

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
Інститут деревообробних технологій і дизайну
Кафедра технологій захисту навколишнього середовища і деревини
та безпеки життєдіяльності

Пояснювальна записка

до дипломної роботи магістра на тему

ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ: СВІТОВІ НАПРАЦЮВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ УКРАЇНИ

Виконав: студент групи ТЗНСз-61м
спеціальності 183 Технології захисту
навколишнього середовища
Синюк І.С.

Керівник: ст. викл., к.б.н. Маєвська О.М.

Рецензент: доц., к.т.н. Курка Р.Р.
(прізвище та ініціали)

Львів – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Інститут деревообробних технологій і дизайну

Кафедра технологій захисту навколишнього середовища і деревини та безпеки життєдіяльності

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Спеціальність 183 Технології захисту навколишнього середовища

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри: ТЗНСДБЖД

проф. Кшивецький Б.Я.

"30" Вересня 2024 року

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ МАГІСТРУ**

Синюку Іллі Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Декарбонізація транспортної галузі: світові напрацювання та перспективи України

Керівник проєкту Масвська О.М., ст. викл., к.б.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету від від "12" липня 2024 №С-470

2. Термін подання студенткою роботи: 10.12.2024
3. Вихідні дані до проєкту: технологічні дані впливу об'єктів залізничної інфраструктури на компоненти довкілля
4. Зміст пояснювальної записки (розділи, які потрібно розробити)
 1. Стан вивчення питання
 2. Декарбонізація транспортного сектору: аналіз різних підходів та практичне їхнє впровадження в різних країнах
 3. Декарбонізація транспорту в Україні: викиди парникових газів та заходи щодо їхнього зниження
 4. Перспективи розвитку декарбонізації транспорту як компоненти сталого розвитку країни
 5. Розроблення комп'ютерної моделі прогнозування змін викидів CO₂ в атмосферне повітря від транспорту
 6. Охорона праці і безпека в надзвичайних умовах

Висновки

Використана література

Презентація доповіді у слайдах

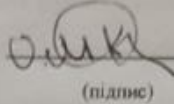
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
5.1.	Доц. Сторожук В.М.	19.11.24	01.12.24
5.2.	Доц. Сторожук В.М.	19.11.24	01.12.24

7. Дата видачі завдання 2 вересня 2024 року

Керівник проекту


(підпис)

Маєвська О.М.

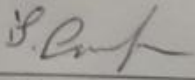
(прізвище, ініціали)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Стан вивчення питання	До 25.09.24	
2	Декарбонізація транспортного сектору: аналіз різних підходів та практичне їхнє впровадження в різних країнах	До 16.10.24	
3	Декарбонізація транспорту в Україні: викиди парникових газів та заходи щодо їхнього зниження	До 07.11.2024	
4	Перспективи розвитку декарбонізації транспорту як компоненти сталого розвитку країн	До 16.11.2024	
5	Розроблення комп'ютерної моделі прогнозування змін викидів CO ₂ в атмосферне повітря від транспорту	До 26.11.2024	
6	Охорона праці і безпека в надзвичайних умовах	До 01.12.2024	
7	Оформлення магістерської роботи	До 09.12.2024	

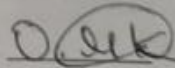
Студент

Синюк І.С.


(підпис)

Керівник роботи

Маєвська О.М.


(підпис)

АНОТАЦІЯ

Тема дипломної роботи магістра – «Декарбонізація транспортної галузі: світові напрацювання та перспективи України»

У цій магістерській роботі проаналізовано заходи декарбонізації транспортної сфери в світі та Україні для забезпечення скорочення викидів парникових газів, зокрема CO₂.

Детальний огляд впливу різних видів транспорту на викиди CO₂, а також аналіз продукування викидів окремими країнами розглянуто у розділі 1.

У розділі 2 проведено аналіз різних підходів проведення декарбонізації в загальному та окремих країнах щодо автомобільного, залізничного, повітряного та водного транспорту. Також проаналізовано законодавчі ініціативи, які включають зобов'язання щодо скорочення викидів парникових газів.

Розділ 3 присвячений процесу декарбонізації транспорту в Україні. У ньому викладено основні виклики і напрацювання, аналіз міжнародних і національних документів щодо декарбонізації, а також розглянуто перспективи та умови успішного її проходження.

У розділі 4 висвітлено майбутній розвиток процесу декарбонізації як складової сталого розвитку держав. Проаналізовані новітні технології, пов'язаного із застосуванням штучного інтелекту, інтернету речей та інтелектуальних транспортних систем та їх вкладу у процес декарбонізації транспорту.

В розділі 5 подана розроблена магістром комп'ютерна модель оля прогнозування скорочення викидів CO₂ в залежності від зміни співвідношення різних видів транспорту. Вона може використовуватись для різних населених пунктів, розташованих в Україні.

SUMMARY

The topic of the master's thesis is «Decarbonization of the transport industry: global best practices and prospects for Ukraine».

This master's thesis analyses decarbonisation measures in the transport sector in the world and Ukraine to reduce greenhouse gas emissions, in particular CO₂.

A detailed overview of the impact of different modes of transport on CO₂ emissions, as well as an analysis of emissions production by individual countries, is provided in Chapter 1.

Section 2 analyses different approaches to decarbonisation in general and in individual countries with regard to road, rail, air and water transport. It also analyses legislative initiatives that include commitments to reduce greenhouse gas emissions.

Section 3 is devoted to the process of decarbonising transport in Ukraine. It outlines the main challenges and developments, analyses international and national documents on decarbonisation, and considers the prospects and conditions for its successful implementation.

Section 4 highlights the future development of the decarbonisation process as a component of sustainable development. It analyses the latest technologies related to the use of artificial intelligence, the Internet of Things and intelligent transport systems and their contribution to the process of transport decarbonisation.

Section 5 presents a computer model developed by the master's student to predict CO₂ emission reductions depending on changes in the ratio of different modes of transport. It can be used for different populated areas located in Ukraine.

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. СТАН ВИВЧЕННЯ ПИТАННЯ	12
1.1. Вплив транспортної галузі на викиди парникових газів та їхні наслідки для довкілля	12
1.1.1. Вклад різних видів транспорту на викиди парникових газів	13
1.1.2. Аналіз впливу окремих країн на викиди CO ₂ від транспортних засобів	16
РОЗДІЛ 2. ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНОГО СЕКТОРУ: АНАЛІЗ РІЗНИХ ПІДХОДІВ ТА ПРАКТИЧНЕ ЇХНЄ ВПРОВАДЖЕННЯ В РІЗНИХ КРАЇНАХ	20
2.1. Міжнародні зобов'язання та угоди щодо декарбонізації транспортного сектору	20
2.2. Заходи для зниження викидів CO ₂ у транспортній галузі: автомобільний сектор	23
2.2.1. Перехід на альтернативні види пального	23
2.2.2. Електрифікація автотранспорту	24
2.2.3. Впровадження низьковуглецевих технологій	25
2.3. Заходи щодо зменшення викидів парникових газів на повітряному, залізничному та водному транспорті	27
2.4. Аналіз світового досвіду інноваційних рішень щодо декарбонізації транспортної галузі	31
2.4.1. Стратегії розвинутих держав і країн, що розвиваються	31
2.4.2. Приклади успішних програм в окремих країнах світу	35
РОЗДІЛ 3. ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТУ В УКРАЇНІ: ВИКИДИ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ТА ЗАХОДИ ЩОДО ЇХНЬОГО ЗНИЖЕННЯ	40
3.1. Структура транспорту в Україні та його частка у викидах CO ₂	40
3.2. Основні виклики, які сповільнюють декарбонізацію транспорту в Україні	41
3.3. Політика України щодо зменшення викидів парникових газів від транспортних засобів	44
3.4. Інноваційні проекти в Україні	47

3.4.1. Тенденції розвитку автомобільного транспорту та дотичної до нього інфраструктури	47
3.4.2. Залізничний транспорт: електрифікація залізниць та потенціал для вантажоперевезень	49
3.5. Перспективи України щодо декарбонізації транспортної галузі: основні напрямки та державна підтримка	50
РОЗДІЛ 4. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУ ЯК КОМПОНЕНТИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ КРАЇН	58
4.1. Тенденції розвитку транспорту до 2050 року.	58
4.2. Перспективи розвитку електричних, автономних, водневих транспортних засобів	60
4.3. Впровадження новітніх технологій	63
4.3.1. Інтернет речей та штучний інтелект у транспорті як технології для зменшення викидів CO ₂	63
4.3.2. Роль інтелектуальних транспортних систем для оптимізації маршрутів та зниження викидів	66
4.4. Економічний та екологічний ефект від впровадження декарбонізаційних заходів	69
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІН ВИКИДІВ CO ₂ В АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ ВІД ТРАНСПОРТУ	75
РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ УМОВАХ	
ВИСНОВКИ	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	82

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

ПГ – парникові гази

НВВ – національно визначені внески

РКЗК – Рамкова конвенція ООН зі зміни клімату

МАПТ – Міжнародна асоціація повітряного транспорту

ЕМ – електромобілі

ДВЗ – двигун внутрішнього згорання

ІТС – інтелектуальні транспортні системи

ІР – інтернет речей

ШІ – штучний інтелект

ВООЗ – всесвітня організація охорони здоров'я

ЄБРР – Європейський банк реконструкції та розвитку

ВСТУП

Транспорт є однією з ключових галузей при реалізації кліматичних стратегій, адже транспортний сектор є одним із найбільших джерел викидів парникових газів, насамперед CO₂ в світі та Україні. Незважаючи на технологічний прогрес та політичні ініціативи, спрямовані на зниження викидів, транспортні викиди продовжують зростати через постійне збільшення попиту на мобільність та транспортні послуги. Кліматичні зміни, викликані накопиченням парникових газів в атмосфері, вимагають негайного впровадження заходів для зменшення цих викидів. Декарбонізація – це комплексний підхід, який передбачає перехід на низьковуглецеві технології, впровадження альтернативних видів палива та скорочення залежності від викопного палива, зокрема нафти та газу.

Оскільки більшість викидів у транспорті пов'язана з автомобільним рухом, необхідно впроваджувати комплексні рішення для зменшення залежності від викопного палива. Такі заходи як електрифікація транспорту, розвиток громадського транспорту, використання альтернативних видів палива, а також впровадження жорстких екологічних стандартів є важливими кроками на шляху до зниження вуглецевого сліду транспорту. Вимоги до підвищення екологічності транспортних засобів є основною тенденцією на всіх видах транспорту. Окрім електрифікації, значну роль відіграють водневі технології, особливо у важких вантажних перевезеннях та промислових секторах, де електричні батареї не завжди є ефективними. Водневий транспорт, який не виробляє шкідливих викидів, розглядається як одне з ключових рішень для досягнення кліматичної нейтральності.

В Україні процеси декарбонізації сповільнюються певними особливостями, такими як застарілий транспортний парк та інфраструктура, низький рівень електромобілів, недостатній рівень державної підтримки та гостра потреба в інвестиціях. Розвиток інфраструктури, зростання електромобільності, впровадження нових технологій та видів пального, оновлення транспортного парку в секторі громадського транспорту є запорукою

успішної декарбонізації транспортного сектору в Україні. Важливою складовою цих змін є співпраця між державними структурами, бізнесом і громадськістю, що дозволить забезпечити всебічний підхід до проблем декарбонізації транспорту та сталий розвиток держави. Заходи щодо декарбонізації дозволяють не тільки знижувати рівень викидів CO₂, але й покращують якість повітря, знижують рівень шуму в містах, сприяють економічному розвитку

Таким чином, декарбонізація транспорту є не тільки вимогою часу в контексті кліматичних викликів, але й можливістю для сталого економічного зростання та технологічного розвитку. Україна має великий потенціал для розвитку в цьому напрямку, і використання міжнародного досвіду дозволить досягти амбітних екологічних цілей у найближчі десятиліття.

Метою дослідження є комплексний аналіз світових та українських заходів з декарбонізації транспортної галузі, а також оцінювання їхньої ефективності та перспектив впровадження новітніх технологій. В рамках дослідження будуть розглянуті як законодавчі ініціативи, так і реальні приклади впровадження інноваційних рішень у транспортній сфері.

Об'єкт дослідження: різні види транспорту (в світі та Україні) щодо викидів CO₂ з акцентом на електротранспорт

Предмет дослідження: аналіз існуючих заходів щодо декарбонізації транспортного сектору у світі та в Україні та розгляд перспективи цього процесу в контексті сталого розвитку з додаванням новітніх технологій

Основними завданнями дослідження є:

1. Оцінювання вкладу різних видів транспорту у викиди парникових газів, зокрема CO₂, в світі та Україні.
2. Аналіз світового досвіду щодо впровадження заходів з декарбонізації різних секторів транспортної галузі та аналіз особливостей процесу декарбонізації транспорту в Україні.
3. Дослідження досвіду окремих передових держав та країн, що розвиваються на впровадження ініціатив щодо декарбонізації та аналіз можливостей перенесення таких заходів в українські реалії.

4. Огляд інноваційних рішень та технологічних новацій, які сприяють зниженню викидів, включаючи електромобілі, водневі технології, "розумні" транспортні системи та інші рішення для підвищення енергоефективності транспортної галузі.
5. Оцінювання перспектив провадження процесу декарбонізації в контексті сталого розвитку: аналіз екологічних, економічних та соціальних переваг. на основі світового та українського досвіду сформулювати рекомендації для подальшого розвитку політики декарбонізації транспорту в Україні, з урахуванням специфічних національних умов та міжнародних зобов'язань.

РОЗДІЛ 1. СТАН ВИВЧЕННЯ ПИТАННЯ

1.1. Вплив транспортної галузі на викиди парникових газів та їхні наслідки для довкілля

Транспорт є одним із найбільших джерел викидів парникових газів (ПГ) у світі і його внесок у глобальну зміну клімату стає дедалі очевиднішим. За даними Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change), на частку транспортного сектору припадає близько 24% світових викидів вуглекислого газу (CO_2), причому найбільшу частку в цих викидах складає автомобільний транспорт [1]. Це є серйозною проблемою для досягнення глобальних кліматичних цілей, оскільки вплив транспорту на довкілля продовжує зростати з огляду на зростання урбанізації, збільшення кількості транспортних засобів і, як наслідок, збільшення попиту на енергоносії.

Парникові гази, викиди яких спровоковані роботою транспортних засобів, створюють так званий парниковий ефект, що призводить до підвищення середньої температури на планеті. Цей ефект виникає через накопичення вуглекислого газу та інших парникових газів в атмосфері, що перешкоджає відбиттю теплової енергії назад у космос. В результаті, атмосфера нагрівається, що призводить до зміни клімату, та викликає складні негативні наслідки, таких як екстремальні погодні явища, танення льодовиків, підвищення рівня моря та інші.

Викиди парникових газів, насамперед діоксиду вуглецю (CO_2), метану (CH_4) та оксиду азоту (N_2O), мають кілька критично важливих наслідків щодо довкілля, зокрема порушення глобального балансу енергії, що призводить до збільшення середніх температур. Так, з 1880 року середня температура Землі зросла на $1,1^\circ\text{C}$. Зміна клімату від збільшення викидів ПГ, негативно впливають на різні екосистеми та біорізноманіття. Викиди від транспорту також сприяють забрудненню повітря, що негативно впливає на здоров'я населення. Численні наукові дослідження свідчать, що забруднення повітря викидами відпрацьованих газів від транспортних засобів може призвести до респіраторних захворювань, серцево-судинних захворювань і летальних випадків [2, 3].

1.1.1. Вклад різних видів транспорту на викиди парникових газів

Транспортна галузь є однією з найзначніших складових у глобальному викиді парникових газів, зокрема вуглекислого газу (CO₂), який є основним фактором глобального потепління та зміни клімату. На транспорт припадає приблизно четвертина світових викидів CO₂, спричинених використанням енергії від викопних палив. На рис. 1 відображені викиди CO₂, які припадають на транспорту галузь в світі, порівняно з іншими секторами економіки

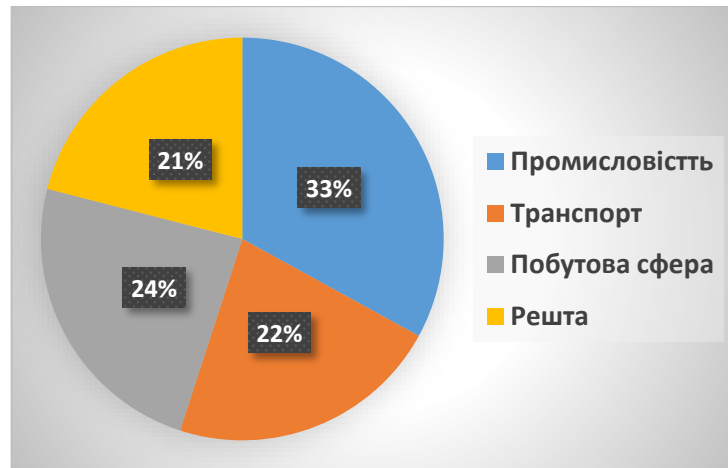


Рис. 1. Вклад транспорту у викиди парникових газів у світі

Для аналізу вкладу різних типів транспорту у світові викиди CO₂ розглянуто умовний поділ на:

- Наземний транспорт (легкові автомобілі, вантажівки, автобуси, залізниця).
- Авіаційний транспорт (цивільна авіація, вантажні перевезення).
- Морський транспорт (вантажні судна, круїзні лайнери, пасажирські пороми).

Викиди парникових газів у транспортному секторі пов'язані з використанням різних видів палива, насамперед нафтових продуктів, таких як бензин, дизельне паливо, авіаційний керосин, а також мазут для морських перевезень.

Розподіл викидів вуглекислого газу у транспортній галузі виглядає так. Найбільший внесок у викиди CO₂ серед усіх видів транспорту припадає на автомобільний транспорт. Легкові автомобілі та вантажівки разом становлять приблизно 74% від загальних транспортних викидів CO₂ у світі. Авіаційний

транспорт охоплює приблизно 11% світових викидів CO₂, але ця частка швидко зростає, особливо в умовах глобалізації та збільшення попиту на повітряні перевезення. Морські перевезення є відносно енергоефективними, проте через великі обсяги перевезень їх внесок у світові викиди CO₂ становить орієнтовно 11%. Внесок залізничного транспорту у викиди CO₂ є відносно невеликим (≈4%), особливо у країнах, де велика частка залізниць електрифікована. Залізничні перевезення споживають менше енергії на одиницю вантажу або пасажирів порівняно з автомобільним чи авіаційним транспортом.

На рис. 2 наведено розподіл різних видів транспорту щодо продукування ними викидів парникових газів, що потрапляють в атмосферне повітря.

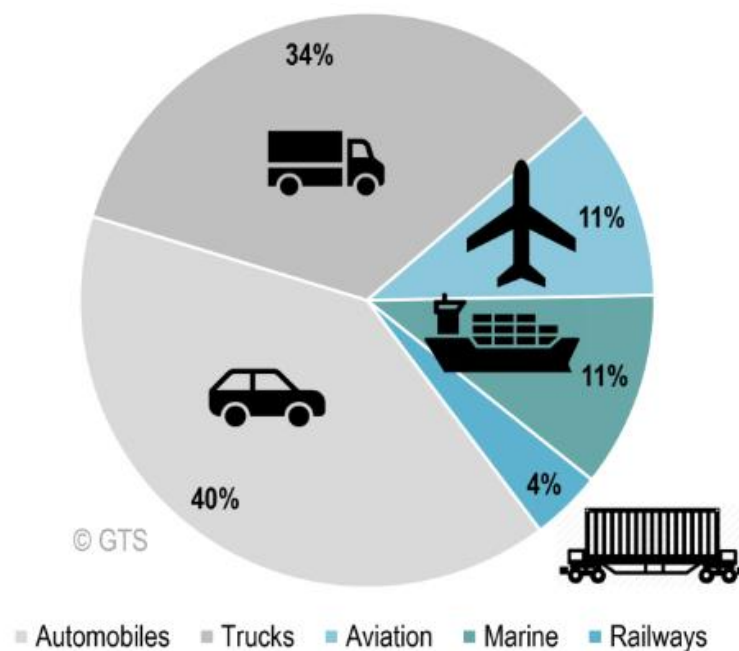


Рис. 2. Розподіл викидів парникових газів, які припадають на різні види транспорту за даними Міжнародної Енергетичної Асоціації [4]

Кожен із цих видів транспорту споживає певні типи палива та робить свій внесок у загальні викиди CO₂. Тому важливо розуміти структуру транспортного сектору і його вплив на клімат, щоб виробити ефективні стратегії для декарбонізації.

Наземний транспорт. Легкові автомобілі становлять найбільшу частку серед наземного транспорту і є основним джерелом викидів вуглецю в багатьох

країнах. У країнах Європейського Союзу більша кількість всіх транспортних викидів CO₂ походять від легкових автомобілів. Ця тенденція пов'язана з великою кількістю приватних автомобілів, зростанням урбанізації та розширенням індивідуальних транспортних засобів у великих містах. Основним джерелом викидів CO₂ від автомобілів є спалювання бензину та дизельного палива, яке є найпоширенішим видом пального. Це паливо під час спалювання виділяє вуглекислий газ, який негативно впливає на клімат. Вантажний транспорт має особливу роль у транспортному секторі, оскільки він забезпечує перевезення товарів на великі відстані. Викиди від вантажних автомобілів є значно вищими на одиницю пального порівняно з легковими автомобілями.

Авіаційний транспорт є одним із найшвидших і найефективніших способів перевезення людей та товарів на великі відстані, однак він є значним джерелом викидів CO₂. Особливістю авіаційних викидів є те, що вони відбуваються на великій висоті, що робить їх більш шкідливими для клімату. Це пояснюється тим, що викиди на висоті 10-12 км сприяють формуванню парникового ефекту значно більше, ніж викиди на поверхні Землі. Тому авіація вважається одним із найбільш негативних з точки зору клімату видів транспорту. За даними Міжнародної організації цивільної авіації (ICAO), авіація сприяє близько 3-4% світових викидів вуглецю. Оскільки літаки використовують авіаційний керосин, викиди на одиницю спаленого палива є досить високими, і з огляду на швидкий розвиток авіаційної індустрії ці викиди продовжують зростати. Через пандемію Covid-19 ринок авіаційних перевезень, особливо пасажирських, дещо знизився, однак після її завершення ситуація із відновленням швидко повернулася на доепідемічний рівень [5].

Морський транспорт. На морські перевезення припадає орієнтовно 3% всіх викидів CO₂ у світі, а у секторі різних видів транспорту 11% (рис. 2). Основним джерелом цих викидів є спалювання пального, що є продуктами перероблення нафти (безпосередньо сирової нафти, або дизельного палива), а також вугілля. Оскільки попит на перевезення різних товарів морем зростає, потенційно може зростати й вуглецевий слід таких транспортувань, особливо

якщо не буде вжито заходів, щоб цьому запобігти [6]. Через зростання світової торгівлі та попиту на морські перевезення товарів, вуглецевий слід сектору, насамперед через викиди CO₂, потенційно може збільшитись на 50%-250% до 2050 року, якщо не буде вжито активних заходів, які б цьому запобігли.

Залізничний транспорт вважається екологічно чистим видом транспорту порівняно з автомобільним та вантажним. Особливо це актуально для тих країн, які характеризуються високим рівнем електрифікації. Електрифіковані залізниці, які використовують електричну енергію для руху потягів, мають мінімальний вуглецевий слід.

1.1.2. Аналіз впливу окремих країн світу на викиди CO₂ від транспортних засобів

Якщо аналізувати викиди парникових газів, зокрема CO₂, від транспортних засобів за останні десятиліття в світовому розподілі, то це чітко відображає розвиток інфраструктури та рівень економічного зростання. Наприклад, у країнах з розвинутою економікою, таких як США та Європейський Союз, частка транспорту у загальних викидах залишається високою через широке використання приватних автомобілів та повітряних перевезень. У той же час, у країнах, що розвиваються, таких як Індія та Китай, транспорт також відіграє важливу роль у зростанні викидів через індустріалізацію та урбанізацію. Більш детальна інформація щодо викидів у вищезгаданих країнах:

- **Сполучені Штати:** У США транспорт є головним джерелом викидів CO₂. За даними Агентства з охорони навколишнього середовища США (EPA), на транспорт припадає понад 28% усіх викидів парникових газів у країні. Основну частку цих викидів становить автомобільний транспорт [7].
- **Європейський Союз:** У Європі на транспорт припадає приблизно 25% загальних викидів CO₂. Країни ЄС активно впроваджують стратегії декарбонізації транспорту, такі як стимулювання електромобілів та інвестиції в громадський транспорт [8].
- **Азійські країни.** Домінуючими щодо викидів парникових газів серед країн Азії є Китай та Індія. Хоча на транспорт у Китаї припадає тільки приблизно 10%

від загальних викидів CO₂ у країні, швидке зростання кількості автомобілів та розвитку інфраструктури викликає занепокоєння щодо майбутнього збільшення транспортних викидів [9]. Проаналізовано, що викиди від транспорту в Індії за період 2001-2020 роки зросла більше ніж удвічі [10].

На рис. 3. поданий реальний (до 2020 року) і прогностичний (від 2030 до 2050 років) розподілу викидів CO₂ від транспортних засобів. Варто враховувати, що прогностичні рівні ґрунтуються на даних щодо викидів CO₂, які реально спостерігались впродовж 2000-2020 років і накладаються на майбутні зростаючі кількості транспортних засобів. Активні заходи декарбонізації транспортної сфери також можуть позначитись на зміні рівня викидів.

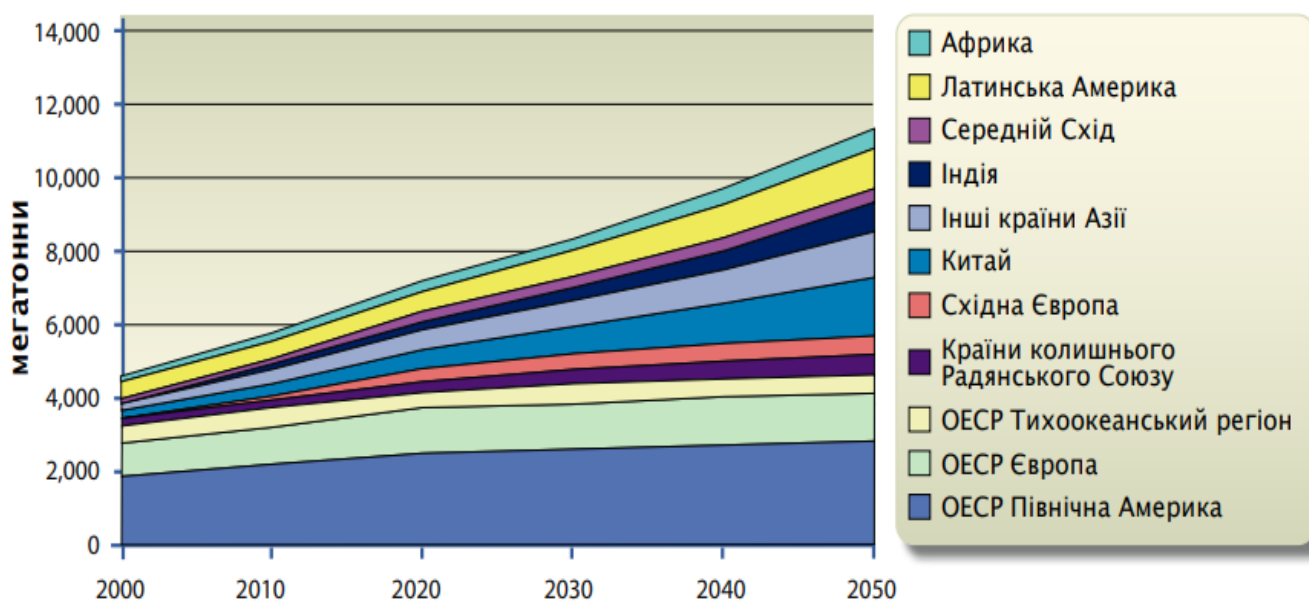


Рис. 3. Реальні (2000-2020 роки) і прогностичні (2030-2050 роки) рівні викидів CO₂ від транспорту у різних регіонах світу [11]

Тенденції змін викидів у транспортній галузі значною мірою залежать від таких факторів як технологічний прогрес, економічне зростання, урбанізація та зміни у споживчій поведінці. За останні десятиліття динаміка транспортних викидів відображала не тільки збільшення попиту на мобільність, але й заходи щодо зменшення викидів через впровадження нових технологій і нормативних вимог.

У 1990-х роках транспортні викиди CO₂ почали значно зростати через збільшення кількості автомобілів та поширення автомобільної культури у багатьох країнах світу. Автомобілі на той час працювали на бензині або дизелі, які є основними джерелами CO₂. У цей період у країнах з розвинутою економікою, таких як США та країни ЄС, викиди від автомобільного транспорту зростали через збільшення кількості автомобілів і залежність від викопного палива. У країнах, що розвиваються, таких як Китай та Індія, початок економічного підйому також сприяв збільшенню обсягів транспортних викидів через збільшення автомобільного парку та розвиток промисловості. Збільшення обсягів повітряних перевезень у 2000-х роках також призвело до суттєвого зростання викидів CO₂ в авіаційному секторі. Із розвитком міжнародної торгівлі та зростанням попиту на авіаперевезення, кількість польотів та обсяги вантажних перевезень повітряним шляхом постійно збільшувались. У 2010-х роках було впроваджено низку нових технологій та політичних рішень, спрямованих на зниження викидів від транспорту. У цей період з'явилися електромобілі та відновлювані джерела енергії, які почали активно використовуватися у транспортній інфраструктурі. Кількість електромобілів у світі швидко зростала, особливо у таких країнах, як Норвегія, Китай, Німеччина та США. Наприклад, у 2020 році кількість нових реєстрацій електромобілів перевищила 3 мільйони одиниць, що становило приблизно 4,6% від усіх проданих автомобілів у світі. Це дозволило зменшити залежність від викопного палива у транспорті. На додачу у багатьох країнах були запроваджені жорсткіші екологічні стандарти для автомобілів, які регламентують допустимі рівні викидів CO₂ та інших шкідливих речовин. Це зобов'язало автовиробників переходити на більш ефективні технології, такі як гібридні двигуни та технології рекуперації енергії. У цей період активізувалися інвестиції в розвиток громадського транспорту. Багато країн почали фінансувати проекти з електрифікації громадського транспорту, зокрема автобусів та трамваїв, що дозволило знизити рівень викидів у великих містах. Однак, незважаючи на всі ці заходи, загальний рівень викидів від транспорту продовжує зростати. Це пов'язано з постійним зростанням світового

населення та попиту на транспортні послуги. Відповідно до прогнозів, без впровадження радикальних змін у транспортній політиці, викиди CO₂ від транспорту можуть продовжувати зростати в найближчі десятиліття.

Свій вплив на світовий рівень викидів парникових газів внесла і пандемія COVID-19, яка розпочалася в 2020 році і мала значний вплив на всі сфери життя, включаючи транспортний сектор. Обмеження на пересування, закриття кордонів та карантинні заходи привели до тимчасового зменшення транспортних викидів. За даними IEA, у 2020 році викиди CO₂ від транспорту зменшилися на 10-15% через зниження кількості польотів та зменшення використання приватних автомобілів. - Авіаційний сектор був одним із найбільш постраждалих, оскільки міжнародні та внутрішні авіап перевезення були зупинені або обмежені, що призвело до зниження кількості польотів на 60-70% [5]. Проте, із поступовим відновленням економіки та зняттям карантинних обмежень, транспортні викиди почали відновлюватися до попередніх рівнів. Відповідно, пандемія продемонструвала, наскільки залежним є сучасне суспільство від транспорту, і підкреслила необхідність впровадження довгострокових стратегій для зниження викидів у цій галузі.

РОЗДІЛ 2. ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНОГО СЕКТОРУ: АНАЛІЗ РІЗНИХ ПІДХОДІВ ТА ПРАКТИЧНЕ ЇХНЄ ВПРОВАДЖЕННЯ В РІЗНИХ КРАЇНАХ

Декарбонізація стала пріоритетним завданням для багатьох країн світу. Вона включає в себе поступовий перехід від використання викопних видів палива до відновлюваних джерел енергії та інших екологічно чистих технологій.

У світовій практиці декарбонізація транспорту є одним із пріоритетних напрямів. Європейський Союз, в рамках "Європейського Зеленого курсу", поставив за мету до 2050 року досягти кліматичної нейтральності, що включає скорочення викидів транспорту на 90% [12]. Впровадження електромобілів, розвиток інфраструктури для електрзарядних станцій, стимулювання використання громадського транспорту та альтернативних видів палива (водень, біопаливо) є ключовими напрямками стратегії ЄС [13-15].

Декарбонізація транспорту стала одним із ключових напрямків міжнародних зусиль щодо боротьби зі зміною клімату. Країни по всьому світу впроваджують різноманітні стратегії та інновації, спрямовані на зменшення викидів парникових газів у транспортному секторі. Цей розділ аналізує світовий досвід декарбонізації транспорту, розглядаючи кращі практики, політичні ініціативи та технологічні рішення, що впроваджуються в різних країнах.

2.1. Міжнародні зобов'язання та угоди щодо декарбонізації транспортного сектору

Оскільки декарбонізація транспорту є важливим аспектом глобальних зусиль щодо подолання зміни клімату, тому напрацювання законодавчих документів є також відображенням об'єднаних зусиль різних країн для запровадження заходів, які покращать ситуацію щодо скорочення викидів парникових газів від транспортних засобів. У міжнародному контексті зобов'язання країн беруться в рамках численних угод та ініціатив, які стимулюють зменшення викидів парникових газів у транспортному секторі. Надалі буде розглянуто основні міжнародні угоди, ініціативи та політики, що сприяють декарбонізації транспорту.

Паризька угода та Цілі сталого розвитку ООН

Паризька угода, ухвалена в 2015 році, основною метою якої є стримування температури до рівня у 1,5°C порівняно з доіндустріальним періодом. Паризька угода заохочує країни до розроблення національно визначених внесків (НВВ), що передбачають зобов'язання щодо зниження викидів кожною із країн і переглядаються кожні п'ять років. Для досягнення цілей Паризької угоди багато держав розробляють національні стратегії, спрямовані на скорочення викидів ПГ. Наприклад, Німеччина планує до 2030 року скоротити викиди від транспорту на 40-42% порівняно з 1990 роком, а Франція має на меті повністю відмовитися від продажу нових бензинових і дизельних автомобілів до 2040 року [16, 17].

Цілі сталого розвитку ООН, зокрема Ціль 11 "Стійкі міста та громади", також підкреслюють важливість розробки сталих транспортних систем. Вони акцентують увагу на необхідності зменшення негативного впливу транспорту на навколишнє середовище і забезпечення доступу до безпечного, доступного та екологічного транспорту для всіх верств населення. Зокрема, ці цілі сприяють розвитку громадського транспорту, велосипедної інфраструктури та зменшенню залежності від приватних автомобілів [18, 19].

Рамкова конвенція ООН зі зміни клімату

Рамкова конвенція ООН зі зміни клімату (РКЗК) є основною міжнародною угодою, яка регулює питання зміни клімату. Вона закладає основу для проведення переговорів про зменшення викидів парникових газів, а також створює платформи для обміну досвідом і технологіями. У рамках РКЗК були розроблені кілька механізмів, які стимулюють зусилля країн у сфері декарбонізації, зокрема в транспортному секторі. РКЗК підтримує ініціативи, які сприяють переходу на сталий транспорт, через обговорення та затвердження резолюцій, що заохочують країни до дій. Так, у 2021 році на конференції COP26 було наголошено на важливості транспорту в контексті змін клімату, і учасники зобов'язалися вжити заходів для зменшення викидів у транспортному секторі [1, 20].

Ініціативи з боку Міжнародної асоціації повітряного транспорту, ЄС та інших організацій

Міжнародна асоціація повітряного транспорту (МАПТ) (International Air Transport Association – IATA) ініціювала програми, спрямовані на скорочення викидів в авіаційному секторі [21, 22]. Наприклад, програма МАПТ "Візія 2050" визначає цілі, що включають досягнення вуглецевої нейтральності для авіації до 2050 року. Це передбачає використання нових технологій, таких як екологічно чисті види пального, поліпшення аеродинаміки літаків та впровадження ефективніших операційних практик. МАПТ також сприяє розвитку ринку сталих авіаційних видів пального, які можуть знизити викиди CO₂ на 80% у порівнянні з традиційними авіапальними. Для стимулювання виробництва такого пального організація співпрацює з державами, виробниками пального та авіакомпаніями [23].

Європейський Союз також активно впроваджує ініціативи щодо декарбонізації. Наприклад, у рамках програми "Fit for 55" ЄС прагне знизити викиди CO₂ на 55% до 2030 року, включаючи заходи, що стосуються транспорту. Ця програма передбачає не лише електрифікацію транспорту, а й розвиток інфраструктури для зарядки електромобілів, стимулювання громадського транспорту та переходи на альтернативні види пального [24]. Окрім цього, ЄС запроваджує систему торгівлі викидами, яка охоплює авіацію, а також запроваджує норми викидів для автомобільного транспорту, що забезпечує механізми для контролю за викидами та відповідальності виробників.

Крім того, Організація Об'єднаних Націй з питань розвитку промисловості (UNIDO) та інші міжнародні організації також працюють над підтримкою країн у впровадженні ефективних практик декарбонізації. Наприклад, вони надають технічну допомогу та фінансування для проектів, спрямованих на зменшення викидів у транспортному секторі.

Міжнародні зобов'язання та угоди відіграють важливу роль у глобальних зусиллях щодо декарбонізації транспорту. Від Паризької угоди до ініціатив IATA та ЄС ці документи забезпечують основи для розробки ефективних

стратегій, спрямованих на зменшення викидів парникових газів у транспортному секторі. Залучення держав, міжнародних організацій та приватного сектора є ключовим для досягнення цілей декарбонізації і забезпечення сталого розвитку транспорту в умовах зміни клімату.

2.2. Заходи для зниження викидів CO₂ у транспортній галузі: автомобільний сектор.

У контексті глобального потепління та необхідності зменшення викидів парникових газів, зокрема CO₂, декарбонізація транспорту стала однією з ключових завдань для країн у всьому світі. Цей сектор є одним з найбільших споживачів енергії та джерел викидів, і його трансформація вимагає комплексного підходу. У цьому розділі детально розглядаються основні заходи для зниження викидів CO₂: перехід на альтернативні види пального, електрифікацію транспорту та впровадження низьковуглецевих технологій.

2.2.1. Перехід на альтернативні види пального

Перехід на альтернативні види пального, такі як біопаливо, водень та синтетичне пальне, є важливою частиною стратегії декарбонізації транспорту.

Біопаливо — це пальне, яке виробляється з рослинних і тваринних відходів. Його перевага полягає в тому, що вуглекислий газ, який викидається при спалюванні біопалива, був акумульований рослинами під час їхнього зростання та проходження в них процесу фотосинтезу. Відповідно до даних Міжнародного енергетичного агентства (International Energy Agency – IEA), біопаливо може скоротити викиди CO₂ на 50-80% в порівнянні з традиційним викопним паливом [25, 26]. У Бразилії, наприклад, більшість автомобілів працює на етанолі, виробленому з цукрової тростини, що дозволяє значно зменшити викиди парникових газів. Окрім того, деякі країни, такі як Швеція та Норвегія, розвивають політики, що стимулюють використання біопалива в громадському транспорті.

Водень має великий потенціал як чисте пальне. Він може бути використаний у паливних елементах, де під час окиснення виділяється тільки вода [27-29]. Багато країн вже почали інвестувати в інфраструктуру для водневих

автомобілів У Німеччині, наприклад, заплановано побудувати широку мережу водневих заправок, щоб забезпечити розвиток водневого транспорту [30]. Японія також активно просуває водневу економіку, пропонуючи фінансові стимули для покупців водневих автомобілів та інвестуючи в технології виробництва зеленого водню [31].

Синтетичне пальне — це ще один важливий напрямок, який може суттєво зменшити викиди CO₂. Синтетичне паливо виготовляється з вуглецю, води та відновлювальної енергії. Цей підхід, хоч і не є масовим у даний момент, має потенціал для зниження викидів у важких транспортних засобах, таких як вантажівки та судна [32]. Наприклад, німецька компанія Porsche розробляє синтетичне паливо, яке може використовуватися в існуючих двигунах внутрішнього згоряння без необхідності їх модифікації. Це забезпечує плавний перехід до більш екологічних технологій.

2.2.2 Електрифікація автотранспорту

Електрифікація транспорту є одним з найбільш ефективних шляхів зменшення викидів CO₂, особливо автомобільної частки транспортного сектору, найбільш відповідальної за викиди парникових газів. Використання електромобілів (ЕМ) може знизити викиди на 50-90% залежно від джерела електрики [33]. У Норвегії, наприклад, більше 54% нових автомобілів, що продаються, – це електромобілі. Це стало можливим завдяки державним пільгам, таким як зниження податків, безкоштовне паркування, а також доступ до спеціальних смуг для електромобілів [34].

Крім легкових автомобілів, електрифікація також охоплює громадський транспорт [35]. Наприклад, у Швеції Стокгольм запровадив електробуси, які зменшують викиди CO₂ в місті. У Лондоні муніципальний уряд запровадив програми, що передбачають поступове заміщення дизельних автобусів електричними. Ці ініціативи дозволяють не лише зменшити викиди парникових газів, але й покращити якість повітря у містах.

Ключовим чинником для розширення використання електромобілів є розвиток інфраструктури для зарядки. Багато країн, включаючи Китай та США,

запроваджують програми для стимулювання розвитку зарядних станцій. У Китаї було встановлено понад 1,3 мільйона зарядних станцій, що робить країну світовим лідером у цій сфері. У США, завдяки ініціативам уряду, розробляється мережа швидких зарядних станцій, що значно підвищує доступність електромобілів для споживачів.

Також варто зазначити, що електрифікація транспорту може бути поєднана з відновлювальними джерелами енергії, такими як сонячна та вітрова енергія. Використання "зеленої" електрики для зарядки електромобілів може суттєво зменшити вуглецевий слід. Країни, які активно впроваджують таку модель, як, наприклад, Ісландія, стають прикладами для інших держав, оскільки вони здатні досягти майже повної нейтральності викидів в електричному транспорті.

2.2.3. Впровадження низьковуглецевих технологій

Впровадження низьковуглецевих технологій є ще одним важливим аспектом декарбонізації транспорту. Він включає в себе нові технології в проектуванні та виробництві транспортних засобів, використання нових матеріалів, що знижують масу автомобілів, та впровадження нових технологій для підвищення енергоефективності. Аеродинамічний дизайн є критично важливим для зниження споживання пального. Зокрема, такі компанії, як Tesla, інвестують у розробку аеродинамічних форм для своїх електромобілів, що зменшує опір повітря і, відповідно, знижує споживання енергії [36]. Також важливим є використання легких матеріалів у виробництві автомобілів. Заміна традиційних видів сталі на композитні матеріали або алюміній дозволяє знизити вагу автомобілів, що веде до зменшення витрат пального. Наприклад, автомобілі марки BMW використовують багато алюмінієвих компонентів, що робить їх легшими і, відповідно, енергоефективнішими [37].

Однією з низьковуглецевих технологій є електроніка для управління енергоспоживанням, яка дозволяє оптимізувати роботу двигунів і систем управління транспортними засобами. Наприклад, системи рекуперації енергії, що використовуються в гібридних та електричних автомобілях, дозволяють

зберігати енергію, що зазвичай втрачається під час гальмування, і використовувати її для подальшого прискорення [38].

Крім того, інтелектуальні транспортні системи можуть суттєво покращити ефективність транспортних потоків. Наприклад, використання технологій, що дозволяють оптимізувати маршрути руху транспортних засобів на основі даних про трафік у реальному часі, може зменшити затори і, відповідно, викиди CO₂. Дослідження показують, що впровадження інтелектуальних транспортних систем може знизити споживання пального до 15%.

Узагальнена схема заходів, які запроваджуються в автомобільному секторі транспорту для зниження викидів CO₂, наведена на рис. 4.

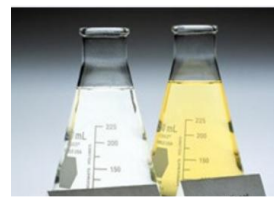
ПЕРЕХІД НА АЛЬТЕРНАТИВНІ ВИДИ ПАЛЬНОГО



біопаливо



водень



синтетичне паливо

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

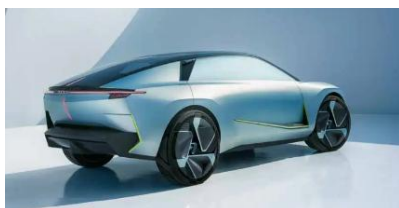


**електричні
автомобілі**



**електричний
громадський транспорт**

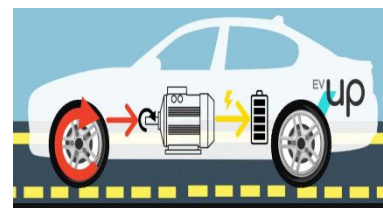
ВПРОВАДЖЕННЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ



**аеродинамічний
дизайн**



**легкі матеріали для
зниження ваги**



**легкі матеріали для
зниження ваги**

Рис. 4. Комплекс заходів щодо скорочення викидів CO₂ в автомобільному секторі (фотографії взяті із [26, 29, 32-34, 36-38])

2.3. Заходи щодо зменшення викидів парникових газів на повітряному, залізничному та водному транспорті

Авіаційний транспорт відіграє важливу роль у сучасній мобільності, але водночас створює значне навантаження на кліматичну систему через високі рівні викидів вуглецю. Впровадження альтернативних видів палива, підвищення енергоефективності літаків, розвиток електричних літаків і використання економічних механізмів, таких як податки на вуглецеві викиди та квоти, є ключовими напрямками для зниження негативного впливу авіації на клімат. Україна як частина глобального авіаційного ринку має великий потенціал для впровадження цих заходів, що дозволить не тільки скоротити викиди, але й посилити конкурентоспроможність на міжнародній арені.

З метою зниження впливу авіації на зміну клімату деякі країни, включаючи Україну, розглядають можливість переходу на екологічні види палива та впровадження новітніх технологій для скорочення викидів. Серед найбільш перспективних напрямів для декарбонізації авіаційного сектору варто виділити такі:

Альтернативні види палива. Одним із ключових шляхів зниження викидів авіаційного транспорту є використання альтернативних видів палива, таких як розглядалось у розділі 2.2.3. До них належать:

- Біопаливо, яке виробляється з рослинних залишків або відходів, вже використовується у деяких країнах. Воно дозволяє зменшити викиди парникових газів на 60-80% порівняно з традиційним авіаційним паливом. У Європі та США уже відбувається частковий перехід на біопаливо для комерційних рейсів.
- Синтетичне паливо, створене з водню та вуглекислого газу за допомогою відновлюваної енергії. Хоча використання синтетичного палива наразі перебуває на експериментальній стадії, воно є перспективним рішенням для авіаційної галузі.
- Водне паливо також експериментально застосовується великими авіаційними компаніями. Так, компанія Airbus, активно працює над створенням

водневих літаків, які можуть стати доступними до 2035 року. Польоти водневих літаків вже здійснюються в останні роки [39].

Поліпшення енергоефективності літаків. Крім зміни типу пального, одним із шляхів скорочення викидів є підвищення ефективності літальних апаратів. Сучасні літаки споживають значно менше палива на одиницю відстані порівняно зі старими моделями, що дозволяє зменшити загальні викиди парникових газів. Аеродинамічні поліпшення, зменшення ваги літаків і застосування більш ефективних двигунів також є важливими напрямками розвитку.

Електричні та гібридні літаки. Електрифікація авіації є амбітною, але важливою метою, яка дозволить повністю позбутися залежності від викопного палива. Хоча електричні літаки поки що лімітується щодо дальності польотів через обмеження технологій акумуляторів, розробка гібридних моделей, які поєднують традиційні та електричні двигуни, уже розпочалася. Перші комерційні польоти на короткі відстані на електричних літаках можуть стати реальністю протягом наступних десятиліть.

Оптимізація маршрутів та управління повітряним рухом. У багатьох країнах вже почали застосовувати технології для оптимізації маршрутів польотів, що дозволяє скоротити час у повітрі та знизити витрати палива. Наприклад, системи управління повітряним рухом, які дозволяють зменшити затори та затримки, можуть суттєво знизити викиди. За оцінками Європейського агентства з безпеки польотів (EASA), оптимізація маршрутів може скоротити викиди CO₂ на 6-10% на окремих маршрутах.

Ініціативи щодо зниження авіаційних викидів

Податки на викиди вуглецю та квоти. Одним із інструментів регулювання авіаційних викидів є запровадження податків на вуглець щодо авіаційного пального або встановлення квот на викиди. В Європейському Союзі діє система торгівлі квотами на викиди (EU ETS), в рамках якої авіаційні компанії зобов'язані купувати права на викиди CO₂. Такий підхід дозволяє стимулювати зниження викидів через економічні механізми.

Екологічні сертифікати. Багато авіакомпаній почали впроваджувати добровільні ініціативи з компенсації викидів, пропонуючи пасажиром купувати "екологічні сертифікати", кошти від яких спрямовуються на проекти з відновлення лісів або розвиток відновлюваних джерел енергії. Це дозволяє частково компенсувати шкоду, завдану викидами під час польоту.

Інноваційні технології. Поряд із традиційними методами зниження викидів, впроваджуються новітні рішення, такі як використання "розумних" датчиків і систем управління літаком, які дозволяють зменшити витрати палива. Крім того, активні дослідження в галузі нанотехнологій, аеродинамічних поліпшень та композитних матеріалів відкривають нові можливості для створення більш енергоефективних літаків.

Попри те, що **залізничний транспорт** позиціонується як такий, що продукує найменшу кількість викидів парникових газів, напружуються заходи, які застосовуються як перспективні для скорочення викидів CO₂ на залізничному транспорті це [40]:

- розширення електрифікації залізничного транспорту;
- розвиток системи високошвидкісних потягів та покращення їх аеродинамічних характеристик [41];
- розроблення потягів із використанням альтернативних видів пального (водню та природних джерел енергії, насамперед сонячної);

Водний транспорт відноситься до транспорту, який складно електрифікувати, тому триває пошук заходів, які б були перспективи для зменшення викидів від морських пасажирських і вантажних перевезень. До них зокрема відносяться [42]:

- розроблення нових типів суден, які мають удосконалений дизайн для пришвидшення руху (наприклад, як електричний пором Candela P-12 із трьома крилами із вуглецевого волокна, які виступають із корпусу завдяки яким стає можливість пересування судна над водою;
- використання альтернативних видів пального як-от біогаз, метанол та водень, які отримані таким способом, що стають вуглецево нейтральними

- використання природної відновної енергії сонця та вітру для руху суден

На рис. 5 наведена узагальнена схема заходів, які впроваджуються на залізничному, повітряному та морському транспорті для скорочення викидів від CO₂.

**Розширення
електрифікації**

**Збільшення кількості
високошвидкісних
потягів**

**Покращені
аероди-
намичні характеристики**



**Поліпшення енерго-
ефективності літаків**

**Альтернативні
види пального**

**Електричні та
гібридні літаки**

**Вуглецеві податки та
екологічні сертифікати**



**Розроблення нових
типів морських суден**

**Використання нових
видів палива – біогазу,
етанолу та водню**

**Використання вітрової
та сонячної енергії**



Рис. 5 Узагальнена схема заходів на залізничному, повітряному та морському транспорті для скорочення викидів від CO₂ (фото взяті із [39, 41, 42])

2.4. Аналіз світового досвіду інноваційних рішень щодо декарбонізації транспортної галузі

Для досягнення цілей Паризької угоди багато держав розробляють національні стратегії, спрямовані на скорочення викидів ПГ. Наприклад, Німеччина планує до 2030 року скоротити викиди від транспорту на 40-42% порівняно з 1990 роком, а Франція має на меті повністю відмовитися від продажу нових бензинових і дизельних автомобілів до 2040 року [14]. Значний внесок у процес декарбонізації транспорту вносить електрифікація. ЕМ поступово замінюють традиційні транспортні засоби з двигунами внутрішнього згорання. Такі країни, як Норвегія та Нідерланди, вже досягли значного прогресу в цьому напрямку, запровадивши стимули для придбання електромобілів та активно розвиваючи інфраструктуру для зарядки електротранспорту. Згідно з дослідженнями, ЕМ на основі "зеленої" енергії здатні зменшити викиди CO₂ на 50-60% порівняно з традиційними автомобілями на бензині [43, 44].

2.4.1. Стратегії розвинутих держав і країн, що розвиваються

Декарбонізація транспорту є ключовим елементом глобальної стратегії щодо зменшення викидів парникових газів та запобігання змінам клімату. Проте підходи до цього процесу значно відрізняються між розвиненими країнами та країнами, що розвиваються. Ці відмінності зумовлені економічними можливостями, доступом до технологій, рівнем інфраструктурного розвитку, політичною волею, а також соціальними та культурними аспектами. У розвинутих країнах, таких як Німеччина, Франція, Японія, Велика Британія та США, підходи до декарбонізації транспорту орієнтовані на впровадження новітніх технологій, інновацій, а також на інтенсивну державну підтримку та стимулювання бізнесу [45-48]. Основними напрямками політики є електрифікація транспорту, розвиток водневих технологій, впровадження інтелектуальних транспортних систем та зниження викидів у секторах громадського транспорту, авіації та морських перевезень [49]. Ці країни мають фінансові ресурси для підтримки великих інфраструктурних проектів, таких як створення розгалужених мереж зарядних станцій для електромобілів, впровадження

інтелектуальних систем управління дорожнім рухом, а також розробка і впровадження нових видів екологічного транспорту. Електрифікація транспорту є ключовим напрямком декарбонізації в розвинутих країнах. Так, Норвегія стала лідером у світі з впровадження електромобілів завдяки масштабним державним субсидіям, податковим пільгам для власників електромобілів та розбудові зарядної інфраструктури. У 2020 році частка нових автомобілів, що працюють на електриці, перевищила 54%, що є найвищим показником у світі [50-52]. Уряди розвинутих країн активно стимулюють покупку електромобілів серед населення, пропонуючи фінансові переваги: субсидії на купівлю, зниження податків або звільнення від сплати деяких зборів. Це дозволяє значно збільшити частку електротранспорту в загальному автопарку та зменшити викиди CO₂/

Важливим компонентом стратегії є водневий транспорт, який може стати альтернативою для важких вантажівок, автобусів та залізничного транспорту, де електричні батареї поки що мають обмежену ефективність через свою вагу і малий радіус дії. Німеччина активно розвиває водневі технології, запустивши перші водневі потяги, які замінюють дизельні локомотиви на маршрутах, де електрифікація недоцільна [53]. Водневі автомобілі, як Toyota Mirai, також набирають популярності завдяки розвитку інфраструктури для виробництва та зберігання водню. Подібні програми розвитку водневого транспорту також впроваджуються в Японії, де водневі автобуси та вантажівки вже використовуються в ряді міст [31, 54]. Ще одним важливим напрямком є зниження викидів у громадському транспорті та авіації. Авіація є одним із найважчих секторів для декарбонізації через обмеженість технологій та високий рівень викидів. Відповідно, розвинені країни інвестують значні кошти у розробку альтернативних видів палива для літаків, таких як біопаливо або синтетичне паливо. Це дозволяє зменшити залежність від викопних видів палива та скоротити викиди вуглекислого газу у цій галузі. Також активно фінансуються проекти з розвитку електричних та гібридних літаків [23, 41].

Країни, що розвиваються, такі як Індія, Бразилія, Китай та країни Африки, мають інший підхід до декарбонізації транспорту, що значною мірою

зумовлений економічними та інфраструктурними обмеженнями. У цих країнах основні зусилля зосереджені на покращенні паливної ефективності транспортних засобів та поступовому впровадженні альтернативних видів пального, таких як біопаливо або природний газ. Наприклад, Індія встановила національні стандарти паливної ефективності, які змушують автовиробників виробляти транспортні засоби з меншим споживанням палива. Крім того, уряд Індії стимулює розвиток електричного транспорту через програми фінансової підтримки та інвестиції в електрифікацію залізничного транспорту [55].

Одним з ключових аспектів стратегії країн, що розвиваються, є розвиток громадського транспорту, який є важливим засобом зниження викидів у великих містах. Наприклад, Китай активно інвестує у розвиток систем електричних автобусів та електричних потягів [56]. У Бразилії широкого поширення набув використання біоетанолу, що виробляється з цукрової тростини [57]. Використання біопалива дозволяє суттєво скоротити викиди CO₂ у порівнянні з традиційними видами палива та є дешевшим рішенням для багатьох країн, що розвиваються.

Однак, важливою проблемою для багатьох країн, що розвиваються, залишається нестача фінансування та відсутність необхідної інфраструктури. Наприклад, в Африці та Південній Азії досі відчутно бракує мереж зарядних станцій для електромобілів, що суттєво уповільнює темпи їх впровадження. Крім того, в цих країнах транспортна інфраструктура часто знаходиться на низькому рівні розвитку, що ускладнює процес декарбонізації. Уряди таких країн часто не мають можливостей надавати субсидії на покупку електромобілів або інвестувати в інноваційні транспортні рішення.

Міжнародна підтримка відіграє важливу роль у процесі декарбонізації транспорту в країнах, що розвиваються. Міжнародні фінансові інституції, такі як Світовий банк та Міжнародний валютний фонд, надають кредити та гранти для підтримки проектів у сфері зеленої енергетики та екологічного транспорту. Це дозволяє країнам, що розвиваються, долати фінансові бар'єри та реалізовувати проекти, які були б недоступні без міжнародної допомоги. Також важливим

аспектом є обмін технологіями між країнами. Наприклад, Китай є лідером у виробництві електричних автобусів і активно експортує свої технології в інші країни, сприяючи глобальній декарбонізації транспорту.

Отже, основні відмінності між стратегіями декарбонізації транспорту в розвинутих країнах і країнах, що розвиваються, зумовлені економічними можливостями, доступом до технологій та інституційною підтримкою. Розвинуті країни орієнтуються на довгострокові цілі – повну електрифікацію транспорту, розвиток водневих технологій та зниження викидів у важкодоступних секторах, таких як авіація та морські перевезення. Країни, що розвиваються, зосереджуються на короткострокових рішеннях, таких як підвищення паливної ефективності та використання альтернативних видів палива, водночас стикаючись із значними інфраструктурними та фінансовими викликами [46, 48].

На рис. 6 наведено основні заходи, які приймаються розвинутими державами та країнами, що розвиваються, для скорочення викидів CO₂ від транспорту.



Рис. 6. Основні заходи в розвинутих державах та країнах, що розвиваються, для скорочення викидів CO₂ від транспорту

2.4.2. Приклади успішних програм в окремих країнах світу

У багатьох країнах світу реалізуються інноваційні програми декарбонізації транспорту, які допомагають зменшити викиди CO₂ та просувати сталий розвиток. У цьому розділі ми розглянемо чотири приклади успішних програм з Норвегії, Німеччини, Китаю та США, кожна з яких має свої особливості та досягнення у сфері електрифікації та зменшення викидів парникових газів.

Норвегія: лідер з електричного транспорту

Норвегія є світовим лідером у впровадженні електричних автомобілів, що обумовлено активною політикою уряду та фінансовими стимулами. У 2023 році частка електромобілів серед нових продажів перевищила 54%, що є рекордним показником у світі.

Ключові елементи успіху Норвегії [49-51]:

1. Фінансові стимули: Норвегія запровадила різноманітні податкові пільги для власників електромобілів. Наприклад, електромобілі звільнені від податку на додану вартість (ПДВ) та дорожніх зборів, що робить їх більш доступними.

2. Розвиток інфраструктури: Країна активно інвестує в зарядні станції для електромобілів. У 2022 році Норвегія мала понад 17000 зарядних станцій, що робить доступ до зарядки зручним для водіїв.

3. Публічний транспорт: Норвегія також реалізує програми електрифікації громадського транспорту. Столиця Осло стала першим містом у світі, яке повністю перевело свій автобусний флот на електротранспорт.

4. Дослідження та інновації: Норвегія інвестує в наукові дослідження в галузі електричних технологій, що сприяє подальшому розвитку електромобілів.

Німеччина: розвиток залізничного транспорту та електромобільності

Німеччина активно працює над декарбонізацією свого транспортного сектору, зокрема через розвиток залізничного транспорту та підтримку електромобільності.

Основні ініціативи [52, 53]:

1. Залізничний транспорт: Німеччина має одну з найбільш розвинених залізничних мереж у світі. Уряд активно інвестує в модернізацію залізниць і

переходить на електрифікацію залізничного транспорту. Близько 60% німецьких залізниць працює на електриці, що значно зменшує викиди CO₂.

2. Електромобільність: Німеччина прагне стати лідером у виробництві електромобілів. В уряді було запроваджено програми для фінансування покупки електромобілів, які включають дотації для споживачів та інвестиції в дослідження. Наприклад, німецький автовиробник Volkswagen оголосив про плани інвестувати 35 мільярдів євро у виробництво електромобілів до 2025 року.

3. Участь бізнесу: Компанії, такі як Daimler і BMW, активно впроваджують електричні технології у своїй продукції, що сприяє розвитку інфраструктури для зарядки та популяризації електромобілів серед споживачів.

4. Громадський транспорт: Німеччина також розвиває екологічний громадський транспорт, включаючи електробуси. У багатьох містах, таких як Берлін і Гамбург, здійснюється перехід на електричні автобуси.

США: стратегії Tesla та урядова політика в електрифікації

Сполучені Штати, зокрема через компанію Tesla, стали одним із провідних гравців на ринку електромобілів. Однак в країні також спостерігаються інші важливі ініціативи з електрифікації транспорту [35. 47].

Ключові аспекти:

1. Tesla: Ця автомобільна компанія стала символом електричної революції у США. Компанія розробила не лише електромобілі, але й мережу зарядних станцій Supercharger, що забезпечує зручність користування електричними автомобілями. Tesla інвестує в інновації, такі як автономне водіння, що може суттєво зменшити викиди в майбутньому.

2. Урядова політика: Адміністрація США також активно підтримує електрифікацію транспорту. У 2021 році було оголошено про план інвестування 7,5 мільярдів доларів у розвиток зарядної інфраструктури по всій країні. Ці інвестиції повинні забезпечити доступність зарядних станцій на міждержавних шляхах та в містах.

3. Дослідження та інновації: Уряд США підтримує наукові дослідження в галузі нових технологій акумуляторів та енергетичних систем. Інститут

енергетичних досліджень в США розробляє нові технології, які можуть зменшити вартість та підвищити ефективність електромобілів.

4. Громадський транспорт: У містах, таких як Лос-Анджелес і Нью-Йорк, розвиваються програми електрифікації громадського транспорту. Наприклад, Лос-Анджелес планує повністю перейти на електричні автобуси до 2030 року, що зменшить викиди CO₂ та покращить якість повітря.

Уряди країн ЄС також пропонують значні фінансові стимули для придбання електромобілів. У Норвегії, наприклад, уряд забезпечує власників електромобілів податковими пільгами, звільненням від сплати податків на автомобілі, паркувальними привілеями та безкоштовним проїздом по платних дорогах. Такі заходи суттєво збільшують попит на електромобілі, що сприяє масовому переходу на екологічно чистий транспорт. Ці стимули ефективно підтримують перехід на електротранспорт та сприяють швидкому зростанню кількості електромобілів на дорогах країни.

У Сполучених Штатах діє програма Build Back Better, яка включає значні інвестиції в "зелені" технології, інфраструктуру та чисту енергію. Частиною цієї програми є фінансування зарядної інфраструктури для електромобілів та стимулювання приватного сектору до переходу на електромобільність. Програма також передбачає надання субсидій для споживачів, які купують електромобілі, та підтримку виробників, що впроваджують "зелені" інновації у виробництво транспортних засобів. Це дозволяє ефективно залучати як державні, так і приватні інвестиції у транспортну галузь.

Таким чином, успішні програми декарбонізації транспорту в Норвегії, Німеччині та США демонструють, як різні країни реалізують інноваційні стратегії для зменшення викидів CO₂. Ці програми включають фінансові стимули, розвиток інфраструктури для електричного транспорту, інвестиції в дослідження та інновації, а також перехід на альтернативні види пального. Обрані країни служать прикладом того, як комплексний підхід може призвести до значного зменшення викидів та сприяти сталому розвитку в умовах зміни клімату.

Китай: стрімке розширення електромобілів та підтримка розвитку зелених технологій

Китай демонструє швидке зростання у сфері електромобільності, що обумовлено державними ініціативами та підтримкою відновлювальних технологій [55].

Головні досягнення [46, 55]:

1. Електромобілі: Китай є найбільшим ринком електромобілів у світі, з понад 5 мільйонами електричних автомобілів на дорогах у 2022 році. Уряд пропонує субсидії та пільги для покупців електромобілів, що сприяє їхньому поширенню.

2. Зарядна інфраструктура: Уряд інвестує у розвиток інфраструктури зарядних станцій. Станом на 2022 рік, у Китаї було встановлено понад 1,3 мільйона зарядних станцій, що забезпечує зручний доступ до електропостачання.

3. Дослідження та інновації: Китай також акцентує увагу на розвитку технологій акумуляторів і відновлювальних джерел енергії. Китайські компанії, такі як BYD, займаються розробкою нових акумуляторних технологій, що робить електромобілі ще більш доступними і ефективними.

4. Громадський транспорт: У багатьох китайських містах впроваджуються електробуси. Наприклад, у Пекіні та Шанхаї вже працюють тисячі електробусів, що знижує викиди CO₂ та покращує якість повітря.

Китай, використовує активну політику субсидій та пільгових кредитів для стимулювання внутрішнього ринку електромобілів. Китайський уряд поставив мету збільшити частку електромобілів до 20% від загального обсягу продажів нових автомобілів до 2025 року. Важливим компонентом цієї стратегії є розробка національної мережі зарядних станцій, яка підтримується державними інвестиціями. Крім того, уряд Китаю фінансує дослідження та розробки у сфері водневих технологій, що дозволяє країні ставати світовим лідером у виробництві екологічного транспорту.

Таким чином, світовий досвід декарбонізації транспорту демонструє ефективність різних заходів, спрямованих на зменшення викидів CO₂. Перехід

на альтернативні види пального, електрифікація транспорту та впровадження низьковуглецевих технологій є критично важливими для досягнення цілей у сфері зменшення викидів. Ці заходи потребують підтримки з боку урядів, інвестицій у нові технології та активної участі суспільства для забезпечення сталого розвитку транспортного сектору в умовах зміни клімату. Обрані країни, такі як Норвегія, Японія та Німеччина, слугують прикладом того, як інновації та стратегічне планування можуть призвести до значного зменшення викидів і переходу до сталого транспорту.

РОЗДІЛ 3. ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТУ В УКРАЇНІ: ВИКИДИ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ТА ЗАХОДИ ЩОДО ЇХНЬОГО ЗНИЖЕННЯ

3.1. Структура транспорту в Україні та його частка у викидах CO₂

Транспорт є невід'ємною частиною економічного та соціального розвитку України, забезпечуючи перевезення товарів і пасажирів між регіонами. Проте цей сектор також є значним джерелом викидів парникових газів. Декарбонізація транспортної галузі в нашій державі стикається зі значною кількістю проблем, розв'язання яких можливе тільки завдяки об'єднаним зусиллям з боку уряду, бізнесу та суспільства. Україна має величезний потенціал для переходу на екологічні види транспорту, скорочення викидів парникових газів та покращення якості атмосферного повітря.

Транспортний сектор України складається з різних видів транспорту, включаючи автомобільний, залізничний, повітряний і морський. За даними Державної служби статистики України, на автомобільний транспорт припадає найбільша частка перевезень. У 2022 році автомобільний транспорт становив приблизно 75% усіх перевезень пасажирів та 60% вантажів [58].

Викиди CO₂ від транспортного сектору в Україні становлять близько 22% від загальних викидів парникових газів. Ця частка варіюється в залежності від виду транспорту, але автомобільний транспорт є найбільшим внеском у загальні викиди. За оцінками експертів, автомобільний транспорт забезпечує приблизно 90% усіх викидів CO₂ від транспорту. Зокрема, у 2020 році викиди від автомобільного транспорту перевищили 12 млн тонн CO₂. Серед них значна частка викидів (приблизно 30% від усіх викидів, сумованих для транспорту) становлять викиди від вантажного транспорту. Це пов'язано з високим рівнем споживання дизельного палива, яке використовується для великих вантажівок і автобусів. Крім того, в Україні зростає кількість пасажирських автобусів і маршруток, які переважно працюють на дизелі, що посилює проблему викидів CO₂ [58].

Також в Україні все ще залишається значна частка дизельних локомотивів, особливо на неповністю електрифікованих ділянках залізничних колій. За

даними "Укрзалізниці", приблизно 47% всіх вантажних перевезень в Україні здійснюється залізницею. Однак електрифікація залізниць покриває лише близько 44% загальної протяжності колій. Таким чином, значна частина залізничного транспорту продовжує працювати на дизельному паливі, що призводить до викидів CO₂ [59].

В Україні до повномасштабного вторгнення 24 лютого 2022 року авіаційний транспорт також відіграв важливу роль у перевезенні пасажирів і вантажів. До пандемії COVID-19 спостерігалось щорічне збільшення пасажиропотоку, що безпосередньо призводило до збільшення викидів. Українські авіакомпанії поступово впроваджували сучасніші літаки з нижчим рівнем викидів, але загальний рівень використання авіації в Україні, порівняно зі світовими стандартами, все ж залишався досить високим. Однак після 24 лютого 2024 року повітряний простір України для комерційних перевезень закритий і поки мова про відновлення авіасполучення не йде [60].

3.2. Основні виклики, які сповільнюють декарбонізацію транспорту в Україні

Декарбонізація транспорту в Україні стикається з кількома серйозними викликами, які потребують комплексного підходу до вирішення.

1. Застарілий транспортний парк, дотична інфраструктура та проблеми з інтеграцією транспортних засобів.

Багато автомобілів, які використовуються в Україні, застарілі, що сприяє високим викидам CO₂ і погіршенню екологічної ситуації. Станом на 2023 рік, середній вік автомобілів в Україні перевищує 15 років, що є значно більше, ніж в європейських країнах, де цей показник становить близько 8-10 років [61]. Більшість автомобілів працюють на бензині чи дизельному паливі, що є невігідним з екологічної точки зору. Погіршення якості повітря через використання великої кількості викопних палив. Транспортний сектор України характеризується значною залежністю від бензину, дизелю та газу, що використовуються на транспорті. Понад 90% автомобілів працюють на бензині та дизельному паливі, що підвищує викиди парникових газів. Так, за даними

Міненерго, у 2021 році було спожито орієнтовно 10,5 мільйонів тонн палива для легкових автомобілів, з яких понад 60% припадало на дизель [62]. На рис. 7 наведено розподіл автомобілів в залежності від виду пального, яким вони заправлені. На фоні зростання цін на пальне і зростаючих екологічних проблем Україні необхідно перейти на більш екологічні види транспорту.

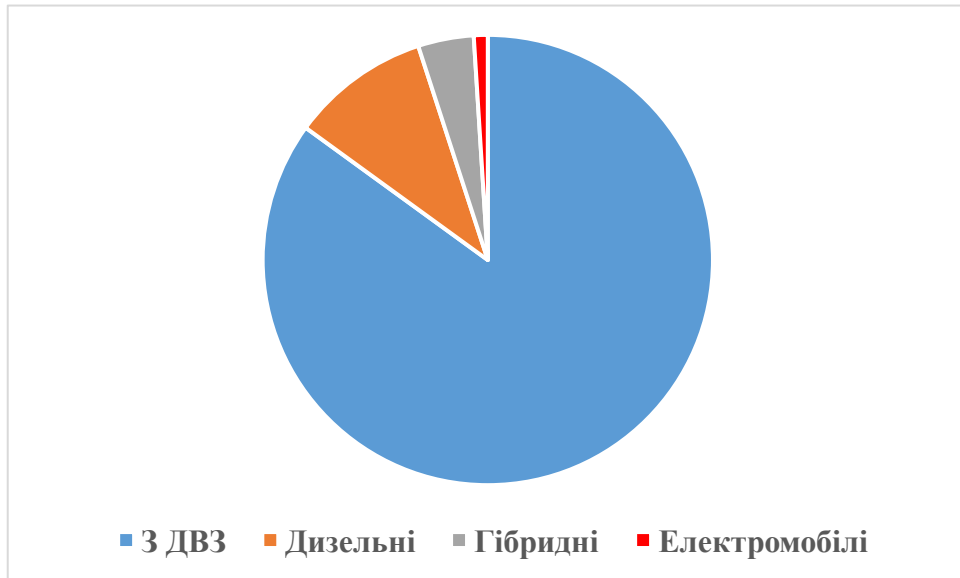


Рис. 7. Розподіл автомобільного транспорту в Україні за типом пального, яке використовує транспортний засіб

Також багато українських автомобілів та транспортних засобів не відповідають сучасним стандартам викидів, встановленим в ЄС. Наприклад, в Україні використовуються автомобілі, які відповідають стандартам Євро-2 або Євро-3, тоді як в Європі вже впроваджуються стандарти Євро-6. Це призводить до того, що український автопарк має значно вищі викиди забруднюючих речовин в атмосферу. Згідно з дослідженнями, в Україні викиди CO₂ від автомобільного транспорту становлять близько 9,5 млн тонн на рік, що є значним внеском у загальний обсяг викидів [63].

Багато українських автомобільних доріг та залізниць потребують термінової модернізації. Відповідно до даних Міністерства інфраструктури України, близько 80% доріг знаходяться в незадовільному стані. Зношеність інфраструктури призводить до підвищення витрат пального і, відповідно, до

збільшення викидів CO₂. Модернізація та ремонти інфраструктури можуть знизити споживання пального на 15-20%, що значно зменшить викиди.

Проблеми з інтеграцією: В Україні недостатньо уваги приділяється інтеграції різних видів транспорту. Нерідко відсутня інфраструктура для перевантаження вантажів між залізницею та автомобільним транспортом, що ускладнює логістичні процеси і призводить до зростання викидів.

2. Низька частка електромобілів та недостатня зарядна інфраструктура для них.

В Україні лише 1% автопарку складають електромобілі, в той час як у країнах Європи цей показник значно вищий. Висока вартість електромобілів є серйозною перешкодою для їх поширення. Це пов'язано не тільки з високими цінами на електромобілі, але й із недостатньою кількістю доступних моделей на ринку, незначним обсягом зарядних станцій та іншими причинами. На сьогодні в Україні налічується близько 6,0 тисяч зарядних станцій, що значно менше, ніж у багатьох європейських країнах [64]. Ця ситуація знижує привабливість електромобілів для споживачів. Впровадження нових технологій стримується браком фінансування та інвестицій у розвиток електричної інфраструктури і технологій заважає впровадженню інноваційних рішень, які б підвищили ефективність і екологічність транспорту.

3. Низька свідомість населення.

Низький рівень обізнаності населення щодо переваги електромобілів, таких як зменшення витрат на паливо та обслуговування. Дослідження показують, що близько 60% населення не мають достатньої інформації про екологічні переваги електричного транспорту. Брак інформації про екологічні переваги електричного транспорту також може стримувати його популярність. Також в Україні спостерігається недостатня підтримка населенням екологічних ініціатив, які сприяли б декарбонізації транспорту. Багато людей ставляться до нововведень з недовірою або не бачать їхньої доцільності.

4. Недостатня політика держави щодо впровадження декарбонізації та брак фінансування програм.

В Україні немає чітко прописаних правил щодо стратегії декарбонізації транспорту, не впроваджено достатньо ініціатив щодо підтримки електротранспорту. Це створює невизначеність для інвесторів і бізнесу, ускладнюючи розробку та впровадження нових екологічних ініціатив. Відсутність підтримки з боку держави стримує розвиток нових технологій і альтернативних видів пального. Також недостатніми є державні інвестиції в інфраструктуру електричного транспорту та розвиток альтернативних видів пального. Щоб досягти цілей декарбонізації до 2030 року, нашій країні потрібно інвестувати близько 30 млрд доларів США в модернізацію транспортної інфраструктури. На фоні повномасштабної війни та фінансових труднощів Україні не вистачає коштів на реалізацію масштабних проєктів, що може призвести до уповільнення процесу декарбонізації.

На рис. 8 наведена схема, на якій подані основні проблеми, розв'язання яких необхідне для проведення декарбонізації транспортного сектору в Україні.

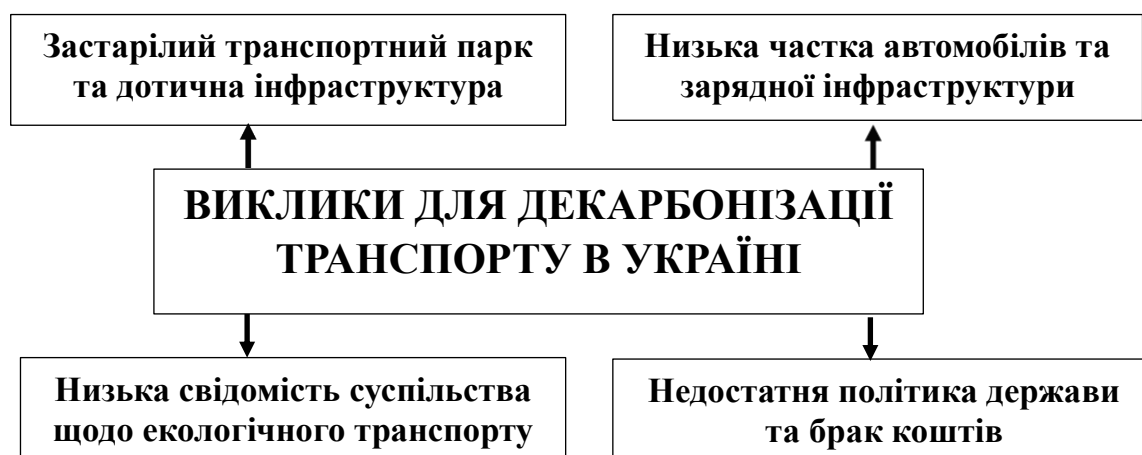


Рис. 8. Основні виклики, що перешкоджають успішній декарбонізації транспортного сектору в Україні

3.3. Політика України щодо зменшення викидів парникових газів від транспортних засобів

Участь у міжнародних угодах

У рамках глобальних зусиль щодо боротьби зі зміною клімату Україна активно бере участь у міжнародних угодах та ініціативах, спрямованих на зменшення викидів парникових газів у всіх секторах економіки, включаючи

транспорт. Основними угодами, в яких бере участь Україна, є Паризька угода та ініціативи Європейського Союзу. Паризька угода – ключовий міжнародний документ, метою якого є обмеження глобального потепління до 1,5 °C порівняно з доіндустріальними рівнями [16]. Відповідно з цим документом та розробленими НВВ Україна зобов'язалася зменшити викиди на 40% до 2030 року у порівнянні з рівнями 1990 року. Також ведеться робота над удосконаленням національної системи моніторингу викидів, що дозволяє точніше оцінювати вплив транспорту на навколишнє середовище.

Україна як асоційований член ЄС бере участь у ініціативах, спрямованих на зменшення викидів у транспортному секторі, зокрема до ініціативи "Зелений курс" (Green Deal), якою заохочується використання екологічних видів пального, електромобілів та розвиток громадського транспорту [12]. У рамках угоди про асоціацію з ЄС Україна зобов'язалася впроваджувати норми та стандарти ЄС у сфері охорони навколишнього середовища. Це включає в себе адаптацію українського законодавства до директив ЄС щодо зменшення викидів транспорту, зокрема викидів від автомобільного транспорту, а також впровадження нових технологій.

Національні плани з енергетичної та транспортної стратегії до 2030 року

Важливою частиною політики України в сфері зменшення викидів є національні плани з енергетичної та транспортної стратегії, які визначають пріоритети та заходи для досягнення цілей у сфері декарбонізації.

Національний план дій з охорони навколишнього середовища

Національний план дій з охорони навколишнього середовища роки передбачає комплексний підхід до зменшення викидів у транспортному секторі. Основними завданнями є:

- Розвиток електричного транспорту, зокрема сприяння переходу на електромобілі, створення інфраструктури для зарядки та впровадження податкових пільг для власників електромобілів. Так, було прийнято декілька важливих законодавчих актів, які стимулюють розвиток

"зеленого" транспорту. Наприклад, у 2020 році було затверджено закон, що надає пільги на імпорт та продаж електромобілів, а також розроблено стратегії для розвитку інфраструктури електричних зарядних станцій [65-72].

- Модернізація громадського транспорту, яка передбачає оновлення автобусного парку на екологічні види пального, зокрема, на електричні автобуси та тролейбуси з акумуляторними батареями, які вже впроваджуються в містах, таких як Київ, Львів, Дніпро, Харків та інших [73].
- Підтримка залізничного транспорту та ширша його електрифікація.

Транспортна стратегія до 2030 року [74]

Транспортна стратегія України до 2030 року містить положення про модернізацію транспортної інфраструктури, зменшення викидів парникових газів та поліпшення якості повітря. Ключові напрямки стратегії включають:

- Електрифікацію транспорту: Розробка плану електрифікації залізниць та впровадження нових технологій, таких як системи тяги на основі електрики.
- Використання альтернативних видів пального: Заохочення використання біопалива, водню та інших екологічних альтернатив.
- Інтеграція різних видів транспорту: Поліпшення сполучення між різними видами транспорту для зменшення викидів та підвищення ефективності перевезень.

Таким чином, політика України щодо зменшення викидів парникових газів у транспортному секторі є складовою частиною міжнародних зобов'язань і національних стратегій. Участь у Паризькій угоді та ініціативах ЄС надає Україні можливість впроваджувати нові технології та стандарти, спрямовані на зменшення викидів. Національні плани дій у сфері енергетики та транспорту до 2030 року визначають пріоритети для розвитку електричного транспорту, модернізації інфраструктури та інтеграції різних видів транспорту. Реалізація цих заходів сприятиме зменшенню викидів CO₂, покращенню якості повітря та досягненню цілей у сфері сталого розвитку в Україні.

3.4. Інноваційні проекти в Україні

3.4.1. Тенденції розвитку автомобільного транспорту та дотичної до нього інфраструктури

В Україні спостерігається зростання популярності електромобілів, що є важливим кроком до декарбонізації транспортного сектору. За даними асоціації "Укравтопром", в Україні за останні кілька років спостерігається стабільне зростання продажів електромобілів. У 2023 році продаж електромобілів зріс на 70% порівняно з попереднім роком [64]. Цей ріст пояснюється не лише державними пільгами, але й зростанням вартості викопних палив через ускладнений їхній імпорт та вплив повномасштабного вторгнення росії до України. Одним із ключових факторів, що впливають на ріст популярності електромобілів, є розвиток технологій. Виробники електромобілів постійно вдосконалюють свої моделі, пропонуючи споживачам більшу дальність ходу, швидшу зарядку та зручніші умови експлуатації. Також збільшення доступності електромобілів відзначається за рахунок зростання кількості вживаних електричних автомобілів на ринку. Всі ці покращення спричиняють і поживлення ринку електромобілів в Україні. Якщо на кінець 2021 в Україні нараховувалось всього орієнтовно 8,5 тис. електромобілів, то на середину 2024 року ця цифра зросла більш ніж у 10 разів і досягла майже 96 тисяч електромобілів [64].

Для подальшого розвитку електромобільності необхідно розвивати зарядну інфраструктуру. В Україні вже діє мережа зарядних станцій, яка включає як швидкі, так і повільні зарядні пристрої. Станом на 2023 рік в Україні налічувалось понад 3000 зарядних станцій, з яких приблизно 700 є швидкими зарядними станціями, а на 2024 рік їхня кількість зросла вдвічі. Важливими проектами є також ініціативи приватних компаній, які розгортають мережі зарядних станцій у містах та на автомагістралях [64]. Одна з ініціатив, яка активно реалізується в Україні, полягає у створенні нових мереж зарядних станцій на території супермаркетів, торгових центрів і автозаправних станцій. Ці мережі дозволяють власникам електромобілів легко заряджати свої автомобілі

під час шопінгу чи подорожей. Власники електромобілів також можуть використовувати домашні зарядні станції, що значно полегшує процес заряджання. Державна програма "Доступні електромобілі" передбачає можливість отримання фінансування на установку домашніх зарядних станцій. Це стимулює людей переходити на електромобілі, оскільки створення зарядної інфраструктури є важливим фактором при виборі електричного автомобіля [73-76].

Міський транспорт є ще одним важливим напрямком у зменшенні викидів CO₂ в Україні. У містах активно впроваджуються програми з розвитку електробусів та тролейбусів, які допомагають зменшити забруднення повітря та покращити якість життя мешканців. Відповідно до даних Міністерства інфраструктури, кількість електробусів в Україні зростає щороку. У 2023 році в Україні було закуплено понад 500 електробусів для міст, таких як Київ, Львів, Одеса, Дніпро та інші. Це дозволяє не лише зменшити викиди, але й покращити екологічну ситуацію в містах. Першим містом в Україні, яке впровадило електробуси в масовий обіг, став Київ. У столиці вже запущено кілька маршрутів з електробусами, що отримали позитивні відгуки від мешканців. За даними досліджень, електробуси значно знижують рівень шуму та викидів, покращуючи загальну якість повітря. Програми розвитку електробусів передбачають не лише закупівлю нових машин, а й розвиток зарядної інфраструктури для їх обслуговування. Міста впроваджують систему швидкої зарядки, яка дозволяє заряджати електробуси під час перерв на маршруті, що збільшує їхню ефективність [73].

Тролейбуси залишаються важливим елементом міського транспорту в Україні. Багато міст, зокрема Київ, Львів та Одеса, активно модернізують свої тролейбусні мережі, впроваджуючи нові технології та екологічні рішення. У 2022 році в Україні було закуплено понад 200 нових тролейбусів, що працюють на чистій енергії. Однією з важливих програм є також модернізація тролейбусних ліній, яка передбачає встановлення нових контактних мереж і модернізацію системи живлення. Це дозволяє значно зменшити витрати на

енергію та знизити викиди. Використання тролейбусів у містах дозволяє значно зменшити рівень шуму та покращити якість повітря [73]. Міста також розвивають систему "розумного" транспорту, яка передбачає інтеграцію тролейбусів, електробусів і інших видів транспорту в єдину мережу. Це забезпечує зручні маршрути та підвищує ефективність використання міського транспорту.

3.4.2. Залізничний транспорт: електрифікація залізниць та потенціал для вантажоперевезень

Залізничний транспорт є важливим компонентом декарбонізації в Україні, оскільки він вже вважається одним із найефективніших способів перевезення вантажів. Важливість залізниці для забезпечення перевезення вантажів і пасажирів особливо зросла в останні два роки через повномасштабне вторгнення росії до України і втрату ринку активних перевезень морським транспортом. Тому в пріоритеті буде напрацювання планів щодо активнішої електрифікації залізничних маршрутів завдяки яким можна досягнути не тільки скорочення викидів парникових газів, але й підвищувати ефективність перевезень. В рамках Національного плану електрифікації до 2030 року планується електрифікувати 70% залізничних маршрутів [74, 77]. Це дозволить зменшити залежність від дизельних локомотивів і знизити викиди CO₂. На сьогоднішній день вже реалізовані проекти електрифікації важливих залізничних магістралей, таких як Київ-Львів, Київ-Одеса та інші. Це забезпечує не лише зменшення викидів, але й скорочення витрат на перевезення, оскільки електричні локомотиви є більш енергоефективними.

Залізничний транспорт може стати альтернативою автомобільному транспорту для вантажних перевезень, що допоможе зменшити затори на дорогах і покращити екологічну ситуацію, адже має великий потенціал для вантажоперевезень. Україна розташована на важливих торгових шляхах між Європою та Азією, і розвиток залізничної інфраструктури може значно підвищити конкурентоспроможність української економіки. За даними "Укрзалізниці", у 2022 році частка залізничних перевезень вантажів зросла до

28%. Це свідчить про зростання попиту на залізничні перевезення та підтверджує правильність обраного курсу на електрифікацію та модернізацію залізничної інфраструктури. Однак, для досягнення максимального потенціалу, необхідно не лише електрифікувати залізниці, а й модернізувати колійні мережі, вдосконалити логістичні процеси та інтегрувати залізничні перевезення в загальну транспортну інфраструктуру. Це забезпечить швидше та ефективніше обслуговування вантажів, а також дозволить знизити викиди CO₂.

3.5. Перспективи України щодо декарбонізації транспортної галузі: основні напрямки та державна підтримка

Державна підтримка є одним із ключових факторів успішного впровадження декарбонізаційних ініціатив у транспортній галузі. Ефективність державних програм безпосередньо впливає на розвиток інфраструктури для електромобілів, водневого транспорту, а також стимулює залучення приватних інвестицій у ці галузі. У світовій практиці уряди розвинутих країн активно впроваджують програми підтримки, спрямовані на досягнення цілей декарбонізації транспорту. Україні теж діють певні програми державної підтримки, але їхній вплив та ефективність суттєво відрізняються від міжнародних практик. Так, масштаби програми розвитку електромобільності та декарбонізації транспорту суттєво менші у порівнянні з країнами Європи або США. Зокрема, ухвалено закон щодо звільнення електромобілів від сплати податку і акцизів при їхньому імпорті до країни, що сприяє збільшення ЕМ в Україні [75, 76]. Проте в Україні немає системних програм розвитку інфраструктури для електромобілів або водневого транспорту на національному рівні. Переважна більшість зарядних станцій для електромобілів встановлюється приватними компаніями, і цей процес не отримує достатньої підтримки від держави.

Розвиток інфраструктури та залучення інвестицій є критично важливими факторами для успішної декарбонізації транспортної галузі як на світовому рівні, так і в Україні [77, 78]. Зарядна інфраструктура для електромобілів, а також інвестиції у водневі технології та альтернативні види транспорту стають

ключовими напрямками для зменшення викидів CO₂. В Україні розвиток зарядної інфраструктури для електромобілів і водневого транспорту відстає від світових тенденцій. Станом на 2023 рік в Україні налічується лише близько 4500 зарядних станцій для електромобілів, більшість з яких розташовані у великих містах, таких як Київ, Львів, Одеса та Харків. Розвиток інфраструктури в регіонах та на автомагістралях залишається недостатнім, що обмежує можливість використання електромобілів на довгих дистанціях. Для порівняння, у країнах Європейського Союзу на кожні 100 км шляху припадає в середньому 20–30 зарядних станцій, тоді як в Україні цей показник значно нижчий.

Розвиток водневих технологій для транспорту знаходиться на початковій стадії. Це зумовлено відсутністю необхідної інфраструктури для виробництва, зберігання та розподілу водню, а також високими витратами на технології. Утім, Україна вже починає робити перші кроки у цьому напрямку, зокрема через участь у міжнародних проєктах та розвиток співпраці з європейськими партнерами у сфері водневої енергетики. Що стосується водневих технологій, то в Україні ця сфера знаходиться на етапі планування і не отримала ще належного розвитку. Незважаючи на великий потенціал для виробництва "зеленого" водню за допомогою відновлюваних джерел енергії, Україна поки не має національних програм або стратегій, які б забезпечили масовий перехід на водневий транспорт. В Україні також є значний потенціал для виробництва "зеленого" водню за допомогою відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергетика. Впровадження національної стратегії розвитку водневих технологій допоможе країні скористатися цим потенціалом та інтегруватися в європейський водневий ринок.

Наразі в Україні впровадження інноваційних технологій у транспортній сфері є обмеженим через брак ресурсів та недостатній розвиток цифрової інфраструктури. Автономні транспортні засоби поки що не є поширеними, а ІТС використовуються лише на початковому рівні. Проте у великих містах, таких як Київ та Львів, починають з'являтися перші ініціативи з розумного управління дорожнім рухом, які можуть стати основою для подальшого розвитку таких

технологій. Підтримка міжнародних організацій, таких як Світовий банк, сприяє реалізації окремих проектів у цьому напрямі, але цей процес потребує більше часу і значних інвестицій.

Країни, що лідирують у сфері декарбонізації транспорту, також активно інвестують у науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи. Наприклад, Європейська комісія фінансує програми з дослідження новітніх технологій для електромобілів, водневого транспорту та альтернативних видів палива. Такий підхід дозволяє прискорити впровадження нових рішень на ринок. В Україні створення спеціальних фондів для підтримки наукових досліджень та стартапів у сфері екологічного транспорту може стати потужним інструментом для залучення інноваційних рішень у національну економіку. Це дозволить не лише використовувати вже існуючі технології, а й активно брати участь у створенні нових.

Важливою частиною міжнародної стратегії декарбонізації є стимулювання бізнесу до переходу на екологічний транспорт. У багатьох країнах ЄС існують програми субсидування для підприємств, які купують електричні або водневі вантажівки, автобуси та інші транспортні засоби. Цей підхід дозволяє скорочувати викиди від комерційного транспорту, який зазвичай є одним із найбільших джерел забруднення. Для України це також може бути важливим інструментом, оскільки більшість вантажного та громадського транспорту все ще працює на викопному паливі. Запровадження програм підтримки для бізнесу з купівлі екологічного транспорту допоможе скоротити викиди та покращити екологічну ситуацію в країні.

Отже, міжнародний досвід пропонує широкий спектр рішень, які можуть бути ефективно адаптовані в Україні. Податкові пільги та субсидії, розвиток зарядної та водневої інфраструктури, підтримка інновацій та наукових досліджень, а також стимулювання бізнесу є ключовими елементами, які можуть допомогти прискорити процес декарбонізації транспортної галузі в Україні та інтегрувати її у глобальні екологічні ініціативи.

Порівняння розвитку інфраструктури для декарбонізації транспорту між Україною та розвинутими країнами свідчить про значний розрив у темпах та обсягах інвестицій. У той час як у Європі та США інфраструктурні проекти фінансуються на мільярди доларів та є частиною національних стратегій, в Україні цей процес відбувається повільніше через обмежені можливості фінансування та брак належної інституційної підтримки. Проте міжнародна співпраця та залучення інвестицій можуть стати каталізатором для покращення інфраструктури в Україні та досягнення цілей щодо декарбонізації транспорту.

Ефективність державних програм в Україні залежить від здатності уряду залучати іноземні інвестиції та підтримувати місцевий бізнес у розвитку інфраструктури для екологічного транспорту. Міжнародні інституції, такі як Світовий банк, Європейський банк реконструкції та розвитку (ЄБРР), а також Європейський Союз, надають Україні технічну та фінансову підтримку для реалізації проектів з декарбонізації [79]. Проте необхідно створити більш сприятливі умови для розвитку "зелених" технологій на національному рівні, включаючи програму підтримки будівництва зарядних станцій, водневих заправок та стимулювання внутрішнього ринку електромобілів і водневого транспорту.

Для досягнення цілей декарбонізації необхідно розробити комплексну стратегію підтримки, яка включатиме не лише податкові пільги, але й прямі інвестиції у розвиток інфраструктури та новітніх технологій.

Необхідні кроки для досягнення цілей декарбонізації

Аналіз міжнародного досвіду у сфері декарбонізації транспорту дає змогу виділити низку найкращих практик, які можуть бути адаптовані та впроваджені в Україні для зменшення викидів парникових газів та розвитку інфраструктури екологічно чистого транспорту. Оскільки декарбонізація є глобальним пріоритетом, країни Європейського Союзу, США, Японія та Китай уже досягли значних успіхів у цій галузі завдяки впровадженню продуманих стратегій і державних програм підтримки. Україна, маючи свої унікальні виклики та

можливості, може скористатися досвідом цих країн для прискорення процесу декарбонізації транспортного сектору.

Однією з найефективніших практик, яку Україна може запозичити з міжнародного досвіду, є надання значних податкових пільг та субсидій для стимулювання купівлі електромобілів. У багатьох країнах Європейського Союзу та Норвегії власники електромобілів користуються фінансовими перевагами, такими як знижені податки, звільнення від сплати зборів та субсидії на придбання транспортних засобів. Крім того, такі стимули, як знижки на паркування та безкоштовний проїзд по платних дорогах, створюють додаткові переваги для переходу на екологічний транспорт. В Україні вже запроваджено звільнення від сплати ПДВ та акцизу при імпорті електромобілів, але додаткові заходи, як-от субсидії та підтримка на місцевому рівні, могли б прискорити цей процес.

Важливим аспектом у розвитку електромобільності є створення розвиненої зарядної інфраструктури. У розвинутих країнах, таких як Німеччина, Франція, Норвегія та США, уряди активно інвестують у будівництво зарядних станцій у містах та на автомагістралях. Часто це досягається через публічно-приватні партнерства, де держава надає підтримку через субсидії, а приватний сектор здійснює безпосереднє будівництво та обслуговування інфраструктури. Цей підхід може бути ефективним і для України, де розвиток зарядної інфраструктури поки що відстає. Підтримка приватних ініціатив, співфінансування за участю Світового банку та ЄБРР, а також партнерство з державою можуть суттєво прискорити цей процес.

Крім того, міжнародний досвід свідчить про значні можливості для розвитку водневих технологій, які стають важливим елементом декарбонізації транспорту. У таких країнах, як Німеччина та Японія, водень уже активно використовується як паливо для громадського транспорту та вантажівок [30, 31, 54]. Розвиток інфраструктури для водневого транспорту, а також створення національних стратегій водневої економіки дозволяє цим країнам скоротити викиди CO₂ та сприяти розвитку нових галузей економіки. В Україні також є

значний потенціал для виробництва "зеленого" водню за допомогою відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергетика. Впровадження національної стратегії розвитку водневих технологій допоможе країні скористатися цим потенціалом та інтегруватися в європейський водневий ринок.

Країни, що лідирують у сфері декарбонізації транспорту, також активно інвестують у науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи. Наприклад, Європейська комісія фінансує програми з дослідження новітніх технологій для електромобілів, водневого транспорту та альтернативних видів палива. Такий підхід дозволяє прискорити впровадження нових рішень на ринок. В Україні створення спеціальних фондів для підтримки наукових досліджень та стартапів у сфері екологічного транспорту може стати потужним інструментом для залучення інноваційних рішень у національну економіку. Це дозволить не лише використовувати вже існуючі технології, а й активно брати участь у створенні нових.

Важливою частиною міжнародної стратегії декарбонізації є стимулювання бізнесу до переходу на екологічний транспорт. У багатьох країнах ЄС існують програми субсидування для підприємств, які купують електричні або водневі вантажівки, автобуси та інші транспортні засоби. Цей підхід дозволяє скорочувати викиди від комерційного транспорту, який зазвичай є одним із найбільших джерел забруднення. Для України це також може бути важливим інструментом, оскільки більшість вантажного та громадського транспорту все ще працює на викопному паливі. Запровадження програм підтримки для бізнесу з купівлі екологічного транспорту допоможе скоротити викиди та покращити екологічну ситуацію в країні.

Отже, міжнародний досвід пропонує широкий спектр рішень, які можуть бути ефективно адаптовані в Україні. Податкові пільги та субсидії, розвиток зарядної та водневої інфраструктури, підтримка інновацій та наукових досліджень, а також стимулювання бізнесу є ключовими елементами, які можуть

допомогти прискорити процес декарбонізації транспортної галузі в Україні та інтегрувати її у глобальні екологічні ініціативи.

Якщо підсумувати перелік рекомендації для подальшого розвитку декарбонізації в Україні, то його подати так:

- **Розвиток зарядної інфраструктури.** Україні необхідно прискорити розбудову мережі зарядних станцій для електромобілів по всій країні, не лише в містах, але й уздовж головних транспортних коридорів. Це зробить електромобілі доступнішими та зручнішими для широких верств населення, стимулюючи перехід від автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння.
- **Стимулювання електромобільності.** Український уряд може розширити програми податкових пільг та субсидій для громадян і підприємств, які купують електромобілі. Це включає не лише зниження ПДВ, але й можливість фінансової підтримки для бізнесів, що інвестують в електричний транспорт.
- **Впровадження водневих технологій.** Україна має великий потенціал для розвитку водневого транспорту завдяки наявності відновлюваних джерел енергії. Розробка національної стратегії розвитку водневої економіки та створення відповідної інфраструктури дозволить інтегрувати водневі рішення у вантажні перевезення та промисловість.
- **Розвиток інтелектуальних транспортних систем.** Для оптимізації управління транспортом у великих містах необхідно впроваджувати ІТС, які дозволяють динамічно регулювати транспортні потоки, зменшувати затори та підвищувати ефективність перевезень. Це не тільки покращить мобільність у містах, але й сприятиме зменшенню викидів від транспорту.
- **Перехід на екологічно чистий громадський транспорт.** Перехід на електричний та водневий громадський транспорт, зокрема електробуси та трамваї, дозволить суттєво знизити рівень забруднення у містах та покращити якість повітря. Це є важливим кроком для зниження викидів і підвищення екологічної безпеки в урбанізованих регіонах.

На рис. 9 наведено основні заходи, які необхідно запроваджувати в Україні для проведення декарбонізації транспорту.



Рис. 9. Основні заходи для проведення декарбонізації транспортного сектору в Україні

РОЗДІЛ 4. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУ ЯК КОМПОНЕНТИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ КРАЇН

4.1. Тенденції розвитку транспорту до 2050 року.

Прогнози розвитку транспортного сектору до 2050 року демонструють значні зміни, спрямовані на досягнення глобальних цілей зі зниження викидів парникових газів, особливо CO₂. Транспорт є одним із головних джерел викидів вуглекислого газу, тому його декарбонізація має вирішальне значення для запобігання зміні клімату та досягнення сталого розвитку. У найближчі десятиліття очікується впровадження інноваційних технологій, підвищення ефективності транспортних систем, електрифікація різних типів транспорту, а також використання альтернативних видів палива, таких як водень та синтетичні біопалива.

Основною тенденцією у розвитку транспорту до 2050 року стане масова електрифікація автомобільного транспорту. Згідно з прогнозами Міжнародного енергетичного агентства, до середини століття електромобілі стануть домінуючим типом особистого транспорту, витіснивши транспортні засоби з двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ). Європейський Союз, США, Китай та інші великі економіки вже поставили амбітні цілі щодо скорочення продажів автомобілів на ископному паливі та повного переходу на електромобілі до 2040-2050 років. Наприклад, у рамках Європейського зеленого курсу планується заборона продажу нових автомобілів з ДВЗ після 2035 року. Це дозволить суттєво скоротити викиди CO₂ в атмосферу, адже автомобільний транспорт сьогодні є найбільшим джерелом викидів у більшості країн [24].

Поряд із електрифікацією особистого транспорту важливу роль відіграватиме електрифікація громадського та комерційного транспорту, зокрема автобусів та вантажівок. Уряди багатьох країн вже підтримують програми з електрифікації громадського транспорту, особливо у великих містах, де електробуси стають дедалі популярнішими. Згідно з прогнозами, до 2050 року більшість громадських транспортних засобів у містах світу буде електричними, що знизить не лише викиди CO₂, але й рівень забруднення повітря [12].

Ще однією ключовою тенденцією стане впровадження водневих технологій для транспорту, особливо у важкому транспорті, де електричні батареї мають обмежену ефективність через свої технічні характеристики. Водень вважається перспективним джерелом енергії для вантажних перевезень, авіації та морських перевезень. Згідно з прогнозами, до 2050 року водень може стати одним із основних видів палива для важких транспортних засобів та літаків [80, 81]. Уряди країн ЄС, Японії та Південної Кореї активно інвестують у розвиток водневої інфраструктури, включаючи будівництво водневих заправних станцій та розвиток технологій виробництва "зеленого" водню з відновлюваних джерел енергії [30, 31, 54].

Прогнози щодо зниження викидів CO₂ у транспортному секторі вказують на те, що до 2050 року можна очікувати суттєвого зменшення глобальних викидів. Згідно з даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (IRENA), перехід на електротранспорт, використання відновлюваних джерел енергії для виробництва електроенергії, а також впровадження водневих технологій можуть скоротити викиди CO₂ у транспортному секторі на 70-90% у порівнянні з поточними рівнями [82, 83]. Європейський Союз, у рамках своєї стратегії "Fit for 55", має намір зменшити викиди вуглецю на 55% до 2030 року, а до 2050 року досягти повної кліматичної нейтральності [24].

Окрім електрифікації та використання водню, важливу роль у скороченні викидів CO₂ відіграватиме використання синтетичних біопалив та інших альтернативних видів палива. Авіація та морські перевезення, які важко електрифікувати через технічні обмеження, використовуватимуть біопаливо та синтетичне паливо, що виробляється з відновлюваних джерел енергії. Це дозволить суттєво знизити викиди CO₂ у цих галузях до 2050 року [32].

У найближчі десятиліття очікується також активне впровадження інтелектуальних транспортних систем, які дозволять оптимізувати управління транспортними потоками, скоротити затори та підвищити загальну ефективність транспортної системи. Автономні транспортні засоби, які вже активно розробляються в багатьох країнах, також можуть сприяти зниженню викидів

CO₂, адже вони забезпечать більш ефективне використання палива та енергії [84].

На світовому рівні країни Європейського Союзу, США, Японія та Китай активно треба продовжувати впроваджувати програми для підтримки розвитку електромобільності, водневого транспорту та інфраструктури. Одним із ключових інструментів є субсидії на купівлю електромобілів, податкові пільги, фінансування досліджень і розробок у сфері чистих технологій, а також розвиток інфраструктурних проектів. Наприклад, у рамках Європейського зеленого курсу (Green Deal), ЄС передбачив значні інвестиції на розвиток екологічної інфраструктури, що включає будівництво зарядних станцій, розвиток водневої інфраструктури та стимулювання промисловості до переходу на екологічно чисті технології. Ця ініціатива має на меті досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року, і вже зараз програма активно впливає на транспортний сектор [12].

Отже, прогнозується, що до 2050 року транспортний сектор зазнає значних змін, що дозволять суттєво скоротити викиди парникових газів. Масова електрифікація, впровадження водневих технологій, використання синтетичних біопалив та інтелектуальних транспортних систем дозволять досягти цілей щодо кліматичної нейтральності у більшості країн світу. Це не лише знизить вплив транспорту на кліматичні зміни, але й сприятиме покращенню якості життя у містах за рахунок зменшення забруднення повітря.

4.2. Перспективи розвитку електричних, автономних та водневих транспортних засобів

До 2050 року транспортна галузь зазнає значних змін у контексті декарбонізації, що ґрунтується на впровадженні новітніх технологій, зокрема електричних, автономних і водневих транспортних засобів. Ці інновації відіграють ключову роль у глобальному скороченні викидів парникових газів і сприяють досягненню цілей сталого розвитку, які поставили перед собою багато країн світу.

Електричні транспортні засоби продовжуватимуть займати все більшу частку на ринку, завдяки значним інвестиціям у розвиток зарядної

інфраструктури та подальшому зниженню вартості акумуляторів. За прогнозами BloombergNEF, до 2030 року понад 58% нових продажів легкових автомобілів у світі будуть електричними, а до 2050 року цей показник може досягнути майже 90% [85]. Основними факторами, що сприятимуть прискоренню темпів впровадження електромобілів, є державна підтримка, спрямована на розвиток інфраструктури, зокрема через публічно-приватне партнерство для будівництва мережі зарядних станцій, а також зростаючий попит на "зелені" технології серед споживачів.

Держави з високим рівнем розвитку, такі як Норвегія, Німеччина, Китай і США, лідирують у розробці стратегій з переходу на електротранспорт. Норвегія вже оголосила, що до 2025 року всі нові транспортні засоби мають бути електричними, що значно пришвидшить процес глобальної декарбонізації. Подібні плани мають Європейський Союз та Китай, які також ставлять за мету поступово зменшувати кількість нових транспортних засобів на викопному паливі до 2040 року [86].

У розвинутих країнах, таких як Європейський Союз, США, Китай і Японія, інфраструктура для електромобілів розвивається стрімкими темпами. Європейський Союз запровадив амбітну політику, спрямовану на досягнення нульових викидів в транспортній галузі до 2050 року в рамках Європейського зеленого курсу. Одним із ключових аспектів цієї стратегії є створення розгалуженої мережі зарядних станцій по всій Європі. Такі країни, як Норвегія, Німеччина, Нідерланди та Франція, інвестують значні державні та приватні кошти в розбудову інфраструктури для електромобілів. Наприклад, у Норвегії на 1000 жителів припадає понад 50 зарядних станцій, що робить її світовим лідером за цим показником. Це дозволяє власникам електромобілів зручно користуватися транспортом і подорожувати на довгі дистанції, не хвилюючись про зарядку.

Європейський Союз і національні уряди країн ЄС надають значні фінансові стимули для розвитку інфраструктури, включаючи субсидії для будівництва зарядних станцій та інвестиції у дослідження та розробку нових технологій. Загалом на розвиток "зеленої" інфраструктури планується виділити понад 750

мільярдів євро у рамках програми "NextGenerationEU", що передбачає як державні, так і приватні інвестиції [87]. У США аналогічні програми підтримки інфраструктури розпочалися в рамках програми "Build Back Better", що передбачає розвиток зарядної інфраструктури з метою забезпечення до 2030 року 500000 зарядних станцій по всій країні [88].

Іншою важливою сферою розвитку інфраструктури є водневі заправні станції. У Німеччині активно впроваджуються проекти зі створення мережі водневих заправок для громадського транспорту та вантажівок, особливо у великих містах. Також розвинуті країни інвестують у розвиток "зеленого" водню, що виробляється з відновлюваних джерел енергії, а також у дослідження та розвиток технологій для зберігання і транспортування водню.

Автономні транспортні засоби мають потенціал суттєво змінити структуру транспортної галузі до 2050 року. Автономні автомобілі та вантажівки, обладнані штучним інтелектом, дозволяють підвищити ефективність перевезень і значно скоротити енергетичні витрати, пов'язані із заторами та неефективним використанням палива. Прогнози аналітиків з McKinsey & Company вказують на те, що вже до 2030 року автономні транспортні засоби можуть стати звичним явищем у великих містах, а до 2050 року значна частина комерційних перевезень здійснюватиметься за допомогою таких технологій. Автономні транспортні засоби можуть сприяти зниженню викидів CO₂ завдяки оптимізації маршрутів та підвищенню безпеки дорожнього руху, що також зменшує втрати енергії та шкідливі викиди [89].

Автономні вантажівки та безпілотні таксі будуть не лише ефективнішими з точки зору використання енергії, але й більш безпечними, що також сприятиме скороченню витрат на ремонт і технічне обслуговування, зменшить затори та втрати палива. Tesla, Waymo, Uber, а також великі автомобільні концерни, такі як General Motors і Volkswagen, вже інвестують значні кошти у розвиток автономних технологій, і ці зусилля дозволять зробити автономний транспорт більш доступним та ефективним у найближчі десятиліття [90].

Водневі транспортні засоби розглядаються як перспективна альтернатива для секторів транспорту, де електричні технології поки що мають обмежений потенціал через вимоги до дальності пробігу та швидкості зарядки, особливо у важкому транспорті. Водневі технології активно розвиваються в таких країнах, як Японія, Південна Корея та Німеччина, де уряди створюють національні стратегії з розвитку водневої економіки. Прогнози вказують, що до 2050 року водень стане одним з основних джерел енергії для вантажних перевезень, громадського транспорту та навіть авіації [80, 81]. Компанії, такі як Toyota та Hyundai, вже активно розробляють водневі автомобілі, а такі країни, як Німеччина, інвестують у розвиток водневих заправних станцій та технологій зберігання водню. Водневі транспортні засоби мають великий потенціал для скорочення викидів у галузях, де електрифікація стикається з труднощами через технічні обмеження.

Загальний прогноз розвитку транспортного сектору до 2050 року включає інтеграцію всіх трьох основних технологій – електричних, автономних та водневих транспортних засобів, що дозволить значно скоротити викиди парникових газів та досягти кліматичної нейтральності. Використання цих технологій допоможе знизити залежність від викопних видів палива, покращить енергоефективність і створить нові можливості для економічного розвитку в межах "зеленої" економіки. Згідно з прогнозами Transport & Environment, до 2050 року викиди від транспорту можуть бути знижені на 85-90%, що дозволить забезпечити значний внесок у досягнення кліматичних цілей Паризької угоди [16].

4.3. Впровадження новітніх технологій.

4.3.1. Інтернет речей та штучний інтелект у транспорті як технології для зменшення викидів CO₂

До 2050 року розвиток інновацій і новітніх технологій матиме значний вплив на процес декарбонізації транспорту. Серед ключових технологій, що допоможуть оптимізувати транспортні системи та зменшити викиди парникових газів, особливе місце посідають Інтернет речей (IP) та штучний інтелект (ШІ). Ці

технології стають основою для побудови розумних транспортних систем, які дозволяють ефективніше управляти транспортними потоками, знижувати витрати енергії та скорочувати забруднення навколишнього середовища [91].

IP у транспорті передбачає використання мережі взаємопов'язаних пристроїв та сенсорів для збору даних у реальному часі, що допомагає оптимізувати транспортні системи та підвищити ефективність перевезень. Важливою перевагою IP є можливість моніторингу та аналізу транспортних потоків, стану дорожнього покриття, погодних умов та іншої інформації, яка впливає на ефективність транспортних систем. До 2050 року IP стане критично важливим інструментом для побудови розумних міст, де транспорт буде інтегрований з іншими комунальними та інфраструктурними системами [92]. Наприклад, система IP може використовуватися для моніторингу руху на дорогах у реальному часі, щоб оптимізувати сигнальне управління та зменшити затори. Це не тільки скоротить час у дорозі, але й зменшить витрати палива та викиди CO₂. У містах із високим рівнем автомобільного руху та забруднення повітря це рішення може значно підвищити якість життя мешканців. Крім того, IP може бути використаний для моніторингу стану громадського транспорту, управління маршрутами та забезпечення своєчасного технічного обслуговування, що допоможе уникнути непередбачених поломок і затримок. Технології IP вже активно впроваджуються у транспортній індустрії. Вантажоперевізники використовують їх для відстеження місцезнаходження транспортних засобів, моніторингу рівня завантаження та ефективного управління ланцюгами постачання. Такі компанії, як UPS і DHL, інтегрують IP у свої системи управління перевезеннями для підвищення енергоефективності, скорочення витрат і мінімізації викидів. До 2050 року очікується, що IP стане невід'ємною частиною ІТС, які допоможуть автоматизувати та вдосконалити процеси перевезень, скорочуючи їхній вплив на навколишнє середовище.

Штучний інтелект є ще однією технологією, що має величезний потенціал у декарбонізації транспортного сектору. ШІ дозволяє аналізувати великі обсяги даних у реальному часі та приймати рішення, які оптимізують роботу

транспортних систем. Завдяки використанню штучного інтелекту можна ефективно управляти автономними транспортними засобами, зменшувати енерговитрати та підвищувати безпеку на дорогах. ШІ також допомагає підвищити ефективність перевезень за рахунок оптимізації маршрутів і скорочення витрат палива. Автономні автомобілі та вантажівки, оснащені системами штучного інтелекту, можуть приймати рішення на основі аналізу дорожньої ситуації в реальному часі. ШІ допомагає таким транспортним засобам самостійно коригувати маршрути, уникати затори і максимально ефективно використовувати енергію. За даними досліджень PwC, автономні транспортні засоби на основі ШІ можуть скоротити викиди парникових газів на 15-20% до 2030 року завдяки оптимізації маршрутів і зменшенню витрат енергії [93]. ШІ також використовується в управлінні інтелектуальними транспортними системами для контролю руху в містах. Розумні світлофори, керовані штучним інтелектом, можуть автоматично регулювати рух залежно від інтенсивності трафіку, що дозволяє уникати заторів і зменшувати час простою автомобілів. У великих мегаполісах, таких як Сінгапур і Токіо, такі системи вже активно використовуються для зниження енергоспоживання транспорту та покращення якості повітря [94]. У сфері вантажоперевезень ШІ також відіграє важливу роль у розвитку технологій автономних вантажівок. Відповідно до прогнозів Boston Consulting Group (BCG) автономні вантажівки дозволять скоротити операційні витрати на 45%, значно зменшивши викиди CO₂ завдяки оптимізації маршрутів і підвищенню ефективності перевезень. Технології ШІ також використовуються для вдосконалення "останньої милі" доставки, що дозволяє знизити затори у міських зонах і зменшити забруднення повітря [92].

Очкуються, що до 2050 року штучний інтелект та інтернет речей стануть основою для інтегрованих розумних транспортних систем, які об'єднують різні види транспорту в єдину мережу. Ці системи зможуть забезпечити безперервне управління транспортними потоками, знижуючи енергетичні витрати, викиди CO₂ і підвищуючи загальну ефективність перевезень. Завдяки цих системам транспорт стане не тільки більш екологічним, але й більш безпечним, зручним і

доступним для широкого кола користувачів. Інтеграція ШІ та ІР також дасть змогу реалізувати проєкти "розумних міст", де транспорт буде синхронізований із енергетичними та комунальними системами для досягнення максимальної енергоефективності [95]. Наприклад, автономні електромобілі можуть бути автоматично заряджені від мережі, коли споживання енергії в місті найнижче, що дозволить краще використовувати ресурси відновлюваної енергії. У такий спосіб ІР та ШІ створюють основу для нової екологічно чистої транспортної системи майбутнього.

Отже, Інтернет речей та штучний інтелект матимуть вирішальне значення для досягнення цілей декарбонізації транспорту до 2050 року. Завдяки цим технологіям транспорт стане більш екологічним, ефективним та інтелектуальним, що дозволить знизити викиди CO₂ і покращити якість життя у містах.

4.3.2. Роль інтелектуальних транспортних систем для оптимізації маршрутів та зниження викидів

Інтелектуальні транспортні системи стають важливим елементом у розвитку сучасної транспортної інфраструктури та декарбонізації транспортного сектора. ІТС – це комплекс технологій та рішень, які використовують інформаційно-комунікаційні технології для збору, обробки та аналізу даних у реальному часі, що дозволяє підвищити ефективність управління транспортними потоками, знизити затори, скоротити витрати палива та зменшити викиди парникових газів [96]. Згідно з прогнозами International Transport Forum, до 2050 року інтеграція ІТС у міські та регіональні транспортні системи дозволить скоротити викиди CO₂ на 10-15% у глобальному масштабі завдяки оптимізації маршрутів, зниженню заторів і підвищенню загальної ефективності використання транспорту [97].

Однією з ключових функцій інтелектуальних транспортних систем є оптимізація маршрутів та управління дорожнім рухом у реальному часі. Системи ІТС використовують дані від численних сенсорів, камер відеоспостереження, систем геолокації та підключених транспортних засобів для аналізу стану доріг і

транспортних потоків. Це дозволяє швидко реагувати на зміни в умовах руху, перенаправляти транспортні потоки для запобігання заторам та ефективно розподіляти транспортні потоки на основних автомагістралях. Такі технології вже впроваджуються в багатьох розвинутих країнах, включаючи США, Японію, Сінгапур та країни ЄС, де ІТС відіграють ключову роль у зниженні рівня заторів і підвищенні пропускну здатності міських доріг [98].

У містах з високою густиною населення, таких як Токіо та Нью-Йорк, ІТС використовуються для автоматичного регулювання світлофорів залежно від інтенсивності руху. Це знижує час простою автомобілів на перехрестях, зменшує кількість зупинок і розгонів транспортних засобів, що в результаті суттєво знижує споживання палива та викиди CO₂. Системи адаптивного управління сигналами, такі як SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System), вже застосовуються в понад 180 містах світу, що забезпечує ефективну оптимізацію руху і зменшення загального часу у дорозі на 10-30%.

Важливу роль ІТС відіграють у логістичному транспорті та управлінні вантажоперевезеннями. Автоматизовані системи відстеження вантажних автомобілів і управління ланцюгами постачання дозволяють зменшити кількість порожніх пробігів, оптимізувати маршрути для вантажівок, враховуючи стан доріг, час пік та погодні умови. За даними McKinsey & Company, впровадження ІТС у логістиці може скоротити витрати палива на 5-10%, що суттєво знижує викиди CO₂, особливо в умовах великих транспортних коридорів, таких як Європейський Союз та Північна Америка [89].

Інтелектуальні транспортні системи також сприяють розвитку концепції розумного міського транспорту, де громадський транспорт інтегрується з іншими видами перевезень для забезпечення безперебійного руху і зручного пересування пасажирів. ІТС можуть використовувати дані про навантаження на маршрути громадського транспорту, затори та дорожні умови для динамічної зміни графіків руху, зменшуючи час очікування і підвищуючи точність прибуття транспорту. Наприклад, у місті Сінгапур громадський транспорт інтегровано в єдину мережу ІТС, що дозволяє не тільки оптимізувати рух автобусів і поїздів,

але й автоматично підлаштовувати графіки руху залежно від попиту, знижуючи загальні витрати енергії та викиди.

Крім того, ІТС дозволяють впроваджувати системи пріоритетного проїзду для екологічного транспорту, що надають перевагу на дорогах електричним автобусам та водневим транспортним засобам, сприяючи підвищенню їхньої популярності серед споживачів. Такі системи вже застосовуються в Лондоні, де ІТС забезпечують спеціальні смуги для громадського транспорту та електромобілів, зменшуючи час у дорозі та заохочуючи водіїв переходити на екологічно чисті види транспорту. Впровадження подібних рішень у великих містах дозволяє значно зменшити викиди CO₂ у міських зонах, які є одними з найбільш забруднених.

Ще одним напрямом використання ІТС є системи управління вантажоперевезеннями в портах та логістичних центрах. Автоматизовані системи відстеження вантажних контейнерів, управління завантаженням та розвантаженням на великих транспортних вузлах допомагають оптимізувати процеси, зменшити час очікування та підвищити ефективність роботи. У великих портах, таких як Роттердам та Лос-Анджелес, впровадження ІТС дало змогу скоротити час простою вантажівок, зменшивши викиди парникових газів від очікування та холостого ходу транспортних засобів.

ІТС також відіграють важливу роль у зниженні викидів у сільській місцевості, де управління дорожніми потоками часто є складним через довгі відстані та низьку інтенсивність руху. Використання ІТС для моніторингу стану доріг і погодних умов дозволяє мінімізувати непередбачені зупинки та забезпечує ефективне використання транспортних ресурсів, що є особливо важливим для країн з великою територією, таких як США та Канада.

На глобальному рівні інтелектуальні транспортні системи можуть також сприяти зниженню викидів у транскордонних перевезеннях. Європейський Союз активно впроваджує систему ІТС на своїх міжнародних коридорах, що дозволяє зменшити затори на митних постах, скоротити час простою вантажівок та підвищити ефективність логістичних процесів у межах європейської

транспортної мережі. До 2050 року очікується, що транскордонні ІТС стануть важливим елементом інтеграції транспортних систем різних країн, сприяючи глобальному зниженню викидів.

Таким чином, ІТС є важливим інструментом для оптимізації транспортних систем, підвищення енергоефективності та зниження викидів парникових газів. Використання цих технологій дозволить зменшити негативний вплив транспорту на довкілля, підвищити ефективність перевезень і створити основи для сталого розвитку транспортних систем майбутнього.

На рис. 10 узагальнено основні новітні інновації, впровадження яких допоможе не тільки впорядкувати транспортні потоки у населених пунктах, впливати на зниження заторів, а й позначиться на покращення енергоефективності транспорту, зменшенні забруднення атмосферного повітря, що впливає й на самопочуття та здоров'я людей.



Рис. 10. Впровадження новітніх технологій у впорядкування руху транспортних засобів для зниження викидів парникових газів, насамперед CO₂

4.4. Економічний та екологічний ефект від впровадження декарбонізаційних заходів.

Вплив на економіку (нові робочі місця, скорочення витрат на паливо)

Впровадження декарбонізаційних заходів у транспортному секторі не лише сприятиме суттєвому зменшенню викидів парникових газів, але й матиме значний позитивний економічний ефект. Ці заходи можуть стати рушійною силою для розвитку нових галузей економіки, створення нових робочих місць та зниження витрат на паливо, що в цілому стимулюватиме економічне зростання та сприятиме стійкому розвитку.

Однією з головних економічних переваг від впровадження декарбонізації є створення нових робочих місць у секторі зелених технологій та відновлюваної енергетики. Перехід до електрифікації транспорту, розбудова інфраструктури для електромобілів, водневих заправних станцій, а також розвиток відновлюваних джерел енергії вимагають залучення значних людських ресурсів. Згідно з прогнозами Міжнародної агенції з відновлюваної енергетики (IRENA), до 2050 року близько 10 мільйонів нових робочих місць буде створено внаслідок переходу на чисті технології в транспортній галузі. Ці нові робочі місця включатимуть інженерів, розробників програмного забезпечення для електричних транспортних засобів, будівельників зарядних станцій, експертів з управління енергетичними системами та спеціалістів з обслуговування інфраструктури [85].

Окремою важливою складовою є розвиток індустрії з виробництва акумуляторів та систем зберігання енергії для електромобілів. Виробництво акумуляторів потребує значних інвестицій і створює нові робочі місця у науково-дослідних та виробничих секторах. Європейський Союз, наприклад, інвестує мільярди євро у створення власної виробничої бази для акумуляторів через програму European Battery Alliance, яка має на меті зменшити залежність від імпорту акумуляторів та розвивати власну промисловість, створюючи тисячі робочих місць на кожному етапі виробничого ланцюга. Цей підхід дозволяє стимулювати зростання у різних галузях економіки, що супроводжується технологічним прогресом та переходом до сталого виробництва [97].

Крім створення нових робочих місць, декарбонізація транспорту сприятиме скороченню витрат на паливо для споживачів та бізнесу. Перехід на

електромобілі та водневі транспортні засоби допомагає знизити загальні експлуатаційні витрати на транспорт. Вартість електрики для зарядки електромобіля значно нижча, ніж витрати на бензин або дизельне паливо. За даними досліджень BloombergNEF, вартість володіння електромобілем може бути на 30-50% нижчою у порівнянні з традиційним транспортним засобом, що працює на викопному паливі, оскільки електромобілі вимагають меншого технічного обслуговування і мають триваліший життєвий цикл.

Варто також зазначити, що впровадження системи водневого транспорту сприятиме скороченню витрат на паливо у важкій промисловості та вантажних перевезеннях. Водень як джерело енергії для вантажних автомобілів та залізничного транспорту може стати екологічно чистою та економічно вигідною альтернативою дизельному паливу. У довгостроковій перспективі, із збільшенням виробництва та використання водню, ціни на цей вид палива можуть стати конкурентоспроможними з традиційними видами палива, що значно знизить витрати на перевезення вантажів.

Крім економічної вигоди, впровадження декарбонізаційних заходів має величезний екологічний ефект. Найбільш очевидним екологічним результатом є суттєве зменшення викидів парникових газів та поліпшення якості повітря, особливо у великих містах. Згідно з даними Європейської комісії, електрифікація транспорту та зменшення залежності від викопного палива можуть знизити викиди CO₂ на 85-90% до 2050 року [24]. Це допоможе країнам виконати свої міжнародні зобов'язання в рамках Паризької угоди та сприятиме боротьбі зі зміною клімату.

Водночас зменшення забруднення повітря сприятиме поліпшенню здоров'я населення, що зменшить витрати на медичне обслуговування та підвищить продуктивність робочої сили. За оцінками Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), забруднення повітря у містах є однією з головних причин респіраторних захворювань та смертей, тому зниження викидів від транспорту позитивно позначиться на здоров'ї мільйонів людей, що живуть у мегаполісах [99]. Додатково, перехід на відновлювані джерела енергії для

транспорту, такі як електрика та водень, зменшить залежність від імпорту викопного палива, що підвищить енергетичну безпеку країн та зменшить їхню вразливість до коливань цін на нафту і газ на міжнародних ринках. Це дозволить стабілізувати економіку, зменшити бюджетні витрати на енергетичні ресурси та стимулювати розвиток внутрішніх ринків відновлюваної енергії.

Отже, впровадження декарбонізаційних заходів у транспортному секторі має як економічні, так і екологічні переваги. Створення нових робочих місць у зелених технологіях, скорочення витрат на паливо, зменшення викидів парникових газів та покращення здоров'я населення — усе це є важливими результатами переходу на екологічно чистий транспорт. Перспективи розвитку цього напрямку є особливо важливими для досягнення сталого економічного зростання та захисту довкілля.

Екологічні переваги (поліпшення якості повітря, зниження парникового ефекту)

Впровадження заходів з декарбонізації транспорту має не лише економічні переваги, але й вагомі екологічні вигоди. Однією з ключових цілей декарбонізації є зменшення негативного впливу транспорту на навколишнє середовище, що досягається за рахунок скорочення викидів шкідливих речовин, зокрема парникових газів, та поліпшення якості повітря. Транспортний сектор є одним з основних джерел забруднення атмосфери у великих містах і суттєво впливає на глобальний клімат. Тому зменшення викидів через впровадження новітніх технологій, таких як електромобілі, водневий транспорт та альтернативні види палива, матиме значний позитивний екологічний ефект.

Одна з основних екологічних вигод від впровадження декарбонізаційних заходів – це поліпшення якості повітря. У великих мегаполісах, де інтенсивність автомобільного руху дуже висока, традиційний транспорт, що працює на викопному паливі (бензин та дизель), є головним джерелом забруднення повітря оксидами азоту (NO_x), твердими частинками (Particular Matter) та вуглекислим газом (CO_2). Забруднене повітря негативно впливає на здоров'я людей, викликаючи респіраторні та серцево-судинні захворювання. За даними ВООЗ

щорічно від наслідків забруднення повітря помирає понад 7 мільйонів людей у світі. Упровадження електромобілів, які не викидають шкідливих речовин під час роботи, суттєво зменшить кількість цих небезпечних забруднювачів у повітрі, що призведе до покращення загальної якості повітря в містах і зниження негативних наслідків для здоров'я населення.

Електрифікація транспорту у поєднанні з використанням відновлюваних джерел енергії для виробництва електроенергії матиме подвійний ефект: зменшення викидів як на рівні автомобільного транспорту, так і на рівні енергетики. Це сприятиме створенню чистих, екологічно безпечних міських транспортних систем. За оцінками Європейської агенції з охорони навколишнього середовища впровадження електромобілів на дорогах Європи може зменшити викиди оксидів азоту на 90%, а викиди твердих частинок – на 80%, порівняно з традиційними автомобілями з двигунами внутрішнього згоряння. Іншою важливою екологічною вигодою від декарбонізації транспорту є зниження парникового ефекту та, як наслідок, глобальне потепління. Викиди парникових газів, особливо CO₂, сприяють зміні клімату, викликаючи підвищення температури на планеті, що призводить до екстремальних погодних явищ, підвищення рівня світового океану, посух та інших природних катастроф. Транспорт є одним з найбільших джерел викидів CO₂, і його частка у глобальних викидах становить близько 24%. Відповідно до прогнозів Міжнародного енергетичного агентства декарбонізація транспорту, зокрема перехід на електромобілі та водневий транспорт, може знизити глобальні викиди CO₂ у транспортному секторі на 60-70% до 2050 року. Це стане важливим внеском у досягнення цілей Паризької угоди щодо обмеження підвищення температури на планеті до 1,5°C [16, 84].

Крім зменшення викидів у містах, декарбонізація транспорту позитивно вплине на біорізноманіття та екосистеми. Зниження залежності від викопних видів палива зменшить потребу у видобуванні нафти та газу, що, у свою чергу, скоротить знищення природних середовищ існування, зокрема лісів, океанів та полярних регіонів. Зменшення нафтовидобутку також знизить ризик нафтових

катастроф, таких як розливи нафти, що мають катастрофічні наслідки для флори і фауни. Впровадження відновлюваних джерел енергії та екологічно чистих видів транспорту допоможе зберегти екосистеми і захистити біорізноманіття на планеті.

Також важливо зазначити, що зменшення викидів від транспорту призведе до поліпшення кліматичних умов у містах. За рахунок скорочення викидів CO₂ та інших парникових газів зменшиться ефект так званого "міського теплового острова", коли через велике скупчення автомобілів та промислових об'єктів температура в містах стає на кілька градусів вищою, ніж у навколишніх сільських районах. Впровадження електромобілів, розвиток громадського транспорту та альтернативних видів палива допоможуть поліпшити мікроклімат у містах, зробивши їх комфортнішими для життя.

Загалом, екологічний ефект від впровадження декарбонізаційних заходів у транспорті є значним. Зниження рівня забруднення повітря, покращення здоров'я населення, зменшення викидів парникових газів та захист екосистем є ключовими вигодами, які сприятимуть створенню екологічно чистих міст і зниженню впливу транспорту на глобальне потепління. Ці заходи є вирішальними для досягнення цілей сталого розвитку та боротьби зі змінами клімату.

/

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІН ВИКИДІВ CO₂ В АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ ВІД ТРАНСПОРТУ

МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ВИКИДІВ CO₂

Модель оцінки викидів CO₂ забезпечує аналіз транспортної системи міста з урахуванням кількості транспорту, його типу, середньої відстані пересування і частки електротранспорту. Вона дозволяє оцінити вплив збільшення частки екологічно чистого транспорту на скорочення рівня викидів CO₂ і використовуватись при розробленні екологічних програм планування міст. Завдяки використанню у ній універсальних вхідних даних, які можуть бути легко змінені ця програма може застосовуватись для населених пунктів різного масштабу в Україні.

Вхідні дані

- Модель передбачає введення основних параметрів транспортної системи:
Загальна кількість транспортних засобів, які щодня перебувають на вулицях міста.
- Середня відстань, яку долають транспортні засоби за день.
- Частки різних типів транспорту у відсотках:
 - ✓ Дизельний транспорт
 - ✓ Бензиновий транспорт.
 - ✓ Гібридний транспорт.
 - ✓ Електричний транспорт.

На рис. 11 поданий інтерфейс програми для обрахунку впливу кількості автомобілів, що заправляються різними видами пального, на скорочення викидів CO₂

Transport Emissions Model

Обчислення викидів CO₂ у Львові

Загальна кількість транспорту:

Середня відстань на день (км):

Частка дизельного транспорту (%):

Частка бензинового транспорту (%):

Частка гібридного транспорту (%):

Частка електротранспорту (%):

Розрахувати та побудувати графіки

Рис. 11. Інтерфейс програми для обрахунку впливу кількості автомобілів, що заправляються різними видами пального, на скорочення викидів CO₂

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ

Модель виконує розрахунки за такими основними етапами:

1. Розподіл транспорту за типами:

На основі введених даних обчислюється кількість транспортних засобів кожного типу.

Формула: $N_{type} = Q \times (P_{type} / 100)$, де

N_{type} — кількість транспортних засобів відповідного типу,

Q — загальна кількість транспорту,

P_{type} — частка транспорту відповідного типу у відсотках.

2. Обчислення викидів CO₂:

Для кожного типу транспорту розраховуються щоденні викиди CO₂ за формулою:

Формула: $E_{type} = N_{type} \times D \times E_{per_km}$, де

E_{type} — щоденні викиди для конкретного типу транспорту (в кг CO_2).

D — середня відстань за день (у км).

E_{per_km} — середні викиди CO_2 на км для відповідного типу транспорту:

- ✓ Дизель: 0.27 кг/км.
- ✓ Бензин: 0.24 кг/км.
- ✓ Гібрид: 0.1 кг/км.
- ✓ Електричний транспорт: 0.0 кг/км.

3. Сума викидів:

Загальні викиди обчислюються як сума викидів від усіх типів транспорту:

$$\text{Формула: } E_{total} = \sum E_{type}$$

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Результати розрахунків відображаються у вигляді двох графіків які можуть бути подані у вигляді лінійної (рис. 12) або стовпчикової діаграм (рис. 13).

Лінійна діаграма: Відображає залежність загальних викидів CO_2 від частки електротранспорту. Вісь x показує частку електротранспорту (у відсотках), а вісь y — загальні викиди CO_2 (у тоннах).

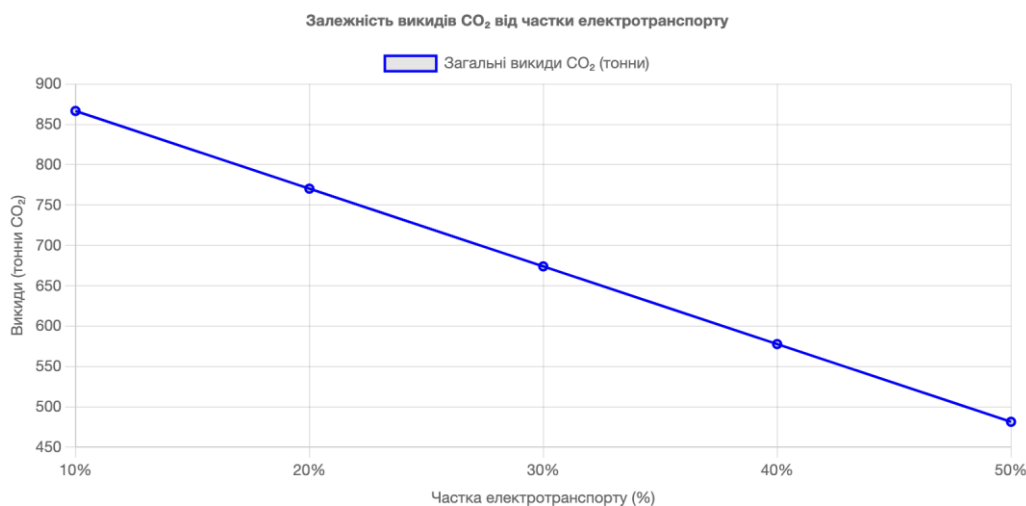


Рис. 12. Залежність загальних викидів CO_2 від частки електротранспорту.

Стовпчикова діаграма: Демонструє внесок кожного типу транспорту в загальні викиди. Вісь x відображає типи транспорту (дизель, бензин, гібрид, електроавтомобілі), а вісь y — кількість викидів (у тоннах).

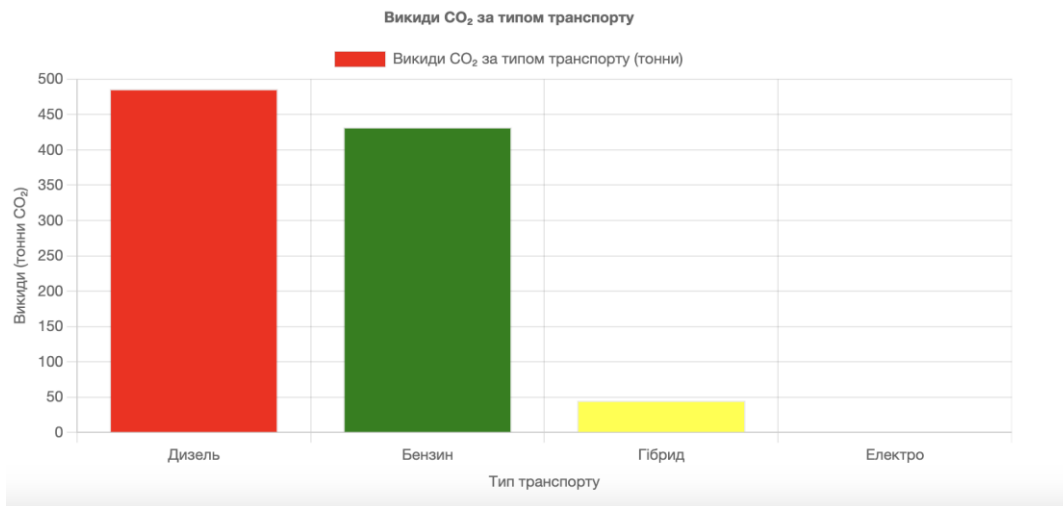


Рис. 13. Внесок кожного типу транспорту (в залежності від пального, яке використовується) в загальні викиди CO₂.

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ

Ця модель є корисним інструментом для аналізу екологічного стану транспортної системи міста. Її можна використовувати для:

- ✓ Планування переходу до екологічно чистого транспорту.
- ✓ Оцінки ефективності впровадження електротранспорту.
- ✓ Розробки міської екологічної політики.

Модель легко адаптується для інших міст або сценаріїв, що робить її універсальним інструментом для екологічного аналізу.

Використані технології

Для реалізації моделі оцінки викидів CO₂ було використано сучасні веб-технології, які забезпечують її інтерактивність, адаптивність і простоту використання. Модель реалізована за допомогою стандартного стека веб-розробки: HTML, CSS і JavaScript, а також бібліотеки Chart.js для створення графіків.

HTML забезпечує базову структуру сторінки, включаючи форму для введення даних (загальна кількість транспорту, середня відстань, частки дизельного, бензинового, гібридного та електротранспорту) і контейнери для

відображення графіків. Уся структура оптимізована для логічного впорядкування елементів і зручності користувача.

CSS використовується для оформлення та адаптації сторінки до різних пристроїв. Застосовано простий адаптивний дизайн, який дозволяє коректно відображати модель на екранах комп'ютерів, планшетів і смартфонів. Візуальне оформлення забезпечує чітке вирівнювання елементів, інтуїтивно зрозуміле розташування форми введення даних і графіків.

JavaScript є основним інструментом для реалізації функціональності моделі. Усі розрахунки виконуються динамічно, залежно від введених користувачем даних. Скрипт забезпечує перевірку коректності даних (наприклад, сума часток транспорту не повинна перевищувати 100%), обчислення кількості транспортних засобів для кожного типу, а також розрахунок викидів CO₂ за кожним типом транспорту і загального рівня викидів. Крім того, JavaScript забезпечує динамічне оновлення графіків після кожної взаємодії користувача.

Для створення графіків використовується Chart.js — легка бібліотека, що дозволяє швидко створювати інтуїтивно зрозумілі графіки. У моделі застосовуються два типи графіків: лінійна діаграма для відображення залежності загальних викидів CO₂ від частки електротранспорту та стовпчикова діаграма для показу викидів CO₂ для кожного типу транспорту. Обидва графіки оновлюються динамічно, що забезпечує зручний візуальний аналіз даних.

Реалізація відповідає стандартам W3C, що забезпечує стабільну роботу моделі в усіх сучасних браузерях. Вона тестувалася у різних середовищах, включаючи Google Chrome, Mozilla Firefox і Safari, для забезпечення кросбраузерності. Завдяки використанню сучасних технологій модель може бути легко інтегрована в більш масштабні системи аналізу або адаптована до інших сценаріїв.

Всі необхідні дані для створення моделі і проведення розрахунків були взяті із [100, 101]

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ УМОВАХ

Написання цього розділу проводилось відповідно до [102].

5.1. Організація робочого місця в офісному приміщенні з дотримання охорони праці.

Організація робочого місця в офісі повинна проводитись так, щоб створити комфортні і безпечні умови праці з дотриманням відповідних вимог нормативних документів про охорону праці, викладених у Кодексі законів про працю та Законі України «Про охорону праці» [103, 104]. Насамперед вони стосуються дотримання рівня запиленості і загазованості повітря виробничих приміщень, зниження інтенсивності шуму, вібрації та електромагнітного випромінювання, забезпечення умов освітленості, температурного режиму та безпеки роботи з персональними комп'ютерами. Також має бути правильно розташовані офісні столи і стелажі із документами. Працівники повинні мати змогу на задоволення своїх гігієнічних потреб, а також можливості перепочинку і прийому їжі/напоїв у визначений час у спеціально відведених для цього приміщеннях. Забороняється паління в офісних приміщеннях, для цього потрібно обладнати спеціальні зони.

5.2. Дотримання правил безпеки при виникненні надзвичайних ситуацій.

Надзвичайна ситуація при роботі в офісному приміщенні може бути пов'язана із виникненням пожежної небезпеки або руйнування будівлі внаслідок різних причин. У час воєнного стану найчастіше це пов'язано із ракетними обстрілами, які відбуваються досить часто і можуть привести до прямого влучання ракети/шахедів або їхніх уламків. Тому при виникненні такої загрози і оголошенні повітряної тривоги треба негайно вимкнути електрообладнання і пройти до укриття. Покинути укриття можна лише після завершення повітряної тривоги.

ВИСНОВКИ

1. Транспортний сектор – один з найбільших джерел викидів парникових газів, особливо вуглекислого газу (CO₂), на який припадає ¼ від загальних глобальних викидів CO₂, спричинених спалювання викопного палива.
2. Найбільшу кількість викидів парникових газів, насамперед CO₂, серед різних видів транспорту вносить автомобільний транспорт, на який припадає понад 70% фіксованих викидів.
3. Основними заходами, що застосовуються для скорочення викидів CO₂ від автомобільного транспорту є: застосування альтернативних видів пального, збільшення частки електромобілів та зарядних станцій, впровадження низьковуглецевих технологій.
4. Зниження викидів CO₂ від залізничного, повітряного та морського транспорту можна досягнути реалізацією таких основних заходів: зростанням електрифікації залізниць, покращення аеродинамічних характеристик потягів; впровадженням водневих, електричних та гібридних літаків та поліпшенням їхньої енергоефективності; розробленням нових видів суден, що використовуватимуть енергію Сонця та вітру, а також водень, метанол та біогаз.
5. Стратегії досягнення скорочення викидів CO₂ від транспорту відрізняються у розвинутих державах та країнах, що розвиваються. Перша група країн зорієнтована на електрифікацію транспорту, розвиток водневих технологій, впровадження інтелектуальних транспортних систем, а друга – на перехід на альтернативні види палива та електрифікацію громадського транспорту.
6. Застаріла інфраструктура, низька частка електромобілів, недостатня свідомість населення та відсутність чіткої державної політики – основні виклики для декарбонізації транспорту в Україні.
7. Розвиток інфраструктури електричного транспорту, запровадження програм підтримки електромобілів, вирішення проблем забезпечення інфраструктури для громадського транспорту – ключові моменти успішної декарбонізації транспортної сфери в Україні.

8. Успішна декарбонізація транспорту як компонента сталого розвитку потребує комплексного підходу, охоплюючи законодавчі та політичні аспекти, підтримуючи впровадження нових технологій, розвиток інфраструктури та активну участь суспільства.
9. Розроблена комп'ютерна модель дає змогу розраховувати зміни викидів CO₂ у населених пунктах в залежності від перерозподілу співвідношення автотранспорту, що використовує різні види пального або електроенергію.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. [Online resource](<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>).
2. Health effects of transport-related air pollution /edited by Michal Krzyzanowski et al. Health_Effects_of_Transport-Related_Air_Pollution // 2005. 206 p.
3. Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ). "Air Pollution and Health: A Global Overview." <https://www.who.int/>.
4. International Energy Association // <https://transportgeography.org/contents/chapter4/transportation-and-environment/greenhouse-gas-emissions-transportation/>
5. The Covid-19 Crisis and Clean Energy Progress. Transport // <https://www.iea.org/reports/the-covid-19-crisis-and-clean-energy-progress/transport>
6. How much does the shipping industry contribute to global CO₂ emissions? // <https://sinay.ai/en/how-much-does-the-shipping-industry-contribute-to-global-co2-emissions/>
7. Fast Facts on Transportation Greenhouse Gas Emissions. 2023 // <https://www.epa.gov/greenvehicles/fast-facts-transportation-greenhouse-gas-emissions>
8. Greenhouse gas emissions from transport in Europe. 2024 // <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-transport>
9. The carbon brief profile: China // <https://interactive.carbonbrief.org/the-carbon-brief-profile-china/index.html>
10. Siddharth Jain, Shalini Rankavat, Analysing driving factors of India's transportation sector CO₂ emissions: Based on LMDI decomposition method, Heliyon, V. 9, Is. 9, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19871>.
11. Транспорт і зміна клімату. Стійкий розвиток транспортної системи: Збірник матеріалів для політиків міст. 2010. 60 с. <https://climateadapt.enefcities.org.ua/wp-content/uploads/2022/10/5e-tcc-ua.pdf>
12. European Commission. (2020). The European Green Deal. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
13. Parliamentary Office of Science and Technology (POST). "Decarbonising Transport." <https://post.parliament.uk/>.
14. Hydrogen Europe. "The Role of Hydrogen in Decarbonising Transport." <https://hydrogeneurope.eu/>
15. Європейська агенція з охорони навколишнього середовища (ЕЕА). "Electric Vehicles and Air Quality." <https://www.eea.europa.eu/>.
16. Паризька угода. Документ 995_161, чинний, поточна редакція — Ратифікація Верховною Радою України від 14.07.2016, підстава - 1469-VIII // https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_161#Text

17. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2015). Paris Agreement. // <https://unfccc.int/sites/default/files/english.paris.agreement.pdf>
18. Що таке Цілі сталого розвитку? // <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku>
19. Sustainable Transport Forum. (2022). Towards decarbonization of transport: Policy and practical measures // <https://www.stf.europa.eu/activities/decarbonization>.
20. United National Framework Convention on Climate Change (with annexes). Concluded at New York on 9 May 1992 // https://treaties.un.org/doc/source/recenttexts/unfccc_eng.pdf
21. Міжнародне енергетичне агентство (IEA). "Global CO₂ Emissions in 2021." <https://www.iea.org/>.
22. International Air Transport Association (IATA). (2021). *Climate Action*. [Link](<https://www.iata.org/en/pressroom/2021-releases/2021-10-04-01/>)
23. Vision 2050. 2011 International Air Transport Association // https://treaties.un.org/doc/source/recenttexts/unfccc_eng.pdf
24. European Commission. "Fit for 55: delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality." <https://ec.europa.eu/>.
25. Transport, energy and CO₂. International Energy Agency // <https://iea.blob.core.windows.net/assets/34816408-681f-4dbb-9a1c-8bf787bf8ad3/transport2009.pdf>
26. Ринок біопалива: наскільки відкрите вікно можливостей для України. 2023 // <https://agroportal.ua/publishing/lichnyi-vzglyad/rinok-biopaliva-naskilki-vidkrite-vikno-mozhlivostey-dlya-ukrajini>
27. Hydrogen Europe. "Hydrogen in Transport: Green Hydrogen Projects." <https://hydrogeneurope.eu/>.
28. Hydrogen Council. "Hydrogen Insights Report 2022." <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2022/>.
29. Водень – паливо майбутнього? 2021 // https://ecoclubrivne.org/hydrogen_energy/
30. Німецька національна воднева стратегія. "Nationale Wasserstoffstrategie." <https://www.bmwi.de/>.
31. Dokso A. The Uphill Battle for Hydrogen Cars in Japan // <https://energynews.biz/the-uphill-battle-for-hydrogen-cars-in-japan/>
32. Синтетичне паливо // https://uk.wikipedia.org/wiki/Синтетичне_паливо
33. «Електрифікація»: Чи зможуть електромобілі завоювати світ // <https://avtoblog.ua/news/elektrifikatsija-smogut-li-elektromobili-zavoevat-mir>
34. Norwegian Electric Vehicle Association. (2022). *Norway's Electric Vehicle Success*. [Link](<https://elbil.no/>)
35. Електрифікація муніципального транспорту – важлива умова для вступу України в ЄС // <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/elektrifikaciya-municipalnogo-transportu-vazhliva-umova-dlya-vstupu-ukraini-v-ies/>

36. Tesla, Inc. (2022). *Impact Report 2022*. [Link](<https://www.tesla.com/impact>)
37. Opel показала Experimental — концепткар, який розкриває погляд бренду на електромобілі майбутнього. 2023 // <https://startermedia.com.ua/intresting/concepts/2023/08/16/opel-pokazala-experimental-kontseptkar-iaquy-rozkryvaie-pohliad-brendu-na-elektromobili-maybutnoho>
38. Що таке рекуперація енергії та як вона працює // <https://ionity.ua/shho-take-rekuperacziya-energiyi-ta-yak-vona-praczuuye/>
39. В США запустили в небо найбільший пасажирський водневий літак // <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/v-ssha-zapustili-v-nebo-najbilshij-pasazhirskij-vodnevij-litak/>
40. Каграманян А.О. Європейська політика декарбонізації залізничного транспорту: досвід для України. Міжнародна та національна транспортна інфраструктура // <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/>
41. Високошвидкісний поїзд Avelia Horizon від Alstom отримав премію German Design Award. 2021 // <https://www.railway.supply/uk/vysokoskorostnoj-poezd-avelia-horizon-ot-alstom-poluchil-premiyu-german-design-award/>
42. From ekectric ferries to wind poweder boats: here’s how to the shipping industry can decarbonize/ 2024 // <https://www.weforum.org/stories/2024/08/electric-ferry-decarbonize-shipping-industry/>
43. Heinrich-Böll-Stiftung. (2022). Decarbonization of Transport in Europe and beyond // <https://www.boell.de/en/2022/02/01/decarbonization-of-transport-in-europe-and-beyond>).
44. Transport & Environment. (2021). *Europe's car makers must go electric by 2035 to meet climate goals*. [Доступно онлайн](<https://www.transportenvironment.org/discover/europes-car-makers-must-go-electric-by-2035-to-meet-climate-goals/>).
45. United Nations. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. [Link](<https://sdgs.un.org/2030agenda>)
46. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. (2020). *The Future of Mobility: The National Strategy for Electric Mobility*. <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Artikel/Industry/national-strategy-for-electric-mobility.html>
47. International Energy Agency (IEA). (2021). *Global EV Outlook 2021*. [Link](<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>)
48. U.S. Department of Energy. (2021). *Electric Vehicles: A Win for Consumers, the Economy, and the Environment*. <https://www.energy.gov/eere/electricvehicles/electric-vehicles-win-consumers-economy-and-environment>
49. World Bank Group. "Decarbonizing Transport in Developing Countries." <https://www.worldbank.org>.

50. Norwegian Ministry of Climate and Environment. (2021). *Climate Action in Norway*. [Link](https://www.regjeringen.no/en/topics/climate-and-environment/climate/greenhouse-gas-emissions-in-norway/id2009358/)
51. Норвезьке управління з питань дорожнього руху. "Norway: Leading the Charge in Electric Vehicles." https://www.vegvesen.no/.
52. Norwegian Ministry of Transport. "Norway's Electric Vehicle Incentives." https://www.regjeringen.no/en/topics/transport-and-communications/
53. Deutsche Bahn. (2022). *Sustainable Rail Transport*. [Link](https://www.deutschebahn.com/en/sustainability/sustainable-transport)
54. Hydrogen Bus Trials With Second Generation Mirai FCV System Conducted In Japan // https://voi.id/en/technology/253550
55. India Rolls Out 10,000 Electric Buses in Dozens of Cities // https://www.wri.org/outcomes/india-rolls-out-10000-electric-buses-dozens-cities
56. China Association of Automobile Manufacturers. (2022). China's New Energy Vehicle Development Report. http://www.caam.org.cn/
57. Bioethanol: the Brazilian success story // https://www.energy-observer.org/resources/bioethanol-brazilian-success-story
58. Державна служба статистики України. (2023). Статистичні дані щодо викидів парникових газів // http://www.ukrstat.gov.ua/
59. Електрифікація залізниць // https://uk.wikipedia.org/wiki/Електрифікація_залізниць
https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/17-civik-2018/zvit2023/zvit_avia_2023.pdf
60. Звіт про діяльність Державної авіаційної служби України за 2023 рік // https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/17-civik-2018/zvit2023/zvit_avia_2023.pdf
61. Пилипів І. Середній вік авто в Україні за 2022 рік зріс ще на пів року. 2023 // https://pravda.com.ua/news/2023/05/7/699851/
62. Цьогоріч в Україні почало зростати споживання пального – експерт. 2023 // https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3803255-cogoric-v-ukraini-rosalo-zrostati-spozivanna-palnogo-ekspert.html
63. Екологічний аспект // http://auto.cost.ua/ekologichnij-aspekt/
64. Як електромобілі змінюють майбутнє енергетики. 2024 // https://pravda.com.ua/projects/664dbb0cbc029/2024/05/29/714398/
65. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. (2021). Національна стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 року. https://mepr.gov.ua/news/naionalna-strategiya.
66. Міністерство інфраструктури України. (2020). Концепція розвитку електротранспорту в Україні до 2030 року. https://mtu.gov.ua/news/elektrotransport.
67. Міністерство інфраструктури України. (2021). Національна стратегія зниження викидів парникових газів // https://mtu.gov.ua/
68. Національна академія наук України. (2022). Екологічний стан і шляхи розвитку транспортної системи України // https://www.nas.gov.ua/

69. Управління ООН з наркотиків і злочинності. (2021). Екологічні інновації в транспортному секторі України // <https://www.unodc.org>
70. Екологічна організація «Грінпіс Україна». (2022). Перехід на електромобілі: проблеми та перспективи // <https://www.greenpeace.org/>
71. Українське товариство охорони природи. (2023). Транспорт і навколишнє середовище: аналіз ситуації в Україні // <https://www.uto.org.ua/>
72. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. (2022). Звіт про стан енергетичного сектору України. // <https://www.nerc.gov.ua/>
73. Електробус // <https://uk.wikipedia.org/wiki/Електробус>
74. Урядовий портал України. "Національна транспортна стратегія України до 2030 року." <https://www.kmu.gov.ua/>.
75. Народний депутат України. (2023). Законопроект про електромобілі та стимулювання їх використання // <https://www.rada.gov.ua/>
76. Міністерство інфраструктури України. "Програма розвитку електромобільності в Україні." <https://mtu.gov.ua/>.
77. Кабінет Міністрів України. (2022). Національний план дій з енергетики на 2021-2030 роки // <https://www.kmu.gov.ua/>
78. Міністерство інфраструктури України. (2020). Концепція розвитку електротранспорту в Україні до 2030 року // <https://mtu.gov.ua/news/elektrotransport>
79. Європейський банк реконструкції та розвитку (ЄБРР). "Ukraine Green Cities Programme." <https://www.ebrd.com/>.
80. World Economic Forum. "How hydrogen can power the global economy by 2050." <https://www.weforum.org/>.
81. Hydrogen Council. "Hydrogen scaling up: A sustainable pathway for the global energy transition." <https://hydrogencouncil.com/>.
82. International Renewable Energy Agency (IRENA). "Reaching Zero with Renewables: Eliminating CO₂ Emissions from Industry and Transport in Line with the 1.5°C Climate Goal." <https://www.irena.org/>.
83. Міжнародна агенція з відновлюваної енергетики (IRENA). "The Renewable Energy Employment Statistics 2023." <https://www.irena.org/>.
84. World Economic Forum. "How autonomous vehicles, hydrogen and electrification will transform transport by 2050." <https://www.weforum.org/>.
85. BloombergNEF. "Electric Vehicle Outlook 2023." <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>.
86. Transport & Environment. "Roadmap to climate-neutral road freight by 2050." <https://www.transportenvironment.org/>.
87. "NextGenerationEU // https://next-generation-eu.europa.eu/index_en
88. Build Back Better Plan // https://en.wikipedia.org/wiki/Build_Back_Better_Plan
89. McKinsey & Company. "Autonomous driving's future: Convenient and connected." <https://www.mckinsey.com/>.
90. Boston Consulting Group (BCG). "Self-Driving Trucks: What's the Future?" <https://www.bcg.com/>.

91. Forbes. "How AI and IoT are Revolutionizing Transportation." <https://www.forbes.com/>.
92. Gartner. "The Future of IoT in Transportation." <https://www.gartner.com/>.
93. PwC. "Artificial Intelligence in Transport: Enhancing Efficiency and Reducing Emissions." <https://www.pwc.com/>.
94. World Economic Forum. "IoT and AI: The Future of Smart Cities and Transport Systems." <https://www.weforum.org/>.
95. International Transport Forum (ITF). "Smart Transport Systems for Sustainable Development." <https://www.itf-oecd.org/>.
96. Gartner. "Future Trends in Intelligent Transport Systems." <https://www.gartner.com/>.
97. World Economic Forum. "How Intelligent Transport Systems Can Drive Sustainable Mobility." <https://www.weforum.org/>
98. Urban Transport Group. "The Role of Intelligent Transport Systems in Reducing Urban Emissions." <https://www.urbantransportgroup.org/>.
99. Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ). "Air Pollution and Health: A Global Overview." <https://www.who.int/>.
100. Викиди CO₂ від автомобілів: стандарти, податки, симулятор
101. CO₂ emissions from new passenger cars // <https://CO2cars.apps.eea.europa.eu/?source>

102. Кшивецький Б.Я., Сторожук В.М., Маєвська О.М., Соколовський І.Я., Гайда С.В. Методичні рекомендації для підготовки магістерської кваліфікаційної роботи зі спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища». – Львів: НЛТУ України, 2023. – 44 с.
103. Кодекс законів про працю України. Документ чинний. Остання редакція від 27.09.2024 // <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/322-08#Text>
104. Закон України Про охорону праці. Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1992, № 49, ст.668 // <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>

ДОДАТОК

(програмний код математичної моделі)

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
  <meta charset="UTF-8">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
  <title>Transport Emissions Model</title>
  <script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/chart.js"></script>
  <style>
    body {
      font-family: Arial, sans-serif;
      margin: 20px;
    }
    .container {
      max-width: 800px;
      margin: 0 auto;
    }
    .....
  });
}

  calculateAndDraw(); // Ініціалізація графіків
</script>
</body>
</html>
```