

ВИСНОВОК

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації
Толстова Дмитра Вадимовича
на тему «ІНТЕГРАЦІЯ ЕЛЕКТРОЛІЗНОГО ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ ДО
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ
ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ»,
що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії
з галузі знань 14 – Електрична інженерія
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Дисертаційну роботу Толстова Дмитра Вадимовича виконано у відділі трансформації структури паливно-енергетичного комплексу Інституту загальної енергетики НАН України.

Наукові результати дисертації розглянуто на засіданні розширеного наукового семінару відділу трансформації структури паливно-енергетичного комплексу Інституту загальної енергетики НАН України (протокол № 6 від 02.07.2026).

Актуальність теми дослідження

Глобальні тренди декарбонізації енергетики та зобов'язання України щодо переходу до кліматично нейтральної економіки зумовлюють необхідність інтеграції новітніх технологій виробництва та зберігання енергії. У цих умовах особливої актуальності набуває проблема впровадження електролізних водневих технологій, які здатні виступати сполучним елементом між стохастичною генерацією відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та енергоємними секторами промисловості. Водень трансформується з промислової сировини у гнучкий енергоресурс, що дозволяє вирішувати задачі балансування електроенергетичної системи та декарбонізації важкої індустрії.

Значні напрацювання таких науковців, як Дубовський С. В., Каплін М. І., Кириленко О. В., Кулик М. М., Стогній Б. С. та інші, у сфері системних досліджень та оптимізації ПЕК України формують теоретичну основу для аналізу функціонування та розвитку електроенергетичних систем, однак потребують подальшого розвитку в частині моделювання інтегрованих систем типу «енергетика–промисловість». У контексті глобальної декарбонізації, що активно підтримується аналітичними звітами Міжнародного енергетичного агентства (IEA), Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA) та Європейського водневого альянсу (ECH2A), водень розглядається як універсальний енергетичний носій, здатний поєднати електроенергетику з енергоємними галузями промисловості. Відповідно, наукові дослідження в Україні розвиваються у напрямі формування повного технологічного ланцюга використання водню. Зокрема, у роботах С. О. Кудрі та науковців Інституту відновлюваної енергетики НАН України обґрунтовано можливість виробництва «зеленого» водню на основі відновлюваних джерел енергії, його використання як засобу акумулювання енергії та інструменту балансування електроенергетичної системи. Водночас дослідження Інституту газу НАН України, зокрема І. М. Карпа та інших авторів, зосереджені на питаннях транспортування, зберігання та використання водню, включаючи можливість його змішування з природним газом і використання існуючої газотранспортної інфраструктури, при цьому визначено низку технічних обмежень, зокрема водневу корозію матеріалів та підвищені вимоги до безпеки. Таким чином, поєднання результатів досліджень у сфері виробництва водню та його інфраструктурної інтеграції формує передумови для впровадження водневих

технологій у промисловість. У цьому контексті особливого значення набувають дослідження Інституту загальної енергетики НАН України, зокрема В. В. Станиціної, які демонструють високу залежність виробництва аміаку та азотних добрив від природного газу, частка якого у структурі витрат досягає 70–85 %, що обґрунтовує доцільність заміщення викопного палива воднем у процесах декарбонізації енергоємних галузей та підтверджує необхідність розробки комплексних балансово-оптимізаційних моделей інтеграції водню в енергетичну систему України.

Для України водневі технології є стратегічним орієнтиром, що закріплено у Водневій стратегії України та оновленій Енергетичній стратегії до 2050 року. Впровадження РЕМ-електролізерів як високотехнологічних споживачів дозволить мінімізувати небаланси ВДЕ та знизити навантаження на ДП «Гарантований покупець». Проте, масове впровадження електролізу створює нові виклики: зростання сумарної електроємності економіки та дефіцит водних ресурсів.

Проте недостатньо дослідженими залишаються питання:

- впливу електролізного навантаження на режими роботи електроенергетичної системи;
- визначення необхідних обсягів генерації ВДЕ для виробництва водню;
- врахування ресурсних обмежень та електроємності енергоємних галузей;
- моделювання взаємодії системи «ВДЕ – електроліз – промисловість» в умовах ринку електричної енергії України.

Дисертаційне дослідження, спрямоване на розроблення моделей інтеграції водневих технологій, що враховують міжпродуктові зв'язки та дозволяють прогнозувати потреби в ресурсах для металургії, хімії та виробництва будматеріалів та обсягах необхідної генерації ВДЕ для забезпечення виробництва водню, є актуальним, оскільки дає змогу обґрунтувати параметри енергетичного переходу та забезпечити енергетичну безпеку країни в умовах лібералізованого ринку.

Мета та завдання дослідження

Метою дослідження

Метою дисертаційного дослідження є розроблення підсистеми інтеграції електролізного виробництва водню в електроенергетичні системи з високою часткою відновлюваних джерел енергії для визначення енергетично та економічно доцільних обсягів ВДЕ-генерації, електроспоживання водневої підсистеми та змін енергетичного балансу з урахуванням стохастичного характеру відновлюваної генерації, ресурсних обмежень і ринкових умов функціонування виробників електричної енергії

Для досягнення поставленої мети дослідження було сформульовано та вирішено

1. Дослідження режимів роботи електролізних установок як гнучкого навантаження для компенсації погодинних небалансів генерації ВДЕ та оцінка впливу їх інтеграції на економічні результати балансуючих груп «Гарантованого покупця».
2. Визначення перспективних потреб енергоємних галузей економіки України у водні як ресурсі декарбонізації з урахуванням міжпродуктових та енергетичних зв'язків.
3. Визначення впливу ресурсних обмежень та зміни електроємності промисловості на сценарії декарбонізації енергоємних галузей (сталь, аміак, клінкер).
4. Визначення ціни електроенергії для прямої закупівлі електролізерами у ВДЕ-генерації, що базується на умовах фінансової беззбитковості виходу станцій з балансуєючої групи «Гарантованого покупця».

5. Визначення техніко-економічних показників виробництва водню, зокрема рівня собівартості водню (LCOH), для різних сценаріїв інтеграції електролізних технологій, з урахуванням витрат на зберігання та транспортування.

6. Розроблення моделі для оцінки взаємодії електроенергетичної системи, електролізних водневих установок та енергоємних галузей промисловості на основі балансового підходу.

7. Визначення необхідних обсягів споживання додаткової електричної енергії для забезпечення необхідних обсягів виробництва водню.

Об'єкт дослідження – інтеграція електролізного виробництва водню в електроенергетичні системи.

Предмет дослідження – моделі та методи визначення доцільних обсягів відновлюваної генерації й електроспоживання електролізних установок під час інтеграції виробництва водню в електроенергетичні системи з урахуванням енергетичного балансу, стохастичності ВДЕ-генерації, ресурсних обмежень і ринкових умов.

Наукова новизна отриманих результатів, що розроблені дисертантом особисто

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

1. Розроблено нову модель виробництва, перетворення та споживання водню в моделі енергозабезпечення країни, яка, на відміну від існуючих моделей водневих технологій, враховує взаємозв'язок між потребою у виробництві водню, необхідними обсягами виробництва електричної енергії відновлюваними джерелами та змінами обсягів енергозабезпечення країни іншими енергоносіями. Це дозволило визначити доцільні обсяги виробництва електричної енергії для забезпечення системи виробництва водню та відповідні зміни загального енергетичного балансу країни.

2. Уперше запропоновано представлення електроенергії ВДЕ в моделі енергозабезпечення країни у вигляді декількох окремих ресурсних потоків: електроенергії поза балансуєчою групою ДП «Гарантований покупець» від СЕС та ВЕС та електроенергії позитивних небалансів – із визначенням їх економічних критеріїв вартості, що дозволило формалізувати ціну електроенергії як внутрішній параметр балансово-оптимізаційної моделі та підвищити точність оцінювання економічної ефективності виробництва водню і мінімізації LCOH.

3. Уперше в моделі енергозабезпечення країни введено вузол транспортування водню з урахуванням споживання електричної енергії на процеси транспортування та перетворення, що дало змогу підвищити точність оцінювання сумарних енергетичних витрат у ланцюгу «виробництво – зберігання–транспортування–споживання водню» та їх впливу на баланс електроенергетичної системи.

4. Набули подальшого розвитку підходи до оцінювання техніко-економічної ефективності інтеграції водневих технологій у ринкові механізми електроенергетики, зокрема моделі визначення собівартості водню за умови фінансової беззбитковості реалізації електричної енергії ВДЕ генерації поза балансуєчою групи «Гарантованого покупця».

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Тематика та розділи цієї дисертації роботи входили до складу наукових робіт, які були виконані в Інституті загальної енергетики Національної академії наук (НАН)

України. Отримані результати досліджень здобувача увійшли до складу наукових робіт:

- «Прогнозування обсягів вуглезабезпечення України відповідно до структури її загального енергетичного балансу» (КПКВК 6541030, № 0123U100309, шифр «Прогноз»);
- «Дослідження функціонування об'єктів розподіленої генерації ВДЕ із системами акумулювання енергії на базі метеорологічних даних» (№ 0124U002308).

Практична цінність отриманих результатів

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання розроблених підходів та отриманих результатів для обґрунтування параметрів впровадження водневих технологій у сучасних умовах функціонування ринку електричної енергії України.

Розроблений підхід до визначення обсягів виробництва водню та відповідних їм обсягів встановленої потужності відновлюваних джерел енергії доцільно використовувати при плануванні розвитку ВДЕ-генерації з урахуванням потреб водневої економіки.

Результати оцінки режимів роботи електролізних установок як гнучкого навантаження можуть бути використані для оптимізації роботи балансуючих груп та зменшення небалансів відновлюваної генерації.

Удосконалений підхід до визначення собівартості водню (LCOH), який враховує витрати на електроенергію, зберігання, транспортування та доцільно застосовувати при обґрунтуванні інвестицій у водневі проекти та оцінці їх економічної ефективності.

Розроблено методичний підхід до формування ціни електричної енергії, що використовується для виробництва водню методом електролізу, який, на відміну від існуючих підходів, враховує економічні умови функціонування виробників електроенергії з відновлюваних джерел енергії та забезпечує створення економічно обґрунтованих комерційних моделей їх взаємодії зі споживачами водню.

Результати дослідження доцільно використовувати при розробці стратегій декарбонізації енергоємних галузей промисловості, зокрема виробництва аміаку, металургії та виробництва будівельних матеріалів.

Публікації результатів дисертації

Основні наукові результати, отримані в процесі виконання дисертаційного дослідження, оприлюднені в наукових виданнях і апробовані на міжнародних науково-практичних конференціях, що відповідає вимогам до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 9 наукових праць, з них: 6 статей у наукових фахових виданнях України, включених до переліку МОН України (категорія Б), троє тез доповідей, опублікованих у збірниках матеріалів науково-практичних конференцій; 1 свідоцтво про реєстрацію патенту на корисну модель.

1. Толстов Д. В. (2025) Інтеграція РЕМ-електролізера в балансуючу групу ВДЕ України. Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит, 8 (211). <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.08.03> (фахове видання, категорія Б, ISSN 2313-8890).

2. Толстов Д. В. (2023) Показники LCOH електролізерів, що працюють відокремлено від генерації. Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит, 9–10 (187–188), 54. <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2023.09.03> (фахове видання, категорія Б, ISSN 2313-8890).

3. Толстов Д. В. (2025) Модель міжпродуктового балансу виробничої підсистеми за розвитку водневих технологій. System Research in Energy, 4(84), 54–81 (фахове видання, категорія Б, ISSN 2786-7102).

4. Толстов Д. В., Білан Т. Р. (2025) Оцінка потреб енергоємних галузей промисловості України в ресурсах для декарбонізації. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях, 2. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2025.02.01> (фахове видання, категорія Б, ISSN 2413-4295).

5. Толстов Д., Білан Т. (2025) Дослідження середньозваженої вартості транспортування водню з урахуванням потенційних місць зберігання та виробництва. System Research in Energy, 2(82), 101–117. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.02.101> (фахове видання, категорія Б, ISSN 2786-7102).

6. Tolstov D., Bilan T. (2024) Determination of the Optimal "Green" Tariff Rate for Removing Solar Power Plants from the Balancing Group of "Guaranteed Buyer" State Enterprise. System Research in Energy, 4(80), 143–155. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.143> (фахове видання, категорія Б, ISSN 2786-7102).

7. Толстов Д. В. (2022) Динамічні показники електролізерів, як споживачів-регуляторів енергосистеми. VII Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Інноваційна модернізація економіки України в умовах євроінтеграційних процесів», 15–16 листопада 2022 року, м. Кременчук. С. 244–246.

8. Толстов Д. В., Тесленко О. І. (2022) Аналіз технологічної здатності водневих електролізерів для регулювання ОЕС України. X Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених «Наукова молодь – 2022», 15 листопада 2022 року, м. Київ. С. 234–236.

9. Толстов Д. В. (2024) Вимоги до об'єктів «зеленої» енергетики для роботи на ринку електричної енергії. XX Міжнародна науково-практична конференція «Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку», 2024 року, м. Київ. С. 37–41.

Особистий внесок здобувача

Дисертаційна робота є самостійно виконаним науковим дослідженням. Висновки та положення, викладені в тексті роботи, отримані автором самостійно. Основні наукові результати, отримані автором дисертації, наведено у наукових працях, поданих у списку публікацій.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: [4] – проведення техніко-економічного аналізу умов функціонування електростанцій на відновлюваних джерелах енергії поза балансуєчою групою ДП «Гарантований покупець», зокрема визначення економічного критерію доцільності їх роботи та обґрунтування підходу до формування ціни електричної енергії; [5] – проведення аналітичних і балансових розрахунків потреб у водні та електроенергії для декарбонізації металургійної, хімічної (виробництво аміаку) та цементної галузей промисловості України, визначення сценарних обсягів споживання водню та відповідних витрат електроенергії, а також аналіз можливостей заміщення викопних палив воднем у технологічних процесах; [6] – розроблення комплексного підходу до

оцінки середньозваженої вартості транспортування водню (LCON) що є складовою загальної вартості виробництва водню з урахуванням просторового розміщення джерел генерації та сховищ, формування розрахункової моделі магістральної водневої інфраструктури (трубопроводи, компресорні станції), визначення її технічних параметрів та проведення техніко-економічного аналізу ефективності різних варіантів транспортування водню.

Апробація результатів дисертації

Основні положення і результати дисертаційного дослідження доповідалися та обговорювалися на:

- VII Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Інноваційна модернізація економіки України в умовах євроінтеграційних процесів», м. Кременчук, 15–16 листопада 2022 року;
- X Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених «Наукова молодь – 2022», м. Київ, 15 листопада 2022 року.
- XX Міжнародній науково-практичній конференції «Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку», м. Київ, 2024.

Відповідність принципам академічної доброчесності

Дисертаційна робота містить результати власних досліджень автора. Використання ідей, наукових результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

У результаті обговорення презентації дисертаційної роботи Толстова Дмитра Вадимовича «Інтеграція електролізного виробництва водню до електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії» вважаємо, що:

1. Дисертаційна робота Толстова Д.В. є кваліфікаційною науковою працею, виконаною ним особисто, в якій розв'язано важливе наукове завдання з розроблення моделей інтеграції водневих технологій, що враховують міжпродуктові зв'язки та дозволяють прогнозувати потреби в ресурсах для металургії, хімії та виробництва будматеріалів та обсягах необхідної генерації ВДЕ для забезпечення виробництва водню, яке актуальним, оскільки дає змогу обґрунтувати параметри енергетичного переходу та забезпечити енергетичну безпеку країни в умовах лібералізованого ринку. Основні положення та результати дослідження, викладені в тексті дисертації, отримано автором самостійно.

2. Дисертація Толстова Д.В. має наукову новизну, теоретичну й практичну значущість, відповідає вимогам пунктів 5–7 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44. Фактів академічного плагіату, фабрикації або фальсифікації у тексті дисертації та в опублікованих наукових працях не виявлено.

3. Толстовим Д.В. за темою дисертації опубліковано 9 наукових праць, з яких 6 висвітлюють основні наукові результати, і 3 наукових праці засвідчують апробацію результатів на міжнародних наукових конференціях. Усі публікації відповідають вимогам пункту 8 вищезазначеного Порядку.

4. Рекомендувати дисертаційну роботу Толстова Дмитра Вадимовича «Інтеграція електролізного виробництва водню до електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії» до захисту з метою присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Головуючий на семінарі відділу:

Заступник директора Інституту

загальної енергетики НАН України

з наукової роботи,

докт. техн. наук, ст.досл.



Світлана КОВТУН