

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЗАХИСТ ДОВКІЛЛЯ

ISSN 2522-4344 (Online), ISSN 1562-8965 (Print). The problems of general energy, 2021, 1(64): 45–51
doi: <https://doi.org/10.15407/pge2021.01.045>

УДК 332.873: 658.18

Н.П. ІВАНЕНКО, канд. техн. наук,

П.В. ТАРАСЕНКО, канд. хім. наук,

Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

СОБІВАРТІСТЬ ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ З ВИКОРИСТАННЯМ ЧАСТКИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В УКРАЇНІ

У 2020 р. було внесено низку змін до Закону України «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 № 2019-VIII, які передбачають зниження ставок «зеленого» тарифу до проектів з відновлюваної енергетики. Наразі ПрАТ «НЕК «Укренерго» прогнозує обмеження виробництва електроенергії з відновлюваних джерел. Одним з можливих шляхів використання надлишкової електроенергії є виробництво водню. Мета статті – оцінити середньозважену собівартість водню в Україні за рахунок електроенергії від відновлюваних джерел енергії.

Запропоновано алгоритм розрахунку середньозваженої собівартості виробництва водню з використанням вітрових електростанцій (ВЕС) для умов України, враховуючи визначення встановлених потужностей накопичувача, електролізера і дистильатора. За результатами розрахунків середньозважена собівартість виробництва водню в Україні склала близько 5, 1 дол. США/кг водню.

К л ю ч о в і с л о в а: виробництво водню, відновлювані джерела енергії, вітрова електростанція, середньозважена собівартість, математична модель, накопичувач, електролізер.

Станом на червень 2020 р. частка відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у структурі виробництва електроенергії в Україні зросла вдвічі порівняно з попереднім роком. Такі результати в ПрАТ «НЕК «Укренерго» пояснили інтенсивним введенням нових потужностей ВДЕ упродовж минулого та у першому півріччі 2020 р. та зниженням рівня споживання. У результаті встановлена потужність ВДЕ зросла удвічі (з 2,9 ГВт у червні 2019 р. до 5,8 – у червні 2020 р.). Таке зростання пояснюється законодавчо закріпленими економічними стимулами будівництва ВДЕ, зокрема, «зеленим» тарифом та гарантованим викупом державою електроенергії, виробленої з ВДЕ. При цьому у структурі виробництва за результатами першого півріччя 2020 р. на 5% зменшилась частка ТЕС, а частки АЕС та інших видів генерації практично не змінилися.

Загальне виробництво в енергосистемі скоротилося на 8%, а споживання (нетто) – на майже 5% порівняно з першим півріччям 2019 р. Двома ключовими причинами зниження виробництва

і споживання електроенергії у 2020 р. в «Укренерго» назвали теплу зиму та введення у березні карантинних обмежень в Україні та у світі. Найбільше скорочення виробництва електроенергії у першому півріччі 2020 р. відбулося на АЕС (–7,7%), ТЕС (–24%) та ГЕС (–26,3%). Виникли серйозні ризики технічного характеру, пов'язані зі складністю забезпечення операційної безпеки ОЕС України в умовах стрімкого неконтрольованого зростання встановленої потужності об'єктів відновлюваної енергетики. Наразі в електроенергетичній системі України вже відчувається брак гнучкості генеруючих потужностей, яка необхідна для забезпечення інтеграції таких об'єктів, особливо зі змінним графіком генерації, що призводить до неекономічних режимів функціонування ОЕС України. Для забезпечення балансової надійності режимів ОЕС України необхідно було застосовувати обмеження генерації з ВДЕ.

У зв'язку з цим у 2020 р. було внесено низку змін до Закону України «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 №2019-VIII [1], які передбачають зниження ставок «зеленого» тарифу до проектів з відновлювальної енергетики.

© Н.П. ІВАНЕНКО, П.В. ТАРАСЕНКО, 2021

ПрАТ «НЕК «Укренерго» прогнозує обмеження виробництва електроенергії з відновлюваних джерел, на фоні зростаючої їх потужності та падаючого споживання – до 1 млрд кВт·год. Загальний обсяг виробництва електроенергії ВДЕ у 2019 р. склав близько 4,5 млрд кВт·год [2].

Таким чином залишається значний обсяг надлишкової електроенергії, виробленої ВДЕ. Одним з можливих шляхів використання цієї електроенергії є виробництво водню. Водень успішно використовують як сировину вже багато років. Загальна оціночна вартість ринку сировини водню – 115 млрд дол. США і, як очікується, вона буде тільки зростати, досягнувши до 2022 р. 155 млрд дол. США [3]. Наразі водень широко застосовують у різних галузях і секторах, зокрема в промисловості: 65% водню використовується в хімічній промисловості (виробництво аміаку, полімерів та резин), 25% при виробництві чавуну та сталі, 10% в інших галузях промисловості (виробництво напівпровідників, скла і т.д.). Водень також використовується як домішок до природного газу в трубопроводах, широко застосовується для різних видів транспорту. На жаль, наразі лише 4% водню виробляється за рахунок електроенергії від ВДЕ, але ця частка швидко зростає.

Найбільш відомими технологічними варіантами отримання водню з відновлюваних джерел енергії є електроліз води та паровий риформінг біометану/біогазу з або без уловлювання та використання/зберігання вуглецю (CCU/CCS) [4]. Менш розвиненими технологіями є газифікація біомаси та піроліз, термохімічне розщеплення води, фотокаталіз, надкритична газифікація води біомаси та комбіноване темне бродиння та анаеробне перетравлення.

Собівартість водню, що виробляється з відновлюваної електроенергії, в даний час у більшості випадків дорожче, ніж водень, отриманий з використанням органічного палива [5]. Вартість водню, виробленого з природного газу, становить, як правило, близько 1,5–3 дол. США/кг водню, тоді як вартість водню, що виробляється з відновлюваної електроенергії (сонячна фотоелектрична енергія або вітрова енергія), становить, як правило, 2,5–6,6 дол. США/кг водню.

В Європі створено Європейську асоціацію, яка представляє інтереси промисловості виробництва водню і паливних елементів. Ця асоціація об'єднує більше 60 компаній, 78 наукових організацій та 25 національних асоціацій [6].

Окремо слід зазначити, що використання водню замість природного газу не призводить до викидів парникових газів і сприяє декарбонізації економіки. Крім того, слід зазначити, що побіч-

ним продуктом електролізу є очищений кисень, що наразі є актуальним.

Мета статті полягає в оцінці середньозваженої собівартості водню в Україні за рахунок електроенергії ВДЕ, зокрема, виробленої вітровою електростанцією.

На рис. 1 наведено принципову схему виробництва водню шляхом електролізу. До неї входить таке обладнання: дистилятор, накопичувач і електролізер. Накопичувач необхідний для усунення нерівномірності виробництва електроенергії на ВЕС. Подальша обробка водню залежить від сфери його використання. Дистилятор необхідний для виробництва дистильованої води. Електролізер необхідний для проведення електролізу дистильованої води. Ззовні надходять електроенергія від ВДЕ і вода. Кінцевими продуктами є кисень і водень.

Для електрохімічного відновлення 1 г-еквівалента будь-яких іонів необхідно витратити кількість струму, що відповідає числу Фарадея – 96520 кулонів. Відповідно для відновлення двох іонів водню (H^+), тобто для одержання 1 г-моля (2 г) водню необхідно витратити 2·96500 Кл, або 53,6 А·год. Мінімальний потенціал електрохімічного відновлення катіона водню безвідносно до матеріалу катода становить 1,23 В. Отже теоретично для отримання 1 кг водню необхідно витратити:

$$E = \frac{53,6 \cdot 1,03 \cdot 1}{0,002 \cdot 1000} = 32,96 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{кг}.$$

В умовах промислового електролізу води необхідно підтримувати вищу напругу для компенсації втрат від перенапруги на електродах. Величина перенапруги для реакції катодного відновлення H^+ виражається рівнянням Тафеля:

$$\eta = \alpha + \beta \lg i,$$

де η – величина перенапруги, В; α – константа, що відповідає величині перенапруги при щільності струму 1 А/см² і залежить від матеріалу електрода, В; β – константа, що залежить від природи електрохімічного процесу; i – застосована щільність струму, А/см².

У випадку застосування нікельованих пластин електродів і гідроксиду натрію в якості електроліта з концентрацією 4,4 г/л і при щільності струму 1 А/см² перенапруга становить:

$$\eta = 0,64 + 0,1 \lg 1 = 0,64 \text{ В}.$$

Відповідно витрати електроенергії становлять 50,1 кВт·год на 1 кг водню:

$$E = \frac{53,6 \cdot (1,23 + 0,64) \cdot 1}{0,002 \cdot 1000} = 50,1 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}.$$

Збільшення щільності струму для інтенсифікації електролізу згідно з рівнянням Тафеля також веде до зростання перенапруги і питомих

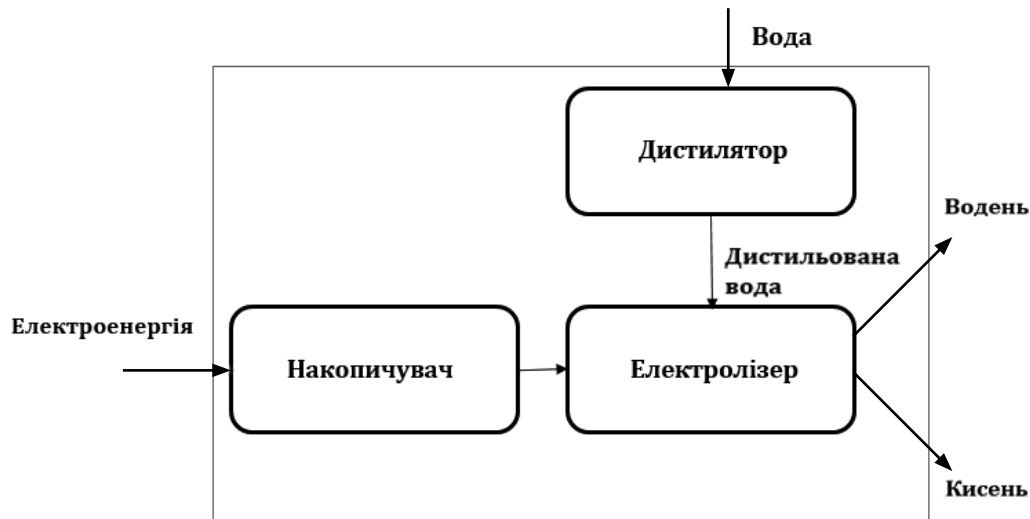


Рис. 1. Принципова схема виробництва водню шляхом електролізу

затрат енергії. Додатковий вклад у перенапругу вносять також втрати через омичний опір розчину і діафрагми. Вже при підтриманні напруги на електродах 2 В витрати електроенергії зростають до 53,6 кВт·год на 1 кг водню [7].

При електролізі на 1 кг водню витрачається 9 кг води.

У табл. 1 наведені умови проведення розрахунків середньозваженої собівартості виробництва водню за рахунок електроенергії від вітрових електростанцій (ВЕС) в Україні.

На першому етапі необхідно визначити параметри обладнання для виробництва водню, тобто потужності накопичувача, дистилятора і електролізера.

Наразі існують три основні електролізерні технології: лужний електролізер (ALK), електролізер на основі мембранного протонообміну (PEM), електроліз та електролітичні елементи твердого оксиду (SOEC). Їх основні технічні та економічні характеристики узагальнено в табл. 2 [9].

Лужний електроліз – це найбільш зріла та комерційна технологія. Він використовується з 1920-х років, зокрема для виробництва водню в галузі виробництва добрив та хлору. Операційний діапазон лужних електролізерів варіюється від

мінімального навантаження 10% до повної проектної потужності.

Лужний електроліз характеризується низькими капітальними витратами порівняно з іншими електролізерними технологіями в зв'язку з невикористанням дорогіших матеріалів.

Вперше електролізерні системи PEM були введені в 1960-х роках компанією «General Electric» для подолання деяких операційних недоліків лужних електролізерів.

Вони порівняно невеликі, що робить їх потенційно більш привабливими, ніж лужні електролізери, у щільно заселених міських районах. Вони здатні виробляти сильно стиснений водень для децентралізованого виробництва та зберігання на заправних станціях (30–60 бар без додаткового компресора та до 100–200 бар у деяких системах порівняно з 1–30 бар для лужних електролізерів) і забезпечують гнучку роботу, зокрема можливість надання резерву частоти та інших мережових послуг. Їх робочий діапазон може складати від нульового навантаження до 160% від проектної потужності (так що можна перевантажити електролізер для деякий час, якщо установка та силова електроніка були спроектовані відповідно). Серед недоліків слід зазначити необхідність викорис-

Таблиця 1. Вихідна інформація для розрахунку середньозваженої собівартості виробництва водню за рахунок електроенергії від ВЕС в Україні

Показник	Одиниці виміру	Значення	Позначення у формулах
Щорічний обсяг електроенергії від ВЕС	МВт·год	1000	EE
Середньозважена собівартість електроенергії на ВЕС	\$/ МВт·год	64–85 [8]	C_{wind}
Термін експлуатації	років	20	N

тання дорогих електродних каталізаторів (платина, іридій) та мембранних матеріалів, а також коротший, ніж у лужних електролізерів, термін експлуатації.

Наразі загальні витрати для електролізерів PEM значно вищі, ніж для лужних електролізерів.

SOEC є найменш розвинутою технологією електролізу. Вона ще не комерціалізована, хоча окремі компанії зараз прагнуть вивести такі електролізери на ринок. SOEC використовують кераміку як електроліт, тому необхідні недорогі матеріальні витрати. Вони діють за високих температур і мають високий ступінь електричної ефективності. У зв'язку з тим, що вони використовують пару для електролізу, їм потрібне джерело тепла. Атомні, сонячні, теплові або геотермальні електростанції можуть для цього використовуватися. Теплові системи також можуть бути джерелами тепла для високотемпературного електролізу.

На відміну від лужних та PEM електролізерів, електролізер SOEC можна експлуатувати у зворотному режимі як паливний елемент, перетворюючи водень назад в електроенергію. Це означає, що такий електролізер міг би забезпечити послуги балансування мережі в поєднанні з сховищами водню. Це приводить до збільшення загального коефіцієнта використання обладнання. Також можна використовувати SOEC електролізер для спільного електролізу пари та вуглекислого газу, утворюючи газову суміш (монооксид вуглецю і водень) для подальшого перетворення в синтетичне паливо. Одна із ключових проблем для тих, хто розробляє електролізери SOEC, це деградація матеріалів від високих робочих температур.

Дистилятор необхідний для очищення води від сторонніх домішок. В основі його дії лежить процес дистиляції, який протікає за допомогою випа-

ривування, що дозволяє очистити воду від непотрібних домішок і отримати в результаті найчистіший продукт. Дистиляцію можна цілком назвати найефективнішим методом очищення.

Принцип роботи дистиляторів полягає в тому, що вода, яка надходить в перегінний куб, доводиться до стану кипіння, після чого з отриманим паром відбувається процес конденсації, а конденсат, в свою чергу поміщається в призначену для нього ємність. У підсумку, отримана рідина (дистильована вода) не має ні найменших домішок, а також не має кольору, запаху і смаку. За допомогою дистилятора можна очистити воду практично будь-якої початкової якості – від водопровідної до колодязної.

Між собою дистилятори можуть відрізнятися конструкцією, способами нагріву, а також рівнем продуктивності. Так, конструктивно, дистилятори можуть бути вогневими, електричними з наявністю водопідготовки або ж електричними з наявністю водопідготовки і збірки. У підсумку, в залежності від конструкції, кількість отриманої дистильованої води (дистиляту) відрізняється.

У розрахунках було використано літєво-іонний акумулятор, який найбільше використовується у світі. Виходячи з зазначеного вище, обрано лужний електролізер (Alkaline electrolyzers, ALK)

Техніко-економічні характеристики літєво-іонного акумулятора, лужного електролізера і дистилятора наведено в табл. 2–5.

Для точних розрахунків необхідно розглядати конкретну ВЕС з прив'язкою до конкретних погодних умов місцевості. Якщо усереднити ці умови по всій території України, можна отримати лише орієнтовну оцінку. Для цього необхідно проаналізувати погодинні графіки виробництва електроенергії на ВЕС України. На рис. 2 і 3 наведено

Таблиця 2. Техніко-економічні характеристики електролізерів

Характеристики	ALK			PEM			SOEC		
	2020 р.	2030 р.	Довгострокова перспектива	2020 р.	2030 р.	Довгострокова перспектива	2020 р.	2030 р.	Довгострокова перспектива
Електрична ефективність, %	63–70	65–71	70–80	56–60	63–68	67–74	74–81	77–84	77–90
Робочий тиск, бар	1–30			30–80					
Робоча температура, °C	60–80			50–80			650–1000		
Термін експлуатації, годин роботи	60000–90000	9000–100000	100000–150000	30000–90000	60000–90000	100000–150000	10000–30000	40000–60000	75000–100000
Діапазон навантаження, % від номінального	10–110			0–160			20–100		
Капітальні витрати, дол. США/кВт	500–1400	400–850	200–700	1100–1800	650–1500	200–900	2800–5600	800–2800	500–1000

Таблиця 3. Техніко-економічні характеристики літєво-іонного акумулятора [9]

Характеристики	Значення	Позначення у формулах
Номинальна потужність, МВт	10000	
ККД, %	86	σ_{LIA}
Життєвий цикл, роки	20	N
Капітальні вкладення, дол. США/кВт	1132	K_{LIA}
Експлуатаційні витрати, % від капітальних вкладень	1,5	E_{LIA}

Таблиця 4. Техніко-економічні характеристики лужного електролізера [10]

Характеристики	Значення	Позначення у формулах
Продуктивність, кВт·год/кг H ₂	51	P_{ALK}
ККД, %	65	σ_{ALK}
Життєвий цикл, роки	20	N
Капітальні вкладення, дол. США/кг водню/год	850	K_{ALK}
Експлуатаційні витрати, % від капітальних вкладень	2	E_{ALK}

Таблиця 5. Техніко-економічні характеристики дистилятора [1]

Характеристики	Значення	Позначення у формулах
Витрати електроенергії, кВт·год/кг дистилюваної води	0,744	EE_D
Життєвий цикл, роки	20	N
Капітальні вкладення, дол. США/кг/год	200	K_D
Експлуатаційні витрати, % від капітальних вкладень	1	E_D

погодинний графік виробництва ВЕС [2] 15 січня і 15 липня 2020 р. відповідно.

На рисунках середнє добове значення позначено горизонтальною лінією. Електроенергію, яка знаходиться вище цієї лінії, необхідно накопичувати. При цьому ємність накопичувача становить близько 50% від добового виробництва.

Для визначення параметрів накопичувача було проаналізовано обсяги накопичування енергії. Вони складають близько 40% від добового виробництва.

Таким чином, встановлена потужність накопичувача складає:

$$EE_{LIA} = \frac{EE}{366 \cdot 24} \cdot 0,5 / (\sigma_{LIA} \cdot 100),$$

де EE_{LIA} – встановлена потужність накопичувача, МВт; EE – щорічний обсяг електроенергії від ВЕС, МВт·год; σ_{LIA} – ККД, %.

Встановлена потужність електролізера складає:

$$EE_{ALK} = EE / 366 \cdot 24 \cdot \sigma_{ALK} \cdot 100$$

де EE_{ALK} – встановлена потужність електролізера, МВт.

При цьому виробництво водню за рік складає:

$$PROD_{H_2} = EE \cdot 1000 / P_{ALK},$$

де $PROD_{H_2}$ – виробництво водню за рік, кг.

Необхідна потужність дистилятора:

$$D_D = PROD_{H_2} / 366 \cdot 24 \cdot 9$$

де D_D – виробництво дистилюваної води, кг/год.

Таким чином, капітальні витрати на установку для виробництва водню складають:

$$C_{total} = EE_{LIA} \cdot K_{LIA} \cdot 1000 + EE_{ALK} \cdot K_{ALK} \cdot 1000 + D_D \cdot K_D,$$

де C_{total} – сумарні капітальні вкладення, дол. США; K_{LIA} – капітальні вкладення для накопичувача, дол. США/кВт; K_{ALK} – капітальні вкладення для електролізера, дол. США/кВт; K_D – капітальні вкладення для дистилятора, дол. США/кг/год.

Сумарні витрати електроенергії на роботу установки:

$$EE_{total} = EE + EE_D \cdot 24 \cdot 365 / 1000,$$

де EE_{total} – сумарні витрати електроенергії, МВт·год; EE_D – витрати електроенергії, кВт·год/кг дистилюваної води.

Сумарні експлуатаційні витрати складають:

$$M_{total} = 100 \cdot (E_{LIA} \cdot K_{LIA} \cdot E_{LIA} + E_{ALK} \cdot K_{ALK} \cdot E_{ALK} + D_D \cdot K_D \cdot E_D),$$

де E_{LIA} – експлуатаційні витрати на накопичувач, % від капітальних вкладень; E_{ALK} – експлуатаційні витрати на електролізер, % від капітальних вкладень; E_D – експлуатаційні витрати на дистилятор, % від капітальних вкладень.

Середньозважена собівартість виробництва водню обчислюється наступним чином:

$$C_{H_2} = \left(\sum_{\tau=1}^N \frac{EE_{total} \cdot C_{wind} + M_{total}}{(1+r/100)^\tau} \right) \times \left(\sum_{\tau=1}^N \frac{PROD_{H_2}}{(1+r/100)^\tau} \right)^{-1},$$

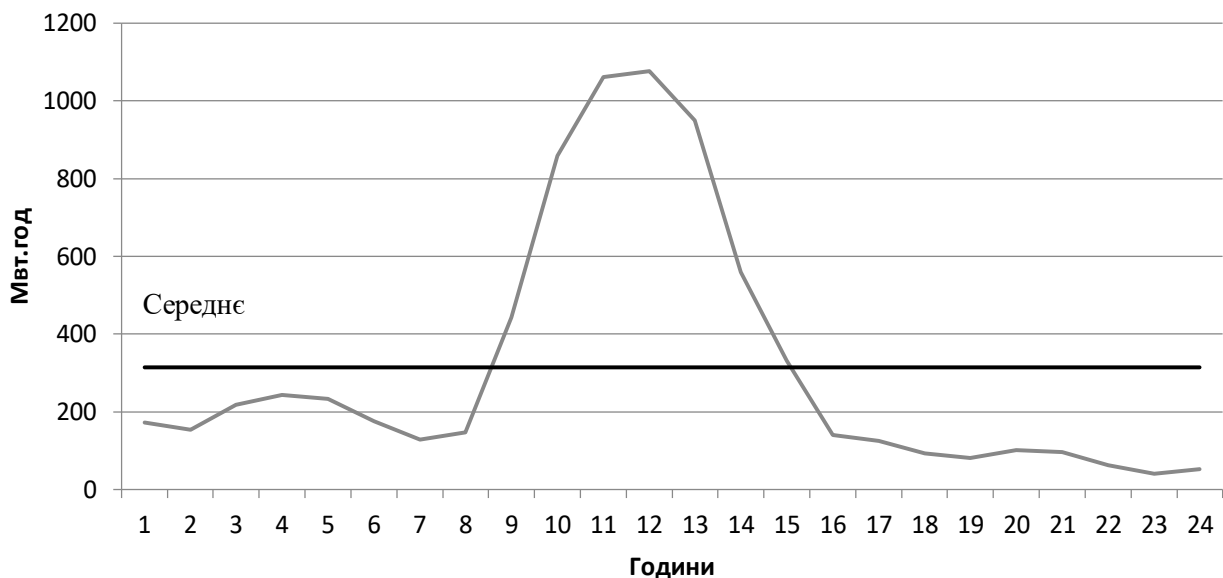


Рис. 2. Погодинний графік виробництва ВЕС 15 січня 2020 р.

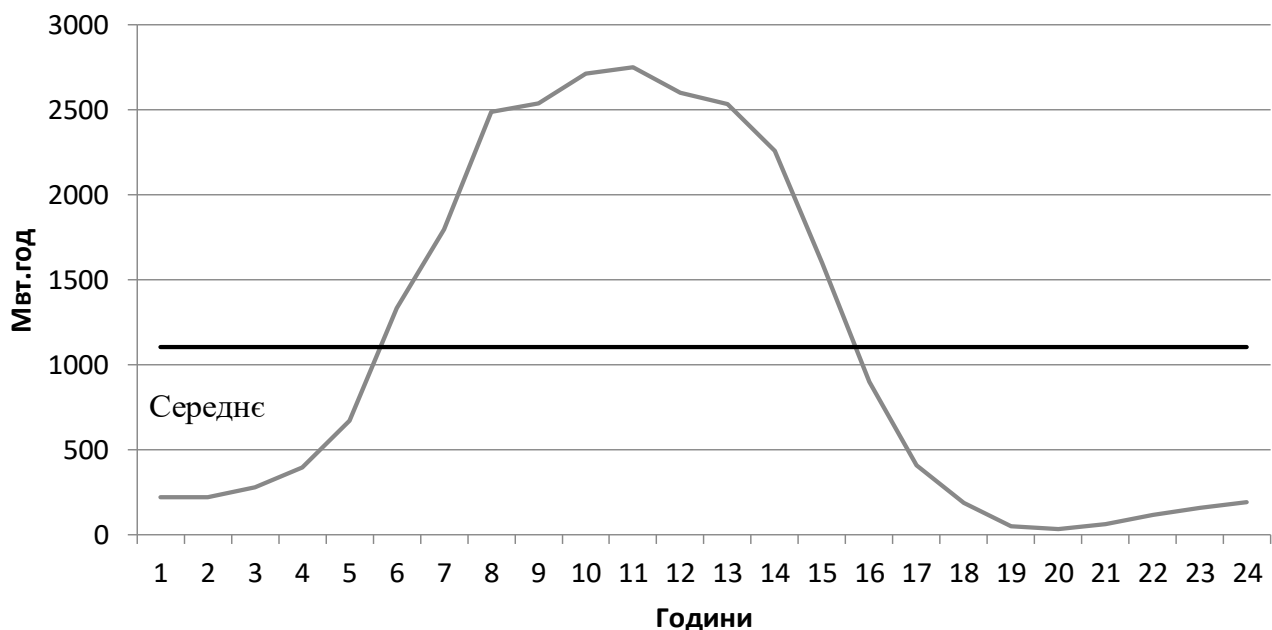


Рис. 3. Погодинний графік виробництва ВЕС 15 липня 2020 р.

де C_{H_2} – середньозважена собівартість виробництва водню, дол. США/кг; C_{wind} – середньозважена собівартість електроенергії на ВЕС, \$/ МВт·год; r – рівень дисконту, %.

Було проведено розрахунки для $r = 1\%$. Середньозважена собівартість виробництва водню склала близько 5,1 дол. США/кг водню.

Подальші дослідження будуть спрямовані на визначення середньозваженої собівартості виробництва водню з використанням традиційних джерел енергії (наприклад, АЕС). Також доцільно дослідити економічну ефективність використання водню в різних галузях.

ВИСНОВКИ

1. Для забезпечення балансової надійності режимів ОЕС України необхідно було застосувати обмеження генерації з ВДЕ. У зв'язку з цим у 2020 р. було внесено цілу низку змін до Закону України «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 №2019-VIII, які передбачають зниження ставок «зеленого» тарифу до проектів з відновлювальної енергетики. ПрАТ «НЕК «Укренерго» прогнозує обмеження виробництва електроенергії з відновлюваних джерел, на фоні зростаючої їх потужності та падаючого споживання – до 1 млрд кВт·год. Загальний

обсяг виробництва електроенергії ВДЕ у 2019 р. склав близько 4,5 млрд кВт·год.

2. Одним з найбільш ефективних шляхів використання надлишкової електроенергії є виробництво водню. Водень успішно використовують як сировину вже багато років. Загальна оціночна вартість ринку сировини водню – 115 млрд дол. США і, як очікується, вона буде тільки зростати, досягнувши до 2022 р. 155 млрд дол. США. У наші дні водень широко застосовують у різних галузях і секторах. Вартість водню, що виробляється з відновлюваної електроенергії, становить, як правило, 2,5–6,6 дол. США/кг водню.

3. Було запропоновано алгоритм розрахунку середньозваженої собівартості виробництва водню з використанням ВЕС для умов України, враховуючи визначення встановлених потужностей акумулятора, електролізера і дистильатора.

4. Відповідно до результатів розрахунків, середньозважена собівартість виробництва водню склала близько 5,1 дол. США/кг водню.

1. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII. *Відомості Верховної Ради (ВВР)*. 2017. № 27-28. С. 312.

2. Офіційний сайт Національної енергетичної компанії «Укренерго». URL: <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/dyspetcherska-informatsiya/dobovyj-grafik-vyrobnytstva-spozhyvannya-e-e/> (дата звернення: 30.06.2020).

3. Hydrogen from renewable power technology outlook for the energy transition. *IRENA*. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf (дата звернення: 09.11.2020).

4. Path to hydrogen competitiveness. A cost perspective. *IEA*. URL: <https://webstore.iea.org/download/direct/2803> (дата звернення: 08.12.2020).

5. Assessment of Hydrogen Production Costs from Electrolysis: United States and Europe. URL: https://theicct.org/sites/default/files/icct2020_assessment_of_hydrogen_production_costs_v1.pdf#page=14&zoom=100,96,148 (дата звернення: 11.01.2021).

6. Hydrogeneurope. URL: <https://hydrogeneurope.eu/about-us-2> (дата звернення: 11.01.2021).

7. Герасимов Я.И. Курс физической химии. Том II. М.: Химия, 1973. 624 с.

8. Кулик М.М., Нечаєва Т.П., Згуровець О.В. Перспективи та проблеми розвитку Об'єднаної енергосистеми України в умовах її приєднання до енергосистеми Євросоюзу і гіпертрофованого використання у її складі вітрових та сонячних електростанцій. *Проблеми загальної енергетики*. 2019. Вип. 4(59). С. 4—12. <https://doi.org/10.15407/pge2019.04.004>

9. The Future of Hydrogen. *IEA*, Japan. URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

10. Lazard's levelized cost of storage analysis. Version 6.0. *Lazard*. 2020. URL: <https://www.lazard.com/media/451418/lazards-levelized-cost-of-storage-version-60.pdf> (дата звернення: 10.02.2021).

11. Бурбан А.Ф. Мембранна дистильація в процесах водопідготовки, знесолення та очищення стічних вод. *Наукові записки НАУКМА. Том 157. Хімічні науки та технології*. С. 15—24.

Надійшла до редколегії: 18.02.2021