УДК 620. **doi: 10.20998/2313-8890.2023.09.03**

Толстов Дмитро Вадимович, аспірант, https://orcid.org/0000-0002-2042-1836, Тел: +38 (050)4 02 62 12
Інститут загальної енергетики НАН України

ПОКАЗНИКИ LCOH ЕЛЕКТРОЛІЗЕРІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ВІДОКРЕМЛЕНО ВІД ГЕНЕРАЦІЇ

Анотація. *Перспективний напрямок підвищення гнучкості енергосистеми це впровадження інноваційних технологій регулювання споживання електроенергії. Споживачі-регулятори можуть використовувати електроенергію у періоди профіциту та призупиняти споживання у періоди дефіциту. Однією з таких технологій є використання водневих електролізерів для перетворення надлишкової електроенергії у водень. Одним із ключових економічних показників водневої технології є «The Levelized Cost of Hydrogen» (LCOH). У роботі розглянуто різні варіанти використання електролізерів, серед яких: робота електролізера на електроенергії, що була згенерована з відновлювальних джерел, докупівля додаткового дешевого обсягу на ринку електричної енергії, робота електролізера з неповним навантаженням та наданням послуг енергосистемі із балансування.Досліджено вплив роботи електролізера, як споживача регулятора, на показник LCOH.*
Ключові слова: *електролізер, балансування, ГарПок, LCOH.*

Tolstov Dmytro V., Ph.D., https://orcid.org/0000-0002-2042-1836, Phone: +38 (050)4 02 62 12
Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine

LCOH INDICATORS OF ELECTROLYSER OPERATING SEPARATELY FROM GENERATION

Abstract. *A promising direction for increasing the flexibility of the energy system is the introduction of innovative technologies for regulating electricity consumption. Regulator consumers can use electricity during periods of surplus and suspend consumption during periods of shortage. One such technology is the use of hydrogen electrolyzers to convert excess electricity into hydrogen. One of the key economic indicators of hydrogen technology is "The Levelized Cost of Hydrogen" (LCOH). The paper considers various options for the use of electrolyzers, including: the operation of the electrolyzer on electricity generated from renewable sources, the purchase of additional cheap volume on the electricity market, the operation of the electrolyzer with partial load and the provision of balancing services to the power system. The influence of the operation of the electrolyzer as a consumer of the regulator on the LCOH indicator was studied.*
Keywords: *electrolyzer, balancing, GarPok, LCOH.*

Постановка проблеми. У світі спостерігається значне зростання відновлювальної енергетики. За даними Statistical Review of World Energy [1] за 2022 рік встановлена потужність об'єктів ВДЕ зросла на 15% порівняно з 2021 роком. За даними Інформаційно-аналітичного випуску НТСЕУ про стан ПЕК України [2], сукупна встановлена потужність об'єктів відновлюваної

енергетики в Україні станом на кінець 2021 року досягла 8451 МВт. На кінець 2021 року загальна потужність ВЕС становила 1529 МВт, промислових СЕС – 6365,3 МВт, що складає 11,3% від встановленої потужності ОЕС України. При цьому АЕС за 2021 рік згенерували 54% загального обсягу виробництва електроенергії[3]. Переважання атомних електростанцій негативно впливає на гнучкість системи, адже вони працюють в базовому режимі з постійною потужністю та не можуть реагувати на добові коливання попиту, оскільки часті зміни навантаження небажані для безпечної експлуатації реакторів.

Потреба в балансуванні зросла з розвитком електростанцій на ВДЕ. Сонячна та вітрова генерація не лише не реагують на коливання попиту, але й потребують додаткового балансування: вони мало прогнозовані, адже залежать від погодних умов. Для балансування використовуються вугільні ТЕС, що відображено на мал.1 [4,5].

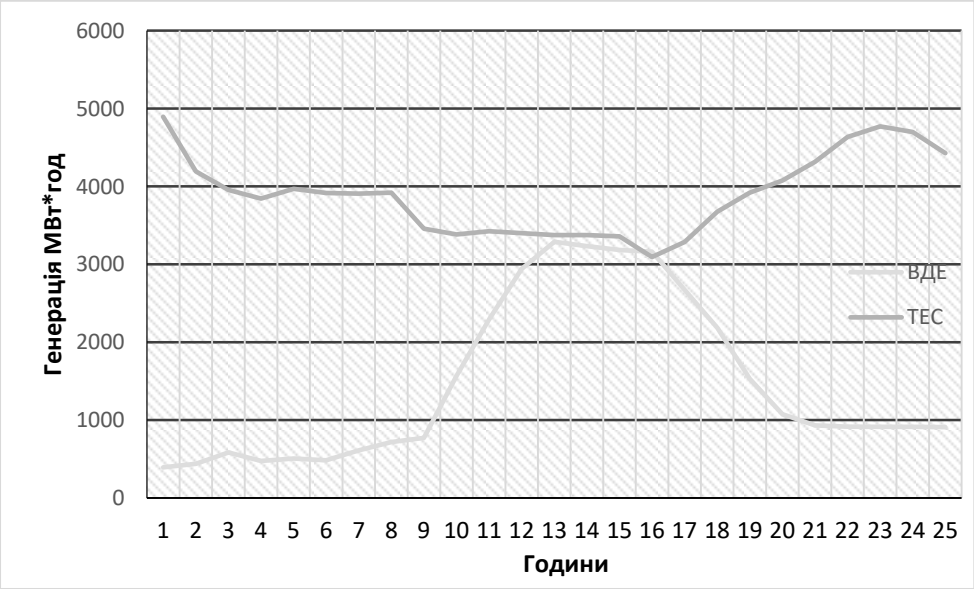

Рис. 1 - Співставлення генерації ВДЕ та ТЕС на прикладі 14.04.20

Згідно «Національного плану скорочення викидів від великих спалювальних установок» [6] плануються суттєві трансформації паливно-

енергетичного комплексу країни з переходом від атомно-вугільної парадигми до впровадження інноваційної атомно – відновлювальної енергетики з оглядом на подальший сталий розвиток України в умовах її міжнародних екологічних зобов'язань, зокрема заміна вуглецевої генерації піковими високоманевровими електростанціями, електроакумуляторами, збільшення обсягу генерації ВДЕ та будівництво електролізних установок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У дослідженні [7] було розглянуто можливість використання теплових насосів як засобу для збалансування енергосистеми. Проведено порівняльний аналіз техніко-економічних характеристик цих споживачів і гідроакумулюючих електростанцій (ГАЕС). За результатами проведеного аналізу визначено, що використання споживачів-регуляторів є економічно доцільним для балансування енергосистеми, ніж використання ГАЕС.

Vogt та ін. [8] оцінюють роботу малих систем відновлюваної енергії на основі фактичних метеоданих та попиту на електроенергію у Швейцарії. Аналіз показує, що водень є ідеальним вибором для довгострокового зберігання великих обсягів енергії, тоді як акумулятори найбільш підходять для короткострокового зберігання.

Oloyede [9] зібрав фактичні дані про обсяг споживання електроенергії від операторів мережі на північному сході та південному заході Сполучених Штатів, визначив щоденний, щотижневий та сезонний попит. Крім того, у [9] представлено результати розроблення аналітичних та числових моделей виробництва електроенергії з різних джерел, поєднаних із системами зберігання.

Reus та ін. [10] пропонують модель ланцюжка поставок електролізного водню з сезонним зберіганням водню, яка може зв'язати коливання виробництва відновлюваної енергії через надлишкову електроенергію і попит на заправні станції.

Буратинський І. М. [11] розробив модель, яка використовується для збереження надлишкової електричної енергії фотоелектричних модулів, що виникає в період пікової інтенсивності сонячного випромінювання за умови зниження попиту на електричну енергію в енергосистемі, з її перенесенням у час вечірнього піку електричного навантаження та згладжування коливань потужності СЕС, що виникають за умови добової зміни інтенсивності сонячного випромінювання.

Лещенко І.Ч. [12] проведена оцінка роботи електролізера типу РЕМ в умовах України, розглянуто декілька варіантів серед яких купівля нічної електроенергії у атомної генерації. Дослідження показало, що шляхом вибору варіанту організації електропостачання для електролізера можна підвищити його коефіцієнт використання встановленої потужності та, відповідно, знизити середньозважену собівартість виробництва водню.

Колектив авторів на чолі з Arash E. Samani [13] провів оцінку надання електролізером типу РЕМ різних типів допоміжних послуг енергосистемі Бельгії під час закачування водню у газопровід,що допомагає системі регулювати частоту та денні коливання споживання.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

З одного боку, методи зберігання енергії, споживачі-регулятори, які розглядаються авторами, в основному вирішують проблеми короткострокового характеру, такі як регулювання піків впродовж доби, регулювання частоти (батареї), але таким чином важко подолати сезонні флуктуації виробництва електроенергії та максимізувати використання відновлювальної енергії. З іншого боку, із зростанням потужності встановленого обсягу відновлювальної енергії нерівновага між споживанням та виробництвом відновлювальної енергії стає все більш актуальною. Рис. 2 показує місячну криву щорічного споживання електроенергії та виробництва електроенергії СЕС в енергосистемі України за 2021 рік.

Зазначені на рисунку дані показують, що пік споживання електроенергії припадає на зимовий період, у той час як пік виробництва ВДЕ спостерігається влітку. Для переносу піку генерації до піку споживання, плавних щомісячних і навіть сезонних коливань балансу електроенергії, потрібні довгострокові технології зберігання енергії. Ці технології також повинні забезпечити великий обсяг переносу електричної енергії між сезонами. Сезонне зберігання водню може забезпечити довгостроковий та великомасштабний перенос енергії і надає нові ідеї для вирішення проблем енергетики.

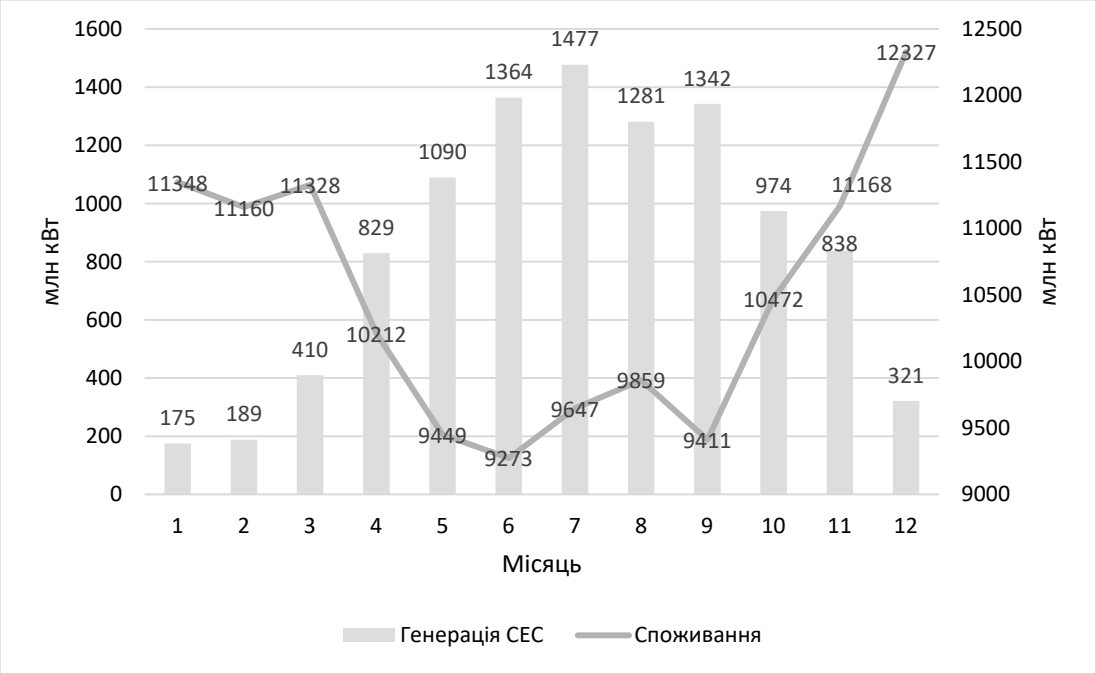

Рис. 2 - Графіки споживання та ВДЕ генерації [14,15]

Загалом, дослідження електролізерів, що проводяться в Україні, сфокусовані на визначенні економічних показників електролізерів як складової комплексу ВДЕ генерація – електролізер або електролізер, що споживає електричну енергію із мережі у періоди низької генерації ВДЕ.

Проблемі використання електролізерів як комбінації споживачів – регуляторів та джерела для системи накопичення енергії в Україні приділяється мало уваги. В даній статті буде зроблена спроба розкрити

питання використовування електролізера як незалежного споживача – учасника ринку електричної енергії та економічної доцільності такого режиму роботи у порівнянні із іншими варіантами.

Мета статті. Метою статті є оцінка впливу на LCOH різних режимів роботи електролізера.

Виклад основного матеріалу. На сьогодні існує три основні технології виробництва водню: лужний електроліз води; електроліз за допомогою протоно - обмінної мембрани, та електроліз з аніонно-обмінною мембраною.

Лужний електроліз води (ЛЕВ) є найбільш вивченою та комерційно доступною технологією з 1902 року [16]. Електролізер складається з двох електродів - аноду та катоду. Електроди знаходяться в рідинному лужному рідинному електроліті, який створюється за допомогою гідроксид калію (KOH) або гідроксид натрію (NaOH). Анод та катод розділяється за допомогою пористої діафрагми, яка пропускає носій заряду - іони гідроксиду. Ефективність та продуктивність електролізера залежать від геометрії, матеріалів електродів, діафрагми [17]. У типовій лужній технології діафрагма може значно зменшити перемішування газів, одначе вона не може його повністю усунути. Перемішування газів відбувається, коли вироблений водень з катодної половині проникає в анодну половину, або вироблений кисень з анодної проникає в катодну.

Електролізери з протонообмінною мембраною. Назва технології PEM є абревіатурою, яка означає «Протонообмінна мембрана (ПОМ)» - Proton Exchange Membrane. Унікальність технології PEM полягає в тому, що в усій системі присутня лише вода, і роль електроліту виконує тверда полімерна мембрана PEM. Система постачає підготовлену воду до області анода стеку PEM. Далі на поверхні каталізатора відбувається розщеплення води на протони і кисень (газ). Протони, завдяки властивостям мембрани, проходять через мембрану до області катода, де зустрічаються з електронами і утворюють водень. Завдяки властивостям мембрани, система працює при

великій різниці тиску між областями катода і анода, так що водень утворюється під тиском 30 бар, в той час як кисень знаходиться в області анода під тиском 1,5 бар. Потік води виводить із стеку утворений кисень і тепло в результаті процесу електролізу. На сьогодні доступні агрегати потужністю кілька мегават [18].

Електроліз з аніонно-обмінною мембраною (АОМ) - це нова технологія, яка використовує переваги електролізу з мембраною протонного обміну (РЕМ), але працює в лужних умовах. Через лужне середовище, для АОМ не потрібні дорогоцінні матеріали, такі як іридій або платина. Конструкція АОМ-електролізера подібна до РЕМ: мембрана розташована між двома електродами. Мембрана дозволяє транспортування (ОН-) та одночасно відокремлює газові продукти (водень та кисень) [19]. Так як це нова технологія, то інформації по економічним та динамічним характеристикам такого устаткування мало.Задля оцінки можливості використовувати електролізери для регулювання енергосистеми необхідно розглянути їх динамічні характеристики та показники ефективності що наведені у Таблиці 1.

Таблиця 1.

Порівняльні характеристики електролізерів [20,21,22]

Показник	Одиниця виміру	IRENA		OIES		Goldmansach	
		Лужний	ПОМ	Лужний	ПОМ	Лужний	ПОМ
Ефективність	кВт/кг Н2	51	58	50–78	50-83	48-64	43-60
Діапазон навантажень	% від Nном	15–100	0-160	15(40)–100	5-120	10-110	20-160
Пуск з холодного стану	хв	10	5	30	15	10	5
Швидкодія	вверх/вниз, %/сек	0,2–20	100	-	-	-	-
Життя стеку	тис. год	80	40	60-100	50-90	60-90	30-80

У 2019 році Arash E. Samani з групою авторів у журналі «IET Renewable Power Generation» було зроблено публікацію «Grid balancing with a large-scale electrolyser providing primary reserve» [14].

У цій роботі проведено техніко-економічний аналіз 25 МВт ПОМ електролізера у Бельгії. Проаналізовано можливість надавання балансуючих послуг під час закачування водню в газопровід. Досліджуються різні стратегії роботи електролізера, щоб знайти оптимальний спосіб роботи електролізера для максимізації економічної віддачі. Чисельна модель розроблена в Matlab для оцінки економічної переваги використання великомасштабного електролізера за двома різними стратегіями. В результаті аналізу було виявлено, що найбільше економічно ефективною стратегією є надання послуги із балансування – симетричний резерв підтримки частоти 0,1 Гц, при навантаженні електролізера у 55% від номінального.

Національна лабораторія з вивчення відновлюваної енергії (США) та Національна лабораторія Айдахо (США) у 2017 р. опублікували звіт «Dynamic Modeling and Validation of Electrolyzers in Real Time Grid Simulation» [23],у якому описана імітаційна модель по використанню електролізера як споживача-регулятора, та результати досліджень, зокрема що реакція електролізерів типу PEM на відхилення частоти енергосистеми (ЕС) вкладається у 30 секундний інтервал. Це дозволяє використовувати таку систему споживачів – регуляторів з електролізером в якості первинного регулятора частоти в ЕС. Адже ключовими критеріями для такого регулятора є: - час для початку дії первинного регулювання частоти становить до однієї секунди після збурення, ПОМ електролізери є більш привабливіші для регулювання енергосистеми, оскільки має більшу швидкість навантаження 100%/сек проти 20%/сек у лужного, може працювати у всьому діапазоні потужностей, та допускає короткочасну роботу при перенавантажені.

Лужний електролізер має перевагу у порівняні із ПОМ електролізером у меншій витраті електроенергії, та у менших капітальних затратах, що дає

можливість йому працювати як споживачу-регулятору на балансуючому ринку (БР), подаючи заявки на заплановану активацію, тому що час виконання такої команди складає 15 хвилин, так як для такого споживача швидкість зміни навантаження задовільна. Таким чином навантаження лужного електролізеру можна подати на балансуючий ринку як обсяг електроенергії для балансування. При дефіциті електроенергії в системі він буде розвантажений по команді диспетчера енергосистеми, за що власник отримає кошти від ОСП. При профіциті електроенергії він буде навантажений по команді оператора енергосистеми, при цьому власнику необхідно буде заплатити кошти за спожиту електроенергію ОСП.

Споживач - регулятор як учасник ринку електричної енергії

На роздрібному ринку електричної енергії споживання та використання електричної енергії для потреб електроустановки споживача здійснюється за умови забезпечення розподілу/передачі та продажу (постачання) електричної енергії на підставі договорів про розподіл/передачу, постачання електричної енергії, надання послуг комерційного обліку, які укладаються відповідно до цих Правил, Кодексу системи передачі, Кодексу систем розподілу та Кодексу комерційного обліку [24].

Відповідно до договорів про надання послуг з розподілу (передачі) електричної енергії, що укладаються зі споживачем та електропостачальником, оператор системи передачі згідно з Кодексом системи передачі та оператори систем розподілу згідно з Кодексом систем розподілу здійснюють, відповідно, передачу та розподіл електричної енергії на роздрібному ринку в точку розподілу до електроустановки споживача на території діяльності відповідного оператора системи.

Постачання електричної енергії здійснюється електропостачальником на підставі договору про постачання електричної енергії споживачу, який розробляється електропостачальником на основі Примірного договору про постачання електричної енергії споживачу.

В дослідженні розглянуті пропозиції компаній постачальників електричної енергії- «Прикарпаттяенерготрейд», «Київська обласна енергопостачальна компанія», «Київські енергетичні послуги», «Запоріжжяелектропостачання» [25-27].Загалом, для споживачів із погодинним зчитуванням даних з лічильників (група А), через велику волатильність цін на електричну енергію використовується формула із прив'язкою до ринку на добу наперед (РДН). Формула має вигляд:

$$B = Ц_{зак} + T_{пост} + T_{перед} + T_{роз}$$

де $T_{перед}$ – тариф на послугу з передачі електричної енергії оператора системи передачі (ПРАТ «НЕК «УКРЕНЕРГО») згідно чинного законодавства України, грн/кВт; $T_{пост}$ - тариф постачальника, грн/кВт; $T_{роз}$ - тариф на послугу з розподілу електричної енергії оператора системи розподілу згідно чинного законодавства України, грн/кВт; $Ц_{зак}$ - фактична закупівельна ціна електричної енергії для Споживача у відповідному розрахунковому періоді на ринках електричної енергії.

Приклади $T_{пост}$ наведені у Таблиці 2.

Таблиця 2.

Приклад тарифів електропостачальників та умов оплати

Компанія	«ПЕТ»	«КОЕК»	«КЕП»	«ЗЕП»
$T_{пост}$	0,3 грн/кВт*год	0,158 грн/кВт*год	0,1	1% від Цзак
Оплата	післяплата	післяплата	100% передоплата	100% передоплата

Примітка. Для «ЗЕП» це споживач з обсягом споживання 500 МВт/місяць. Для 100МВт/місяць -1,8%.

Тарифи $T_{роз}$ та $T_{перед}$ регулюються НКРЕП окремими постановами, а $Ц_{зак}$ залежить від ціни на спотовому ринку електричної енергії.

Споживачі, які отримують електричну енергію від оператора системи розподілу на межі балансової належності номінальною напругою 27,5 кВ та

вище, а також споживачі, приєднані до шин електростанцій (за винятком суб'єктів господарювання, що виробляють електричну енергію з альтернативних джерел, а саме з енергії сонячного випромінювання, біогазу, біомаси, енергії вітру та мікро-, міні- та малими гідроелектростанціями), відносяться до 1 класу напруги.

Споживачі, які отримують електричну енергію від оператора системи розподілу на межі балансової належності номінальною напругою нижче 27,5 кВ, відносяться до 2 класу напруги.

Згідно водневої стратегій ЄС[28] – основне джерело електроенергії для електролізерів це енергія вироблена з ВДЕ. Ціна на водень, вироблений шляхом електролізу, вище ніж ціна водню, виробленого традиційним шляхом. Тому стратегія передбачає підтримку виробників зеленого водню.

В Україні основним продавцем електроенергії виробленої з ВДЕ є ДП «Гарантований покупець» (ГарПок) [29]. Тому, коли електролізер буде споживати електричну енергію із мережі, то її треба буде купляти у ГарПока.

Середньозважена вартість виробництва водню

Для оцінки економічної ефективності різних варіантів виробництва водню використовується LCOH [30]

$$LCOH = \frac{C^{к} + \sum_{n=1}^{N} \frac{O_n}{(1+r)^{n-1}}}{\sum_{n=1}^{N} \frac{H_n}{(1+r)^{n-1}}}$$

де $LCOH$ – середньозважена собівартість виробництва водню \$/кг H_2; $C^{к}$ – капітальні інвестиційні витрати, дол. США; r – ставка дисконтування, частка; N – термін комерційної експлуатації, років; H_n – сумарний обсяг виробленого водню в році n, кг H_2; O_n – операційні витрати при експлуатації електролізерів у році n, \$.

Капітальні інвестиції для електролізера включають: трансформатори, ректифікатори, водоочисне устаткування, стеки електролізера; газові

аналізатори, систему очищення газу, насос для циркуляції; компресор та систему зберігання, транспортування луги (для лужних електролізерів).[31]

Дані по капітальним інвестиціям наведені у Таблиці 3.

Таблиця 3.

Капітальні інвестиції згідно джерел.

Джерело	Одиниця виміру	АЛК	ПОМ	Встановлена потужність,МВт	Рік даних
IRENA	дол. США /кВт	500-1000	700-1400	>10	2020
OIES	дол. США /кВт	540-900	667-1450	1	2021
Fraunhofer	євро /кВт	663- 949	720-980	5-100	2020
IEA	дол. США /кВт	500-1400	1100-1800	-	2018
Goldman Sachs	дол. США /кВт	600-1100	800-1250	-	2021

Операційні витрати визначаються як:

$$O_n = O_n^g + O_n^e + O_n^{eks} + O_n^v + O_n^r$$

де O_n^g – витрати за частку запозичених коштів в році n, дол. США; O_n^e – витрати на закупівлю електричної енергії в році n, дол. США; O_n^{eks} – витрати на експлуатацію та технічне обслуговування в році n, дол. США; O_n^v – витрати, що враховують підготовку води та її ціну в році n, дол. США; O_n^r– витрати на виплату заробітної плати працівникам в році n, дол. США.

Вартість тарифу на передачу, розподіл, ціна водних ресурсів регулюються постановами НКРЕКП, вартість 1 МВт електроенергії на РДН та при покупці обсягів у ГарПока наведена у Таблиці 4. Витрати за частку запозичених коштів визначають ануїтетним методом виплат на основі незмінності суми періодичних платежів та відсоткової ставки [32,33].

$$O_n^g = \frac{r \cdot (1+r)^N}{(1+r)^N - 1} D$$

де D – сума запозичених коштів, дол. США.

Як зазначає О. С. Ралко [34], враховуючи розвиток фондового ринку в Україні, найбільш доцільно ставку дисконтування (r) визначати через середньозважену вартість капіталу (Weighted Average Cost of Capital, WACC).

$$r = WACC = \frac{D}{D+E} d(1-F) + \frac{E}{D+E} e$$

де E – частка власних коштів, %;d – вартість кредитних коштів%;F – ставка податку на прибуток, %;e – вартість власного капіталу, %.

Таблиця 4.

Закупівельна ціна для різних варіантів.

Місяць	Години ГарПока	Ціна сценарій 1	Ціна сценарій 2	Ціна сценарій 3*	Ціна сценарій 4 АОМ*	Ціна сценарій 4 ПОМ*
Одиниця виміру	Години	дол/МВт* год	дол/МВт* год	дол/МВт* год	дол/МВт* год	дол/МВт* год
Жовтень	8-17	104,33	88,49	95,88	95,88	95,88
Листопад	8-17	107,79	90,11	99,17	99,17	99,17
Грудень	8-17	108,20	90,10	85,86	85,86	85,86
Січень	8-17	108,02	90,06	85,48	85,48	85,48
Лютий	8-19	108,08	85,95	85,39	85,39	85,39
Березень	8-20	99,81	84,19	82,54	76,66	74,08
Квітень	8-20	82,62	84,19	69,59	64,80	61,70
Травень	8-20	80,18	74,95	70,91	66,01	62,97
Червень	8-20	79,56	74,78	70,68	65,81	62,75
Липень	8-20	79,11	88,75	74,86	69,63	66,74
Серпень	8-20	97,38	103,89	91,05	84,46	82,22
Вересень	8-19	87,32	96,61	78,74	72,87	69,97

**Розраховано автором*

Автором було розглянуто декілька сценаріїв роботи електролізерів.

Сценарій 1. Проведено аналіз торгів «ГарПоку» на ринку двосторонніх договорів з жовтня 2022 по вересень 2023 року. Визначено ціну 1 МВт, та години за якими продає «ГарПок». Для оцінки впливу тарифу ОСР на LCOH вибрано ОСР із максимальним та мінімальним тарифом на розподіл для 2 та 1 класу. Термін будівництва – 1 рік, термін експлуатації залежить від тривалості життя стеку та коефіцієнта використання встановленої потужності (КВВП). Для лужного електролізера прийнято 60000 годин, для ПОМ – 40000. Вартість очищення води має незначний вплив на кінцевий LCOH [12], тому витрати за воду будуть складатись тільки з вартості води в області діяльності ОСР згідно даних НКРЕКП [35]. Витрата води для лужного електролізера прийнята 9л/кг H_2, для ПОМ -10л/кг H_2 [36]. Період робочих годин у добу та закупівельна ціна – з торгів «ГарПоку».

Варіант 1. Електролізери ПОМ та АОМ підключені по мережі ОСР. Потужність електролізерів 3 МВт, будуть сплачуватись послуги з розподілу за 1 класом та передачі.

Варіант 2. Електролізери ПОМ та ALK підключені по мережі ОСР. Потужність електролізерів 30 МВт, будуть сплачуватись послуги з розподілу 1 класу та передачі.

Варіант 3. Електролізери ПОМ та ALK підключені по мережі ОСР. Потужність електролізерів 90 МВт, будуть сплачуватись послуги з передачі, послуги з розподілу відсутні бо підключення напряму до мереж ОСП.

Сценарій2. Для того щоб збільшити КВВП електролізера, розглянуто можливість докупки обсягів електричної енергії на ринку на добу наперед. Електролізери працюють цілодобово. У місяць із максимальною вартістю електричної енергії є 25 денний перерив для ремонтних робіт. Вартість електричної енергії - це мікс цін «ГарПоку» та РДН. Варіанти 1, 2, 3 лишаються без змін.

Сценарій 3. Для зменшення вартості електричної енергії розглянуто можливість докупки обсягів електричної енергії на РДН у нічні години.

Графік роботи електролізерів ніч + години «ГарПоку». Вартість електричної енергії - це мікс цін «ГарПоку» та нічних цін з РДН. Варіанти 1, 2, 3 лишаються без змін.

Сценарій 4. Оцінка ефективності роботи електролізерів на БР та ринку ДП.

Години роботи електролізерів співпадають з сценарієм 3.

Електролізер типу ALK працює на БР. Години, у які він надає послуги з балансування це – 11-18 година, місяці – з березня по вересень. У цей період 60% часу енергосистема знаходилась у профіциті, і середня ціна БР склалась на рівні 12,97702 дол.США/кг H_2. Це закупівельна ціна. [37]

Електролізер типу ПОМ працює на ринку ДП та надає послугу РПЧ за ціною 1339,82 грн/МВт*год. На надання послуги з РПЧ подається 30% від встановленої потужності. Прийнято, що за період надання послуги буде спожито 60 % від обсягу, що подіється на РПЧ за ціною БР. Години, у які електролізер надає послуги з РПЧ, це – 11-18 година, місяці – з березня по вересень. Вхідні параметри показані у таблицях 5 та 6, а результати розрахунку наведені у таблицях 7 та 8.

Висновки. Через більшу вартість капітальних затрат електролізер типу ПОМ має вище значення LCOH у порівнянні із лужним електролізером. Загалом надання послуг на БР та ринку ДП зменшує LCOH на 1,15% для лужного електролізеру при встановленій потужності у 3 МВт, та на 1,77% для потужності 90 МВт. Різниця пов’язана із відсутністю в ціні електроенергії тарифу на розподіл, що робить ефект від участі у балансуванні більш вагомим. Порівняння проводиться для сценарію докупки обсягів електричної енергії на РДН у нічні години та оцінки ефективності роботи електролізерів на БР та ринку ДП, у яких умови по годинам споживання однакові. Вплив вартості водних ресурсів на кінцевий LCOH незначний та становить 0,0539% для 4 сценарію, 0,0439% для 1 сценарію від загального значення LCOH.

Для електролізеру типу ПОМ надання послуг на БР та ринку ДП зменшує LCOH на 1,69% при встановленій потужності у 3 МВт, та на 2,81% для потужності 90 МВт. Електролізер цього типу споживає більше електроенергії на одиницю водню, тому для нього робота в режимі споживача-регулятора має більший вплив на LCOH.

Таблиця 5.

Вхідні параметри лужного електролізеру

Параметр		Одиниця виміру	Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3	Сценарій 4
Параметри лужного електролізеру	Загальна потужність	МВт	3/30/90	3/30/90	3/30/90	3/30/90
	Питомі капіталовкладення у встановлену потужність	дол. США /кВт	880/780/680			
	Термін експлуатації блоку	років	13,9	7,4	8,7	8,7
	Термін будівництва	років	1	1	1	1
	Коефіцієнт використання встановленої потужності	%	49,3	93,2	78,5	75,9
	Споживання електроенергії	кВт год/кг H_2	52	52	52	52
	Споживання води	л/кг Н2	9	9	9	9
	Витрати на експлуатацію та технічне обслуговування	% питомих капіталовкладень	1,5	1,5	1,5	1,5
	Зростання витрат на електроенергію, воду, обслуговування	%	5	5	5	5
	Витрати на оплату праці	% питомих капіталовкладень	2	2	2	2
	Зростання витрат на оплату праці	%	3,5	3,5	3,5	3,5
Фінансові параметри	Частка кредитних/ власних коштів	%	40/60	40/60	40/60	40/60
	Термін надання кредиту	років	14	7	9	9
	Процентна ставка за кредитом	%	12	12	12	12
	Вартість власного капіталу	%	17	17	17	17
	Податок на прибуток підприємств	%	18	18	18	18
	WACC	%	14,36	14,36	14,36	14,36

Таблиця 6.

Вхідні параметри ПОМ електролізеру.

Параметр		Одиниця виміру	Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3	Сценарій 4
Параметри ПОМ електролізеру	Загальна потужність	МВт	3/30/90	3/30/90	3/30/90	3/30/90
	Питомі капіталовкладення у встановлену потужність	дол. США /кВт	1400/1200/1000			
	Термін експлуатації блоку	років	9,3	4,9	5,8	5,8
	Термін будівництва	років	1	1	1	1
	Коефіцієнт використання встановленої потужності	%	49,3	93,2	78,5	73,9
	Споживання електроенергії	кВт год/кг H_2	55	55	55	55
	Споживання води	л/кг Н2	10	10	10	10
	Витрати на експлуатацію та технічне обслуговування	% питомих капіталовкладень	1,5	1,5	1,5	1,5
	Зростання витрат на електроенергію, воду, обслуговування	%	5	5	5	5
	Витрати на оплату праці	% питомих капіталовкладень	2	2	2	2
	Зростання витрат на оплату праці	%	3,5	3,5	3,5	3,5
	Зростання витрат на електроенергію, воду, обслуговування	%	5	5	5	5
Фінансові параметри	Частка кредитних/власних коштів	%	40/60	40/60	40/60	40/60
	Термін надання кредиту	років	9	5	6	6
	Процентна ставка за кредитом	%	12	12	12	12
	Вартість властного капіталу	%	17	17	17	17
	Податок на прибуток підприємств	%	18	18	18	18
	WACC	%	14,36	14,36	14,36	14,36

Таблиця 7.

Результат розрахунку лужного електролізеру.

Сце-нарій	ОСР	Клас напру-ги	Встанов-лена потужність, МВт	Термін експлуатації, роки	Кількість водню у рік, кг	LCOH
1	ПРАТ «ДТЕК КЕМ»	2	3	14	249115	11,880
1	ТОВ «ЛЕО»	2	3	14	249115	14,416
1	АТ «ЧЕРНІВЦІОБЛЕНЕРГО»	1	30	14	2491154	10,543
1	ТОВ «ЛЕО»	1	30	14	2491154	11,333
1	НЕК "Укренерго"	-	90	14	7473462	9,109
1	НЕК "Укренерго"*	-	90	14	7473462	9,113
2	ПРАТ «ДТЕК КЕМ»	2	3	7	470769	10,065
2	ТОВ «ЛЕО»	2	3	7	470769	12,440
2	АТ «ЧЕРНІВЦІОБЛЕНЕРГО»	1	30	7	4707692	8,883
2	ТОВ «ЛЕО»	1	30	7	4707692	9,622
2	НЕК "Укренерго"	-	90	7	14123077	7,609
2	НЕК "Укренерго"*	-	90	7	14123077	7,612
3	ПРАТ «ДТЕК КЕМ»	2	3	9	396519	10,089
3	ТОВ «ЛЕО»	2	3	9	396519	12,519
3	АТ «ЧЕРНІВЦІОБЛЕНЕРГО»	1	30	9	3965192	8,868
3	ТОВ «ЛЕО»	1	30	9	3965192	9,624
3	НЕК "Укренерго"	-	90	9	11895577	7,553
3	НЕК "Укренерго"*	-	90	9	11895577	7,556
4	ПРАТ «ДТЕК КЕМ»	2	3	9	383350	9,973
4	ТОВ «ЛЕО»	2	3	9	383350	12,402
4	АТ «ЧЕРНІВЦІОБЛЕНЕРГО»	1	30	9	3833500	8,743
4	ТОВ «ЛЕО»	1	30	9	3833500	9,499
4	НЕК "Укренерго"	-	90	9	11500500	7,419
4	НЕК "Укренерго"*	-	90	9	11500500	7,422

НЕК "Укренерго" - встановлено на території України, з найбільшим тарифом на централізоване водопостачання*

Таблиця 8.

Результат розрахунку протонобмінного електролізеру.

Сцен-арій	ОСР	Клас напру-ги	Встановле-на потужність, МВт	Термін експлуа-тації, роки	Кількість водню у рік, кг	LCOH
1	ПРАТ «ДТЕК КЕМ»	2	3	9	235527	15,080
1	ТОВ «ЛЕО»	2	3	9	235527	17,676
1	АТ «ЧЕРНІВЦІОБЛЕНЕРГО»	1	30	9	2355273	13,208
1	ТОВ «ЛЕО»	1	30	9	2355273	14,016
1	НЕК "Укренерго"	-	90	9	7065818	11,237
1	НЕК "Укренерго"*	-	90	9	7065818	11,241
2	ПРАТ «ДТЕК КЕМ»	2	3	5	445091	12,533
2	ТОВ «ЛЕО»	2	3	5	445091	14,928
2	АТ «ЧЕРНІВЦІОБЛЕНЕРГО»	1	30	5	4450909	10,939
2	ТОВ «ЛЕО»	1	30	5	4450909	11,684
2	НЕК "Укренерго"	-	90	5	13352727	9,253
2	НЕК "Укренерго"*	-	90	5	13352727	9,256
3	ПРАТ «ДТЕК КЕМ»	2	3	6	374891	12,685
3	ТОВ «ЛЕО»	2	3	6	374891	15,123
3	АТ «ЧЕРНІВЦІОБЛЕНЕРГО»	1	30	6	3748909	11,028
3	ТОВ «ЛЕО»	1	30	6	3748909	11,787
3	НЕК "Укренерго"	-	90	6	11246727	9,277
3	НЕК "Укренерго"*	-	90	6	11246727	9,28
4	ПРАТ «ДТЕК КЕМ»	2	3	6	362440	12,471
4	ТОВ «ЛЕО»	2	3	6	362440	14,910
4	АТ «ЧЕРНІВЦІОБЛЕНЕРГО»	1	30	6	3624400	10,791
4	ТОВ «ЛЕО»	1	30	6	3624400	11,549
4	НЕК "Укренерго"	-	90	6	10873200	9,016
4	НЕК "Укренерго"*	-	90	6	10873200	9,020

Для більш точних результатів розрахунку впливу роботи електролізерів на балансуючому ринку та ринку допоміжних послуг на LCOH необхідно знати щохвилинне значення частоти мережі України, та провести моделювання реакції електролізера на зміну частоти в мережі.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Statistical Review of World Energy – 71st edition. British Petroleum, 2022. URL: https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf (дата звернення: 17.08.2023).

2. Інформаційно-аналітичний випуск НТСЕУ про стан ПЕК України. Науково-технічна спілка енергетиків та електротехніків України. Січень 2022. URL: https://www.ntseu.net.ua/docs/review605-202201.pdf (дата звернення 16.08.2023).

3. Інформаційно-аналітичний випуск НТСЕУ про стан ПЕК України. Науково-технічна спілка енергетиків та електротехніків України. Липень 2021. URL: https://www.ntseu.net.ua/docs/review598-202107.pdf (дата звернення 16.08.2023).

4. Робота ринку електроенергії за квітень 2020 року. Офіційний сайт НЕК «Укренерго». URL: https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya /dyspetcherska-informatsiya (дата звернення 16.08.2023).

5. Толстов Д. В. Розробка ефективної стратегії розвитку підприємства в умовах економічної кризи. Квал. роб. Магістра, КПУ. Запоріжжя. 2021.

6. Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок. Розпорядження КМУ від 8 листопада 2017 р. № 796-р. та План відновлення України (проєкт). Національна програма «Енергетична незалежність та Зелений Курс». URL: https://recovery.gov.ua/project /program/energy-independence-and-green-deal (дата звернення: 10.08.2023).

7. Kulyk M. M. Spivstavnyi analiz tekhniko-ekonomichnykh kharakterystyk Kanivskoi HAES ta kompleksu spozhyvachiv-rehuliatoriv dlia pokryttia hrafikiv elektrychnykh navantazhen [Comparative analysis of the technical and economic characteristics of Kanivska HPP and the complex of consumers-regulators to cover electric load schedules]. *Problems of general energy*. 2012. vol. 4(39). pp. 5–10.

8. Bielmann M., Vogt U. F., Zimmermann, M., Zuttel, A. A seasonal energy storage system based on hydrogen for self sufficient living. *Journal of Power Sources*. 2011. 196. P. 4054–4060. doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.11.096.

9. Oloyede I. O. Design and evaluation of seasonal storage hydrogen peak electricity supply system : thesis. 2011. 325 p. URL: http://hdl.handle.net/1721.1/76947 (дата звернення: 17.08.2023).

10. Reus M., Grube T., Robinius M., Preuster P., Wasserscheid P. et al. Seasonal storage and alternativecarriers: A flexible hydrogen supply chain model. *Applied Energy*. 2017. 290–302. doi:10.1016/j.apenergy.2017.05. 050

11. Буратинський І. М. Моделювання спільної роботи сонячної електростанції та акумуляційної системи зберігання енергії в умовах підвищення стабільності та економічної ефективності їх функціонування в енергосистемі: дис. канд. Техн. наук,: 04.00.17. Київ, 2023. 171 с.

12. Лещенко І. Ч. Оцінка середньозваженої собівартості виробництва водню в Україні. Проблеми загальної енергетики. 2021, № 2(65). С. 4–11. URL: https://doi.org/10.15407/pge2021.02.004

13. Arash E. Samani, Anna D'Amicis, Jeroen D.M. De Kooning, Dimitar Bozalakov. Grid balancing with a large-scale electrolyser providing primary reserve. IET Renewable Power Generation. 2020. vol. 14(16). P. 370–378. URL: https://www.researchgate.net/publication/346489257_Grid_Balancing_with_a_Large-Scale_Electrolyser_Providing_Primary_Reserve (дата звернення 16.08.2023)

14. Стаднік М. І., Рубаненко О. О., Бондаренко С. В. Вибір встановленої потужності сонячної електростанції та її елементів. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017. №1. С. 166-175. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ tetapk_2017_1_34 (дата звернення 18.08.2023)

15. Інформаційно-аналітичний випуск НТСЕУ про стан ПЕК України. Науково-технічна спілка енергетиків та електротехніків України. Січень 2022. URL: https://www.ntseu.net.ua/docs/review605-202201.pdf (дата звернення 16.08.2023)

16. Chatenet M. et al. Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments. *Chemical Society Reviews*. 2022. URL: https://doi.org/10.1039/d0cs01079k (дата звернення: 11.08.2023).

17. M series PEM electrolyser. Nel. URL: https://nelhydrogen.com/product/m-series-3/ (дата звернення: 13.08.2023).

18. Li C., Baek J. B. The promise of hydrogen production from alkaline anion exchange membrane electrolyzers. *Nano Energy.* 2021. P. 87. doi: https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106162.

19. Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition. International Renewable Energy Agency IRENA. 2018. URL: https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/%_Hydrogen_from_renewable_ power_ 2018.pdf (дата звернення: 12.08.2023).

20. Zoe Clarke and other, The clean hydrogen revolution. Goldman Sachs. 2022. URL:https://www.goldmansachs.com/intelligence/pages/gs-research/carbonomics-the-clean-hydrogen-revolution/carbonomics-the-clean-hydrogen-revolution.pdf (дата звернення: 19.08.2023).

21. Cost-competitive green hydrogen: how to lower the cost of electrolysers? Patonia A, Rahmatallah P. The Oxford institute for energy studies. 2022. URL: https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2022/01/Cost-competitive-green-hydrogen-how-to-lower-the-cost-of-electrolysers-EL47.pdf (дата звернення: 19.08.2023).

22. Kurtz J. and other. Dynamic Modeling and Validation of Electrolyzers in Real Time Grid Simulation National renewable energy laboratory. URL: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review17/tv031_hovsapian_2017_o.pdf (дата звернення: 16.08.2023).

23. Про затвердження Правил роздрібного ринку електричної енергії: Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 14.03.2018 р. № 312: станом на 1 лип. 2023 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-18#Text (дата звернення: 17.08.2023).

24. Комерційна пропозиція постачальника електричної енергії ТОВ «КИЇВСЬКІ ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОСЛУГИ». Yasno. URL: https://s3.eu-central.amazonaws.com/yasno.com.ua/uploads/documents/2023/07/31/2.1. (дата звернення: 17.08.2023).

25. Комерційна пропозиція «фактична». ТОВ «Київська обласна ЕК». URL: https://koec.com.ua/documents/ (дата звернення: 17.08.2023).

26. Комерційна пропозиція «Стандарт А» до договору про постачання електричної енергії споживачу. ТОВ «Запоріжжяелектропостачання». URL: https://zpep.com.ua/wp-content/uploads/2023/ (дата звернення: 17.08.2023).

27. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions Brussels. 8.7.2020, COM(2020) 301 URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0301 (дата звернення: 19.08.2023).

28. Офіційний сайт ДП «Гарантований покупець». URL: https://www.gpee.com.ua/about_us (дата звернення: 18.08.2023).

29. Lazard's Levelized Cost of Hydrogen Analysis. Lazard. 2021. URL: https://www.lazard.com/media/12qcxl1j/lazards-levelized-cost-of-hydrogen-analysis-vf.pdf (дата звернення: 19.08.2023).

30. Proost J. State-of-the art CAPEX data for water electrolysers, and their impact on renewable hydrogen price settings. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44,

no. 9. P. 4406–4413. URL: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.164 (дата звернення: 02.08.2023).

31. Нечаєва Т. П. Оцінка сукупної роботи батарейних систем накопичення енергії з електростанціями на відновлюваних джерелах енергії. *Проблеми загальної енергетики*. 2019. № 3(58). С. 11-16. doi: https://doi.org/10.15407/pge2019.03.011.

32. Момот О. М. Ануїтетний графік погашення кредитів: переваги та недоліки. *Науковий вісник Ужгородського університету: Серія: Економіка*. Ужгород: Видавництво УжНУ «Говерла», 2011. № 32. С. 224–226.

33. Ралко О. С. Методи визначення ставки дисконтування. *Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. Серія: Економіка і менеджмент.* 2015. № 11. С. 150-153.

34. Тарифи централізованого водопостачання та водовідведення. Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. URL:https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/holodna-voda/spozhivachi/centralizovane -vodopostachannya-ta-vodovidvedennya/tarifi-na-centralizovane-vodopostachannya-ta-vodovidvedennya/tarifi-centralizovanogo-vodopostachannya-ta-vodovidvedennya (дата звернення: 20.08.2023).

35. Nel. The world`s most efficient and reliable electrolysers. 2021. URL: https://nelhydrogen.com/wp-content/uploads/2020/03/Electrolysers-Brochure-Rev-D.pdf (дата звернення: 20.08.2023).

36. Переваги та основні умови участі споживачів на ринку допоміжних послуг (РДП) та балансуючому ринку (БР). 2022. НЕК «Укренерго» URL: https://ua.energy/wp-content/uploads/2022/09/Spozhyvachi-na-RDP_BR_2022.pdf (дата звернення: 17.08.2023).

REFERENCES:

1. Statistical Review of World Energy – 71st edition. British Petroleum, 2022. Available at: https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/ energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf (data zvernennia: 17.08.2023).

2. Informatsiino-analitychnyi vypusk NTSEU pro stan PEK Ukrainy. Naukovo-tekhnichna spilka enerhetykiv ta elektrotekhnikiv Ukrainy. Sichen 2022. Available at: https://www.ntseu.net.ua/docs/review605-202201.pdf (data zvernennia 16.08.2023)

3. Informatsiino-analitychnyi vypusk NTSEU pro stan PEK Ukrainy. Naukovo-tekhnichna spilka enerhetykiv ta elektrotekhnikiv Ukrainy. Lypen 2021. Available at: https://www.ntseu.net.ua/docs/review598-202107.pdf (data zvernennia 16.08.2023)

4. Robota rynku elektroenerhii za kviten 2020 roku. Ofitsiinyi sait NEK «Ukrenerho». Available at: https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya /dyspetcherska-informatsiya (data zvernennia 16.08.2023)

5. Tolstov D. V. Rozrobka efektyvnoi stratehii rozvytku pidpryiemstva v umovakh ekonomichnoi kryzy. Kval. rob. Mahistra , 2021. KPU. Zaporizhzhia.

6. Natsionalnyi plan skorochennia vykydiv vid velykykh spaliuvalnykh ustanovok. Rozporiadzhennia KMU vid 8 lystopada 2017 r. № 796-r. ta Plan vidnovlennia Ukrainy (proiekt). Natsionalna prohrama «Enerhetychna nezalezhnist ta Zelenyi Kurs». Available at: https://recovery.gov.ua/project /program/energy-independence-and-green-deal (data zvernennia: 10.08.2023)

7. Kulyk M. M. Spivstavnyi analiz tekhniko-ekonomichnykh kharakterystyk Kanivskoi HAES ta kompleksu spozhyvachiv-rehuliatoriv dlia pokryttia hrafikiv elektrychnykh navantazhen. [Comparative analysis of the technical and economic characteristics of Kanivska HPP and the complex of consumers-regulators to cover electric load schedules]. *Problems of general energy*. 2012. vol. 4(39). P. 5–10.

8. Bielmann M., Vogt U. F., Zimmermann M., Zuttel A. A seasonal energy storage system based on hydrogen for self sufficient living. *Journal of Power Sources*. 2011. 196. P. 4054–4060. doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.11.096.

9. Oloyede I. O. Design and evaluation of seasonal storage hydrogen peak electricity supply system : thesis. 2011. 325 p. Available at: http://hdl.handle.net/1721.1/76947 (data zvernennia: 17.08.2023).

10. Reus, M., Grube, T., Robinius, M., Preuster, P., Wasserscheid, P. et al. (2017). Seasonal storage and alternativecarriers: A flexible hydrogen supply chain model. *Applied Energy,* 290–302. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05. 050

11. Buratynskyi I. M. Modeliuvannia spilnoi roboty soniachnoi elektrostantsii ta akumuliatsiinoi systemy zberihannia enerhii v umovakh pidvyshchennia stabilnosti ta ekonomichnoi efektyvnosti yikh funktsionuvannia v enerhosystemi: dys. kand. Tekhn. nauk,: 04.00.17. Kyiv, 2023. 171 s.

12. Leshchenko I. Ch. Otsinka serednozvazhenoi sobivartosti vyrobnytstva vodniu v Ukraini. *Problemy zahalnoi enerhetyky*. 2021, № 2(65). S. 4–11. Available at: https://doi.org/10.15407/pge2021.02.004

13. Arash E. Samani, Anna D'Amicis, Jeroen D.M. De Kooning, Dimitar Bozalakov (2020) Grid balancing with a large-scale electrolyser providing primary reserve. *IET Renewable Power Generation,* vol. 14(16), 370–378. Available at: https://www.researchgate.net/publication/346489257_Grid_Balancing_with_a_Large-Scale_Electrolyser_Providing_Primary_Reserve (data zvernennia 16.08.2023)

14. Stadnik M. I., Rubanenko O. O., Bondarenko S. V. Vybir vstanovlenoi potuzhnosti soniachnoi elektrostantsii ta yii elementiv. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 2017. №1. S. 166-175. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ tetapk_2017_1_34 (data zvernennia 18.08.2023)

15. Informatsiino-analitychnyi vypusk NTSEU pro stan PEK Ukrainy. Naukovo-tekhnichna spilka enerhetykiv ta elektrotekhnikiv Ukrainy. Sichen 2022. Available at: https://www.ntseu.net.ua/docs/review605-202201.pdf (data zvernennia 16.08.2023)

16. Chatenet, M. et al. Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments. *Chemical Society Reviews*. 2022. Available at: https://doi.org/10.1039/d0cs01079k (data zvernennia: 11.08.2023).

17. M series PEM electrolyser. Nel. Available at: https://nelhydrogen.com/product/m-series-3/ (data zvernennia: 13.08.2023).

18. Li, C., Baek, J. B. (2021) The promise of hydrogen production from alkaline anion exchange membrane electrolyzers. *Nano Energy*; 87. doi: 10.1016/j.nanoen.2021.106162.

19. Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition. International Renewable Energy Agency IRENA. 2018. Available at: https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/%_Hydrogen_from_renewable_ power_ 2018.pdf (data zvernennia: 12.08.2023).

20. Zoe Clarke and other, The clean hydrogen revolution. Goldman Sachs. 2022. Available at:https://www.goldmansachs.com/intelligence/pages/gs-research/carbonomics-the-clean-hydrogen-revolution/carbonomics-the-clean-hydrogen-revolution.pdf (data zvernennia: 19.08.2023).

21. Cost-competitive green hydrogen: how to lower the cost of electrolysers? Patonia A, Rahmatallah P. The Oxford institute for energy studies. 2022 Available at: https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2022/01/Cost-competitive-green-hydrogen-how-to-lower-the-cost-of-electrolysers-EL47.pdf (data zvernennia: 19.08.2023).

22. Kurtz J. and other. Dynamic Modeling and Validation of Electrolyzers in Real Time Grid Simulation National renewable energy laboratory. Available at: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review17/tv031_hovsapian_2017_o.pdf (data zvernennia: 16.08.2023).

23. Pro zatverdzhennia Pravyl rozdribnoho rynku elektrychnoi enerhii: Postanova Natsionalnoi komisii, shcho zdiisniuie derzhavne rehuliuvannia u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh vid 14.03.2018 r. № 312: stanom na 1 lyp. 2023 r. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-18#Text (data zvernennia: 17.08.2023).

24. Komertsiina propozytsiia postachalnyka elektrychnoi enerhii TOV «KYIVSKI ENERHETYChNI POSLUHY». Yasno. Available at: https://s3.eu-central.amazonaws.com/yasno.com.ua/uploads/documents/2023/07/31/2.1. (data zvernennia: 17.08.2023).

25. Komertsiina propozytsiia «faktychna». TOV «Kyivska oblasna EK». Available at: https://koec.com.ua/documents/ (data zvernennia: 17.08.2023).

26. Komertsiina propozytsiia «Standart A» do dohovoru pro postachannia elektrychnoi enerhii spozhyvachu. TOV «Zaporizhzhiaelektropostachannia». Available at: https://zpep.com.ua/wp-content/uploads/2023/ (data zvernennia: 17.08.2023).

27. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. Sommunication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions Brussels. 8.7.2020, COM(2020) 301 Available at: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0301 (data zvernennia: 19.10.2023).

28. Ofitsiinyi sait DP «Harantovanyi pokupets». Available at: https://www.gpee.com.ua/about_us (data zvernennia: 18.08.2023).

29. Lazard's Levelized Cost of Hydrogen Analysis. Lazard. 2021. Available at: https://www.lazard.com/media/12qcxl1j/lazards-levelized-cost-of-hydrogen-analysis-vf.pdf (data zvernennia: 19.08.2023).

30. Proost J. State-of-the art CAPEX data for water electrolysers, and their impact on renewable hydrogen price settings. International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44, no. 9. P. 4406–4413. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.164 (data zvernennia: 02.08.2023).

31. Nechaieva T. P. Otsinka sukupnoi roboty batareinykh system nakopychennia enerhii z elektrostantsiiamy na vidnovliuvanykh dzherelakh enerhii. *Problemy zahalnoi enerhetyky*. 2019. № 3(58). S. 11-16. doi: https://doi.org/10.15407/pge2019.03.011.

32. Momot, O. M. Anuitetnyi hrafik pohashennia kredytiv: perevahy ta nedoliky. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu: Seriia: Ekonomika*. Uzhhorod: Vydavnytstvo UzhNU «Hoverla», 2011. № 32. S. 224–226.

33. Ralko O. S. Metody vyznachennia stavky dyskontuvannia. *Naukovyi visnyk Mizhnarodnoho humanitarnoho universytetu. Seriia: Ekonomika i menedzhment.* 2015. № 11. S. 150-153.

34. Taryfy tsentralizovanoho vodopostachannia ta vodovidvedennia. Natsionalnoi komisii, shcho zdiisniuie derzhavne rehuliuvannia u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh. Available at:https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/holodna-voda/spozhivachi/centralizovane-vodopostachannya-ta-vodovidvedennya/tarifi-na-centralizovane-vodopostachannya-ta-vodovidvedennya/tarifi-centralizovanogo-vodopostachannya-ta-vodovidvedennya (data zvernennia: 20.08.2023).

35. Nel. The world`s most efficient and reliable electrolysers. 2021. Available at: https://nelhydrogen.com/wp-content/uploads/2020/03/Electrolysers-Brochure-Rev-D.pdf (data zvernennia: 20.08.2023).

36. Perevahy ta osnovni umovy uchasti spozhyvachiv na rynku dopomizhnykh posluh (RDP) ta balansuiuchomu rynku (BR). 2022. NEK «Ukrenerho» Available at: https://ua.energy/wp-content/uploads/2022/09/Spozhyvachi-na-RDP_BR_2022.pdf (data zvernennia: 17.08.2023)

Надійшла до редакції 27.09.2023р.