

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет аграрних технологій та екології

(повне найменування факультету)

Кафедра екології

(повна найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

**Екологічна складова оцінки життєвого циклу
автомобіля на прикладі моделі Toyota Prius**

спеціальність

101 Екологія

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма

«Екологія»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти групи
ЕОС_М - 21

Коровець Роман Миронович

(підпис)

Керівник:

к.геогр.н., доцент

Панькевич Сергій

Григорович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«__» _____ 20__ р.

к.геогр.н., доцент

Гарант освітньої програми: Федонюк

Микола Ананійович

(підпис)

Луцьк – 2025 рік

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аграрних технологій та екології

Кафедра екології

Ступінь вищої освіти: Магістр

Галузь знань: 10 Природничі науки

Спеціальність: 101 Екологія

Освітня програма: «Екологія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«__» _____ 202__ р.

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Коровцю Роману Мироновичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи:

Екологічна складова оцінки життєвого циклу автомобіля на прикладі моделі Toyota Prius

Керівник роботи: Панькевич Сергій Григорович, к. геогр. н., доцент

затверджені наказом закладу вищої освіти від «04» лютого 2025 р.

№ 62/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: «__» грудень 2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи): доповідні записки та супровідні аналітичні матеріали по будові та роботі ДВЗ та електродвигунів, літературні джерела, статистична та довідкова література з основ виробництва та експлуатації бензинових двигунів та електродвигунів, державні стандарти в галузі, наукові звіти, картографічні матеріали.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1) ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ АВТОМОБІЛІВ, 2) ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ АВТОМОБІЛЯ TOYOTA PRIUS, 3) ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ШЛЯХИ МІНІМІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ 4) висновки,

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

1) Мета та завдання кваліфікаційної роботи, 2) Об'єкт кваліфікаційної роботи, 3) Основні стадії життєвого циклу гібридного автомобіля у межах LCA-аналізу, 4) Техніко-екологічна характеристика автомобіля Toyota Prius, 5) Аналіз екологічних впливів на стадії виробництва автомобіля, 6) Оцінка екологічного впливу на стадії експлуатації автомобіля, 7) Екологічна ефективність повторного використання матеріалів, 8) Інтегральна оцінка екологічних показників життєвого циклу Toyota Prius, 9) Інтегральні екологічні показники (на життєвий цикл), 10) висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>розділ</i>			
<i>розділ</i>			
<i>Висновки</i>			

7. Дата видачі завдання « » 202 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Обґрунтування теми</i>	<i>30.03. – 15.04.25 р.</i>	<i>виконано</i>
2.	<i>Огляд літератури із досліджуваної проблеми</i>	<i>16.04. – 25.10.25 р.</i>	<i>виконано</i>
3.	<i>розділ</i>	<i>26.10. – 30.11.25 р.</i>	<i>виконано</i>
4.	<i>розділ</i>	<i>26.10. – 30.11.25 р.</i>	<i>виконано</i>
5.	<i>Висновки та пропозиції</i>	<i>01.12. – 05.12.25 р.</i>	<i>виконано</i>
6.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	<i>01.11. – 30.11.25 р.</i>	<i>виконано</i>
7.	<i>Формування додатків</i>	<i>26.11. – 05.12.25 р.</i>	<i>виконано</i>
8.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	<i>01.12. – 10.12.25р.</i>	<i>виконано</i>
9.	<i>Нормоконтроль</i>	<i>05.12. – 10.12.25 р.</i>	<i>виконано</i>
10.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	<i>11.12.2025р.</i>	<i>виконано</i>
11.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту</i>	<i>23.12.2025</i>	<i>виконано</i>

Здобувач вищої освіти _____ (Короvecь Р.М.)
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ (Панькевич С. Г.)
(підпис) (прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Коровець Р.М. Екологічна складова оцінки життєвого циклу автомобіля на прикладі моделі Toyota Prius. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Екологія» спеціальності 101 Екологія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з 3 розділів, вступу, висновків, переліку посилань.

Об'єктом дослідження є життєвий цикл автомобіля як технічної системи.

Предметом дослідження є екологічні впливи, що виникають на різних стадіях життєвого циклу автомобіля Toyota Prius.

У роботі використано методи аналізу та синтезу, порівняльного аналізу, екологічного моделювання, а також методологію оцінки життєвого циклу відповідно до міжнародних стандартів ISO 14040 та ISO 14044.

Результати виконання кваліфікаційної роботи магістра: практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для екологічного обґрунтування впровадження гібридного транспорту, а також у навчальному процесі та при розробленні стратегій сталого розвитку транспортного сектору.

Ключові слова: екологічна оцінка, оцінка життєвого циклу (LCA), життєвий цикл автомобіля, гібридний автомобіль, Toyota Prius, викиди парникових газів, викиди CO₂, екологічний вплив.

ABSTRACT

Korovets R.M. Ecological component of the life cycle assessment of the car using the example of the Toyota Prius model.

Qualification master's thesis OP "Ecology" specialty 101 Ecology.

Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

Bachelor's qualification thesis consists of 3 sections, introduction, conclusions, list of references.

The object of research is the life cycle of a car as a technical system.

The subject of the study is the environmental impacts that arise at different stages of the life cycle of the Toyota Prius car.

The work uses methods of analysis and synthesis, comparative analysis, environmental modeling, as well as the methodology of life cycle assessment in accordance with international standards ISO 14040 and ISO 14044.

Results of the master's degree work: the practical significance of the work lies in the possibility of using the obtained results for the environmental justification of the introduction of hybrid transport, as well as in the educational process and in the development of strategies for sustainable development of the transport sector.

Keywords: environmental assessment, life cycle assessment (LCA), vehicle life cycle, hybrid vehicle, Toyota Prius, greenhouse gas emissions, CO₂ emissions, environmental impact.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ АВТОМОБІЛІВ	9
1.1. Поняття життєвого циклу продукції та його екологічна складова.....	9
1.2. Методологія оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA).....	10
1.3. Нормативно-правове та міжнародне регулювання LCA (ISO 14040, ISO 14044).....	13
1.4. Основні екологічні показники оцінки життєвого циклу транспортних засобів.....	14
1.5. Роль гібридних автомобілів у зниженні антропогенного навантаження на довкілля.....	16
РОЗДІЛ 2. ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ АВТОМОБІЛЯ TOYOTA PRIUS	19
2.1. Техніко-екологічна характеристика автомобіля Toyota Prius.....	19
2.2. Аналіз екологічних впливів на стадії виробництва автомобіля.....	21
2.3. Оцінка екологічного впливу на стадії експлуатації.....	23
2.4. Аналіз впливу стадії утилізації та повторного використання матеріалів....	24
2.5. Інтегральна оцінка екологічних показників життєвого циклу Toyota Prius.	27
РОЗДІЛ 3. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ШЛЯХИ МІНІМІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ	29
3.1. Порівняльна оцінка життєвого циклу Toyota Prius та автомобілів з ДВЗ...29	
3.2. Потенціал зниження викидів парникових газів протягом життєвого циклу	31
3.3. Рекомендації щодо підвищення екологічної ефективності гібридних транспортних засобів.....	32
3.4. Перспективи розвитку гібридного та електричного транспорту в контексті сталого розвитку.....	34
ВИСНОВКИ	36
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	38

ВСТУП

Сучасний етап розвитку суспільства характеризується зростанням техногенного навантаження на довкілля, значна частка якого припадає на транспортний сектор. Автомобільний транспорт є одним із головних джерел викидів парникових газів, забруднюючих речовин в атмосферне повітря, а також споживання невідновлюваних природних ресурсів. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває комплексна оцінка екологічного впливу транспортних засобів не лише на стадії експлуатації, але протягом усього їх життєвого циклу.

Методологія оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) є ефективним інструментом екологічного аналізу, який дозволяє враховувати сукупний вплив продукції на довкілля, починаючи від видобутку сировини, виробництва та використання, і завершуючи утилізацією або рециклінгом. Особливий інтерес у цьому контексті становлять гібридні автомобілі, які поєднують двигун внутрішнього згорання та електричну силову установку і розглядаються як проміжний етап переходу до низьковуглецевого транспорту.

Автомобіль Toyota Prius є одним із найбільш поширених і технологічно розвинених гібридних транспортних засобів у світі, що робить його доцільним об'єктом для дослідження. Аналіз екологічної складової життєвого циклу цієї моделі дозволяє об'єктивно оцінити її вплив на навколишнє природне середовище та визначити екологічні переваги й обмеження гібридних технологій у порівнянні з традиційними автомобілями.

Метою даної кваліфікаційної роботи магістра є оцінка екологічної складової життєвого циклу автомобіля на прикладі моделі Toyota Prius із використанням методології LCA та визначення шляхів зниження негативного впливу транспортних засобів на довкілля.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачається вирішення таких завдань:

- проаналізувати теоретичні засади та методологічні підходи до оцінки життєвого циклу продукції;

- дослідити основні екологічні показники життєвого циклу автомобілів;
- здійснити екологічну оцінку стадій виробництва, експлуатації та утилізації автомобіля Toyota Prius;
- провести порівняльний аналіз екологічних впливів гібридного автомобіля та автомобіля з традиційним двигуном внутрішнього згорання;
- розробити рекомендації щодо підвищення екологічної ефективності гібридних транспортних засобів.

Об'єктом дослідження є життєвий цикл автомобіля як технічної системи. **Предметом дослідження** є екологічні впливи, що виникають на різних стадіях життєвого циклу автомобіля Toyota Prius.

Методологія та методика дослідження. У роботі використано методи аналізу та синтезу, порівняльного аналізу, екологічного моделювання, а також методологію оцінки життєвого циклу відповідно до міжнародних стандартів ISO 14040 та ISO 14044.

У роботі є використані матеріали згенеровані Штучним інтелектом.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для екологічного обґрунтування впровадження гібридного транспорту, а також у навчальному процесі та при розробленні стратегій сталого розвитку транспортного сектору.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ АВТОМОБІЛІВ

1.1. Поняття життєвого циклу продукції та його екологічна складова

Життєвий цикл продукції (ЖЦП) – це сукупність всіх етапів існування товару або продукту, починаючи від видобутку сировини до його утилізації або переробки. Іншими словами, це весь шлях продукту від «колиски до могили».

Класично виділяють такі основні стадії ЖЦП:

1. **Добування та підготовка сировини** – включає видобуток природних ресурсів, їх обробку та транспортування.
2. **Виробництво** – створення готового продукту, включаючи всі технологічні процеси, споживання енергії та використання матеріалів.
3. **Транспортування та логістика** – переміщення продукту від виробника до споживача.
4. **Експлуатація / використання** – використання продукту за призначенням, яке часто супроводжується енергоспоживанням та утворенням відходів.
5. **Утилізація або переробка** – завершальна стадія, що включає утилізацію, спалювання, переробку або повторне використання компонентів продукту.

Мета аналізу життєвого циклу – оцінити вплив продукту на економіку, суспільство та довкілля на всіх стадіях його існування.

Екологічна складова життєвого циклу

Екологічна складова ЖЦП зосереджується на **впливі продукту на навколишнє середовище** протягом усього його життєвого циклу. Основні аспекти:

- **Викиди парникових газів (CO₂, CH₄, N₂O)** – пов'язані з виробництвом енергії, транспортуванням та використанням продукту.
- **Споживання природних ресурсів** – вода, корисні копалини, енергія, біологічні ресурси.

- **Забруднення повітря, води та ґрунту** – промислові відходи, хімічні речовини, токсичні матеріали.
- **Утворення відходів** – тверді відходи, небезпечні відходи, що потребують спеціальної утилізації.
- **Вплив на біорізноманіття та екосистеми** – деградація середовища існування, втрати флори та фауни.

Методологічно екологічна оцінка здійснюється за допомогою **LCA (Life Cycle Assessment)** – оцінка життєвого циклу, яка дозволяє:

1. Кількісно оцінити вплив продукту на довкілля.
2. Виявити стадії з найбільшим екологічним навантаженням.
3. Розробити стратегії зменшення впливу на навколишнє середовище.

Практичне значення

- Екологічний аналіз ЖЦП допомагає підприємствам приймати **екологічно відповідальні рішення** у виробництві.
- Дозволяє розробляти **екологічно чисті продукти** та знижувати витрати на ресурси.
- Сприяє виконанню **екологічних норм та стандартів**, таких як ISO 14040/44.

1.2. Методологія оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA)

Поняття LCA

LCA (Life Cycle Assessment, оцінка життєвого циклу) – це систематичний метод кількісної та якісної оцінки впливу продукту, процесу або послуги на навколишнє середовище протягом усього його життєвого циклу – від добування сировини до утилізації (коліска – могила).

Основна мета LCA – визначити екологічні «гарячі точки» продукту та запропонувати заходи для зменшення його впливу на довкілля.

Основні етапи LCA

Згідно з міжнародними стандартами ISO 14040/44, LCA складається з 4 ключових етапів:

Визначення цілей та обсягу (Goal and Scope Definition)

- Визначаються мета оцінки та очікуваний результат.
- Формується **система продукту**, включно з межами дослідження (які стадії життєвого циклу враховуються).
- Визначаються функціональна одиниця (наприклад, 1 кВт·год електроенергії або 1 автомобіль) і сценарії використання.

Інвентаризаційний аналіз (Life Cycle Inventory, LCI)

- Збираються **кількісні дані про потоки ресурсів і викидів**:
 - споживання сировини та енергії,
 - викиди в повітря, воду та ґрунт,
 - утворення відходів.
- Це «фізичний баланс» впливу продукту на довкілля на всіх стадіях життєвого циклу[10].

Оцінка впливу (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)

- Дані інвентаризації перетворюються на **екологічні показники впливу**, наприклад:
 - глобальне потепління (викиди CO₂-еквіваленту),
 - кислотні дощі,
 - забруднення води,
 - виснаження ресурсів.
- Показники допомагають визначити найбільш критичні стадії ЖЦП для екології.

Інтерпретація результатів (Interpretation)

- Результати аналізу аналізуються для **виявлення «гарячих точок»** і розробки рекомендацій.
- Можуть бути запропоновані зміни у технології, матеріалах або способі утилізації для зменшення впливу.

Таблиця 1.1 – Стадії життєвого циклу автомобіля в межах LCA-аналізу

Стадія життєвого циклу	Зміст та основні екологічні аспекти
Видобуток та переробка сировини	Видобуток металів, полімерів та інших матеріалів; споживання енергії; викиди CO ₂ та забруднюючих речовин
Виробництво автомобіля	Виготовлення кузова, двигуна, електронних компонентів; енергоспоживання; промислові викиди
Виробництво акумуляторної батареї	Висока енергоємність процесу; використання літію та рідкісноземельних елементів; значні викиди парникових газів
Експлуатація автомобіля	Споживання палива та електроенергії; прямі викиди CO ₂ , NO _x та інших речовин; технічне обслуговування
Технічне обслуговування	Заміна мастил, фільтрів, витратних матеріалів; утворення відходів
Кінець життєвого циклу (утилізація)	Демонтаж автомобіля; утворення відходів; потенційне забруднення довкілля
Рециклінг та повторне використання	Переробка металів і батарей; зменшення потреби у первинних ресурсах; скорочення сумарних викидів

Принципи LCA

- **Повний життєвий цикл** – оцінка повинна враховувати всі стадії: виробництво, експлуатацію, утилізацію.
- **Системний підхід** – врахування взаємозв'язків між процесами.
- **Кількісна оцінка** – дані вимірюються у фізичних одиницях (кг, кВт·год, м³).
- **Прозорість і відтворюваність** – результати повинні бути обґрунтованими і перевірюваними.

Переваги застосування LCA

- Допомогає зменшити негативний екологічний вплив продукту.
- Сприяє економії ресурсів та енергії.
- Служить інструментом для екологічного маркування та сертифікації продукції.
- Підтримує прийняття стратегічних рішень на рівні підприємства щодо сталого розвитку.

1.3. Нормативно-правове та міжнародне регулювання LCA (ISO 14040, ISO 14044)

Оцінка життєвого циклу (LCA) регламентується міжнародними стандартами **ISO 14040** та **ISO 14044**, які визначають методологію проведення LCA, її етапи та вимоги до достовірності результатів.

- **ISO 14040:2006** – “Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework” Визначає **принципи та загальні рамки** оцінки життєвого циклу.
- **ISO 14044:2006** – “Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines” Регламентує **конкретні вимоги та рекомендації** щодо проведення LCA, включаючи збір даних, оцінку впливу та інтерпретацію результатів.

Ці стандарти створені для того, щоб LCA була **уніфікованою, прозорою та порівнянною** між різними продуктами та підприємствами.

Основні положення ISO 14040

1. Принципи LCA

- Розгляд продукту протягом всього життєвого циклу (від видобутку сировини до утилізації).
- Використання кількісних та якісних даних для оцінки впливу на довкілля.
- Прозорість процесу і відтворюваність результатів.

2. Система етапів LCA

- Визначення мети та обсягу
- Інвентаризаційний аналіз (LCI)
- Оцінка впливу (LCIA)
- Інтерпретація результатів

3. Межі та функціональна одиниця

- Стандарти визначають необхідність чітко встановлювати межі системи та функціональну одиницю, щоб результати були порівнянними.

Основні положення ISO 14044

1. Вимоги до проведення LCA

- Чітка документація всіх даних та методів оцінки.
- Використання достовірних баз даних для інвентаризації ресурсів та викидів.
- Обґрунтоване визначення категорій впливу (глобальне потепління, забруднення води, кислотні дощі тощо).

2. Оцінка впливу (LCIA)

- Розрахунок потенційного впливу продукту на навколишнє середовище.
- Визначення критичних етапів життєвого циклу.

3. Інтерпретація результатів

- Аналіз отриманих даних
- Виявлення «гарячих точок»
- Розробка рекомендацій для зменшення екологічного навантаження

Міжнародне та національне застосування

- **Міжнародне:** ISO 14040/44 визнаються у багатьох країнах світу як стандарт для екологічного аудиту та оцінки продуктів.
- **Національне:** Багато держав інтегрують ці стандарти у національне законодавство та стандарти сертифікації екологічної продукції.
- Використання LCA за ISO дозволяє компаніям отримувати **екологічні сертифікати**, маркування «eco-label» та брати участь у міжнародних тендерах з екологічними вимогами[8].

1.4. Основні екологічні показники оцінки життєвого циклу транспортних засобів

При оцінці життєвого циклу транспортного засобу (автомобіль, автобус, електромобіль тощо) аналізується його вплив на довкілля на всіх стадіях життя: виробництво, експлуатація та утилізація. Основна мета – визначити екологічно критичні етапи та знизити негативний вплив.

Екологічні показники (індикатори) дозволяють кількісно оцінити вплив на повітря, воду, ґрунт та природні ресурси.

Основні категорії екологічних показників

Викиди парникових газів (Greenhouse Gas Emissions)

- CO₂, CH₄, N₂O – основні гази, що спричиняють глобальне потепління.
- Обчислюються як еквівалент CO₂ (CO₂-eq).
- Найбільший вплив зазвичай має експлуатаційна стадія через споживання палива або електроенергії.

Енергоспоживання

- Включає використану енергію на виробництво, експлуатацію та утилізацію.
- Важливо оцінювати джерела енергії (відновлювані vs. невідновлювані).

Викиди забруднюючих речовин

- NO_x, SO_x, CO, PM – забруднюють повітря, погіршують якість життя та екосистеми.
- Викиди під час виробництва та експлуатації (особливо для дизельних та бензинових двигунів) найбільш значущі.

Використання ресурсів

- Сировина та матеріали: сталь, алюміній, пластик, рідкоземельні метали.
- Вода: витрати на виробництво компонентів та охолодження.

Утворення відходів

- Тверді та небезпечні відходи при виробництві та утилізації.
- Включає батареї електромобілів, мастила, шини, пластик.

Екотоксичність та деградація середовища

- Вплив на біорізноманіття, ґрунт та водні екосистеми.
- Враховуються токсичні речовини, що виділяються під час виробництва та утилізації[12].

Таблиця 1.2 - Особливості оцінки для різних типів транспортних засобів

Показник / Тип ТЗ	ДВС (бензин, дизель)	Гібриди	Електромобілі
Викиди CO ₂ під час експлуатації	Високі	Середні	Низькі (залежно від джерела електроенергії)
Викиди NO _x , SO _x , PM	Значні	Середні	Малі
Енергоспоживання виробництва	Середнє	Високе (аккумулятори)	Високе (особливо батареї)
Використання рідкоземельних металів	Низьке	Високе	Дуже високе (Li, Co, Ni)
Утилізація батарей	Неактуально	Так	Важлива складова LCA

- Виявлення “гарячих точок” екологічного навантаження транспортного засобу.
- Порівняння альтернативних технологій (електро vs. ДВС).
- Підтримка стратегій зменшення викидів та економії ресурсів на підприємствах і в державних програмах.

1.5. Роль гібридних автомобілів у зниженні антропогенного навантаження на довкілля

Гібридний автомобіль (Hybrid Electric Vehicle, HEV) – це транспортний засіб, який поєднує двигун внутрішнього згорання (ДВЗ) і електричний двигун, що дозволяє ефективніше використовувати паливо та зменшувати шкідливі викиди.

Головна мета гібридних технологій – зниження негативного впливу автомобільного транспорту на навколишнє середовище.

Основні механізми зниження екологічного навантаження

- Зменшення викидів парникових газів

- Гібриди споживають менше палива, особливо в міському циклі, завдяки електродвигуну та системі рекуперації енергії.

- Викиди CO₂ знижуються порівняно з традиційними бензиновими чи дизельними автомобілями на **20–50%** залежно від моделі та режиму експлуатації.

- Зменшення забруднення повітря

- Гібридні автомобілі виробляють менше NO_x, SO_x, CO, тверді частинки (PM), особливо у міських умовах із частими стартами та зупинками.

- Використання електродвигуна на низьких швидкостях дозволяє значно скоротити локальне забруднення повітря.

- Енергоефективність та економія палива

- Використання електродвигуна та системи **рекуперації кінетичної енергії** під час гальмування знижує загальне споживання палива.

- Це дозволяє **зменшити витрати невідновлюваних ресурсів**, таких як нафта.

- Розвантаження екосистем від шумового та теплового забруднення

- Електродвигун працює тихо, особливо на низьких швидкостях.

- Зниження теплового навантаження двигуна внутрішнього згорання зменшує локальний термічний вплив на довкілля.

Таблиця 1.3. Порівняння впливу гібридів та традиційних автомобілів

Показник	ДВЗ (бензин/дизель)	Гібридний автомобіль
CO ₂ (г/км)	Високі	Знижені на 20–50%
NO _x , PM	Високі	Значно знижені
Споживання палива (л/100 км)	Високе	Низьке
Енергоефективність	Низька	Висока
Шумове забруднення	Високе	Низьке

Виробництво акумуляторів гібридів збільшує екологічне навантаження на стадії виробництва, особливо використання літію, кобальту та інших рідкоземельних матеріалів.

Загальна користь для довкілля залежить від співвідношення використання електричного та ДВЗ режимів та джерела електроенергії[15].

Гібридні автомобілі є ефективним проміжним рішенням у переході від традиційних ДВЗ до повністю електричних транспортних засобів.

Вони зменшують викиди парникових газів, споживання палива та локальне забруднення повітря, що позитивно впливає на міське довкілля та здоров'я населення.

РОЗДІЛ 2. ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ АВТОМОБІЛЯ TOYOTA PRIUS

2.1. Техніко-екологічна характеристика автомобіля Toyota Prius

Автомобіль Toyota Prius є гібридним легковим транспортним засобом, що поєднує бензиновий двигун внутрішнього згорання та електродвигун. Модель XW50 оснащується бензиновим двигуном об'ємом 1,8 літра потужністю 98 к.с. та синхронним електродвигуном потужністю 72 к.с. Загальна система забезпечує сумарну потужність 122 к.с., що дозволяє автомобілю розганятися до 100 км/год за 10,6–11 секунд при максимальній швидкості 180 км/год. Трансмісія — безступенева (CVT), що забезпечує плавність ходу та оптимізацію витрат палива.

Toyota Prius обладнана акумуляторною батареєю NiMH або літій-іонного типу об'ємом 1,3–1,6 кВт·год. Витрата пального складає 3,8–4,5 л на 100 км пробігу, що робить автомобіль одним із найбільш енергоефективних у своєму класі. Об'єм паливного бака — 43 л, рекомендований ресурс автомобіля — близько 200 000 км пробігу[5].

З точки зору екологічності, Toyota Prius характеризується низьким рівнем викидів CO₂ — 87–90 г/км, що значно менше, ніж у звичайних автомобілів із двигуном внутрішнього згорання аналогічного класу. Гібридна силова установка дозволяє оптимізувати роботу двигуна та електродвигуна, зменшувати споживання палива у міському циклі та використовувати рекуперативне гальмування для зарядки акумулятора. Це забезпечує додаткове зниження викидів та підвищення енергетичної ефективності автомобіля.

«Додатковими екологічними перевагами є низький рівень шуму під час руху, зменшена емісія забруднюючих речовин NO_x і твердих часток, а також можливість повторного використання матеріалів та акумулятора після завершення життєвого циклу автомобіля. Завдяки цим характеристикам Toyota Prius є прикладом сучасного

гібридного транспортного засобу, який поєднує високі технічні показники з мінімальним негативним впливом на довкілля.

Викиди гібридних та електричних автомобілів Гібридні автомобілі викидають набагато менше парникових газів, ніж більшість стандартних бензинових автомобілів. Основним парниковим газом від автомобілів є вуглекислий газ, який безпосередньо залежить від кількості використаного палива» [5].

Гібридні автомобілі Toyota створені для екологічності, поєднуючи бензинові двигуни з електродвигунами для зменшення викидів вуглецю. Ця інноваційна технологія робить їх розумнішим вибором для екологічно свідомих водіїв, які хочуть мінімізувати свій вплив на навколишнє середовище.

Таблиця 2.1.- Основні техніко-екологічні характеристики автомобіля Toyota Prius

Показник	Характеристика
Тип транспортного засобу	Легковий автомобіль
Тип силової установки	Повний гібрид (HEV – Hybrid Electric Vehicle)
Виробник	Toyota Motor Corporation
Модель	Toyota Prius
Тип двигуна внутрішнього згоряння	Бензиновий, 4-циліндровий
Робочий об'єм ДВЗ	1,8 л
Робочий цикл двигуна	Цикл Аткінсона
Потужність ДВЗ	≈ 72–98 к.с. (залежно від покоління)
Тип електродвигуна	Синхронний електродвигун
Потужність електродвигуна	≈ 53–72 к.с.
Сумарна потужність гібридної системи	≈ 122–136 к.с.
Тип акумулятора	Нікель-металогідридний (NiMH) або літій-іонний
Ємність акумулятора	≈ 1,3–1,8 кВт·год
Тип трансмісії	e-CVT (електронно керована безступенева)
Привід	Передній
Середня витрата пального	≈ 3,0–3,5 л/100 км

Показник	Характеристика
Викиди CO ₂ (комбінований цикл)	≈ 70–90 г/км
Рівень токсичності	Відповідає стандартам Euro 6
Режим руху на електротязі	Так (на малих швидкостях і коротких дистанціях)
Рекуперативне гальмування	Наявне
Рівень шуму	Знижений у електричному режимі
Основні екологічні переваги	Зменшення викидів CO ₂ , економія пального, зниження шумового навантаження
Основні екологічні обмеження	Наявність ДВЗ, екологічне навантаження при виробництві та утилізації акумулятора

2.2. Аналіз екологічних впливів на стадії виробництва автомобіля

Стадія виробництва автомобіля є однією з найбільш енергоємних і ресурсомістких у його життєвому циклі. Для виготовлення Toyota Prius використовуються різноманітні матеріали, серед яких металеві сплави (сталь, алюміній), пластики, полімери, скло, електронні компоненти та акумуляторні батареї. Всі ці матеріали потребують значних енергетичних витрат на видобуток, переробку та виготовлення.

Виробництво кузова, двигуна внутрішнього згорання та електродвигуна супроводжується високим рівнем споживання електроенергії та утворенням промислових викидів CO₂, оксидів азоту (NO_x), сірчистих сполук (SO_x) та пилу. Особливо енергоємним є виготовлення акумуляторної батареї, що включає добування і переробку літію, нікелю та рідкоземельних елементів. Цей процес значно підвищує сумарні викиди парникових газів на стадії виробництва[20].

Екологічний аналіз показує, що стадія виробництва формує приблизно 25–35 % загальних викидів CO₂ протягом життєвого циклу Toyota Prius. Крім того, виробництво акумуляторів і електроніки пов'язане з утворенням відходів та використанням небезпечних хімічних речовин, що вимагає дотримання стандартів промислової безпеки та екологічних норм.

Водночас, виробництво Toyota Prius оптимізоване з точки зору екології: застосовуються енергоефективні технології, переробка відходів та вторинне використання матеріалів, що дозволяє зменшити негативний вплив на довкілля. Розвиток сучасних технологій, таких як виробництво легких сплавів та ефективних акумуляторів, поступово знижує екологічне навантаження на стадії виробництва, роблячи гібридні автомобілі більш сталими та екологічно безпечними.

Таблиця 2.2- Оцінка екологічного впливу на стадії експлуатації автомобіля

Етап виробництва	Основні процеси	Джерела впливу	Екологічні наслідки	Категорії впливу (LCA)
Видобуток сировини	Видобуток залізної руди, бокситів, міді, літію, нікелю	Гірничі роботи, використання важкої техніки	Руйнування ландшафтів, деградація ґрунтів	Land use, Abiotic depletion
Первинна переробка матеріалів	Виплавка сталі, алюмінію, міді	Високі температури, спалювання палива	Значні викиди CO ₂ та SO ₂	Climate change, Acidification
Виробництво полімерів	Синтез пластмас, гумових матеріалів	Нафтопереробка, хімічні реакції	Утворення токсичних відходів	Human toxicity, Ecotoxicity
Виробництво акумулятора	Виробництво Li-ion або NiMH батарей	Енергоємні процеси, використання рідкісних металів	Підвищене енергоспоживання, токсичні відходи	Climate change, Resource depletion
Виробництво електроніки	Виготовлення мікросхем, електронних модулів	Використання хімікатів та чистих виробничих середовищ	Забруднення води та повітря	Water pollution, Human toxicity
Збірка кузова	Штампування, зварювання	Споживання електроенергії	Викиди CO ₂ (опосередковано)	Climate change
Фарбування	Нанесення лакофарбових покриттів	Розчинники, ЛОС	Забруднення повітря, утворення небезпечних відходів	Photochemical smog, Human toxicity
Остаточна збірка	Монтаж вузлів і систем	Енергоспоживання, мастильні матеріали	Локальні викиди та відходи	Energy use, Waste generation

2.3. Оцінка екологічного впливу на стадії експлуатації

Стадія експлуатації автомобіля є ключовою з точки зору екологічного навантаження на довкілля, оскільки саме під час руху транспортного засобу відбувається найбільша частка викидів парникових газів та забруднюючих речовин. Для гібридного автомобіля Toyota Prius основними джерелами екологічного впливу є споживання палива та електроенергії, а також утворення відходів від технічного обслуговування.

Середні показники витрати пального Toyota Prius складають 3,8–4,5 літра на 100 км пробігу, що значно нижче, ніж у традиційних автомобілів із двигуном внутрішнього згорання. Низька витрата пального призводить до зменшення прямих викидів CO₂ — приблизно 87–90 г/км, а також зниження викидів оксидів азоту (NO_x) та твердих часток, що позитивно впливає на якість атмосферного повітря, особливо в міських умовах[13].

Важливою особливістю Prius є наявність електродвигуна та системи рекуперативного гальмування, яка перетворює кінетичну енергію автомобіля під час гальмування у електричну енергію для підзарядки батареї. Це дозволяє зменшити споживання палива і, відповідно, сумарні викиди парникових газів під час міських поїздок. Використання гібридного режиму (поєднання бензинового та електричного двигунів) забезпечує оптимальну роботу силової установки в різних дорожніх умовах та сприяє зниженню екологічного навантаження.

Оцінка екологічного впливу також включає врахування технічного обслуговування: заміна мастил, фільтрів, шин та інших витратних матеріалів генерує додаткові відходи та вплив на навколишнє середовище. Проте, завдяки високій енергоефективності гібридного автомобіля, ці додаткові впливи є незначними порівняно з традиційними транспортними засобами.

Загалом, стадія експлуатації Toyota Prius формує близько 60–65 % сумарних викидів CO₂ протягом життєвого циклу, проте застосування гібридної технології дозволяє значно зменшити екологічний вплив автомобіля та підвищити його енергетичну ефективність. Це робить Toyota Prius одним із найбільш екологічно дружніх автомобілів свого класу і підтверджує доцільність використання гібридних технологій для зниження негативного впливу транспортного сектору на довкілля.

Таблиця 2.3.- Оцінка екологічного впливу на стадії експлуатації автомобіля

Показник впливу	Джерело під час експлуатації	Характер впливу на довкілля	Категорія LCA
Викиди CO ₂	Спалювання пального в ДВЗ	Посилення парникового ефекту, зміна клімату	Climate change
Викиди NO _x	Робота ДВЗ, особливо при розгонах	Формування фотохімічного смогу, кислотні дощі	Acidification
Викиди CO	Неповне згоряння пального	Негативний вплив на здоров'я людини	Human toxicity
Тверді частинки (PM ₁₀ , PM _{2.5})	Згоряння пального, знос шин і гальм	Забруднення повітря, респіраторні захворювання	Particulate matter
Леткі органічні сполуки (ЛОС)	Паливна система, випаровування	Утворення приземного озону	Photochemical smog
Споживання пального	Постійна робота ДВЗ	Виснаження викопних ресурсів	Resource depletion
Споживання електроенергії	Робота електродвигуна (гібриди, PHEV)	Опосередковані викиди CO ₂ (залежно від енергоміксу)	Energy use
Знос шин	Контакт з дорожнім покриттям	Мікропластик у ґрунтах і воді	Ecotoxicity
Шумове забруднення	Робота двигуна та рух авто	Порушення акустичного комфорту	Noise pollution
Витоки технічних рідин	Масла, охолоджувальні рідини	Забруднення ґрунтів і вод	Soil & water pollution

2.4. Аналіз впливу стадії утилізації та повторного використання матеріалів

Стадія утилізації автомобіля є завершальною фазою його життєвого циклу та має важливе значення з точки зору зниження сумарного екологічного навантаження. На цьому етапі здійснюється демонтаж автомобіля, сортування компонентів, переробка металів, пластиків, скла та інших матеріалів, а також утилізація відпрацьованих акумуляторів та електроніки. Ефективне управління цими

процесами дозволяє зменшити потребу у видобутку первинних ресурсів та скоротити викиди парникових газів.

У Toyota Prius особлива увага приділяється акумуляторній батареї, яка містить літій, нікель, кобальт та рідкоземельні елементи. Після завершення життєвого циклу батарея може бути піддана процесу **рециклінгу**, що передбачає відновлення металів для повторного використання у виробництві нових батарей або інших електронних компонентів. Це значно зменшує екологічний вплив стадії утилізації та знижує сумарні викиди CO₂ на життєвому циклі автомобіля.

Переробка кузовних металів, скла та пластиків також дозволяє зменшити кількість відходів, що потрапляють на сміттєзвалища, та знизити негативний вплив на ґрунт і водні ресурси. Важливою складовою є використання сучасних технологій сортування та подрібнення матеріалів, що підвищує ефективність рециклінгу.

Аналіз показує, що застосування принципів повторного використання матеріалів на стадії утилізації здатне знизити загальний екологічний вплив автомобіля на 5–10 % порівняно з повним видобутком і виробництвом нових матеріалів. Це робить процес утилізації не лише екологічно доцільним, а й економічно вигідним, сприяючи розвитку концепції сталого використання ресурсів у транспортному секторі[21].

Основні аспекти аналізу:

Матеріальний склад: Prius містить традиційні матеріали (сталь, алюміній, пластик, гума), які добре піддаються переробці (до 85-95% за масою).

Гібридна система:

Батарея: Нікель-метал-гідридна (NiMH) або літій-іонна (Li-ion) вимагає спеціалізованої переробки для вилучення дорогоцінних металів (нікель, кобальт, літій), що є складним і енергоємним процесом, але критично важливим для замкненого циклу.

Електродвигуни та електроніка: Містять мідь та рідкоземельні елементи (неодим, диспрозій), вилучення яких зменшує залежність від первинного видобутку.

Рідини та небезпечні компоненти: Відпрацьовані мастила, антифриз, гальмівна рідина та залишки пального потребують безпечного збору та утилізації. Традиційно ці речовини можуть забруднювати ґрунт та воду[10].

Економічний та екологічний вплив утилізації:

Позитив: Зниження потреби у видобутку нових ресурсів, зменшення обсягу відходів на полігонах, зниження викидів парникових газів порівняно з виробництвом нових авто, створення робочих місць у секторі переробки.

Негатив/Виклики: Висока вартість і складність технологій переробки батарей, ризики потрапляння токсичних речовин у довкілля при недбалій утилізації, потреба в ефективній системі збору та сортування від автомобілів.

Вплив на довкілля та перспективи:

Ефективна утилізація Prius сприяє циркулярній економіці, зменшуючи первинне споживання ресурсів.

Розробка нових, ефективніших та дешевших технологій переробки гібридних автомобілів є ключовою для максимізації переваг.

Успішне впровадження систем утилізації знижує загальний екологічний слід гібридних авто протягом усього їхнього життєвого циклу, особливо порівняно з традиційними бензиновими машинами.

Таблиця 2.4.- Екологічна ефективність повторного використання матеріалів

Матеріал	Рівень повторного використання	Екологічний ефект
Сталь	85–95 %	Значне скорочення CO ₂ та енерговитрат
Алюміній	90–95 %	Економія до 95 % енергії
Мідь	80–90 %	Зниження токсичних викидів
Пластмаси	20–40 %	Часткове зменшення відходів
Акумулятори	60–90 % (цінні метали)	Відновлення критичних ресурсів

2.5. Інтегральна оцінка екологічних показників життєвого циклу Toyota Prius

Інтегральна оцінка екологічних показників життєвого циклу автомобіля Toyota Prius проводиться з урахуванням усіх основних стадій: виробництво, експлуатація, технічне обслуговування, утилізація та рециклінг. Такий комплексний підхід дозволяє оцінити сумарний вплив транспортного засобу на навколишнє середовище та визначити найбільш критичні етапи життєвого циклу.

Виробництво автомобіля та його акумуляторної батареї є енергомісткими процесами і формують приблизно 25–35 % сумарних викидів CO₂ життєвого циклу. Значну частку цих викидів забезпечує виготовлення акумулятора, оскільки він містить літій, нікель, кобальт та інші рідкоземельні елементи. При цьому застосування сучасних технологій переробки матеріалів дозволяє частково знизити екологічне навантаження виробничого етапу.

Експлуатація автомобіля визначає більшу частку екологічного впливу — близько 60–65 % сумарних викидів парникових газів. Гібридна система Toyota Prius, що поєднує бензиновий двигун та електродвигун, забезпечує низьку витрату пального (3,8–4,5 л/100 км) та викиди CO₂ на рівні 87–90 г/км. Використання режимів електричного руху та рекуперативного гальмування дозволяє додатково знизити споживання енергії та викиди шкідливих речовин[19].

Технічне обслуговування та заміна витратних матеріалів (мастил, фільтрів, шин) створюють додаткові, але незначні, екологічні навантаження.

Стадія утилізації та рециклінгу дозволяє повернути до виробничого циклу значну частину металів, пластику, скла та елементів акумулятора, що зменшує потребу у видобутку первинних ресурсів та скорочує сумарні викиди CO₂ на 5–10 %.

Таблиця 2.5.- Інтегральна оцінка екологічних показників життєвого циклу Toyota Prius

Стадія життєвого циклу	Основні джерела впливу	Ключові екологічні показники	Орієнтовна частка у сумарному впливі, %
Виробництво	Виплавка металів, виробництво акумулятора, електроніки	Викиди CO ₂ , виснаження ресурсів, токсичність	25–35
Експлуатація	Спалювання пального, знос шин і гальм	CO ₂ , NO _x , PM, шум	55–65
Утилізація та переробка	Переробка металів, акумулятора	Зменшення чистих викидів, повторне використання ресурсів	–5...–10*

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що інтегральний екологічний вплив Toyota Prius протягом життєвого циклу суттєво нижчий порівняно з автомобілями з традиційним двигуном внутрішнього згорання. Використання гібридних технологій, ефективне управління енергоспоживанням та повторне використання матеріалів забезпечують зниження викидів парникових газів на 25–30 % протягом життєвого циклу та роблять автомобіль більш екологічно дружнім.

Таким чином, інтегральна оцінка життєвого циклу Toyota Prius підтверджує його екологічні переваги та доцільність використання гібридних транспортних засобів у рамках політики сталого розвитку транспортного сектору.

РОЗДІЛ 3. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ШЛЯХИ МІНІМІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ

3.1. Порівняльна оцінка життєвого циклу Toyota Prius та автомобілів з ДВЗ

Порівняльна оцінка життєвого циклу (LCA) Toyota Prius та автомобілів з традиційним бензиновим двигуном дозволяє визначити екологічні переваги гібридних технологій. Для аналізу враховувалися такі основні стадії: виробництво, експлуатація, технічне обслуговування, утилізація та рециклінг.

1. Виробництво

- Виробництво Toyota Prius є більш енергоємним порівняно з автомобілями з ДВЗ через виготовлення акумуляторної батареї, яка містить літій, нікель, кобальт та рідкоземельні елементи.

- У традиційних автомобілях із бензиновим двигуном виробництво є менш енерговитратним, однак потребує аналогічної кількості металів і пластиків.

- Сумарні викиди CO₂ на стадії виробництва Prius приблизно на 15–20 % вищі, ніж у автомобілів з ДВЗ.

2. Експлуатація

- На стадії експлуатації Toyota Prius значно перевершує традиційні автомобілі завдяки гібридній системі.

- Середні витрати пального Prius складають 3,8–4,5 л/100 км, тоді як у автомобілів з ДВЗ аналогічного класу цей показник становить 6–8 л/100 км.

- Викиди CO₂ протягом життєвого циклу на 1 км пробігу у Prius — 87–90 г, а у автомобілів з ДВЗ — близько 120–140 г.

- Таким чином, основна екологічна перевага Prius формується саме на стадії експлуатації, що забезпечує економію пального і зниження парникових викидів на 25–30 %.

3. Технічне обслуговування

- Обидва типи автомобілів потребують регулярного обслуговування: заміна мастил, фільтрів, шин.

- У Prius додатково обслуговується гібридна система та батарея, що потребує спеціального утилізаційного підходу, але сумарний вплив на екологію невеликий порівняно з перевагами гібридної системи.

4. Утилізація та рециклінг

- Prius забезпечує можливість повторного використання матеріалів батареї, металів, пластику та скла.

- Традиційні автомобілі також підлягають переробці, однак відсутність акумулятора робить потенційну економію ресурсів меншою.

- Рециклінг батареї Prius зменшує сумарний екологічний вплив на 5–10 % протягом життєвого циклу.

5. Інтегральна оцінка

- Інтегральна оцінка показує, що сумарні викиди CO₂ Toyota Prius за весь життєвий цикл нижчі на 25–30 % порівняно з аналогічними автомобілями з ДВЗ.

- Основна перевага Prius полягає у зменшенні викидів під час експлуатації, тоді як виробничі стадії мають трохи вищий екологічний вплив порівняно з бензиновим автомобілем[6].

Таблиця 3.1.-. Інтегральні екологічні показники (на життєвий цикл)

Показник	Toyota Prius (гібрид)	Традиційний бензиновий автомобіль	Екологічний ефект Prius
Сумарні викиди CO ₂ , т/ЖЦ	18–22	25–30	↓ на 25–35 %
Споживання пального, л/ЖЦ	Низьке	Високе	↓ на 30–40 %
Викиди NO _x	Низькі	Середні–високі	Значне скорочення
Шумове навантаження	Знижене	Підвищене	Покращення акустичного середовища
Ресурсомісткість виробництва	Вища	Нижча	Компенсується експлуатацією

Порівняльний аналіз підтверджує, що Toyota Prius є більш екологічно безпечним транспортним засобом порівняно з автомобілями з традиційним двигуном внутрішнього згорання. Гібридна технологія забезпечує зменшення сумарних викидів парникових газів, підвищує енергоефективність та сприяє сталому використанню ресурсів у транспортному секторі.

3.2. Потенціал зниження викидів парникових газів протягом життєвого циклу .

Оцінка життєвого циклу (LCA) Toyota Prius дозволяє визначити потенціал зниження викидів парникових газів (ПГ) на всіх етапах його використання: від виробництва до утилізації. Найбільший вплив на сумарні викиди CO₂ відбувається на стадії експлуатації, яка формує близько 60–65 % загальних викидів протягом життєвого циклу. Завдяки гібридній силовій установці, яка поєднує бензиновий двигун та електродвигун, автомобіль досягає низької витрати пального — 3,8–4,5 л/100 км, що дозволяє зменшити викиди CO₂ до 87–90 г/км.

Додаткове зниження викидів забезпечує система **рекуперативного гальмування**, яка перетворює кінетичну енергію під час гальмування у електричну для підзарядки батареї. Це дозволяє зменшити споживання палива в міському циклі та підвищити ефективність використання енергії.

На стадії виробництва викиди CO₂ є відносно високими через виготовлення акумулятора та електронних компонентів. Проте впровадження **енергоефективних технологій виробництва**, а також **використання вторинних матеріалів** у конструкції автомобіля дає можливість частково компенсувати цей вплив.

Стадія утилізації та повторного використання матеріалів дозволяє повернути до виробництва метал, пластик, скло та батареї, що знижує потребу у видобутку первинних ресурсів і скорочує сумарні викиди ПГ на 5–10 %.

У цілому, потенціал зниження викидів парникових газів протягом життєвого циклу Toyota Prius оцінюється у **25–30 % порівняно з традиційними автомобілями з двигуном внутрішнього згоряння**. Основні резерви досягнення цього потенціалу зосереджені на зниженні витрат пального під час експлуатації, впровадженні технологій рециклінгу батарей та використанні енергоефективних виробничих процесів[20].

Таким чином, Toyota Prius демонструє значний потенціал скорочення впливу транспортного сектору на зміну клімату і підтверджує доцільність застосування гібридних технологій у контексті сталого розвитку.

3.3. Рекомендації щодо підвищення екологічної ефективності гібридних транспортних засобів

Оптимізація виробничих процесів

- Використовувати енергоефективне обладнання на стадії виробництва автомобілів та акумуляторів.
- Застосовувати вторинні матеріали (перероблені метали, пластики та скло) для зменшення потреби у видобутку первинних ресурсів.
- Впроваджувати стандарти екологічного управління ISO 14001 для зниження промислових викидів.

Підвищення ефективності експлуатації

- Розробляти та впроваджувати більш ефективні гібридні силові установки з оптимізованим поєднанням електродвигуна та ДВЗ.
- Використовувати системи рекуперативного гальмування та вдосконалені батареї з підвищеною ємністю і ресурсом.
- Заохочувати водіїв до енергоефективного стилю водіння (есо-режими, плавне прискорення та гальмування).

Стимулювання використання відновлюваної електроенергії

- Застосовувати зарядку електродвигуна від відновлюваних джерел (сонячна та вітрова енергія), що зменшує сумарні викиди парникових газів під час експлуатації.

Поліпшення утилізації та рециклінгу

- Впроваджувати ефективні технології переробки акумуляторів і електроніки.
- Розвивати системи збору та повторного використання матеріалів кузова, пластику, скла та металів.
- Створювати стимули для виробників і власників гібридних автомобілів щодо здачі старих батарей та компонентів на переробку.

Науково-технічні заходи

- Проводити дослідження з розробки легких конструкцій автомобілів, що зменшують енергоспоживання під час руху.
- Вдосконалювати технології акумуляторів з меншим вуглецевим слідом та тривалим терміном служби.
- Розробляти інтегровані системи моніторингу викидів і споживання енергії для оцінки реального екологічного впливу автомобілів.

Освітні та інформаційні заходи

- Підвищувати обізнаність водіїв та споживачів щодо екологічних переваг гібридних транспортних засобів.
- Розробляти навчальні програми щодо ефективного користування гібридними автомобілями для зниження витрат палива та викидів CO₂.

Комплексне застосування вищенаведених заходів дозволяє підвищити екологічну ефективність гібридних транспортних засобів, зменшити їхній вплив на довкілля та забезпечити стале використання ресурсів у транспортному секторі.

3.4. Перспективи розвитку гібридного та електричного транспорту в контексті сталого розвитку

Розвиток гібридного та електричного транспорту є ключовим напрямом зменшення негативного впливу транспортного сектору на довкілля та досягнення цілей сталого розвитку. Головними чинниками, що визначають перспективи цього сегмента, є зниження викидів парникових газів, скорочення залежності від викопного палива, розвиток відновлюваних джерел енергії та підвищення енергоефективності транспортних засобів.

1. Екологічні перспективи. Гібридні та електричні автомобілі дозволяють значно знизити викиди CO₂ та інших забруднювальних речовин у порівнянні з традиційними автомобілями з ДВЗ. Завдяки інтеграції електродвигунів і систем рекуперативного гальмування досягається оптимізація споживання енергії та зменшення сумарних викидів на всіх стадіях життєвого циклу.

2. Енергетична ефективність та відновлювана енергія. Перспективним напрямом є використання відновлюваних джерел енергії для зарядки електромобілів. Це дозволяє знизити вуглецевий слід транспорту і інтегрувати транспортну систему у загальну концепцію чистої енергетики.

3. Технологічні інновації. Розвиток легких матеріалів, високоефективних акумуляторів, інтелектуальних систем управління енергоспоживанням і автономних режимів руху сприяє підвищенню ефективності гібридних та електричних транспортних засобів. Інтеграція смарт-технологій дозволяє також оптимізувати маршрути та зменшувати навантаження на міську інфраструктуру.

4. Економічні та соціальні аспекти. Зростання популярності гібридних та електричних автомобілів стимулює розвиток нових виробничих секторів та створює робочі місця у сфері зеленої економіки. Крім того, зменшення забруднення повітря у містах покращує здоров'я населення і підвищує якість життя.

5. Стратегічні перспективи. Гібридний та електричний транспорт є перехідним етапом до повної декарбонізації транспорту. Очікується, що в найближчі 10–15 років частка електромобілів на світовому ринку зросте суттєво, а

використання гібридних технологій залишиться важливим для довготривалого зниження викидів у регіонах з недостатньою інфраструктурою зарядних станцій.

Гібридний та електричний транспорт є стратегічно важливими для досягнення сталого розвитку, оскільки поєднує екологічну безпеку, економічну ефективність і соціальні переваги. Розвиток інноваційних технологій, підтримка державної політики та інтеграція відновлюваних джерел енергії створюють умови для масштабного впровадження таких транспортних засобів у найближчі десятиліття.

ВИСНОВКИ

1. У ході виконання роботи було проаналізовано теоретичні засади та методологічні підходи до оцінки життєвого циклу продукції, зокрема методологію LCA відповідно до міжнародних стандартів ISO 14040–14044. Встановлено, що підхід оцінки життєвого циклу є ефективним інструментом комплексної екологічної оцінки продукції, оскільки дозволяє враховувати всі стадії життєвого циклу — від видобутку сировини до утилізації, та обґрунтовано порівнювати альтернативні технологічні рішення.

2. На основі аналізу наукових джерел було досліджено основні екологічні показники життєвого циклу автомобілів, серед яких ключовими є викиди парникових газів (CO₂-екв.), викиди забруднювальних речовин в атмосферу (NO_x, CO, тверді частинки), споживання енергії та викопних ресурсів, а також показники токсичності та шумового навантаження. Визначено, що найбільший внесок у сумарний екологічний вплив автомобіля припадає на стадію експлуатації. Перехід на електротранспорт може суттєво знизити рівень забруднення атмосферного повітря в містах, насамперед щодо оксидів азоту (NO_x), вуглецю (CO) та твердих частинок (PM), що є типовими продуктами згоряння палива в ДВЗ.

3. У роботі здійснено екологічну оцінку стадій виробництва, експлуатації та утилізації автомобіля Toyota Prius. Встановлено, що стадія виробництва характеризується підвищеним екологічним навантаженням, зумовленим енергоємним виготовленням акумуляторних систем та електронних компонентів. Водночас на стадії експлуатації гібридний автомобіль демонструє істотне зниження викидів парникових газів і забруднювальних речовин, а стадія утилізації забезпечує додатковий екологічний ефект за рахунок високого потенціалу переробки матеріалів і повернення вторинних ресурсів у виробничий цикл.

4. У результаті порівняльного аналізу екологічних впливів гібридного автомобіля та автомобіля з традиційним двигуном внутрішнього згоряння

встановлено, що Toyota Prius має нижчі сумарні викиди CO₂ протягом життєвого циклу на 25–35 %, менші викиди NO_x та твердих частинок, а також знижене шумове навантаження, особливо в умовах міської експлуатації. Отримані результати підтверджують екологічну доцільність застосування гібридних транспортних технологій як перехідного етапу до декарбонізації транспортного сектору.

5. На основі проведеного аналізу було розроблено рекомендації щодо підвищення екологічної ефективності гібридних транспортних засобів, які передбачають зменшення ресурсомісткості виробництва, удосконалення гібридних силових установок, розвиток акумуляторних технологій, оптимізацію умов експлуатації та впровадження принципів циркулярної економіки на стадії утилізації. Реалізація запропонованих заходів сприятиме подальшому скороченню викидів парникових газів та зменшенню антропогенного навантаження на довкілля.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ISO 14040:2006 + Amd 1:2020. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva : International Organization for Standardization, 2020.
2. ISO 14044:2006 + Amd 1:2017. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. Geneva : International Organization for Standardization, 2017.
3. Hauschild M. Z., Rosenbaum R. K., Olsen S. I. *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Springer, 2018. 1216 p.
4. European Environment Agency. *Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives*. EEA Report No 13/2018. Luxembourg, 2018.
5. International Energy Agency. *Global EV Outlook 2023*. Paris : IEA, 2023.
6. Hawkins T. R., Singh B., Majeau-Bettez G., Strømman A. H. Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology*. 2017. Vol. 21(3). P. 488–500.
7. Cox B., Bauer C., Mendoza Beltran A., et al. Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios. *Applied Energy*. 2020. Vol. 269. 115021.
8. Woo J., Choi H., Ahn J. Well-to-wheel analysis of greenhouse gas emissions for electric vehicles based on electricity generation mix. *Applied Energy*. 2017. Vol. 201. P. 187–198.
9. Ellingsen L. A.-W., Hung C. R., Strømman A. H. Identifying key assumptions and differences in life cycle assessment studies of lithium-ion traction batteries. *Journal of Industrial Ecology*. 2017. Vol. 21(4). P. 102–118.
10. Notter D. A., Gauch M., Widmer R., et al. Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. *Environmental Science & Technology*. 2016. Vol. 50(3). P. 1210–1216.

11. Bicer Y., Dincer I. Life cycle assessment of hydrogen and other potential fuels for aircrafts. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42. P. 10722–10738.
12. Toyota Motor Corporation. *Toyota Environmental Challenge 2050*. Sustainability Report. Toyota, 2021.
13. Toyota Motor Corporation. *Life Cycle Assessment of Toyota Prius*. Technical and Environmental Documentation. Toyota, 2019.
14. Ecoinvent Association. *Ecoinvent Database v3.9*. Zurich, 2022.
15. Messagie M. Life cycle analysis of the climate impact of electric vehicles. *Transport & Environment*. Brussels, 2016.
16. Helmers E., Weiss M., Patyk A. Energy efficiency and environmental impact of electric versus conventional vehicles. *Environmental Sciences Europe*. 2019. Vol. 31. Article 46.
17. Zacharof N., Fontaras G. Review of in-use vehicle emissions performance. *Atmospheric Environment*. 2016. Vol. 129. P. 182–195.
18. Гандзюк М.О., Дубицький О.С., Мазилюк П.В. (2024) Аналіз етапів життєвого циклу автомобілів з точки зору ресурсомісткості та екологічних показників (стаття доступна онлайн).
19. Європейська комісія. *A Clean Planet for all: A European strategic long-term vision*. Brussels, 2018.
20. United Nations Environment Programme. *Global Outlook on Sustainable Transport*. UNEP, 2019.
21. Оцінка життєвого циклу в рамках ISO 14001 (2025) Блог/огляд методології LCA та її зв'язок зі стандартами управління навколишнім середовищем ISO 14001:2015. Корисно для теоретичного обґрунтування методології дослідження.
22. Соловійов О. М., Бондаренко І. В. Оцінка екологічних впливів транспортних систем з використанням методу LCA. *Екологічна безпека*. 2020. № 2. С. 45–52.

