

ІНВЕСТИЦІЙНА ПІДТРИМКА ЗЕЛЕНОГО ВОДНЮ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі розглянуті можливості застосування водню для покращення економічного стану багатьох країн світу. Доведено, що інвестиції у створення водневої економіки сприятимуть не тільки розвитку доступної та чистої енергетики, але можуть посилити водневу промисловість, забезпечити створення нових зелених робочих місць та економічне зростання. Показані сценарії провадження водню в енергетичну галузь та розглянуто суспільний ефект інвестицій у водневу енергетику.

Ключові слова: водень, економіка, інвестиції, енергетика, відновлювані джерела енергії.

Abstract

The paper considers the possibilities of using hydrogen to improve the economic condition of many countries. It has been proven that investing in a hydrogen economy will not only promote the development of affordable and clean energy, but can strengthen the hydrogen industry, create new green jobs and economic growth. Scenarios of hydrogen production in the energy sector are shown and the social effect of investments in hydrogen energy is considered.

Key words: hydrogen, economy, investment, energy, renewable energy sources.

Вступ

Водень відіграватиме ключову роль у досягненні ефективної та чистої економіки. У контексті відновлення після спричиненого пандемією COVID-19 економічного спаду, інвестиції у створення водневої економіки сприятимуть не тільки розвитку доступної та чистої енергетичної системи, але можуть посилити водневу промисловість, забезпечити створення нових зелених робочих місць та економічне зростання.

Побудова водневої системи та вихід з економічної кризи поряд із збільшенням попиту на електролізери для чистого водню та збільшенням обсягів виробництва водню і розбудови водневої інфраструктури вимагає великих інвестицій. Такі інвестиції потребують стимулювання за допомогою політики та підтримки ЄС і урядів держав-членів.

Результати дослідження

Загальний обсяг потрібних інвестицій для створення водневої системи до 2030 року оцінюється в 430 млрд. євро із 145 млрд. євро підтримки (гранти, субсидії).

Виробництво 4,4 млн. тон водню в ЄС Згідно з амбітним сценарієм «Водневої дорожньої карти Європи» до 2030 року, попит на водень, становитиме 665 ТВт-год або 16,9 млн. тон. Цей водень потрібно виробляти в ЄС або імпортувати.

Відповідно до Ініціативи «2x40 ГВт зеленого водню», 7,4 млн. тон водню забезпечується за рахунок постачання зеленого водню, в ЄС виробляється 4,4 млн. тон, а 3 млн. тон – буде імпортовано з Північної Африки та України.

Це означає, що потрібно виробляти додатково 9,5 млн. тон водню з низьким вмістом вуглецю. Передбачається, що нинішню кількість водню можна отримати шляхом електролізу, використовуючи інші джерела електроенергії з низьким вмістом вуглецю в Європі, а також природний газ із

технологіями захоплення і зберігання вуглецю (CCS), що утворює разом 8,2 млн тон з низьковуглецевого водню, сприяючи 90% скороченню викидів CO₂.

Решта виробництва низьковуглецевого водню у кількості 1,3 млн. тон, відбудеться в результаті газифікації вугілля за допомогою CCS, завдяки чому можна досягти майже 100% скорочення викидів CO₂. Установки для газифікації вугілля будуть реалізовані в Польщі, Болгарії, Румунії та Угорщині. Реалізація електролізера потужністю 40 ГВт в ЄС, що виробляє 4,4 млн. тон чистого водню, вимагає до 80 ГВт додаткового виробництва відновлюваної електроенергії, вітряної та сонячної.

Загальна сума інвестицій становить до 80-90 млрд. євро. Їх можна зменшити шляхом максимального використання вже наявної в Європі електроенергії, що не містить вуглецю.

Реалізація електролізера потужністю 6 ГВт, розташованого у місці попиту водню та підключеного до електромережі, не потребує водневої інфраструктури або накопичувальної потужності. Єдиним обмеженням цього є потужність електромережі, отже ці електролізерні установки будуть знаходитися в діапазоні від 100 МВт до 1 ГВт. Коефіцієнт навантаження у 8000 год. може бути реалізований через підключення електролізерів до електромережі за рахунок стабільного постачання електроенергії разом із системою гарантій походження та системою відстеження, завдяки якій електроенергія може надходити з поновлюваних та низьковуглецевих джерел електроенергії.

Такий підхід забезпечить синергію та переваги від з'єднання секторів: додаткова гнучкість для електроенергетичної системи та додаткові доходи для електролізерів. Однак, реалізація коефіцієнту навантаження 8 000 год., означає, що вартість електроенергії, яку потрібно заплатити, буде вищою, ніж витрати на виробництво електроенергії за допомогою відновлюваних джерел енергії через плату за мережу, зберігання та гнучкі витрати в електроенергетичній системі.

Реалізація установки потужністю 34 ГВт для виробництва водню при розміщенні електролізера поблизу ресурсу потребує водневої інфраструктури та сховища. Коефіцієнт навантаження буде обмежений відновлюваним ресурсом.

Щоб реалізувати коефіцієнт навантаження 5000 год., особливо на півдні Європи, потрібне розумне поєднання сонячних батарей з вітром, яке потрібно підключити в місці розташування електролізерної потужності. Більш низькі коефіцієнти навантаження, наприклад, підключення сонячних потужностей до потужності електролізера, означали б також менший коефіцієнт навантаження для трубопроводу і потребуватимуть значно більшої ємності для зберігання водню.

Це означає, зрештою, більш високу вартість системи. 3 млн. тон імпортного водню з Північної Африки та України Реалізація електролізера потужністю 40 ГВт у Північній Африці (30 ГВт) та Україні (10 ГВт), що вироблятиме 4 млн. тон зеленого водню, вимагатиме додаткового виробництва близько 77 ГВт відновлюваної електроенергії, вітряної та сонячної.

Загальні інвестиції у відновлювані джерела енергії та електролізерні електростанції становитимуть близько 92 млрд. євро. Реалізація 30 ГВт установок для виробництва водню в Північній Африці та 10 ГВт виробництва водню в Україні при розташування електролізера поблизу ресурсу, потребує водневої інфраструктури та сховища або прямого підключення до аміачної установки.

Коефіцієнт навантаження буде обмежений відновлюваним ресурсом. Для реалізації коефіцієнту навантаження 5000 год. у Північній Африці, потрібне ефективне поєднання сонячної енергії з наземним вітром або поєднання сонячних панелей PV з концентрованими панелями сонячних батарей CSP, що потрібно підключити за місцем розташування потужності електролізера.

Для реалізації коефіцієнту навантаження 5000 год. в Україні, потрібна комбінація сонячних панелей PV з береговим вітром, який потрібно підключити в місці розташування потужності електролізера. Більш низькі коефіцієнти навантаження, наприклад, підключення сонячної потужності PV до електролізерної потужності, означали б також менший коефіцієнт навантаження для трубопроводу і це потребує набагато більшої ємності для зберігання водню, отже і більшу вартість водню для споживача.

Тендерна процедура Тендерна процедура виробництва зеленого водню повинна бути інтегрованою як для виробництва зеленої електроенергії, так і для перетворення електроенергії у водень шляхом 3 електролізу. У такій тендерній процедурі пропонується ціна за кг виробленого водню. Той, хто має найнижчу ставку, виграє тендер. Коли виробничі витрати перевищують ринкову ціну, уряди субсидують різницю. На це потрібно 15-20 років з щорічними виплатами урядів.

У рамках програми відновлення економіки, інтерес може становити капіталізація загальної суми субсидій, які будуть виплачуватись протягом 15-20 років, на інвестиційну субсидію до реалізації проекту. Це зменшить інвестиційні витрати, зменшивши фінансування таких проектів.

Воднева інфраструктура та сховища Згідно з картою інфраструктури водневих магістралей, викладеної в Ініціативі «2x40 ГВт зеленого водню», основна частина водневої інфраструктури є перетворенням існуючих газогонів природного газу на водневі трубопроводи. Приблизно 50 тис. км інфраструктури газопроводів необхідно перетворити на інфраструктуру для водневих трубопроводів. Поряд з цим потрібно забезпечити близько 5 тис км нових водневих трубопроводів до Африки, Греції, Чорного моря, Італії, Португалії та Іспанії.

Питома інвестиційна вартість у нову потужність транспортного трубопроводу становитиме 1 млн. євро на потужність 10 ГВт на 1 км. Новий трубопровід з Африки до Греції та Італії довжиною 2,5 тис км потужністю 20 ГВт буде коштувати 5 млрд. євро. Німецькі оператори газотранспортної мережі запропонували реалізувати в Німеччині водневу магістраль, яка пов'язує масштабне виробництво водню з точками попиту на нього у великих хімічних, нафтохімічних та металургійних майданчиках та із сховищами водневих соляних печер.

Воднева інфраструктура буде реалізована значною мірою шляхом перетворення трубопроводів природного газу та за допомогою нових газопроводів для забезпечення належних з'єднань. У Німеччині пропонується загальна довжина водневої магістралі у 5,9 тис км. Аналогічний план магістралі водню пропонується в Нідерландах на період 2023-2027 рр.

Водневі заправні станції За підрахунками «Водневої дорожньої карти» FCH JU Europe, до 2030 року необхідно встановити 3.740 заправних станцій, що вимагає 8,2 млрд. євро загальних інвестицій. Поряд з цим виникає потреба у водневих бункерних станціях для суден уздовж річок Рейн, Дунай, По та інших, бункерних станціях для морських кораблів у затоках і т.д. Це потребуватиме близько 10 млрд. євро інвестицій до 2030 року. Портова воднева інфраструктура 4 Портів оснащення необхідні для імпорту та експорту водню судном та транспортування водню до внутрішніх районів портів. Елементи портової інфраструктури включають, серед іншого, термінали для рідкого водню, резервуари для зберігання рідкого водню, завантаження вантажівок рідкого водню, блоки випаровування, термінали для носіїв рідкого органічного водню (ЛОНС), резервуари для зберігання, установки для дегідрування, аміачні термінали, резервуари для крекінгу аміаку та ін.

Це вимагатиме інвестування у розмірі близько 2,5 млрд. євро. Налагоджувати водневу інфраструктуру потрібно буде у 8 портах Європи, що коштуватиме 20 млрд. євро. Газ і водень для опалення Споживання газу в ЄС у 2017 році становило 2,783 ТВт.

Газ головним чином використовувався як для опалення, обігріву приміщень і будинків, так і для забезпечення високої та середньої температури в промисловості, наприклад, технологічного тепла в харчовій та паперовій промисловості та високотемпературне тепло в хімічній, скляній/керамічній промисловості.

Припускається, що споживання природного газу в 2030 році становитиме близько 2500 ТВт-год. Якщо 2 млн. тон водню буде використано для опалення низькими і високими температурами, це замінить 3,33% (енергоємність) споживання газу (80 ТВт) або означатиме 10%-ве змішування водню в газовій системі.

Сценарій 1: 100% чистого водню замінить 3,33% природного газу для опалення.

У цьому сценарії припускається, що 100% чистого водню буде використано для заміни 3,33% потреби в газі в 2030 році. 75% цього водню (1,5 млн тон) призначається для опалення будинків і будівель, а 25% - для забезпечення технологічного/високотемпературного тепла.

Це означатиме нижчу кількість водневих установок для опалення в ЄС у 2030 році. Водень для опалення приміщень (низька температура) в будинках та будівлях є перспективним варіантом, особливо для сільської місцевості, невеликих сіл та старих історичних міських центрів.

Інші варіанти обігріву приміщень, такі як електричні теплові насоси чи центральне опалення, в цих районах не застосовуються та/або є дорожчими. Припускається, що в будинках у таких районах у 2030 році буде використано 1,5 млн. тон водню.

Після ізоляції підраховано, що ці будинки споживають в середньому близько 250 кг водню (що еквівалентно 900 куб м природного газу) при нагріванні водневим котлом. 125 кг водню використовується для обігріву будинку з гібридною системою водяного котла з тепловим насосом, а 250 кг водню використовується в системі теплового насоса на паливних елементах, яка виробляє і тепло, і електроенергію.

Повний перехід регіонів/районів/міст з природного газу на водень потребуватиме 100%-го переобладнання мережі розподілу природного газу, у т.ч. вимірювального обладнання, на водень.

Водневі котли вже є на ринку і не будуть коштувати дорожче, ніж котли природного газу при їх виробництві у великих кількостях.

Паливні елементи з реформатором для реформування водню з природного газу вже є на ринку Японії (Ene-farm). При 100% -му постачанні водню ці реформатори не потрібні, але з іншого боку потрібен невеликий тепловий насос для виробництва достатньої кількості тепла.

Сценарій, при якому 8 млн. будинків/будинкових еквівалентів переходять на 100% водню, при якому витрачається 1,5 млн. тон водню: - 2 млн. будинків/еквівалентів будинку з водневим котлом. 1500 євро на котел означає потребу в інвестиціях у розмірі 3 млрд. євро; - 4 млн. будинків/еквівалентів будинку з гібридною системою, тепловим насосом та водневим котлом для опалення та гарячої води у піковий період.

Гібридна система коштуватиме 4 тис євро, отже загальна потреба в інвестиціях становитиме 16 млрд. євро; 5 - 2 млн. будинків/еквівалентів будинків/будинків із системою теплового насоса 1-2 кВт для виробництва електроенергії та тепла: 7,5 тис євро на 1 систему, всього – 15 млрд. євро інвестицій; - перехід 8 млн. будинків/будинкових еквівалентів з інфраструктурою газорозподільної мережі на водень: близько 200-300 євро на будинок для перетворення енергорозподільної мережі та вимірювального обладнання у водень.

Загальна вартість конверсії становить 2 млрд. євро. Крім використання водню для обігріву приміщень, 0,5 млн тон водню для технологічного та високотемпературного тепла потрібно для використання в котлах, печах, газових турбінах, газових двигунах тощо. Якщо середній коефіцієнт навантаження оцінюється у 5000 год., загальна потужність, яку потрібно дооснастити до чистого водню, становить приблизно 4 ГВт. Вартість модернізації установок та газової інфраструктури становить близько 250 євро/кВт.

Загальна вартість модернізації становитиме 1 млрд. євро. Якщо перевести цифри у кількість областей з розрахунку, що 200 тис будинків/еквівалентів будинків формують одну область, до 2030 року 40 районів/водневих долин Європи здійснять перехід з газу на водень. Загальний обсяг інвестицій у цей сценарій оцінюється у 37 млрд. євро.

Сценарій 2: 10% водню змішується з природним газом У сценарії припускається, що у 2030 році 10% обсягу водню змішується з природним газом. До 20% водню можна змішувати з природним газом до того, як газові прилади потребуватимуть модернізації або заміни. До 20% також немає значної потреби в модернізації або налагодженні інфраструктури природного газу.

Однак переривчастість у виробництві водню відновлюваними водневими установками та особливо сезонні зміни попиту на газ для обігріву приміщень будуть призводити до коливань у відсотках змішаного водню. Потрібні подальші дослідження, але приблизні оцінки свідчать про те, що в середньому відсотки змішування водню можуть змінюватись від 0 до 40%, коли водень виробляється від сонячної та вітрової енергії. Утримання постійного відсотку змішування водню в природному газі вимагає модернізації та адаптації системи. 10%-ве змішування водню в системі природного газу еквівалентно 2 млн. тон водню.

У цьому сценарії змішування немає необхідності замінювати газові котли та інше опалювальне обладнання. Однак, очікуючи повного перетворення водню в районах, які перейдуть на 100% водню невдовзі після 2030 року, можна було б ініціювати таку ж кількість опалювальних приладів, які готові до водню.

Котел, готовий до водню, вже є на ринку і коштуватиме не більше, ніж новий природний газ або водневий котел. В Японії вже є ринок водневих паливних елементів, головним з яких є реформатор природного газу на водень (EneFarm). - 2 млн. будинків/еквівалентів будинку з водневим котлом. 1500 євро за 1 котел означає загальні інвестиції в 3 млрд. євро; - 4 млн. будинків/еквівалентів будинку/будинку з гібридною системою, тепловим насосом та водневим котлом для пікового обігріву та гарячої води. Вартість гібридної системи - 4 тис євро, отже загальний інвестицій потрібно буде 16 млрд. євро; - 2 млн. будинків/еквівалентів будинків/будинків з реформатором природного газу 1-2 кВт на водний і паливний елемент для виробництва електроенергії та тепла. 7,5 тис євро – ціна однієї системи, всього потрібно 15 млрд. євро.

Загальний обсяг інвестицій за цим сценарієм становить близько 34 млрд. євро, без урахування витрат на змішування водню з постійним відсотком у систему природного газу. 6 1,8 млн. тон водню для мобільності.

У «Водневій карті Європи» представлено ряд електричних транспортних засобів на водневих паливних елементах. На ринок увійдуть інші засоби водневої мобільності, такі як внутрішні судна з

водневими паливними елементами, морські судна, які використовують аміак в якості палива в дизельному двигуні, трактори/важке обладнання, що змішують водень у місці входу повітря в дизельних двигунах, дрони з водневими паливними елементами та ін.

Водень потрібно транспортувати до станцій перезавантаження водню (HRS), для чого потрібні причепа для водневих труб та причепа для рідкого водню. Однотрубний причіп може перевозити 350 кг водню при тиску 200 бар або 1000 кг на 500 бар. Причіп для рідкого водню може перевозити 3,5 тис кг водню.

Припускається, що 25% причепів - для рідкого водню, 25% - це причепа з 500 барними трубами, а 50% - це причепа на 200 бар. Кожен причіп постачає заправну станцію 1 раз на день упродовж всього року. Якщо 1 млн. тон водню потрібно постачати на трубопровідних причепах, потрібно 2,4 тис причепів для труб з рідким воднем.

Причепа для рідкого водню транспортуватимуть близько 750 тис тон водню, тоді як трубні причепа транспортують інші 250 тис тон водню. Однак для зрідження водню потрібні скраплюючі установки. Потрібно близько 40 установок зрідження, які виробляють 50 тон рідкого водню на день. На 1 кг рідкого водню потрібно 7 кВт/год електроенергії.

Вартість зрідження 50 тон водню щодня становить близько 40 млн. Інвестування переходу залізничного транспорту на водень, в основному на системи водневих паливних елементів, та резервуари для зберігання, а також необхідні установки для зрідження та причепа для перевезення водню оцінюється у близько 40 млрд. євро.

Таблиця 1 – Суспільна ефективність інвестицій у водневу енергетику

Ефективність			
енергетична	політична	економіко-соціальна	екологічна
Реновація зношеного обладнання ТЕС і АЕС	Позбавлення політичного тиску РФ на Україну в ході закупівлі енергетичних носіїв, обладнання і послуг	Зменшення витратної складової тарифу на електроенергію	Зменшення до рівня європейських норм викидів речовин, шкідливих для здоров'я людей і для довкілля
Зняття системних обмежень на розвиток відновлюваної енергетики	Демонополізація генерації і передачі електроенергії	Зменшення фінансування розвитку РФ	
Зменшення втрат електроенергії в процесі передачі	Унеможливує корупційні дії в паливній складовій собівартості електроенергії	Економія валюти, сплаченої за імпорتنі енергоносії, обладнання і послуги для ТЕС і АЕС	
Підвищення надійності постачання електроенергії споживачам (показник SAIDI)	Формуванню позитивного іміджу України як сумлінного виконавця своїх міжнародних зобов'язань щодо стимулювання розвитку відновлюваної енергетики і запобігання глобальному потеплінню	Зниження середніх ринкових цін на електроенергію за рахунок участі СЕС і ВЕС в покритті пікових навантажень споживання	Виконання зобов'язань України згідно Паризької кліматичної угоди щодо обмеження процесів, що сприяють зміні клімату на планеті
		Збільшення надходжень в місцеві бюджети	
		Створення робочих місць в науці, енергетиці, будівництві, хімічній промисловості, машинобудуванні та ін.	

Висновки

Водневі інвестиції можуть забезпечити створення ринку для розвитку конкурентоспроможної та інноваційної європейської галузі виробництва водню. З посиленою увагою до інноваційних водневих розробок ЄС може створити виробничу галузь світового класу, особливо у сфері електролізерів, водневих паливних елементів та іншого водневого обладнання і виробничих застосувань.

Інвестиції у відновлювані джерела енергії та виробництво водню, у водневу інфраструктуру, сховища і обладнання оцінюються разом із зазначенням фінансової підтримки, яка потрібна на першому етапі побудови водневої системи.

Ці інвестиції дають уявлення про ринки конкретних водних продуктів, обладнання тощо. На основі цих даних ЄС та держави-члени можуть розробити політику та схеми підтримки у контексті постпандемійного відновлення. Прогнозування оцінок потрібних інвестицій на водень до 2030 року

здійснювалося на основі позиційного документа Hydrogen Europe «2x40 ГВт зеленого водню для Європейської зеленої угоди» (Green Hydrogen for a European Green Deal: a 2x40 GW Initiative) та доповіді FCH JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking) «Воднева дорожня карта Європи - стійкий шлях європейського енергетичного переходу».

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Japan team evaluates battery-assisted low-cost hydrogen production from solar energy, <https://www.greencarcongress.com>, Feb'19.
2. IRENA, Hydrogen from renewable power Technology outlook for the energy transition, Sep'18.
3. Petro Lezhniuk, Vyacheslav Komar, Serhii Kravchuk, Volodymyr Netrobskiy, Vladyslav Lesko, Optimal Integration of Photoelectric Stations in Electric Networks, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019, 209.
4. <https://avenston.com/articles/hydrogen/>

Поліщук Андрій Леонідович — канд. техн. наук, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Казьмірук Олег Іванович — канд. техн. наук, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Лесько Владислав Олександрович — канд. техн. наук, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: leskovlad@ukr.net

Щербатий Данило Вікторович — студент групи 2ЕЕ-19б, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Polishchuk Andriy L. - Ph.D., Associate Professor of the Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Kazmiruk Oleh I. - Ph.D., Associate Professor of the Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Lesko Vladislav O. - Ph.D., Associate Professor of the Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: leskovlad@ukr.net

Shcherbatyy Danylo V. — student of group 2EE-19b, Faculty of Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.