери великої продуктивності. Значні успіхи щодо їх створення і реалізації зараз мають фірми Norsk Hydro Electrolysers (Норвегія), Stuart Energy Systems (Бельгія), Teledyne Inc. (США) [8].

Впровадження електролізерів з полімерною електролітною мембраною (РЕМ) у великому масштабі досі було неможливим, оскільки для цього були потрібні недорогі модулі, які легко інтегруються до більших електролізерних систем і масштабні автоматизовані виробничі потужності. Зараз ITM Power запропоновані інновації у сфері конструювання модулів і технологій їх виготовлення, які дозволять вирішити ці проблеми, а також знизити вартість електролізерів [9].

Американська воднева компанія Plug Power Inc. поставитиме контейнерні електролізерні модулі Plug потужністю 5 MWt для проектів екологічного водню, призначені для першого в історії промислового використання зеленого водню у виробництві скла, сталі та переробці алюмінію. Електролізери РЕМ розроблені як стандартизована система «під ключ» і ідеально підходять для зниження витрат і складності впровадження екологічних водневих проектів [10].

Високотемпературну технологію електролізу СЕА в промислових масштабах впроваджує Genvia (Франція). Електроліт являє собою тверду, щільну, газонепроникну мембрану на керамічній основі – оксид цирконію,

стабілізований оксидом ітрію, цирконій ітрію. Водневий електрод створено із металокерамічного композитного матеріалу з нікелю та ітрієвого цирконію, а кисневий – із суцільнокерамічного матеріалу перовскітної структури. Принцип дії такий: водяна пара надходить через водневий електрод, який дисоціює під дією електричного струму та високої температури (між 700 і 800 °C). Лужні та PEM-технології мають ефективність теплотворної здатності від 72 до 80 %, тоді як запропонований електролізер досягає 99 %. Genvia розраховує у майбутньому на випуск установок потужністю в декілька сотень мегават; для цих потужностей передбачається застосування модульного підходу, що забезпечує більшу гнучкість в управлінні установками та можливість встановлення електролізерів якомога ближче до кінцевих споживачів та відновлюваних джерел енергії, децентралізованих на територіях [11].

Дослідники пропонують використання в PEM-електролізерах мембран Nafion™ PEM, що мають підвищену міцність, довговічність і стабільність протягом усього терміну експлуатації для виробництва водню електролізом води [12].

Важливим аспектом вітроводневої енергетики є вартість водню, отриманого в процесі електролізу води, що значною мірою залежить від вартості електроенергії та вартості обладнання для виробництва водню. Економіка процесу отримання водню електролізом води передусім залежить від вартості електроенергії. Міжнародним агентством з відновлюваних джерел енергії (IRENA) викладено стратегії зменшення витрат на електролізери шляхом постійних інновацій, підвищення продуктивності та підвищення рівня потужності з мегават (МВт) до рівнів мультігигават (ГВт). Основні висновки такі [13]:

Проектування та конструкція електролізера – збільшення розміру модуля та інновації суттєво впливають на вартість. Так, збільшення розміру установки з 1 МВт, типового в 2020 році, до 20 МВт може зменшити витрати більш ніж на третину. Оптиміальні конструкції системи максимізують ефективність і гнучкість.

Ефективність і гнучкість в експлуатації – блок живлення несе великі втрати ефективності при низькому навантаженні, обмежуючи гнучкість системи з економічного погляду.

Промислове застосування – розробка та експлуатація систем електролізу можуть бути оптимізовані для конкретних застосувань у різних галузях промисловості.

Амбіційний енергетичний перехід, узгоджений з ключовими міжнародними кліматичними цілями, призведе до швидкого скорочення витрат на зелений водень. Траєкторія, необхідна для обмеження глобального потепління на 1,5 °C, може здешевити електролізери на 20 % до 2030 року [13].

За прогнозами аналітиків інвестиційного банку Morgan Stanley, у США зелений водень може зрівнятися в ціні з

воднем, виробленим із викопного палива під дією високих температур і тиску, вже в 2023 році завдяки падінню вартості електроенергії, що виробляється на основі ВДЕ. Зелений водень, вироблений з використанням енергії, може стати конкурентоспроможним з ціною приблизно 1 дол. США за 1 кг. Ціна зеленого водню дуже чутлива до вартості електроенергії – її зниження на 2 дол. за 1 МВт год знижує вартість водню на 0,10 дол. за 1 кг [14].

При роботі дуже великого електролізера потужністю 1 ГВт, що працює з ефективністю 75 % на 8000 годин на рік, річне виробництво водню становитиме 0,15 млн т, а витрати води складатимуть 3 млн т (із розрахунку 20 кг води на 1 кг водню) [15].

Запатентовані електролізери RuggedCell™ від Hydrogen Optimized розроблені для досягнення найнижчого рівня вартості чистого водню у великих масштабах. Вони перетворюють відновлювану енергію, таку як сонячна та вітрова, на зелений водень, використовуючи архітектуру високої потужності, яка дає змогу окремим модулям потужністю 50 МВт+ задовольняти вимоги до чистої енергії для основних промислових застосувань, як-от виробництво сталі, аміаку тощо. Для підтримки виробництва електролізерів RuggedCell™ в Канаді урядом провінції Онтаріо виділено 500 000 дол. США. Урядові кошти збільшують інвестиції компанії Hydrogen Optimized на початковій стадії виробництва на 4,6 млн доларів [16].

Розроблено більш компактне й гнучке, з неперевершеним на цей час строком служби, нове обладнання, призначене як для промисловості, так і для енергетичних ринків, яке забезпечить значне поліпшення технічних і економічних можливостей. Комплексна система отримання електролітичного водню компактна, з високими показниками ефективності й експлуатаційною стабільністю, в якій все обладнання об'єднано в один контейнер [17].

Бельгійські генератори водню фірми Stuart Energy Systems продуктивністю до 120 нм³H₂/год складаються з двох блоків: джерела струму і власне електролізера, поставка здійснюється у повному зібранні у вигляді двох контейнерів. Їх впровадження, завдяки невисоким ваговим та масогабаритним характеристикам, не потребує спорудження окремих будівель. Аналогічні установки з дещо іншою елементною базою виготовляє фірма Norsk Hydro Electrolysers (Норвегія).

Над створенням і побудовою масштабних проєктів з виробництва зеленого водню з використанням енергії вітру як первинного ресурсу та із застосуванням електролізерів великої потужності працюють різні наукові установи, компанії у різних країнах світу, що демонструють різні підходи та напрями [18–22].

Вітчизняні наукові, проєктувальні та виробничі установи й компанії досить активно і давно займаються створенням, удосконаленням та впровадженням електролізної

техніки. Компанія «ІНФОКОМ ЛТД» володіє технологією виробництва зеленого водню методом електролізу води. Процес складається з кількох технологічних потоків; метод виробництва – постійний, циклічний і регулюється технологічним регламентом. У 2009–2010 роках компанія автоматизувала виробництво водню на Запорізькому заводі напівпровідників [23].

Електролізери з використанням активного газопоглинального електрода розроблено в Інституті проблем машинобудування НАН України (ІПМаш НАН України, м. Харків). У пропонуваній конструкції електролізера реалізується розроблена технологія розділення процесів виділення водню й кисню у часі, тобто процес роботи електролітичної системи стає циклічним – складається з почергових періодів виділення водню й кисню. Розроблений варіант електролізера забезпечує отримання водню й кисню при тиску 150 атм (15 МПа) без використання компресора [24].

Електролізне обладнання, що працює за цим принципом, забезпечує:

- зниження енергозатрат – у дослідних зразках питомі витрати становлять 3,85–4,10 кВт год/м³;
- тиск отриманих газів обмежується лише міцністю конструкції;
- у конструкції відсутні іонообмінні мембрани, що підвищує надійність та безпеку експлуатації;
- не потрібно використовувати рідкоземельні метали;
- чистота отриманих газів становить 99,98 % для водню та 99,95 % для кисню.

В ІПМаш НАН України сформовані науково-технічні принципи створення електрохімічних водневих акумуляторів енергії та запропоновано шляхи оптимізації їх роботи на змінних режимах, характерних для реальних умов експлуатації енерготехнологічних комплексів на базі ВЕУ [24]. Були проведені роботи, спрямовані на розробку, проектування й оптимізацію конфігурації електролізерів, виготовлення та монтаж компонентів енерготехнологічного комплексу (ЕТК), створення спеціалізованої системи керування, а також оснащення її відповідним програмним забезпеченням для оптимізації режиму роботи ЕТК. Важливою складовою забезпечення надійної та ефективної роботи енерготехнологічного комплексу є синхронізація роботи ВЕУ і системи генерації газів. Отримані дані про конструктивні рішення електролізної техніки й особливості її експлуатації в технологічних схемах дали змогу розробити оригінальні алгоритми автоматичного керування основними елементами системи й створити технічну базу для його реалізації. Буферна воднева система, яка складається з електролізера і системи зберігання водню, органічно вписується в енерготехнологічну схему ВЕУ, забезпечуючи вирішення проблеми подачі енергії споживачеві у період відсутності вітру [24].

Висновки

Аналіз світових та вітчизняних розробок щодо ефективності отримання водню електролітичним розкладом води показує, що з погляду науково-технічних досягнень у цій галузі є достатній доробок. У разі об'єднання наукових та промислових напрямів, підкріплених фінансово, можна вийти на світовий рівень практичного застосування вітроводневих технологій у нашій країні. Створення вітроводневої енергетики як нової енергетичної підгалузі, яка шляхом впровадження новітніх технологій, створення вітчизняної наукової, науково-технічної, технологічної та виробничої інфраструктури поступово забезпечить значну частку потреб в екологічно чистих енергоносіях різні галузі економіки України.

При визначенні економічної ефективності вітроводневих енергосистем собівартість виробленого водню здебільшого залежить від наявності в певній місцевості енергетичного потенціалу, тому першочерговим завданням при їх впровадженні є вибір вітроелектричного обладнання з урахуванням встановленого енергетичного потенціалу вітрової енергії в цій місцевості. Відповідно до робочих параметрів та режимів роботи ВЕУ проводиться вибір обладнання для електролітичного виробництва водню, а також допоміжного устаткування для максимально можливого та ефективного його освоєння. Оскільки впровадження водневих технологій у вітроенергетиці потребує створення складних енергетичних систем, що включають вітроелектричне обладнання для виробництва електроенергії, обладнання для виробництва електролітичного водню, систем зберігання водню, допоміжного обладнання та інших технічних засобів, виникає необхідність проведення відповідних розрахунків та детального аналізу щодо визначення ефективності як окремих елементів, так і енергосистеми загалом.

ПОСИЛАННЯ

1. Європейський зелений курс і кліматична політика України [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <https://niss.gov.ua/publikatsiyi/analytichni-dopovidi/yevropeyskyy-zelenyy-kurs-i-klimatychna-polityka-ukrayiny>
2. Позитивні та негативні аспекти використання вітроенергетики [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <https://dpssmk.gov.ua/pozytyvni-ta-nehativni-aspekty-vykorystannia-vitroenerhetyky/>.
3. За воднем – майбутнє енергетичної системи України і... незалежність від Росії [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <https://galychyna.if.ua/analytic/zavodnem-maybutnye-energetichnoyi-sistemi-ukrayini-i-nezalezhnist-vid-rosiyi/>
4. Відновлювані джерела енергії / За ред. С.О. Кудрі. Київ: Ін-т відновлюваної енергетики НАНУ. 2020. 392 с.

5. Мхітарян Н. М., Кудря С. О., Яценко Л. В., Шинкаренко Л. Я., Будько В. І. Перспективи використання водню у відновлюваній енергетиці. Відновлювана енергетика. 2008. № 3 (14). С. 5–15.
6. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за ред. С. О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України. 2020. 82 с.
7. Волошин М. Д. Конспект лекцій з дисципліни "Електрохімічна технологія неорганічних речовин". Дніпродзержинськ: ДДТУ. 2012. 87 с.
8. Альтернативні палива, енергетика. Складова водневої енергетики [Електронний ресурс] // – Режим доступу: http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=631
9. Виробництво водню гігаватного масштабу за допомогою офшорної вітрової енергії [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://elektrovesti.net/67292_virobnitstvo-vodnyu-gigavatnogo-masshtabu-za-dopomogoyu-ofshornoivitrovoi-enerгии.
10. Plug Power постачатиме електролізери для трьох унікальних проєктів екологічного водню в Європі [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.hydrogenfuelnews.com/green-hydrogen-plug-electrolyzer/8558862/?awt_a=1jpsU&awt_l=Co-7SC&awt_m=ipahTz0UFu5DIsU
11. Технологія електролізу СЕА для виробництва водню досягає 99% ефективності [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <https://www.industrie-tech-no.com/article/la-technologie-d-electrolyse-du-cea-qu-exploitera-genvia-pour-produire-de-l-hydrogene-atteint-99-de-rendement-se-rejouit-julie-mougin-du-cea-liten.63839>
12. Дослідники розробляють мембрани Nafion™, виготовлені з іонообмінного полімеру [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.nafion.com/en/support/white-papers/membranes-for-water-electrolysis?utm_medium=ad-static-banner&utm_source=hydrogen+fuel+news&utm_campaign=2023-q2-nafion-hydrogen-economy&utm_content=daily+enews+banner+600x400+h2e+waterelectrolyzers&utm_term=eng-may-learnmore
13. IRENA: стратегії зменшення витрат на електролізери [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <https://irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>
14. «Зелений» водень може зрівнятися в ціні з менш екологічним вже у 2023 році [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <https://www.epravda.com.ua/projects/greendeal/2020/07/29/663495/>
15. Зниження витрат на «зелений» водень: збільшення масштабу електролізерів для досягнення кліматичної цілі 1,5°. Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії. Абу-Дабі, IRENA. 2020. 117 с.
16. 500 000 доларів для підтримки виробництва електролізера RuggedCell™ в Канаді [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <https://hydrogenoptimized.com/hydrogen-optimized-inc-project-will-create-new-good-paying-jobs-at-the-companys-growing-owen-sound-facility/>
17. Обладнання для покоління H2: De Nora та McPhy Energy підписали технологічне партнерство [Електронний ресурс] // – Режим доступу: www.denora.com, www.mcphy.com
18. ScottishPower оголошує про найбільший електролізер [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.hydrogenfuelnews.com/green-hydrogen-electrolyzer/8544165/?mc_cid=6c221b8ac9&mc_eid=d40454d77
19. Обсяг виробництва водню електролізером потужністю 60 МВт [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <https://thyssenkrupp-nucera.com/2023/03/13/unigel-and-thyssenkrupp-nucera-sign-memorandum-of-understanding-to-increase-production-capacity-of-green-hydrogen-plant/>
20. Проєкт електролізера гігаватного класу в Іспанії [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <https://www.cummins.com/news/releases/2021/05/24/cummins-selects-spain-its-gigawatt-electrolyzer-plant-partners-iberdrola>
21. Електролізер потужністю 300 МВт для зеленого водню на датському НПЗ [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/agriculture/051121-everfuel-plans-300-mw-electrolyzer-for-green-hydrogen-at-denmarks-fredericia-refinery>
22. Водородная экономика: Норвегия увеличит глобальные мощности по производству электролизёров в десять раз [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <http://renen.ru/hydrogen-economy-norway-will-increase-global-capacities-for-the-production-of-electrolyzers-tenfold/>.
23. АСУ ТП «Виробництво водню» методом електролізу води <https://ia.ua/uk/resheniya/asu-tp-proizvodstvo-vodoroda-metodom-elektroliza-vody/>
24. Русанов А. В., Соловей В. В., Зіпунніков М. М., Шевченко А. А. Термогазодинаміка фізико-енергетичних процесів в альтернативних технологіях: В 3-х т. Т. 1. Термогазодинаміка фізико-енергетичних процесів в водневих технологіях / під загальною редакцією чл.-кор. НАНУ А. В. Русанова; НАН України, Інститут проблем машинобудування. Харків: Видавництво та друкарня «Технологічний Центр». 2018. 336 с.

REFERENCES

1. Yevropeyskyi zelenyi kurs i klimatychna polityka Ukrainy [The European Green Course and the climate policy of Ukraine] // – URL: <https://niss.gov.ua/publikatsiyi/analytichni-dopovidi/yevropeyskyi-zelenyi-kurs-i-klimatychna-polityka-ukrayiny> [in Ukrainian]
2. Pozytyvni ta nehatyvni aspekty vykorystannia vitro-enerhetyky [Positive and negative aspects of using wind energy] // – URL: <https://galychyna.if.ua/analytic/za-vodnem-maybutnye-energetichnoyi-sistemi-ukrayini-i-nezalezhnist-vid-rosiyi/> [in Ukrainian]
3. Za vodnem – maibutnie enerhetychnoi systemy Ukrainy i... nezalezhnist vid Rosii [Hydrogen is the future of Ukraine's energy system and... independence from Russia] // – URL: <https://galychyna.if.ua/analytic/za-vodnem-maybutnye-energetichnoyi-sistemi-ukrayini-i-nezalezhnist-vid-rosiyi/> [in Ukrainian]
4. Vidnovliuvani dzherela enerhii [Renewable energy sources] / Za red. S. O. Kudri. Kyiv: Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NANU. 2020. 392 s. [in Ukrainian]
5. Mkhitarian N. M., Kudria S. O., Yatsenko L. V., Shynkarenko L. Ia., Budko V. I. Perspektyvy vykorystannia vodniu u vidnovliuvanii enerhetytsi [Prospects for the use of hydrogen in renewable energy]. Vidnovliuvana enerhetyka. 2008. № 3 (14). S. 5–15. [in Ukrainian]
6. Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh dzherel enerhii Ukrainy [Atlas of the energy potential of renewable energy sources of Ukraine] / Za red. S. O. Kudri. Kyiv: Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NANU. 2020. 82 s. [in Ukrainian]
7. Voloshyn M. D. Konspekt lektsii z dystsypliny "Elektrokhimichna tekhnolohiia neorhanichnykh rechovyn" [Synopsis of lectures on the discipline "Electrochemical technology of inorganic substances"] Dniprodzerzhynsk: DDTU. 2012. 87 s.
8. Alternatyvnie toplyva, enerhetyka. Sostavliaiushchaia vodorodnoi enerhetyky [Alternative fuels, energy. Component of hydrogen energy] // – URL: http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=631.
9. Vyrobnystvo vodniu hihavatnoho mashtabu za dopomohoiu ofshornoj vitrovoi enerhii [Gigawatt-scale hydrogen production using offshore wind energy] // – URL: https://elektrovesti.net/67292_virobnystvo-vodnyu-gigavatnogo-mashtabu-za-dopomogoyu-ofshornoj-vitrovoi-energii [in Ukrainian]
10. Plug Power postachatyne elektrolizery dlia trokh unikalnykh proiektiv ekolohichnoho vodniu v Yevropi [Plug Power will supply electrolyzers for three unique ecological hydrogen projects in Europe] // – URL: https://www.hydrogenfuelnews.com/green-hydrogen-plug-electrolyzer/8558862/?awt_a=1jpsU&awt_l=Co7-SC&awt_m=ipahTz0UFu5DIsU [in English]
11. Tekhnolohiia elektrolizu CEA dlia vyrobnytstva vodniu dosiahaie 99% efektyvnosti [CEA's electrolysis technology for hydrogen production reaches 99% efficiency] // – URL: <https://www.industrie-techno.com/article/la-technologie-d-electrolyse-du-cea-qu-exploitera-genvia-pour-produire-de-l-hydrogene-atteint-99-de-rendement-se-rejouit-julie-mougin-du-cea-liten.63839> [in French]
12. Doslidnyky rozrobliaiut membrany Nafion™, vyhotovleni z ionoobminnoho polimeru [Researchers are developing Nafion™ membranes made from an ion exchange polymer] // – URL: https://www.nafion.com/en/support/white-papers/membranes-for-water-electrolysis?utm_medium=ad-static-banner&utm_source=hydrogen+fuel+news&utm_campaign=2023-q2-nafion-hydrogen-economy&utm_content=daily+enews+banner+600x400+h2e+waterelectrolyzers&utm_term=eng-may-learnmore [in English]
13. IRENA: stratehii zmenshennia vytrat na elektrolizery [IRENA: cost reduction strategies for electrolyzers] // – URL: <https://irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction> [in English]
14. «Zelenyi» voden mozhe zrivniatys v tsini z mensh ekolohichnym vzhe u 2023 rotsi ["Green" hydrogen may equal the price of less environmentally friendly hydrogen as early as 2023] // – URL: <https://www.epravda.com.ua/projects/greendeal/2020/07/29/663495/> [in Ukrainian]
15. Znyzhennia vytrat na «zelenyi» voden: zbilshennia mashtabu elektrolizeriv dlia dosiahnennia klimatychnoi tsili 1,5° [Reducing the costs of "green" hydrogen: scaling up electrolyzers to meet the climate goal of 1,5°]. Mizhnarodne ahentstvo z vidnovliuvanykh dzherel enerhii. Abu-Dabi, IRENA, 2020. 117 s.
16. 500 000 dolariv dlia pidtrymky vyrobnytstva elektrolizera RuggedCell™ v Kanadi [\$500,000 to support manufacturing of the RuggedCell™ Electrolyzer in Canada] // – URL: <https://hydrogenoptimized.com/hydrogen-optimized-inc-project-will-create-new-good-paying-jobs-at-the-companys-growing-owen-sound-facility/> [in English]
17. Obladnannia dlia pokolinnia N2: De Nora ta McPhy Energy pidpysaly tekhnolohichne partnerstvo [Equipment for N2 generation De Nora and McPhy Energy have signed a technology partnership] // – URL: www.denora.com, www.mcphy.com
18. ScottishPower oholoshuie pro naibilshyi elektrolizer [ScottishPower announces largest ever electrolyser] // – URL:

- https://www.hydrogenfuelnews.com/green-hydrogen-electrolyzer/8544165/?mc_cid=6c221b8ac9&mc_eid=c40454d77 [in English]
19. Obsiah vyrobnytstva vodniu elektrolizerom potuzhnistiu 60 MVt [The volume of hydrogen production by an electrolyzer with a capacity of 60 MW] // – URL: <https://thyssenkrupp-nucera.com/2023/03/13/unigel-and-thyssenkrupp-nucera-sign-memorandum-of-understanding-to-increase-production-capacity-of-green-hydrogen-plant/> [in English]
 20. Proiekt elektrolizera hihavatnoho klasu v Ispanii [Gigawatt class electrolyser project in Spain] // – URL: <https://www.cummins.com/news/releases/2021/05/24/cummins-selects-spain-its-gigawatt-electrolyzer-plant-partners-iberdrola> [in English]
 21. Elektrolizer potuzhnistiu 300 MVt dlia zelenoho vodniu na datskomu NPZ [A 300 MW electrolyser for green hydrogen at a Danish refinery] // – URL: <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/agriculture/051121-everfuel-plans-300-mw-electrolyzer-for-green-hydrogen-at-denmarks-fredericia-refinery> [in English]
 22. Vodorodnaia ekonomika: Norvehiya uvelychyt hlobalnie moshchnosty po proyzvodstvu elektrolizërov v desiat raz [Hydrogen economy: Norway to increase global electrolytic capacity tenfold] // – URL: <http://renen.ru/hydrogen-economy-norway-will-increase-global-capacities-for-the-production-of-electrolyzers-tenfold/>
 23. ASU TP «Vyrobnytstvo vodniu» metodom elektrolizu vody [ACS TP "Production of hydrogen" by the method of water electrolysis] // – URL: <https://ia.ua/uk/resheniya/asu-tp-proizvodstvo-vodoroda-metodom-elektroliza-vody/> [in Ukrainian]
 24. Rusanov A. V., Solovei V. V., Zipunnikov M. M., Shevchenko A. A. Termohazodynamika fizyko-enerhetychnykh protsesiv v alternatyvnykh tekhnolohiiakh: V 3-kh t. T. 1. Termohazodynamika fizyko-enerhetychnykh protsesiv v vodnykh tekhnolohiiakh [Thermogas dynamics of physical and energetic processes in alternative technologies in 3 volumes: vol. 1. Thermogas dynamics of physical and energetic processes in hydrogen technologies] / pid zahalnoi redaktsiieiu chl.-kor. NANU A. V. Rusanova, Instytut problem mashynobuduvannia NAN Ukrainy. Kharkiv: Vydavnytstvo ta drukarnia «Tekhnolohichniy Tsentr». 2018. 336 s.