

УДК 656.07:504.3.054:620.9

## МЕТОДОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ФОРМУВАННЯ ІНВЕСТИЦІЙНОЇ АСИМЕТРІЇ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУ: РОЛЬ ПІДХОДІВ TTW ТА WTW

**Кириллова Олена Вікторівна**, докт. техн. наук, професор,  
завідувач кафедри «Управління портовою і сервісною діяльністю на водному транспорті», Одеський національний морський університет.  
e-mail: [kirillova18@i.ua](mailto:kirillova18@i.ua), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3414-7364>.

**Кириллова Валерія Юріївна**, канд. техн. наук, доцент,  
доцент кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»,  
Одеський національний морський університет.  
e-mail: [vk.onmu@gmail.com](mailto:vk.onmu@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0738-0408>.

### Вступ.

У контексті глобальної кліматичної політики та посилення вимог до декарбонізації транспортного сектору особливого значення набуває методологічно коректне оцінювання викидів парникових газів, яке забезпечує об'єктивну порівнюваність альтернативних енергетичних рішень [1].

Глобальні процеси декарбонізації транспортного сектору зумовлюють активний пошук альтернативних енергетичних рішень, зокрема використання зрідженого природного газу (LNG), електрифікації транспорту та гібридних енергетичних систем [2, 3].

Оцінювання кліматичної ефективності альтернативних енергетичних рішень в транспортних системах значною мірою залежить від методологічних підходів до обліку викидів парникових газів. Підхід Tank-to-Wheel (TTW), що враховує лише прямі викиди під час експлуатації транспортного засобу, не охоплює повний життєвий цикл енергії або палива і може викривлювати результати порівняння альтернативних транспортних технологій.

У цьому контексті особливої актуальності набуває застосування більш комплексного підходу Well-to-Wheel (WTW) [3, 4], який передбачає оцінювання викидів парникових газів на всіх етапах енергетичного ланцюга - від видобутку або виробництва енергоресурсів до кінцевого використання енергії транспортним засобом [5].

У цьому дослідженні обґрунтовується методологічний взаємозв'язок між системними межами оцінювання викидів парникових газів (TTW і WTW), забезпеченням кліматичної порівнюваності транспортних рішень та формуванням інвестиційної асиметрії декарбонізації.

Метою роботи є обґрунтування необхідності переходу від підходу TTW до WTW у процесі оцінювання кліматичної ефективності альтернативних енергетичних рішень у транспорті та визначення методологічних особливостей їх порівняння.

Наукова новизна дослідження полягає у формуванні концептуального взаємозв'язку між межами оцінювання викидів парникових газів (TTW та WTW), забезпеченням кліматичної порівнюваності транспортних рішень та виникненням явища інвестиційної асиметрії декарбонізації.

**Методологічні підходи до оцінювання викидів у транспорті.** Оцінювання викидів парникових газів у транспортному секторі здійснюється на основі різних методологічних підходів, які відрізняються межами системи та ступенем охоплення енергетичного ланцюга. Підхід Tank-to-Wheel враховує лише прямі викиди під час експлуатації транспортного засобу [4], тоді як при використанні електричної енергії або альтернативних видів палива значна частина викидів формується на попередніх етапах енергетичного ланцюга. Саме тому у сучасних дослідженнях застосовується підхід Well-to-Wheel, який охоплює весь енергетичний ланцюг [5]. WTW-підхід включає два основні етапи:

- Well-to-Tank (WTT) - оцінювання викидів, пов'язаних із видобутком, виробництвом і транспортуванням палива або енергії;
- Tank-to-Wheel (TTW) - оцінювання викидів, що виникають під час безпосередньої експлуатації транспортного засобу.

Сукупний ефект цих складових формує повний показник викидів Well-to-Wheel [5].

Незважаючи на широке використання підходів TTW та WTW у дослідженнях декарбонізації транспорту, у багатьох випадках вони розглядаються переважно як технічні методи оцінювання викидів, без належного аналізу їхнього впливу на формування інвестиційних рішень у сфері енергетичної трансформації транспорту. Водночас вибір меж системи оцінювання (TTW або WTW) може суттєво впливати на результати порівняння альтернативних енергетичних технологій. Це створює ризик методологічних викривлень у процесі прийняття стратегічних рішень щодо декарбонізації транспортних систем. З огляду на збереження високої частки транспортного сектору у викидах у країнах Європи, вимога методологічної порівнюваності оцінок стає практично значущою при формуванні політик і інвестиційних програм.

**Формалізація оцінювання.** У загальному вигляді сумарні викиди парникових газів за підходом Well-to-Wheel можуть бути представлені як:

$$E_{WTW} = E_{WTT} + E_{TTW} \quad (1)$$

де  $E_{WTW}$  - сумарні викиди парникових газів у межах повного енергетичного ланцюга;

$E_{WTT}$  - викиди на етапах видобутку, виробництва та транспортування енергоресурсів;

$E_{TTW}$  - викиди під час безпосередньої експлуатації транспортного засобу.

Для забезпечення порівнюваності транспортних рішень доцільно використовувати показник питомих викидів, нормований на транспортну роботу:

$$I_{WTW} = \frac{E_{WTW}}{Q \cdot L} \quad (2)$$

де  $I_{WTW}$  - інтенсивність викидів парникових газів,  
 $Q$  - маса вантажу,  
 $L$  - відстань перевезення.

Показник  $I_{WTW}$  може розглядатися як інтегральний індикатор кліматичної ефективності транспортної технології, що дозволяє здійснювати порівняльне оцінювання альтернативних енергетичних рішень на основі єдиних системних меж аналізу.

У випадку використання електричної енергії величина викидів визначається залежністю:

$$E_{WTT}^{el} = W_{el} \cdot EF_{grid} \quad (3)$$

де  $W_{el}$  - спожита електрична енергія,  
 $EF_{grid}$  - фактор викидів електроенергетичної системи.

Для LNG повноциклові викиди додатково включають метанову складову, пов'язану з явищем methane slip. У межах дослідження LNG розглядається як окремий підтип паливних енергетичних рішень, для якого:

$$E_{WTW}^{LNG} = E_{WTT}^{LNG} + E_{TTW}^{LNG} + E_{slip}^{LNG} \quad (4)$$

де  $E_{WTW}^{LNG}$  - сумарні повноциклові викиди парникових газів для LNG-рішення;

$E_{WTT}^{LNG}$  - викиди на етапах видобутку, виробництва та транспортування LNG;

$E_{TTW}^{LNG}$  - викиди під час експлуатації двигуна на LNG;

$E_{slip}^{LNG}$  - метанова складова повноциклових викидів у CO<sub>2</sub>-еквіваленті:

$$E_{slip}^{LNG} = m_{CH_4} \cdot GWP_{CH_4} \quad (5)$$

де  $GWP_{CH_4}$  - глобальний потенціал потепління метану;

$m_{CH_4}$  - маса незгорілого метану у вихлопних газах, що визначається через енергоспоживання транспортного засобу  $FC$  та питомий коефіцієнт methane slip  $EF_{slip}^{CH_4}$ :

$$m_{CH_4} = FC \cdot EF_{slip}^{CH_4} \quad (6)$$

Запропонована формалізація дозволяє врахувати специфічні особливості LNG-технологій у межах підходу Well-to-Wheel та забезпечити методологічно коректне порівняння альтернативних енергетичних рішень у транспортних системах і технологіях.

**Особливості оцінювання альтернативних енергетичних рішень.**

Порівняння альтернативних транспортних енергетичних систем, зокрема LNG-технологій та електрифікації транспорту, демонструє значну залежність результатів оцінювання від обраної методології. У разі використання підходу TTW електричний транспорт практично не генерує прямих викидів парникових газів. Водночас у разі застосування підходу WTW до розрахунку включаються також викиди, пов'язані з виробництвом електроенергії, структура яких значною мірою залежить від енергетичного балансу країни. Аналогічно, застосування зрідженого природного газу як альтернативного палива дозволяє знизити викиди окремих забруднювачів у процесі експлуатації двигуна. Проте повна оцінка кліматичного ефекту потребує врахування всього ланцюга постачання палива. Таким чином, використання лише підходу TTW може формувати викривлене уявлення про екологічну ефективність альтернативних транспортних технологій.

**Методологічна проблема кліматичної порівнюваності.** Однією з ключових проблем у сфері екологізації транспортних систем є забезпечення методологічно коректної кліматичної порівнюваності альтернативних транспортних рішень. Кліматичну порівнюваність транспортних рішень доцільно розглядати як методологічну можливість коректного зіставлення альтернативних транспортних технологій на основі єдиних системних меж оцінювання викидів парникових газів та узгоджених принципів обліку повного енергетичного ланцюга. Порушення принципу такої порівнюваності може призводити до методологічних викривлень у процесі формування інвестиційних рішень у сфері декарбонізації транспорту. Застосування різних підходів до обліку викидів може формувати різні висновки щодо доцільності впровадження альтернативних енергетичних рішень у транспортних системах і технологіях. У цьому контексті застосування підходу Well-to-Wheel дозволяє забезпечити більш об'єктивну оцінку кліматичного впливу транспортних енергетичних рішень.

**Інвестиційна асиметрія декарбонізації.** Використання неповних методологічних підходів до оцінювання викидів може формувати явище, яке в межах цього дослідження пропонується визначати як *інвестиційну асиметрію декарбонізації* (*investment asymmetry of decarbonization*). Під інвестиційною асиметрією декарбонізації доцільно розуміти ситуацію, за якої інвестиційні рішення щодо впровадження альтернативних транспортних технологій формуються на основі методологічно обмежених оцінок їхнього кліматичного впливу. У результаті окремі енергетичні рішення можуть отримувати необґрунтовані інвестиційні преференції, тоді як інші - недооцінюватися. Застосування підходу Well-to-Wheel дозволяє знизити ризики виникнення такої асиметрії та забезпечити більш збалансований розвиток альтернативних енергетичних рішень у транспортному секторі.

Таким чином, у дослідженні формується концептуальний взаємозв'язок між методологічними межами оцінювання викидів парникових газів (TTW і WTW), забезпеченням кліматичної порівнюваності альтернативних транспортних рішень та можливим виникненням інвестиційної асиметрії декарбонізації.

Такий взаємозв'язок дозволяє розглядати методологію оцінювання викидів як один із ключових чинників формування інвестиційних рішень у процесі енергетичної трансформації транспортного сектору.

### Висновки

1. Декарбонізація транспортного сектору потребує застосування комплексних методологічних підходів до оцінювання кліматичного впливу альтернативних енергетичних систем [1-5].

2. Використання підходу Tank-to-Wheel не дозволяє повною мірою оцінити екологічні наслідки впровадження альтернативних транспортних технологій [4].

3. Підхід Well-to-Wheel забезпечує більш комплексне оцінювання викидів парникових газів, оскільки враховує весь енергетичний ланцюг [5].

4. Перехід до підходу WTW є необхідною умовою забезпечення методологічно коректної кліматичної порівнюваності альтернативних транспортних рішень та обґрунтованості інвестиційних рішень у сфері декарбонізації транспорту [5].

5. Некоректне визначення системних меж оцінювання викидів парникових газів може призводити до викривлення результатів кліматичної оцінки та, відповідно, до неефективних інвестиційних рішень у процесі декарбонізації транспортних систем.

6. У роботі обґрунтовано концептуальний взаємозв'язок між методологічними межами оцінювання викидів парникових газів (TTW та WTW), забезпеченням кліматичної порівнюваності транспортних рішень та формуванням інвестиційної асиметрії декарбонізації.

7. У роботі запропоновано використовувати поняття *інвестиційної асиметрії декарбонізації* (*investment asymmetry of decarbonization*), яке характеризує вплив методологічних меж оцінювання викидів парникових газів (зокрема підходів TTW та WTW) на формування інвестиційних рішень у сфері енергетичної трансформації транспортних систем і технологій.

### Література

1. IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge : Cambridge University Press, 2022. 2029 p.

2. Transport : (Web resource) / **International Energy Agency**. Paris : IEA. URL: <https://www.iea.org/topics/transport> (date of access: 05.03.2026).

3. **Bicer Y., Dincer I.** Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. P. 3017–3029. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.050>.

4. **EN 16258:2012**. Methodology for calculation and declaration of energy consumption and GHG emissions of transport services (freight and passengers). Brussels : European Committee for Standardization (CEN), 2012. 101 p.

5. **ISO 14083:2023**. Greenhouse gases – Quantification and reporting of greenhouse gas emissions arising from transport chain operations. Geneva : International Organization for Standardization, 2023. 132 p.