

УДК 621.357:628

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2026.1\(503\).2.26](https://doi.org/10.15589/znп2026.1(503).2.26)

ASSESSMENT OF THE REGIONAL POTENTIAL OF UKRAINE FOR HYDROGEN HUB DEVELOPMENT BASED ON THE INTEGRATED HHPI INDEX

ОЦІНКА РЕГІОНАЛЬНОГО ПОТЕНЦІАЛУ УКРАЇНИ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ВОДНЕВИХ ХАБІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНТЕГРАЛЬНОГО ІНДЕКСУ ННПІ

Daria V. Kulikova

kulikova.d.v@nmu.one

ORCID: 0000-0003-0874-0188

Д. В. Кулікова,

канд. техн. наук, доцент

*Dnipro University of Technology, Dnipro**Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро*

Abstract. Purpose. The purpose of the study is to provide a comprehensive assessment of Ukraine's regional potential for the development of hydrogen hubs using an integrated approach that considers natural, resource, and infrastructural factors, as well as to identify priority regions for green hydrogen development and to elaborate recommendations for hub specialization according to their functional purpose. *Method.* To assess regional conditions for hydrogen hub formation, the Hydrogen Hub Potential Index (HHPI) was applied. The index integrates four key criteria: solar and wind potential, availability of water resources, and the level of infrastructure development. Each indicator was normalized to a dimensionless range of 0–1. The integral HHPI value was calculated using a weighted additive method, where each criterion was assigned a weight coefficient according to its role in green hydrogen production. *Results.* The calculation of the HHPI for regions of Ukraine enabled a comprehensive evaluation of hydrogen hub development potential and revealed a clear territorial differentiation. Southern and south-eastern regions demonstrate the highest index values due to favorable solar and wind potential and relatively developed infrastructure, although water resource availability is limited in some areas. Central and western regions show medium performance, while northern and Polissia regions are characterized by low potential due to limited renewable resources and weaker infrastructure. The analysis of HHPI components made it possible to outline potential hub specialization: southern regions may serve as export-oriented hubs; industrially developed regions may form industrial hydrogen clusters; and western and transit regions may act as resource and integration hubs for domestic and cross-border energy connectivity. *Scientific novelty.* The study proposes an integrated approach to assessing hydrogen hub potential for all regions of Ukraine based on the simultaneous consideration of four key factors. The application of the HHPI at the regional level enables a systematic analysis of interdependencies among indicators, spatial differentiation of regions, and identification of priority territories for hydrogen economy development, thus filling the gap in comprehensive regional assessments previously absent for Ukraine. *Practical impotence.* The results make it possible to identify priority regions for hydrogen hub deployment in Ukraine, which is important for strategic planning, investment policy, and the development of the hydrogen economy. The proposed methodology can be adapted to assess hydrogen hub potential in other countries or at the level of specific industrial zones, opening prospects for further comparative research.

Key words: hydrogen hubs; Hydrogen Hub Potential Index; renewable energy sources; water resources; infrastructure potential; green hydrogen.

Анотація. Мета. Метою дослідження є комплексна оцінка регіонального потенціалу України для формування водневих хабів за допомогою інтегрального підходу, що враховує природні, ресурсні та інфраструктурні чинники, а також визначення пріоритетних регіонів для розвитку «зеленого» водню та розробка рекомендацій щодо спеціалізації хабів за функціональним призначенням. *Методика.* Для оцінки регіональних умов формування водневих хабів застосовано Hydrogen Hub Potential Index (ННПІ), що інтегрує чотири ключові критерії: сонячний і вітровий потенціал, забезпеченість водними ресурсами та рівень розвитку інфраструктури. Показники нормалізовано до безрозмірного діапазону 0–1 і зведено в інтегральний індекс за допомогою зваженого адитивного методу із урахуванням значущості кожного критерію для виробництва «зеленого» водню. *Результати.* Розрахунок індексу ННПІ виявив чітку диференціацію регіонів України. Найвищі значення характерні для південних і південно-східних областей завдяки високому відновлюваному потенціалу та розвиненій інфраструктурі, хоча водозабезпеченість у частині регіонів обмежена. Центральні й західні області мають середні показники, тоді як північні характеризуються нижчим потенціалом. На основі структури ННПІ визначено

можливу спеціалізацію водневих хабів: південні регіони – експортно-орієнтовані, промислові області – індустриальні водневі кластери, західні та транзитні області – ресурсні та інтеграційні хаби для внутрішнього та транскордонного енергетичного сполучення. *Наукова новизна.* Запропоновано інтегральний підхід до оцінки потенціалу водневих хабів для всіх областей України з одночасним урахуванням чотирьох ключових чинників. Застосування індексу ННРІ дозволяє системно враховувати взаємозалежності показників, здійснювати просторову диференціацію регіонів та визначати пріоритетні території для розвитку водневої економіки. *Практична значимість.* Отримані результати дослідження можуть бути використані для стратегічного планування, формування інвестиційної політики та розвитку водневої інфраструктури. Методика придатна для адаптації в інших країнах або на рівні окремих промислових зон.

Ключові слова: водневі хаби; Hydrogen Hub Potential Index; відновлювані джерела енергії; водні ресурси; інфраструктурний потенціал; зелений водень.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Енергетичний сектор України наразі перебуває на етапі трансформації, що зумовлено як внутрішніми, так і міжнародними чинниками. Сучасна світова тенденція до скорочення викидів парникових газів і переходу на відновлювані джерела енергії робить водень одним із ключових компонентів майбутньої «зеленої» економіки. Водень здатний забезпечити декарбонізацію промисловості, транспорту та енергетики, а також сприяти інтеграції України у європейський енергетичний ринок, де вже активно реалізуються стратегії розвитку водневої економіки.

Україна має значний потенціал відновлюваних ресурсів, який, проте, характеризується суттєвою територіальною нерівномірністю. На сьогодні в країні відсутні системні дослідження, що комплексно оцінюють потенціал регіонів для створення водневих хабів, інтегруючи природні ресурси та інфраструктурні чинники у єдиний кількісний показник. Це обмежує можливості стратегічного планування та інвестиційної підтримки розвитку водневої економіки. Існуючі дослідження переважно зосереджені на окремих компонентах потенціалу, таких як сонячна або вітрова енергія, і недостатньо враховують взаємодію ресурсних та інфраструктурних чинників.

У зв'язку з цим виникає потреба в розробленні системного інтегрального підходу до оцінки потенціалу водневих хабів, який дозволяє визначити пріоритетні регіони для розвитку водневих технологій, виявити їхні сильні та обмежувальні сторони та сформувати науково обґрунтовану основу для державного й інвестиційного планування.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У світовій науковій літературі формування водневих хабів розглядається переважно через призму просторового аналізу, енергетичного моделювання та методів багатокритеріального прийняття рішень. Значна частина досліджень присвячена визначенню оптимальних локацій для виробництва «зеленого» водню з використанням GIS-інструментів і MCDM-підходів. Зокрема, просторове ранжування територій для виробництва водню здійснено для Тунісу [1], Катару [2], Бразилії [3] та Індії [4], а також запропоновано

гібридні моделі нечіткого прийняття рішень для вибору об'єктів водневої інфраструктури [5].

Окремий напрям досліджень стосується вибору майданчиків для водневих експортних терміналів і розвитку портів як центрів «зелених» водневих хабів із урахуванням логістичних та економічних чинників [6, 7]. Паралельно розвиваються роботи, присвячені інтегрованим мультиенергетичним хабам, що поєднують відновлювану генерацію, виробництво водню та системи зберігання енергії [8–10], а також концептуалізації регіональних водневих центрів декарбонізації, зокрема на прикладі штату Техас [11].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Попри активний розвиток досліджень у сфері водневої енергетики та застосування багатокритеріальних підходів до вибору локацій водневих хабів у міжнародній практиці, для України відсутня цілісна регіональна оцінка потенціалу їх формування. Наявні дослідження здебільшого зосереджені на окремих аспектах – аналізі потенціалу сонячної або вітрової енергетики, технічних параметрах електролізу чи розвитку окремих елементів інфраструктури – без інтеграції цих чинників у межах єдиної просторової системи.

Недостатньо дослідженим залишається питання комплексного поєднання природно-ресурсних та інфраструктурних передумов розвитку водневих хабів на рівні областей України. Відсутність узагальненого інтегрального індикатора унеможливорює об'єктивне порівняння регіонів за рівнем їх придатності до виробництва «зеленого» водню та стримує формування просторово обґрунтованих стратегічних рішень.

Таким чином, актуальною науковою задачею є розробка інтегрального індексу потенціалу водневих хабів, який би поєднував показники відновлюваного енергетичного потенціалу, забезпеченості водними ресурсами та рівня розвитку енергетичної й транспортної інфраструктури. Розв'язання цієї задачі дозволяє забезпечити системну регіональну диференціацію території України та сформувати аналітичну основу для стратегічного планування розвитку водневої економіки.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою цього дослідження є комплексна оцінка регіонального потенціалу України для формування водневих хабів за допомогою інтегрального підходу, що враховує природні, ресурсні та інфраструктурні чинники, а також визначення пріоритетних регіонів для розвитку «зеленого» водню та розробка рекомендацій щодо спеціалізації хабів за функціональним призначенням.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для досягнення мети дослідження застосовано інтегральний підхід на основі Hydrogen Hub Potential Index (ННПІ), який передбачає об'єднання чотирьох ключових показників: сонячного потенціалу (GHI, кВт·год/м²/рік), вітрового потенціалу (середня швидкість вітру на висоті 10 м, м/с), забезпеченості водними ресурсами (тис. м³/км²) та рівня розвитку інфраструктури (транспортна, енергетична та промислова складові).

Для забезпечення коректного порівняння регіонів та узгодження показників з різними одиницями вимірювання використано метод нормалізації за схемою min-max, у результаті чого всі змінні приведені до безрозмірного діапазону 0–1. Подальший розрахунок виконувався із застосуванням зваженого адитивного методу, де кожному критерію надано ваговий коефіцієнт відповідно до його ролі у виробництві «зеленого» водню.

Отриманий індекс ННПІ дозволяє здійснити порівняльну оцінку регіонального потенціалу формування водневих хабів в Україні, визначити пріоритетні регіони для їх розвитку та створює методичну основу для стратегічного планування у сфері водневої енергетики. Використання нормалізованих показників і зваженого інтегрального підходу забезпечує методологічну сумісність отриманих результатів із підходами, що застосовуються у країнах Європейського Союзу.

Об'єктом дослідження є регіональний потенціал України щодо формування водневих хабів, який визначається поєднанням природних, ресурсних та інфраструктурних чинників.

Предметом дослідження є методи та результати інтегральної оцінки потенціалу областей України для формування водневих хабів на основі сукупності ключових критеріїв.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Виробництво «зеленого» водню ґрунтується на процесі електролізу води, у ході якого під дією електричного струму молекули води розщеплюються на водень та кисень. Ця технологія дозволяє отримувати водень без використання викопних видів палива, що значно зменшує викиди парникових газів і робить водень «чистим» джерелом енергії. Проте даний технологічний процес є енергоємним і потребує значних обсягів електричної енергії (для виробництва 1 кг водню необхідно приблизно 50–55 кВт·год

електроенергії), що зумовлює доцільність використання відновлюваних джерел енергії як основи для екологічно безпечного виробництва водню. У цьому контексті ключову роль відіграють сонячна та вітрова енергетика, які забезпечують можливість скорочення викидів парникових газів та відповідають цілям кліматичної нейтральності, задекларованим у стратегіях розвитку водневої економіки Європейського Союзу та України.

Для комплексної оцінки регіонального потенціалу водневих хабів України обрано чотири ключові показники.

Першим критерієм обрано сонячний потенціал, який характеризується величиною сумарної сонячної радіації та визначає можливості виробництва електричної енергії за допомогою фотоелектричних установок. Для більшості регіонів України сонячна енергетика є найбільш ефективною у весняно-літній період, коли спостерігається максимальна інсоляція. Другим критерієм є вітровий потенціал, що оцінюється за середньою швидкістю вітру на стандартній висоті та відображає можливості використання вітроенергетичних установок. Вітрова енергетика, на відміну від сонячної, демонструє підвищену ефективність у осінньо-зимовий період, що робить її важливим компенсуючим джерелом електроенергії. Поєднання сонячного та вітрового потенціалу дозволяє врахувати сезонну мінливість виробництва електроенергії та ідентифікувати регіони, де генерація з відновлюваних джерел може бути відносно стабільною протягом року. Саме така стабільність енергопостачання є критично важливою умовою для ефективної роботи електролізерів та безперервного виробництва водню, що визначає конкурентоспроможність майбутніх водневих хабів.

Третім критерієм обрано забезпеченість водними ресурсами, оскільки вода є базовою сировиною для виробництва «зеленого» водню. Незважаючи на те, що обсяги води, необхідні для електролізу, є відносно невеликими порівняно з промисловим або аграрним водокористуванням, регіональні обмеження водних ресурсів можуть суттєво впливати на можливість масштабування водневого виробництва. В умовах кліматичних змін та зростання дефіциту прісної води врахування водної забезпеченості набуває особливої актуальності, оскільки дозволяє уникнути конфліктів між енергетичним, промисловим та побутовим водокористуванням.

Четвертим критерієм є рівень розвитку інфраструктури, який включає наявність та щільність транспортної мережі, доступ до електричних мереж і підстанцій, близькість до промислових центрів та потенційних споживачів водню, а також можливості інтеграції у національні та транскордонні енергетичні системи. Розвинена інфраструктура знижує капітальні та експлуатаційні витрати на створення водневих

На основі проведеного аналізу всіх чотирьох критеріїв сформовано масив вихідних даних для подальших розрахунків інтегрального індексу ННРІ. Для кожної області України визначено репрезентативні значення зазначених показників, що відображають ключові чинники формування регіональних водневих хабів.

Для узагальненої оцінки просторових відмінностей вітрового потенціалу України (I_{wind}) систематизовано результати картографічного аналізу середньорічної швидкості вітру на висоті 10 м (рис. 2). На основі представленої карти виконано орієнтовне усереднення значень швидкості вітру в межах адміністративних областей, що дозволило отримати порівняльні регіональні показники. Слід зазначити, що наведені значення мають узагальнений та оціночний характер, оскільки базуються на інтерполяції метеорологічних даних і відображають переважаючі регіональні тенденції швидкості вітру. У межах окремих областей можливі локальні відмінності, зумовлені особливостями рельєфу, підстильної поверхні, близькістю до водних об'єктів та характером атмосферної

Для оцінки регіональної забезпеченості водними ресурсами (I_{water}) в контексті формування водневих хабів у даному дослідженні використано показник місцевого річкового стоку в розрахунку на 1 км² території області, сформований на основі даних Державного агентства водних ресурсів України. На відміну від сумарного річкового стоку, який включає транзитні води великих річок і формує залежність регіону від водокористування у верхів'ях басейнів або міжрегіональних і міждержавних домовленостей, місцевий стік відображає обсяг водних ресурсів, що формується безпосередньо в межах області за рахунок атмосферних опадів та внутрішньої гідромережі. Такий підхід дозволяє оцінити автономність потенційного водневого хабу та зменшити ризики, пов'язані з зовнішніми водними обмеженнями.

Інфраструктурний потенціал є одним із ключових критеріїв визначення доцільності розміщення водневих хабів, оскільки саме він значною мірою визначає економічну ефективність, технічну здійсненність та інвестиційну привабливість проєктів з виробництва, зберігання та транспортування зеленого водню. Навіть за наявності значного природно-ресурсного потенціалу (сонячної радіації, вітрових ресурсів і водозабезпеченості) недостатній рівень розвитку інфраструктури може суттєво обмежувати можливість практичної реалізації водневих проєктів.



Джерело: Атлас ВДЕ України, 2020.

Для забезпечення комплексності оцінки інфраструктурний критерій було поділено на чотири основні складові:

1. *Рівень розвитку транспортної інфраструктури (I)*. До цієї складової належить щільність автомобільних і залізничних шляхів, наявність міжнародних транспортних коридорів, портів та логістичних вузлів. Регіони з розвинутою транспортною мережею мають конкурентну перевагу завдяки можливості швидкого та економічно доцільного транспортування водню як на внутрішній ринок, так і на експорт.

2. *Доступ до електроенергетичної інфраструктури (II)*. Виробництво зеленого водню потребує стабільного доступу до електричних мереж, підстанцій та генерувальних потужностей. Важливим є також рівень розвитку мережевої інфраструктури високої та надвисокої напруги, що дозволяє інтегрувати відновлювані джерела енергії та забезпечувати балансування енергосистеми. Регіони з розвинутою енергетичною інфраструктурою мають нижчі капітальні витрати на підключення електролітичних установок.

3. *Близькість до промислових центрів і потенційних споживачів водню (III)*. Промислові центри (металургія, хімічна промисловість, нафтопереробка, енергетика) є потенційними великими споживачами водню. Просторова близькість до таких центрів зменшує витрати на транспортування, спрощує створення локальних водневих кластерів та сприяє формуванню регіональних ланцюгів доданої вартості.

4. *Можливості інтеграції у національні та транскордонні енергетичні системи (IV)*. З огляду на стратегічну орієнтацію України на інтеграцію до європейського енергетичного простору, важливим є потенціал

регіонів щодо підключення до міжнародних енергетичних мереж, газотранспортної системи, портової інфраструктури та майбутніх водневих коридорів. Регіони, що мають вигідне географічне положення та доступ до транскордонної інфраструктури, можуть відігравати роль експортно-орієнтованих водневих хабів.

Оцінювання інфраструктурного потенціалу областей України здійснювалося із застосуванням методу експертних оцінок, що дозволяє інтегрувати кількісні статистичні дані та якісні характеристики, які складно формалізувати. Кожна складова потенціалу оцінювалася за п'ятибальною шкалою (1-5):

1 – дуже низький рівень розвитку, суттєві обмеження для створення водневих хабів;

2 – низький рівень розвитку, інфраструктура фрагментарна;

3 – середній рівень розвитку, можливе створення водневих хабів за умови модернізації;

4 – високий рівень розвитку, сприятливі умови для розміщення хабів;

5 – дуже високий рівень розвитку, повна готовність до інтеграції водневих технологій.

Оцінювання базувалося на аналізі статистичних і картографічних даних, офіційних звітів, просторових схем транспортної та енергетичної інфраструктури, а також експертних суджень щодо функціональної придатності регіонів для розміщення водневих хабів.

Інтегральне значення інфраструктурного потенціалу (I_{inf}) регіону визначалося як середньоарифметичне значення бальних оцінок за всіма складовими. Результати експертного оцінювання для кожної області України наведено в табл. 1.

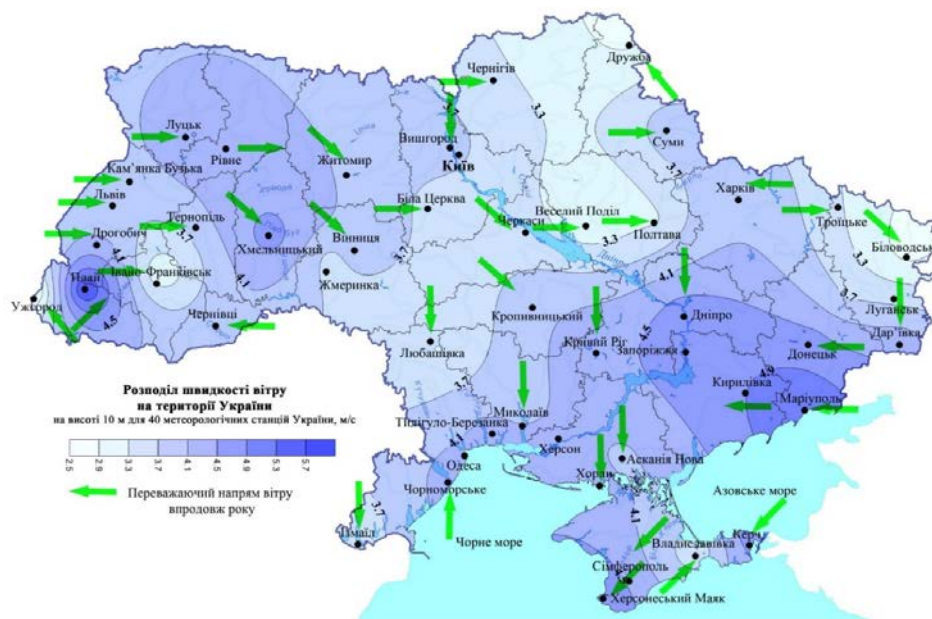


Рис. 2. Розподіл швидкості вітру на території України

Джерело: Атлас ВДЕ України, 2020.

Таблиця 1. Експертна оцінка інфраструктурного потенціалу областей України

Область	Складові потенціалу:				Інтегральне значення потенціалу (I_{int})
	I	II	III	IV	
Вінницька	4	4	2	4	3,5
Волинська	4	3	2	4	3,25
Дніпропетровська	5	5	5	4	4,75
Донецька	3	4	5	3	3,75
Житомирська	3	3	2	3	2,75
Закарпатська	2	2	2	5	2,75
Запорізька	4	5	4	3	4,0
Івано-Франківська	3	4	3	5	3,75
Київська	5	5	4	2	4,0
Кіровоградська	4	4	2	4	3,5
Луганська	2	2	3	2	2,25
Львівська	4	4	3	5	4,0
Миколаївська	4	4	3	4	3,75
Одеська	5	4	3	5	4,25
Полтавська	4	4	3	4	3,75
Рівненська	3	5	2	3	3,25
Сумська	3	3	3	2	2,75
Тернопільська	3	3	2	3	2,75
Харківська	4	4	4	3	3,75
Херсонська	3	3	2	3	2,75
Хмельницька	3	5	2	3	3,25
Черкаська	3	3	3	3	3,0
Чернівецька	2	2	2	3	2,25
Чернігівська	3	2	2	2	2,25
АР Крим	2	2	2	2	2,0

Отримані результати свідчать, що рівень розвитку інфраструктури значно варіюється між областями України. Найвищі значення середньоарифметичного інфраструктурного балу отримали Київська, Дніпропетровська, Харківська та Одеська області, що зумовлено високою щільністю транспортної мережі, розвиненою енергетичною системою, наявністю великих промислових центрів та можливістю інтеграції у національні та транскордонні енергетичні системи. Середні показники спостерігаються у областях центрального та південного регіону, а найнижчі – у західних та північних областях із менш розвиненою транспортною та енергетичною інфраструктурою.

У табл. 2 наведено узагальнені значення сонячного потенціалу, вітрового потенціалу, забезпеченості водними ресурсами та інфраструктурного потенціалу для всіх областей України. Крім того, у таблиці зазначено мінімальні та максимальні значення кожного критерію, які будуть використані для подальшого розрахунку інтегрального індексу ННРІ.

Для забезпечення коректного порівняльного аналізу областей України та інтеграції різнорідних показників у єдиний індекс вихідні дані, наведені в табл. 2, було приведено до зіставного вигляду шляхом мінімальної нормалізації. Нормалізація здійснювалася шляхом перетворення всіх показників у безрозмірні величини в діапазоні від 0 (найменший потенціал) до 1 (найвищий потенціал), що дозволяє усунути вплив різних одиниць вимірювання та масштабів значень і забезпечує коректне агрегування критеріїв у межах інтегрального індексу.

Нормалізацію показників виконано за допомогою методу лінійного масштабування, який широко

Таблиця 2. Вихідні значення критеріїв для оцінювання потенціалу формування водневих хабів

Область	I_{sun} кВт·год/м²·рік	I_{wind} м/с	I_{water} тис. м³/км²	I_{inf} бали
Вінницька	1135	3,5	93,2	3,5
Волинська	1091	3,3	107,9	3,25
Дніпропетровська	1226	4,3	27,3	4,75
Донецька	1219	4,7	38,5	3,75
Житомирська	1110	3,2	105,4	2,75
Закарпатська	1153	3,4	618,7	2,75
Запорізька	1256	4,5	22,8	4,0
Івано-Франківська	1073	3,9	330,2	3,75
Київська	1132	3,2	70,6	4,0
Кіровоградська	1205	3,7	38,6	3,5
Луганська	1219	4,3	54,7	2,25
Львівська	1066	3,5	225,7	4,0
Миколаївська	1296	4,1	23,2	3,75
Одеська	1296	4,2	10,5	4,25
Полтавська	1186	3,4	67,4	3,75
Рівненська	1099	3,3	115,9	3,25
Сумська	1153	3,3	102,9	2,75
Тернопільська	1091	3,6	131,2	2,75
Харківська	1190	3,8	52,9	3,75
Херсонська	1296	4,3	38,6	2,75
Хмельницька	1117	3,7	103,9	3,25
Черкаська	1183	3,5	48,3	3,0
Чернівецька	1073	3,6	151,8	2,25
Чернігівська	1106	3,1	108,2	2,25
АР Крим	1305	4,6	33,7	2,0
I_{min}	1066	3,1	10,5	2,0
I_{max}	1305	4,7	618,7	4,75

використовується в інтегральних оцінках регіонального потенціалу, за формулою:

$$I_{norm_i} = \frac{I_i - I_{min}}{I_{max} - I_{min}}, \quad (1)$$

I_{norm_i} – нормалізоване значення показника для i -тої області; I_i – вихідне значення показника для i -тої області; I_{min} , I_{max} – мінімальне та максимальне значення показника серед усіх областей України відповідно.

На основі нормалізованих значень чотирьох критеріїв для кожної області України розраховано інтегральний індекс ННРІ, який відображає узагальнений рівень придатності регіону для формування водневих хабів та розраховується за формулою:

$$I_{NNPI_i} = I_1 \cdot w_1 + I_2 \cdot w_2 + I_3 \cdot w_3 + I_4 \cdot w_4, \quad (2)$$

I_{NNPI_i} – інтегральний індекс потенціалу водневого хабу для i -тої області; I_1 – нормалізоване значення сонячного потенціалу; I_2 – нормалізоване значення вітрового потенціалу; I_3 – нормалізоване значення забезпеченості водними ресурсами; I_4 – нормалізоване значення інфраструктурного потенціалу; w_1 , w_2 , w_3 , w_4 – вагові коефіцієнти відповідних критеріїв.

Індекс ННРІ побудовано як зважену суму нормалізованих значень ключових критеріїв, що дозволяє врахувати їхню відносну значущість у процесі виробництва «зеленого» водню та формування відповідної інфраструктури.

Вагові коефіцієнти окремих складових інтегрального індексу ННРІ визначено з урахуванням технологічних особливостей виробництва «зеленого» водню, ролі відповідних чинників у формуванні водневих хабів, а також узагальнення підходів, представлених у сучасних наукових публікаціях з проблематики водневої енергетики.

Таблиця 3. Інтегральна оцінка регіонального потенціалу формування водневих хабів (ННРІ)

Область	Нормалізовані значення потенціалів:				Індекс $I_{\text{ННРІ}}$
	I_1	I_2	I_3	I_4	
Вінницька	0,289 (Н)	0,250 (Н)	0,136 (Н)	0,545 (С)	0,298 (Н)
Волинська	0,105 (Н)	0,125 (Н)	0,160 (Н)	0,455 (С)	0,192 (Н)
Дніпропетровська	0,670 (В)	0,750 (В)	0,028 (Н)	1,0 (В)	0,632 (С)
Донецька	0,640 (С)	1,0 (В)	0,046 (Н)	0,636 (С)	0,628 (С)
Житомирська	0,184 (Н)	0,063 (Н)	0,156 (Н)	0,273 (Н)	0,160 (Н)
Закарпатська	0,364 (С)	0,188 (Н)	1,0 (В)	0,273 (Н)	0,420 (С)
Запорізька	0,795 (В)	0,875 (В)	0,020 (Н)	0,727 (В)	0,650 (С)
Івано-Франківська	0,029 (Н)	0,313 (Н)	0,526 (С)	0,636 (С)	0,335 (С)
Київська	0,276 (Н)	0,063 (Н)	0,099 (Н)	0,727 (В)	0,267 (Н)
Кіровоградська	0,582 (С)	0,375 (С)	0,046 (Н)	0,545 (С)	0,405 (С)
Луганська	0,640 (С)	0,750 (В)	0,073 (Н)	0,091 (Н)	0,450 (С)
Львівська	0 (Н)	0,250 (Н)	0,354 (С)	0,727 (В)	0,291 (Н)
Миколаївська	0,962 (В)	0,625 (С)	0,021 (Н)	0,636 (С)	0,607 (С)
Одеська	0,962 (В)	0,688 (В)	0 (Н)	0,818 (В)	0,659 (С)
Полтавська	0,502 (С)	0,188 (Н)	0,094 (Н)	0,636 (С)	0,353 (С)
Рівненська	0,138 (Н)	0,125 (Н)	0,173 (Н)	0,455 (С)	0,205 (Н)
Сумська	0,364 (С)	0,125 (Н)	0,152 (Н)	0,273 (Н)	0,232 (Н)
Тернопільська	0,105 (Н)	0,313 (Н)	0,198 (Н)	0,273 (Н)	0,220 (Н)
Харківська	0,519 (С)	0,438 (С)	0,070 (Н)	0,636 (С)	0,428 (С)
Херсонська	0,962 (В)	0,750 (В)	0,046 (Н)	0,273 (Н)	0,577 (С)
Хмельницька	0,213 (Н)	0,375 (С)	0,154 (Н)	0,455 (С)	0,298 (Н)
Черкаська	0,490 (С)	0,250 (Н)	0,062 (Н)	0,364 (С)	0,307 (Н)
Чернівецька	0,029 (Н)	0,313 (Н)	0,232 (Н)	0,091 (Н)	0,167 (Н)
Чернігівська	0,167 (Н)	0 (Н)	0,161 (Н)	0,091 (Н)	0,100 (Н)
АР Крим	1,0 (В)	0,938 (В)	0,038 (Н)	0 (Н)	0,589 (С)

Примітки: Категорія потенціалу: Н – низький; С – середній; В – високий.

Найвищі вагові коефіцієнти надано показникам сонячного та вітрового потенціалу ($w_1=w_2=0,3$), оскільки саме доступ до відновлюваної електроенергії є ключовою передумовою ефективного функціонування електролітичних установок. Сонячна енергетика забезпечує значні обсяги генерації в літній період, тоді як вітрова енергетика відіграє комплементарну роль, підвищуючи рівень генерації в осінньо-зимовий період. Поєднання цих джерел дозволяє зменшити сезонну варіабельність виробництва електроенергії та підвищити стабільність роботи водневих хабів.

Показнику забезпеченості водними ресурсами надано вагу $w_3=0,2$, що відображає його важливість як необхідної сировинної умови для процесу електролізу. Водночас, у більшості регіонів України водні ресурси не є таким жорстким обмежувальним фактором, як доступ до відновлюваної електроенергії, що зумовило дещо нижчу вагу цього критерію.

Інфраструктурний потенціал також оцінено ваговим коефіцієнтом $w_4=0,2$, оскільки рівень розвитку транспортної, енергетичної та промислової інфраструктури визначає можливість інтеграції водневих хабів у регіональні та міжнародні енергетичні ланцюги, впливає на рівень капітальних і операційних витрат та є критично важливим на етапі масштабування і комерціалізації водневих проєктів.

Для спрощення інтерпретації результатів та проведення порівняльного аналізу кожній області присвоєно категорію потенціалу формування водневих хабів на основі нормалізованих значень критеріїв та інтегрального індексу: низький потенціал (0–0,333), середній (0,334–0,666) та високий (0,667–1,0). Такий підхід дозволяє виділити регіони з найбільш сприятливими умовами для розвитку водневої економіки,

а також визначити області, де потенціал є обмеженим і може потребувати додаткових заходів чи інвестицій. Категорії потенціалу застосовуються як до окремих нормалізованих показників, так і до інтегрального індексу ННРІ, що забезпечує уніфіковану систему оцінки та спрощує порівняльний аналіз областей України.

Отримані нормалізовані значення критеріїв, інтегральний індекс ННРІ та категорії потенціалу наведено у табл. 3, яка слугує основою для подальшого ранжування областей України та виділення регіонів із високим, середнім і низьким потенціалом розвитку водневих хабів.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Результати інтегральної оцінки регіонального потенціалу формування водневих хабів в Україні засвідчили суттєву просторову диференціацію як окремих складових, так і їх сукупного впливу на значення індексу ННРІ. Відповідно до встановлених порогових значень, усі регіони України класифіковані на три категорії потенціалу:

– низький потенціал – області з обмеженими природними та інфраструктурними ресурсами, де створення водневих хабів є економічно неефективним без значних інвестицій;

– середній потенціал – регіони із середнім поєднанням відновлюваних джерел енергії, водних ресурсів та інфраструктури, що можуть виконувати роль ресурсних чи промислових хабів у рамках національної водневої стратегії;

– високий потенціал – області, де природні та інфраструктурні умови максимально сприятливі для створення водневих хабів. Слід зазначити, що за поточними розрахунками жодна область України не

потрапляє до цієї категорії, що підкреслює необхідність оптимізації розташування та розвитку водневих потужностей.

Найвищі значення інтегрального індексу зафіксовано в південних та південно-східних регіонах, зокрема в Одеській, Запорізькій, Дніпропетровській та Миколаївській областях. Для цих територій характерне поєднання значного сонячного та вітрового потенціалів із відносно розвиненою транспортною та енергетичною інфраструктурою. Водночас навіть у найбільш перспективних регіонах спостерігаються обмежувальні чинники. Так, в Одеській області, яка має найвище значення ННРІ, високі показники відновлюваних ресурсів та інфраструктури поєднуються з низькою оцінкою забезпеченості водними ресурсами, що знижує інтегральний показник та ускладнює реалізацію масштабних електролітичних проєктів. Подолання цього обмеження можливе шляхом використання транзитного стоку великих річок, зокрема Дніпра, Дністра та Дунаю, розвитку систем міжбасейнового перерозподілу води, а також упровадження технологій опріснення води, що є особливо актуальним для південних регіонів із високим потенціалом відновлюваної генерації.

Центральні та частина західних областей переважно характеризуються середнім рівнем інтегрального потенціалу. Для цих регіонів типовим є помірний розвиток інфраструктури за відносно нижчих показників одного або декількох природних компонентів. Зокрема, у низці областей зафіксовано достатній рівень інфраструктурного забезпечення, однак обмежений сонячний або вітровий потенціал стримує зростання інтегрального індексу.

Північні та окремі поліські регіони демонструють переважно низький рівень ННРІ, що обумовлено сукупністю менш сприятливих кліматичних умов для генерації відновлюваної енергії та недостатнім розвитком інфраструктурних складових. Навіть за відносно кращих показників забезпеченості водними ресурсами ці регіони не формують конкурентної переваги без розвитку енергетичної та транспортної інфраструктури.

Аналіз структури складових індексу ННРІ дозволяє не лише ранжувати області за рівнем інтегрального потенціалу, але й окреслити можливу функціональну спеціалізацію майбутніх водневих хабів. Південні регіони (Одеська, Миколаївська, Херсонська області), що характеризуються високими показниками сонячного та вітрового потенціалу в поєднанні з розвиненою портовою інфраструктурою, можуть розглядатися як експортно-орієнтовані водневі хаби з фокусом на виробництві та постачанні водню або його похідних (аміак, синтетичні палива) на зовнішні ринки. Індустріально розвинені регіони (Дніпропетровська, Донецька, Запорізька, Харківська області) з потужною енергетичною та транспортною

інфраструктурою мають передумови для формування промислових водневих кластерів, орієнтованих на декарбонізацію металургії, хімічної промисловості та енергетики. Західні області (Львівська, Івано-Франківська, Закарпатська, Чернівецька), які мають вигідне географічне положення щодо транскордонної інтеграції, можуть виконувати функцію транзитних або інтеграційних хабів у контексті майбутнього розвитку міжнародних водневих коридорів. Регіони з достатнім інфраструктурним забезпеченням, але помірним ресурсним потенціалом (Полтавська, Вінницька, Кіровоградська, Харківська області), можуть орієнтуватися на формування внутрішніх регіональних хабів із фокусом на забезпеченні локального попиту.

Загалом результати дослідження підтверджують, що визначальним чинником формування високого інтегрального потенціалу є не максимізація окремого ресурсу, а збалансованість чотирьох складових. Просторова неоднорідність цих компонентів зумовлює необхідність диференційованої регіональної політики, спрямованої на усунення вузьких місць і формування спеціалізованих моделей розвитку водневих хабів залежно від ресурсної структури кожної області.

ВИСНОВКИ

У статті здійснено інтегральну оцінку просторового потенціалу розвитку водневої енергетики в регіонах України на основі розрахунку індексу Hydrogen Hub Potential Index (ННРІ), який поєднує показники відновлюваного енергетичного потенціалу, забезпеченості водними ресурсами та інфраструктурної готовності.

Отримані результати свідчать про значну територіальну диференціацію передумов формування водневих хабів. Найвищі значення індексу характерні для регіонів із поєднанням високого потенціалу сонячної та вітрової енергетики, розвиненої транспортної інфраструктури та сприятливого географічного положення. Водночас частина областей демонструє обмеження, пов'язані з дефіцитом місцевих водних ресурсів або недостатнім рівнем інфраструктурної підготовленості.

Важливим результатом дослідження стало визначення можливої функціональної спеціалізації потенційних водневих хабів.

Методичною перевагою запропонованого підходу є можливість адаптації індексу до різних сценаріїв розвитку, зокрема з урахуванням альтернативних показників водозабезпеченості (включення сумарного річкового стоку) та варіації вагових коефіцієнтів залежно від стратегічних пріоритетів державної політики.

Практичне значення дослідження полягає у формуванні аналітичної основи для просторового планування розвитку водневої економіки України, визначення пріоритетних регіонів для пілотних проєктів та інтеграції національної інфраструктури до європейського водневого простору.

REFERENCES

- [1] Rekik, S., & El Alimi, S. (2024). A spatial ranking of optimal sites for solar-driven green hydrogen production using GIS and multi-criteria decision-making approach: A case of Tunisia. *Energy Exploration & Exploitation*, 42(6), 2150-2190. <https://doi.org/10.1177/01445987241268072>
- [2] Jahangiri, M., Shamsabadi, A. A., Mostafaeipour, A., Rezaei, M., Yousefi, Y., & Pomares, L. M. (2020). Using fuzzy MCDM technique to find the best location in Qatar for exploiting wind and solar energy to generate hydrogen and electricity. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(27), 13862-13875. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.101>
- [3] Leal, J. I., Tofoli, F. L., Melo, F. D. C., & Leão, R. P. S. (2025). Site suitability analysis for green hydrogen production using multi-criteria decision-making methods: A case study in the state of Ceará, Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, 97, 406-418. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.427>
- [4] Thekkethil, R., Ananthakumar, M. R., Kumar, D., Srinivasan, V., & Kalshetty, M. (2024). Green hydrogen hubs in India: A first order analytical hierarchy process for site selection across states. *International Journal of Hydrogen Energy*, 63, 767-774. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.268>
- [5] Li, L., Wang, S., Zhang, S., Liu, D., & Ma, S. (2023). The hydrogen energy infrastructure location selection model: A hybrid fuzzy decision-making approach. *Sustainability*, 15(13), Article 10195. <https://doi.org/10.3390/su151310195>
- [6] Hirst, J., & Chatto, M. (2022). Hydrogen export terminal site selection considerations. In *Australasian Coasts & Ports 2021: Te Oranga Takutai, Adapt and Thrive*. New Zealand Coastal Society. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.259639100729200>
- [7] Notteboom, T., & Haralambides, H. (2023). Seaports as green hydrogen hubs: Advances, opportunities and challenges in Europe. *Maritime Economics & Logistics*, 25(1), 1-27. <https://doi.org/10.1057/s41278-023-00253-1>
- [8] Kumar, S., Arzaghi, E., Baalisampang, T., Garaniya, V., & Abbassi, R. (2023). Insights into decision-making for offshore green hydrogen infrastructure developments. *Process Safety and Environmental Protection*, 174, 805-817. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.04.042>
- [9] Baimbetov, D., Salem, M., Syrlybekkyzy, S., Ermek Talantovich, N., Muralev, Y., & Alhuyi Nazari, M. (2025). Optimal scheduling of a multi-energy hub with renewables, hydrogen vehicles, and storage systems. *IEEE Access*, 13, 161709-161728. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3609439>
- [10] Ahmed, M., Liu, M., Meegahapola, L., & Bu, S. (2026). Coordinated frequency regulation scheme for renewable integrated green hydrogen hubs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 216, Article 153892. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2026.153892>
- [11] Lin, H., Hernandez Gonzalez, A., Nielsen, C. P., & McElroy, M. B. (2024). Texas: A green hydrogen hub to decarbonize the United States and beyond. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(50), Article e2321347121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2321347121>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Rekik, S., & El Alimi, S. (2024). A spatial ranking of optimal sites for solar-driven green hydrogen production using GIS and multi-criteria decision-making approach: A case of Tunisia. *Energy Exploration & Exploitation*, 42(6), 2150-2190. <https://doi.org/10.1177/01445987241268072>
- [2] Jahangiri, M., Shamsabadi, A. A., Mostafaeipour, A., Rezaei, M., Yousefi, Y., & Pomares, L. M. (2020). Using fuzzy MCDM technique to find the best location in Qatar for exploiting wind and solar energy to generate hydrogen and electricity. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(27), 13862-13875. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.101>
- [3] Leal, J. I., Tofoli, F. L., Melo, F. D. C., & Leão, R. P. S. (2025). Site suitability analysis for green hydrogen production using multi-criteria decision-making methods: A case study in the state of Ceará, Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, 97, 406-418. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.427>
- [4] Thekkethil, R., Ananthakumar, M. R., Kumar, D., Srinivasan, V., & Kalshetty, M. (2024). Green hydrogen hubs in India: A first order analytical hierarchy process for site selection across states. *International Journal of Hydrogen Energy*, 63, 767-774. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.268>
- [5] Li, L., Wang, S., Zhang, S., Liu, D., & Ma, S. (2023). The hydrogen energy infrastructure location selection model: A hybrid fuzzy decision-making approach. *Sustainability*, 15(13), Article 10195. <https://doi.org/10.3390/su151310195>
- [6] Hirst, J., & Chatto, M. (2022). Hydrogen export terminal site selection considerations. In *Australasian Coasts & Ports 2021: Te Oranga Takutai, Adapt and Thrive*. New Zealand Coastal Society. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.259639100729200>
- [7] Notteboom, T., & Haralambides, H. (2023). Seaports as green hydrogen hubs: Advances, opportunities and challenges in Europe. *Maritime Economics & Logistics*, 25(1), 1-27. <https://doi.org/10.1057/s41278-023-00253-1>
- [8] Kumar, S., Arzaghi, E., Baalisampang, T., Garaniya, V., & Abbassi, R. (2023). Insights into decision-making for offshore green hydrogen infrastructure developments. *Process Safety and Environmental Protection*, 174, 805-817. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.04.042>
- [9] Baimbetov, D., Salem, M., Syrlybekkyzy, S., Ermek Talantovich, N., Muralev, Y., & Alhuyi Nazari, M. (2025). Optimal scheduling of a multi-energy hub with renewables, hydrogen vehicles, and storage systems. *IEEE Access*, 13, 161709-161728. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3609439>
- [10] Ahmed, M., Liu, M., Meegahapola, L., & Bu, S. (2026). Coordinated frequency regulation scheme for renewable integrated green hydrogen hubs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 216, Article 153892. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2026.153892>
- [11] Lin, H., Hernandez Gonzalez, A., Nielsen, C. P., & McElroy, M. B. (2024). Texas: A green hydrogen hub to decarbonize the United States and beyond. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(50), Article e2321347121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2321347121>

© Кулікова Д. В.

Дата першого надходження статті до видання: 20.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)