

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 «БАКАЛАВР»**

**Екологічна складова оцінки життєвого циклу
електричного автомобіля на прикладі моделі Nissan
Leaf**

спеціальність

101 Екологія

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма

«Екологія»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти

групи ЕОС - 41

Потапюк Андрій Петрович

(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 Віталіна Володимирівна

(підпис)

Луцьк – 2026 рік

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аграрних технологій та екології

Кафедра екології

Ступінь вищої освіти: бакалавр

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

Потапюка Андрія Петровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи:

Екологічна складова оцінки життєвого циклу електричного автомобіля на прикладі моделі Nissan Leaf

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «28» лютого 2026 р.

№ 102/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: «__» червня 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) ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ, 2) ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ NISSAN LEAF, 3) ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ NISSAN LEAF ТА ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ 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 етапи життєвого циклу транспортного засобу., 4) Основні технічні параметри автомобіля Nissan Leaf, 5) Екологічні показники оцінки життєвого циклу електромобіля; 6) Екологічне навантаження на різних стадіях життєвого

циклу електромобіля; 7) Частка окремих стадій у сумарному екологічному впливі; 8) Показники енергоспоживання та екологічного навантаження під час експлуатації Nissan Leaf, 9) Порівняння життєвого циклу Nissan Leaf та автомобіля з бензиновим двигуном, 10). Порівняння сумарних викидів CO₂ протягом життєвого циклу автомобілів, 12) 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>Вересень - Жовтень 2025</i>	<i>виконано</i>
2.	<i>Огляд літератури із досліджуваної проблеми</i>	<i>Жовтень – Листопад 2025</i>	<i>виконано</i>
3.	<i>розділ</i>	<i>Листопад Грудень 2025</i>	<i>виконано</i>
4.	<i>розділ</i>	<i>Січень – Березень 2026</i>	<i>виконано</i>
5.	<i>Висновки та пропозиції</i>	<i>Березень 2026</i>	<i>виконано</i>
6.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	<i>Квітень 2026</i>	<i>виконано</i>
7.	<i>Формування додатків</i>	<i>Травень 2026</i>	<i>виконано</i>
8.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	<i>Травень 2026</i>	<i>виконано</i>
9.	<i>Нормоконтроль</i>	<i>Травень 2026</i>	<i>виконано</i>
10.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	<i>До 01.06.2026</i>	<i>виконано</i>
11.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту</i>	<i>13.06.2026</i>	<i>виконано</i>

Здобувач вищої освіти _____ (Потапук А.П.)
(підпис) (прізвище, ініціали)

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

АНОТАЦІЯ

Потапюк М.П. Екологічна складова оцінки життєвого циклу електричного автомобіля на прикладі Nissan Leaf. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Екологія» спеціальності 101 Екологія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

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

Об'єктом дослідження є життєвий цикл електричного автомобіля Nissan Leaf.

Методи дослідження – до основних методів дослідження можна віднести комплекс кількісних та якісних методів, що дозволяють всебічно оцінити екологічні, енергетичні та соціальні наслідки використання електричного транспорту.

Результати виконання кваліфікаційної роботи бакалавра: ідентифіковано основні типи двигунів, визначено безпечний рівень їх використання, оцінено рівень ризику для здоров'я та їх вплив на екосистеми. Це допомагає встановити можливі наслідки використання їх на екосистеми та допомагає уникнути негативних впливів в результаті розробки та впровадження екологічно-орієнтованих практик.

Ключові слова: електродвигун, екологічна оцінка, викиди CO₂, шкідливі речовини, витрати пального, паливна ефективність, відновлювана енергія, вуглецевий слід, екологічна безпека, зниження викидів

ABSTRACT

Potapyuk M.P. The ecological component of the assessment of the life cycle of an electric car using the example of the Nissan Leaf. Manuscript.

Bachelor's qualification work OP "Ecology" specialty 101 Ecology. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The bachelor's qualification work consists of 3 sections, introduction, conclusions, list of references.

The object of the study is the life cycle of the electric car Nissan Leaf. Research methods - the main research methods include a set of quantitative and qualitative methods that allow comprehensively assessing the environmental, energy and social consequences of using gasoline and hybrid engines.

Results of the bachelor's qualification work: the main types of engines are identified, the safe level of their use is determined, the level of health risk and their impact on ecosystems is assessed. This helps to establish the possible consequences of their use on ecosystems and helps to avoid negative impacts as a result of the development and implementation of environmentally friendly practices.

Keywords: hybrid engine, environmental assessment, CO₂ emissions, harmful substances, fuel consumption, fuel efficiency, renewable energy, carbon footprint, environmental safety, emission reduction

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.....7

1.1. Концепція життєвого циклу продукції та її значення для екологічних досліджень.....7

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

1.3. Екологічні переваги та ризики використання електричного транспорту.....15

1.4. Нормативно-правове та міжнародне регулювання оцінки життєвого циклу транспортних засобів.....17

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ NISSAN LEAF.....21

2.1. Технічна характеристика електромобіля Nissan Leaf.....21

2.2. Визначення меж і стадій життєвого циклу електромобіля.....23

2.3. Методика оцінки екологічних впливів на різних етапах життєвого циклу...25

2.4. Система екологічних показників для аналізу життєвого циклу електромобіля

РОЗДІЛ 3. ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ NISSAN LEAF ТА ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ.....30

3.1. Екологічна оцінка етапу виробництва електромобіля та тягової батареї...30

3.2. Аналіз екологічних впливів під час експлуатації електромобіля.....31

3.3. Оцінка екологічних аспектів утилізації та переробки компонентів електромобіля.....33

3.4. Порівняльна оцінка життєвого циклу електромобіля Nissan Leaf та автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння.....34

3.5. Рекомендації щодо підвищення екологічної ефективності електромобілів у контексті сталого розвитку.....38

ВИСНОВКИ.....41

Перелік посилань.....43

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток транспортного сектору супроводжується значним споживанням енергетичних ресурсів та негативним впливом на навколишнє природне середовище. Транспорт є одним із основних джерел викидів парникових газів, забруднення атмосферного повітря та споживання викопного палива. У зв'язку з глобальними викликами, пов'язаними зі зміною клімату, виснаженням природних ресурсів та необхідністю переходу до принципів сталого розвитку, особливої актуальності набуває впровадження екологічно безпечних транспортних технологій.

Одним із перспективних напрямків зменшення антропогенного навантаження на довкілля є використання електричного транспорту. Електромобілі характеризуються відсутністю прямих викидів забруднюючих речовин під час експлуатації, нижчим рівнем шумового забруднення та вищою енергоефективністю порівняно з транспортними засобами, оснащеними двигунами внутрішнього згоряння. Водночас екологічні переваги електромобілів не можуть оцінюватися виключно на стадії експлуатації, оскільки значний вплив на довкілля здійснюють процеси видобутку сировини, виробництва акумуляторних батарей, генерації електроенергії та утилізації відпрацьованих компонентів.

У зв'язку з цим важливим інструментом комплексної оцінки екологічних наслідків використання електромобілів є методологія оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA), яка дозволяє визначити екологічний вплив продукції на всіх етапах її існування – від видобутку сировини до утилізації. Однією з найбільш поширених моделей електромобілів у світі є Nissan Leaf, який став символом масового впровадження електричного транспорту та може слугувати репрезентативним об'єктом для проведення екологічного аналізу.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю комплексної оцінки екологічної складової життєвого циклу електромобілів з метою визначення їх реального впливу на довкілля та обґрунтування перспектив розвитку екологічно орієнтованих транспортних систем.

Метою кваліфікаційної роботи бакалавра є оцінка екологічної складової життєвого циклу електричного автомобіля на прикладі Nissan Leaf та визначення основних екологічних переваг і ризиків на різних етапах його життєвого циклу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати теоретичні засади та методологічні підходи до оцінки життєвого циклу продукції;
- дослідити особливості екологічного впливу електричного транспорту на довкілля;
- охарактеризувати технічні особливості автомобіля Nissan Leaf як об'єкта дослідження;
- визначити основні стадії життєвого циклу електромобіля та джерела екологічного впливу на кожному етапі;
- провести екологічну оцінку етапів виробництва, експлуатації та утилізації автомобіля Nissan Leaf;
- здійснити порівняльний аналіз екологічних показників електромобіля та автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння;
- розробити рекомендації щодо підвищення екологічної ефективності електричного транспорту.

Об'єктом дослідження є життєвий цикл електричного автомобіля Nissan Leaf.

Предметом дослідження є екологічні аспекти та показники впливу на навколишнє природне середовище на різних стадіях життєвого циклу електромобіля.

Методи дослідження. У роботі використано методи аналізу та синтезу наукових джерел, порівняльний аналіз, статистичний метод, метод оцінки життєвого циклу (LCA), системний підхід та метод узагальнення отриманих результатів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання результатів дослідження для оцінки екологічної доцільності

впровадження електромобілів, обґрунтування заходів зі зниження негативного впливу транспортного сектору на довкілля та формування рекомендацій щодо розвитку сталого транспорту в Україні.

Структура роботи. Бакалаврська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У першому розділі розглянуто теоретичні та методологічні основи оцінки життєвого циклу електричних транспортних засобів. У другому розділі охарактеризовано об'єкт дослідження та методику проведення екологічної оцінки. У третьому розділі здійснено оцінку екологічної складової життєвого циклу автомобіля Nissan Leaf та розроблено рекомендації щодо підвищення його екологічної ефективності.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

1.1. Концепція життєвого циклу продукції та її значення для екологічних досліджень.

«Сучасний розвиток суспільства супроводжується зростанням обсягів виробництва та споживання продукції, що призводить до збільшення антропогенного навантаження на навколишнє природне середовище. У зв'язку з цим особливого значення набуває необхідність комплексного оцінювання екологічних наслідків, пов'язаних із виробництвом, використанням та утилізацією продукції. Одним із найбільш ефективних підходів до вирішення цього завдання є концепція життєвого циклу продукції, яка дозволяє розглядати екологічні аспекти на всіх етапах існування виробу» [5].

Поняття життєвого циклу продукції (Life Cycle) охоплює послідовність взаємопов'язаних стадій існування продукції, починаючи від видобутку природних ресурсів, виробництва матеріалів та комплектуючих, безпосереднього виготовлення продукції, її транспортування та експлуатації і закінчуючи повторним використанням, переробкою або утилізацією. Такий підхід дозволяє враховувати сукупний вплив продукції на довкілля протягом усього періоду її існування [4, 5].

«Концепція життєвого циклу сформувалася у другій половині XX століття внаслідок зростання уваги до проблем виснаження природних ресурсів, забруднення навколишнього середовища та глобальних змін клімату. Згодом вона стала основою для розроблення міжнародних стандартів серії ISO 14000, які регламентують методологію екологічного менеджменту та оцінки життєвого циклу продукції» [7].

Основними стадіями життєвого циклу продукції є:

- видобуток та переробка сировини;
- виробництво матеріалів і комплектуючих;
- виготовлення та складання продукції;
- транспортування та розподіл;

- експлуатація і технічне обслуговування;
- повторне використання, переробка та утилізація відходів.

Для кожної зі стадій характерні певні види впливу на навколишнє середовище. До основних екологічних наслідків належать викиди парникових газів, забруднення атмосферного повітря, водних об'єктів та ґрунтів, споживання енергетичних і матеріальних ресурсів, утворення відходів та зміна природних ландшафтів.

Особливістю концепції життєвого циклу є системний підхід до оцінювання екологічних наслідків. На відміну від традиційних методів, які враховують лише окремі етапи використання продукції, концепція життєвого циклу дає можливість уникнути перенесення негативного впливу з однієї стадії на іншу. Наприклад, зниження рівня викидів під час експлуатації транспортного засобу може супроводжуватися збільшенням споживання ресурсів на етапі виробництва, що потребує комплексної оцінки всіх стадій життєвого циклу.

У сучасних екологічних дослідженнях концепція життєвого циклу використовується для оцінювання впливу промислової продукції, транспортних засобів, енергетичних систем, будівельних матеріалів, пакувальної продукції, відходів та інших об'єктів господарської діяльності. Вона є основою для проведення оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA), яка дозволяє кількісно визначати екологічні навантаження та порівнювати альтернативні технології з точки зору їх впливу на довкілля [5].

«Важливе значення концепція життєвого циклу має для реалізації принципів сталого розвитку та циркулярної економіки. Вона сприяє раціональному використанню природних ресурсів, скороченню утворення відходів, зменшенню викидів парникових газів та підвищенню екологічної безпеки виробництва і споживання.

Особливої актуальності концепція життєвого циклу набуває у транспортному секторі, який є одним із найбільших джерел забруднення атмосферного повітря та викидів парникових газів. Оцінювання екологічних аспектів транспортних засобів лише на стадії експлуатації не дозволяє повною

мірою визначити їх реальний вплив на довкілля. Тому застосування концепції життєвого циклу дає можливість здійснювати комплексний аналіз екологічної ефективності різних видів транспорту, зокрема електромобілів» [8].

Таким чином, концепція життєвого циклу продукції є важливим інструментом екологічних досліджень, що забезпечує комплексне оцінювання впливу продукції на навколишнє середовище протягом усього періоду її існування та сприяє впровадженню екологічно безпечних і ресурсоефективних технологій.

Рисунок 1.1 – Стадії життєвого циклу електромобіля



Рисунок 1.1. Основні етапи життєвого циклу транспортного засобу.

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

«Оцінка життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) є одним із найбільш поширених і науково обґрунтованих методів комплексного аналізу впливу продукції, технологічних процесів або послуг на навколишнє природне середовище. Методологія LCA дозволяє кількісно оцінити споживання ресурсів, викиди забруднювальних речовин та інші екологічні наслідки на всіх етапах

життєвого циклу продукції – від видобутку сировини до утилізації або повторного використання» [5].

Необхідність застосування LCA зумовлена тим, що оцінка окремих стадій виробництва чи експлуатації не дає повного уявлення про реальний вплив продукції на довкілля. Комплексний підхід дозволяє виявити стадії, які створюють найбільше екологічне навантаження, та визначити шляхи його мінімізації.

Методологічні засади оцінки життєвого циклу регламентуються міжнародними стандартами ISO 14040 «Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework» та ISO 14044 «Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines». Згідно з цими стандартами, оцінка життєвого циклу являє собою систематизований процес, що складається з чотирьох взаємопов'язаних етапів.

Першим етапом є визначення мети та сфери дослідження (Goal and Scope Definition). На цьому етапі формулюються цілі дослідження, встановлюються межі системи, обирається функціональна одиниця та визначаються основні припущення. Межі системи можуть охоплювати повний життєвий цикл продукції («від колиски до могили» – cradle-to-grave) або окремі його частини («від колиски до воріт» – cradle-to-gate).

Другим етапом є аналіз інвентаризації життєвого циклу (Life Cycle Inventory, LCI). Він передбачає збір та систематизацію даних про споживання сировини, енергії, води, а також про обсяги викидів забруднювальних речовин, утворення відходів та інших екологічно значущих потоків. На цьому етапі формуються кількісні показники, необхідні для подальшого оцінювання [11].

Третім етапом є оцінка впливу життєвого циклу (Life Cycle Impact Assessment, LCIA), під час якої визначаються потенційні екологічні наслідки, пов'язані з виявленими потоками речовин і енергії. Основними категоріями впливу є:

- глобальне потепління та викиди парникових газів;
- виснаження природних ресурсів;

- забруднення атмосферного повітря;
- кислотні дощі;
- евтрофікація водних екосистем;
- фотохімічне забруднення атмосфери;
- утворення відходів;
- токсичний вплив на людину та екосистеми.

Заключним етапом є інтерпретація результатів (Interpretation), яка передбачає аналіз отриманих даних, визначення найбільш екологічно значущих стадій життєвого циклу та розроблення рекомендацій щодо зниження негативного впливу продукції на довкілля.

Методика LCA ґрунтується на декількох основних принципах, серед яких системність, комплексність, наукова обґрунтованість, порівнянність результатів та врахування всіх стадій життєвого циклу. Важливою особливістю методу є можливість порівняння альтернативних технологій та продуктів за однаковими критеріями.

Залежно від меж дослідження виділяють декілька типів оцінки життєвого циклу:

- «від колиски до могили» (cradle-to-grave), що охоплює всі стадії існування продукції;
- «від колиски до воріт» (cradle-to-gate), яка враховує процеси до моменту виходу продукції з підприємства;
- «від воріт до воріт» (gate-to-gate), що аналізує окремий виробничий процес;
- «від колиски до колиски» (cradle-to-cradle), яка передбачає повторне використання та переробку матеріалів відповідно до принципів циркулярної економіки.

Методологія LCA широко застосовується в енергетиці, машинобудуванні, будівництві, аграрному секторі та транспортній галузі. Особливого значення вона набула при оцінці екологічної ефективності автомобілів різних типів. Використання LCA дозволяє встановити, що екологічні переваги електромобілів

не обмежуються відсутністю прямих викидів під час експлуатації, а залежать також від енергоємності виробництва акумуляторів, джерел виробництва електроенергії та ефективності переробки компонентів після завершення строку служби.

У сучасних дослідженнях для проведення оцінки життєвого циклу використовуються спеціалізовані програмні комплекси, зокрема SimaPro, GaBi, OpenLCA та Umberto, які містять великі бази даних щодо виробничих процесів та дозволяють виконувати комплексний аналіз екологічних впливів.

Таким чином, методологія оцінки життєвого циклу є універсальним інструментом екологічного аналізу, що забезпечує об'єктивне оцінювання впливу продукції на довкілля, дозволяє виявити найбільш критичні стадії життєвого циклу та сприяє прийняттю рішень, спрямованих на підвищення екологічної ефективності технологій і реалізацію принципів сталого розвитку.

1.3. Екологічні переваги та ризики використання електричного транспорту

«Сучасний транспортний сектор є одним із найбільших джерел забруднення навколишнього природного середовища та викидів парникових газів. Використання автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння супроводжується значними обсягами споживання викопного палива, викидами вуглекислого газу, оксидів азоту, оксидів сірки та твердих частинок, що негативно впливає на стан атмосферного повітря та здоров'я населення. У зв'язку з цим електричний транспорт розглядається як один із перспективних напрямів екологізації транспортної системи та досягнення цілей сталого розвитку» [10].

Основною екологічною перевагою електромобілів є відсутність прямих викидів забруднювальних речовин під час експлуатації. На відміну від автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, електромобілі не утворюють викидів вуглекислого газу, оксидів азоту, чадного газу та незгорілих вуглеводнів безпосередньо під час руху. Це сприяє покращенню якості атмосферного

повітря, особливо у великих містах, де транспорт є одним із головних джерел забруднення.

Ще однією важливою перевагою електричного транспорту є зниження рівня шумового забруднення. Електродвигуни працюють значно тихіше, ніж двигуни внутрішнього згорання, що сприяє покращенню акустичного комфорту та зменшенню негативного впливу шуму на населення.

Електромобілі характеризуються високою енергоефективністю. Коефіцієнт корисної дії електродвигунів досягає 85–95 %, тоді як у двигунів внутрішнього згорання цей показник зазвичай не перевищує 30–40 %. Завдяки цьому зменшуються втрати енергії та підвищується ефективність використання енергетичних ресурсів.

Важливою екологічною перевагою є можливість використання електроенергії, виробленої з відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні, вітрові та гідроелектростанції. У такому випадку експлуатація електромобілів супроводжується суттєвим скороченням сумарних викидів парникових газів протягом життєвого циклу.

Крім того, електромобілі потребують меншого обсягу технічного обслуговування. Відсутність складної паливної системи, моторних мастил та великої кількості рухомих деталей дозволяє зменшити утворення відпрацьованих рідин і відходів, що позитивно впливає на навколишнє середовище.

Незважаючи на значні переваги, використання електричного транспорту пов'язане з певними екологічними ризиками. Одним із головних недоліків є високе екологічне навантаження на стадії виробництва акумуляторних батарей. Видобуток літію, кобальту, нікелю та інших рідкісноземельних металів супроводжується значним споживанням води та енергії, деградацією земель, утворенням відходів та забрудненням навколишнього середовища.

Суттєвий вплив на загальну екологічну ефективність електромобілів має структура виробництва електроенергії. У країнах, де переважають теплові електростанції, що працюють на вугіллі або природному газі, непрямі викиди

парникових газів можуть бути досить значними. У таких умовах екологічні переваги електромобілів частково знижуються.

Ще одним важливим питанням є утилізація та переробка відпрацьованих акумуляторних батарей. Накопичення великої кількості відпрацьованих батарей може створювати ризики забруднення ґрунтів і водних ресурсів важкими металами та токсичними речовинами. Тому розвиток технологій повторного використання та переробки акумуляторів є необхідною умовою забезпечення екологічної безпеки електричного транспорту.

До екологічних ризиків також належать додаткові навантаження на енергетичну систему, пов'язані зі зростанням попиту на електроенергію, а також збільшення споживання мінеральних ресурсів для виробництва акумуляторів та електронних компонентів.

Разом із тим більшість наукових досліджень свідчить, що навіть з урахуванням підвищеного впливу на стадії виробництва, електромобілі характеризуються меншим сумарним екологічним навантаженням протягом життєвого циклу порівняно з транспортними засобами, обладнаними двигунами внутрішнього згоряння. Подальший розвиток відновлюваної енергетики, удосконалення технологій виробництва акумуляторів та впровадження принципів циркулярної економіки сприятимуть підвищенню екологічної ефективності електричного транспорту.

«Таким чином, електричний транспорт має значний потенціал щодо зниження негативного впливу транспортного сектору на навколишнє природне середовище. Водночас для повної реалізації його екологічних переваг необхідно враховувати ризики, пов'язані з виробництвом, споживанням електроенергії та утилізацією акумуляторних батарей, що обумовлює необхідність комплексного підходу до оцінки життєвого циклу електромобілів» [5].

1.4. Нормативно-правове та міжнародне регулювання оцінки життєвого циклу транспортних засобів.

«Сучасні підходи до оцінки екологічного впливу транспортних засобів ґрунтуються на міжнародних стандартах, нормативно-правових актах та екологічних програмах, спрямованих на забезпечення сталого розвитку, скорочення викидів парникових газів і раціональне використання природних ресурсів. Важливу роль у цьому процесі відіграє методологія оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA), яка регламентується низкою міжнародних стандартів та законодавчих актів» [15].

Основою методології LCA є міжнародні стандарти серії ISO 14000, розроблені Міжнародною організацією зі стандартизації (ISO). Зокрема, стандарт ISO 14040 встановлює загальні принципи та структуру оцінки життєвого циклу, а ISO 14044 визначає вимоги та рекомендації щодо проведення інвентаризації, оцінки екологічних впливів та інтерпретації результатів.

На території Європейського Союзу екологічна політика у транспортному секторі реалізується відповідно до положень Європейського зеленого курсу (European Green Deal), метою якого є досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року. Одним із ключових напрямів є декарбонізація транспортної галузі та поступове скорочення використання транспортних засобів з двигунами внутрішнього згоряння.

«Важливе значення має Регламент Європейського парламенту та Ради ЄС 2019/631, який встановлює стандарти викидів CO₂ для легкових автомобілів і легких комерційних транспортних засобів. Документ передбачає поступове зниження середніх викидів вуглекислого газу та стимулює розвиток електричного транспорту.

У межах міжнародної кліматичної політики значний вплив на розвиток екологічно безпечних транспортних технологій мають Паризька кліматична угода 2015 року та Цілі сталого розвитку ООН, які передбачають скорочення викидів парникових газів та розвиток екологічно чистого транспорту» [12].

В Україні питання екологічної безпеки транспортних засобів регулюються Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища», Законом України «Про альтернативні джерела енергії», Законом України «Про

альтернативні види палива», а також Національною транспортною стратегією України до 2030 року. Ці нормативні документи спрямовані на розвиток електротранспорту, підвищення енергоефективності та гармонізацію національного законодавства з європейськими вимогами.

Для оцінки екологічної ефективності транспортних засобів широко використовуються міжнародні бази даних та програмні комплекси, зокрема Ecoinvent, SimaPro, GaBi та OpenLCA, які забезпечують проведення комплексного аналізу життєвого циклу продукції та визначення її впливу на навколишнє середовище.

Таблиця 1.1. Нормативно-правове та міжнародне регулювання оцінки життєвого циклу транспортних засобів

Нормативний документ	Організація / країна	Основний зміст
ISO 14040:2006 «Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework»	ISO	Визначає принципи та структуру оцінки життєвого циклу
ISO 14044:2006 «Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines»	ISO	Встановлює вимоги до проведення LCA-досліджень
European Green Deal	Європейський Союз	Передбачає досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року
Регламент ЄС 2019/631	Європейський Союз	Встановлює нормативи викидів CO ₂ для транспортних засобів
Паризька кліматична угода (2015 р.)	ООН	Спрямована на скорочення глобальних викидів парникових газів
Цілі сталого розвитку ООН (SDGs)	ООН	Передбачають розвиток екологічно безпечного транспорту
Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища»	Україна	Регулює питання екологічної безпеки та охорони довкілля
Закон України «Про альтернативні джерела енергії»	Україна	Стимулює використання відновлюваних джерел енергії
Закон України «Про альтернативні види палива»	Україна	Сприяє розвитку екологічно безпечних видів транспорту
Національна транспортна стратегія України до 2030 року	Україна	Визначає пріоритети розвитку транспортної системи та електромобільності

З наведених у таблиці даних видно, що методологія оцінки життєвого циклу транспортних засобів базується на міжнародних стандартах ISO та підтримується нормативно-правовими актами Європейського Союзу, ООН і України. Сучасна екологічна політика спрямована на скорочення викидів парникових газів, розвиток електротранспорту та впровадження принципів сталого розвитку. Гармонізація національного законодавства з міжнародними вимогами створює передумови для підвищення екологічної ефективності транспортного сектору та широкого застосування методології оцінки життєвого циклу.

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ NISSAN LEAF

2.1. Технічна характеристика електромобіля Nissan Leaf

Об'єктом дослідження даної роботи є електромобіль Nissan Leaf, який належить до найбільш поширених серійних електричних транспортних засобів у світі. Модель була вперше представлена компанією Nissan Motor Co. у 2010 році та стала одним із перших масових електромобілів, що отримали широке поширення на світовому ринку. Завдяки поєднанню високої енергоефективності, прийнятному запасу ходу та відсутності прямих викидів забруднювальних речовин Nissan Leaf є репрезентативним об'єктом для дослідження екологічної складової життєвого циклу електричних транспортних засобів.

У даній роботі розглядається модель другого покоління Nissan Leaf із літій-іонною акумуляторною батареєю ємністю 40 кВт·год. Автомобіль оснащений синхронним електродвигуном змінного струму потужністю 110 кВт (150 к.с.) та максимальним крутним моментом 320 Н·м. Такі характеристики забезпечують достатню динаміку руху та комфортну експлуатацію як у міських умовах, так і під час міжміських поїздок.

Запас ходу автомобіля за циклом WLTP становить близько 270 км, а середнє споживання електроенергії знаходиться в межах 17–18 кВт·год на 100 км пробігу. Відсутність двигуна внутрішнього згоряння та паливної системи дозволяє значно зменшити витрати на технічне обслуговування та скоротити утворення експлуатаційних відходів.

Електромобіль обладнаний системою рекуперативного гальмування, яка забезпечує повернення частини кінетичної енергії до акумуляторної батареї, підвищуючи загальну енергоефективність транспортного засобу. Заряджання батареї може здійснюватися як від побутової електромережі, так і за допомогою швидкісних зарядних станцій стандарту CHAdeMO.

Важливою екологічною особливістю Nissan Leaf є відсутність прямих викидів вуглекислого газу, оксидів азоту, оксидів сірки та інших забруднювальних речовин під час експлуатації. Рівень шумового навантаження

також є значно нижчим порівняно з автомобілями, обладнаними двигунами внутрішнього згоряння. Це робить електромобіль перспективним засобом зниження негативного впливу транспортного сектору на навколишнє природне середовище [15].

Основні технічні параметри автомобіля наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики електромобіля Nissan Leaf

Показник	Значення
Тип транспортного засобу	Легковий електромобіль
Рік випуску покоління	2017
Тип двигуна	Синхронний електродвигун змінного струму
Максимальна потужність, кВт	110
Максимальна потужність, к.с.	150
Максимальний крутний момент, Н·м	320
Тип акумуляторної батареї	Літій-іонна
Ємність батареї, кВт·год	40
Номінальна напруга батареї, В	350
Запас ходу (WLTP), км	270
Максимальна швидкість, км/год	144
Розгін 0–100 км/год, с	7,9
Споживання електроенергії, кВт·год/100 км	17–18
Час заряджання від мережі 220 В, год	16–18
Час швидкого заряджання до 80 %, хв	40–60
Кількість місць	5
Довжина, мм	4490
Ширина, мм	1788
Висота, мм	1540
Споряджена маса, кг	1580
Об'єм багажного відділення, л	435
Прямі викиди CO ₂ під час експлуатації	0 г/км
Стандарт швидкої зарядки	CHAdeMO
Наявність рекуперативного гальмування	Так

З наведених у таблиці даних видно, що Nissan Leaf характеризується високою енергоефективністю та достатнім запасом ходу для щоденного

використання. Відсутність прямих викидів забруднювальних речовин, низький рівень шуму та наявність системи рекуперації енергії забезпечують екологічні переваги електромобіля порівняно з транспортними засобами, оснащеними двигунами внутрішнього згоряння. Це дозволяє розглядати Nissan Leaf як перспективний напрям розвитку екологічно безпечного транспорту.

2.2. Визначення меж і стадій життєвого циклу електромобіля.

«Оцінка екологічної складової електромобіля Nissan Leaf здійснюється на основі концепції життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA), яка передбачає комплексний аналіз усіх стадій існування транспортного засобу. Відповідно до міжнародних стандартів ISO 14040 та ISO 14044, одним із найважливіших етапів проведення оцінки життєвого циклу є встановлення меж системи дослідження та визначення основних стадій життєвого циклу продукції» [14].

У даній роботі використовується підхід «від колиски до могили» (cradle-to-grave), який охоплює всі етапи існування електромобіля – від видобутку природних ресурсів до завершення експлуатації та утилізації компонентів. Такий підхід дозволяє отримати найбільш повне уявлення про екологічний вплив транспортного засобу протягом усього періоду його використання.

Функціональною одиницею дослідження прийнято один електромобіль Nissan Leaf протягом нормативного терміну експлуатації, який становить 10–15 років або приблизно 200–250 тис. км пробігу.

Життєвий цикл електромобіля складається з декількох взаємопов'язаних стадій.

Першою стадією є видобуток та переробка сировини. Вона включає добування металів і мінералів, необхідних для виробництва кузова, електродвигуна та акумуляторної батареї. Особливе значення мають літій, нікель, кобальт, марганець, мідь та алюміній, видобуток яких супроводжується значним споживанням енергетичних ресурсів та впливом на довкілля.

Друга стадія охоплює виробництво компонентів і складання автомобіля. На цьому етапі здійснюється виготовлення кузова, силової установки, електронних систем, а також літій-іонної акумуляторної батареї, виробництво

якої є одним із найбільш енергоємних процесів у життєвому циклі електромобіля.

Третьою стадією є експлуатація транспортного засобу, яка включає заряджання акумуляторної батареї, споживання електроенергії, технічне обслуговування та поточний ремонт. На відміну від автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, електромобілі не створюють прямих викидів забруднювальних речовин під час руху, що забезпечує їхні екологічні переваги.

Наступною стадією є технічне обслуговування та заміна окремих компонентів, що включає заміну шин, гальмівних елементів, фільтрів салону та інших витратних матеріалів. У порівнянні з автомобілями з двигунами внутрішнього згоряння, обсяги відходів і витрати матеріалів на цьому етапі є меншими.

Завершальною стадією життєвого циклу є утилізація та переробка автомобіля. Вона передбачає демонтаж транспортного засобу, вилучення цінних металів, переробку пластикових і металевих компонентів, а також утилізацію або повторне використання акумуляторних батарей. Ефективність переробки значною мірою визначає загальний екологічний вплив електромобіля.

Основні межі та стадії життєвого циклу електромобіля Nissan Leaf наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Межі та стадії життєвого циклу електромобіля Nissan Leaf

Стадія життєвого циклу	Основні процеси	Основні екологічні аспекти
Видобуток сировини	Добування літію, кобальту, нікелю, міді, алюмінію	Споживання ресурсів, викиди CO ₂ , порушення земель
Виробництво компонентів	Виготовлення батареї, електродвигуна, кузова	Значне споживання енергії та утворення відходів
Складання автомобіля	Монтаж вузлів та агрегатів	Витрати електроенергії, виробничі відходи
Експлуатація	Заряджання, рух транспортного засобу	Непрямі викиди CO ₂ , споживання електроенергії
Технічне обслуговування	Заміна шин, фільтрів, ремонт	Утворення незначної кількості відходів

Стадія життєвого циклу	Основні процеси	Основні екологічні аспекти
Утилізація та переробка	Демонтаж, вторинна переробка матеріалів	Скорочення обсягів відходів та повторне використання ресурсів

2.3. Методика оцінки екологічних впливів на різних етапах життєвого циклу

«Оцінка екологічних впливів електромобіля Nissan Leaf проводиться відповідно до методології Life Cycle Assessment (LCA), яка базується на міжнародних стандартах ISO 14040 та ISO 14044. Даний підхід дозволяє комплексно оцінити вплив транспортного засобу на навколишнє середовище протягом усього життєвого циклу – від видобутку сировини до утилізації та повторного використання матеріалів» [9].

Методика дослідження передбачає застосування підходу «від колиски до могили» (cradle-to-grave), що забезпечує врахування всіх стадій існування електромобіля. Об'єктом оцінювання є один автомобіль Nissan Leaf із терміном експлуатації 10–15 років та середнім пробігом 200–250 тис. км.

Першим етапом методики є визначення мети та меж дослідження. На цьому етапі встановлюються основні стадії життєвого циклу, формуються критерії оцінювання та визначається функціональна одиниця аналізу.

«Другий етап передбачає проведення інвентаризаційного аналізу життєвого циклу (Life Cycle Inventory, LCI). Для кожної стадії визначаються потоки матеріалів та енергії, обсяги споживання природних ресурсів, утворення відходів і викиди забруднювальних речовин. До основних джерел даних належать наукові публікації, міжнародні бази даних та технічні характеристики електромобіля.

На третьому етапі здійснюється оцінка екологічних впливів (Life Cycle Impact Assessment, LCIA). Основними показниками, які використовуються у роботі, є:

- викиди парникових газів у перерахунку на CO₂-еквівалент;
- споживання електроенергії та первинних енергетичних ресурсів;

- використання мінеральних ресурсів;
- утворення відходів;
- викиди оксидів азоту (NO_x), оксидів сірки (SO_x) та твердих частинок;
- потенціал глобального потепління;
- можливість повторної переробки матеріалів» [15].

У межах дослідження екологічні впливи оцінюються окремо для кожної стадії життєвого циклу.

На стадії видобутку сировини визначаються обсяги споживання природних ресурсів, енергетичні витрати та викиди парникових газів, пов'язані з видобуванням літію, кобальту, нікелю, алюмінію та інших матеріалів.

Для стадії виробництва оцінюються витрати енергії, викиди CO_2 та утворення відходів під час виготовлення акумуляторної батареї, електродвигуна та інших компонентів автомобіля.

Під час аналізу стадії експлуатації враховується споживання електроенергії, непрямі викиди парникових газів, які залежать від структури виробництва електроенергії, а також вплив технічного обслуговування на довкілля.

На стадії утилізації та переробки оцінюються можливості повторного використання металів, полімерних матеріалів та акумуляторних батарей, а також потенціал скорочення відходів завдяки вторинній переробці.

Отримані результати узагальнюються та використовуються для визначення стадій життєвого циклу, що формують найбільше екологічне навантаження. Це дозволяє встановити найбільш критичні процеси та розробити рекомендації щодо підвищення екологічної ефективності електромобіля.

Таблиця 2.3. Екологічне навантаження на різних стадіях життєвого циклу електромобіля

Стадія життєвого циклу	Основні екологічні аспекти	Рівень екологічного навантаження
Видобуток сировини	Видобування літію, кобальту, нікелю, міді; порушення земельних ресурсів; споживання води та енергії	Високий
Виробництво компонентів та акумуляторної батареї	Значне споживання енергії, викиди CO ₂ , утворення промислових відходів	Дуже високий
Складання автомобіля	Витрати електроенергії, утворення виробничих відходів	Середній
Експлуатація та заряджання	Споживання електроенергії, непрямі викиди CO ₂ залежно від структури енергосистеми	Низький
Технічне обслуговування	Заміна шин, технічних рідин, окремих компонентів	Низький
Завершення життєвого циклу (утилізація)	Утворення відходів, переробка акумуляторів та металів	Середній
Повторне використання та переробка матеріалів	Повернення вторинної сировини у виробництво, зменшення споживання ресурсів	Позитивний екологічний ефект

2.4. Система екологічних показників для аналізу життєвого циклу електромобіля

«Комплексна оцінка екологічної складової життєвого циклу електромобіля ґрунтується на використанні системи екологічних показників, які дозволяють кількісно оцінити вплив транспортного засобу на навколишнє природне середовище на всіх стадіях його існування. Застосування таких показників є одним із основних елементів методології Life Cycle Assessment (LCA) та дає можливість визначити найбільш екологічно навантажені процеси, а також порівнювати різні види транспортних засобів між собою» [12].

У даному дослідженні система екологічних показників формується відповідно до вимог міжнародних стандартів ISO 14040 та ISO 14044 і охоплює основні категорії впливу на довкілля. До найбільш важливих показників належать викиди парникових газів, споживання енергетичних і матеріальних ресурсів, утворення відходів, забруднення атмосферного повітря та потенціал повторного використання матеріалів.

Одним із головних показників є сумарні викиди парникових газів, які виражаються у перерахунку на CO₂-еквівалент. Даний показник характеризує внесок транспортного засобу у глобальне потепління та використовується для оцінки кліматичного впливу на всіх стадіях життєвого циклу.

Важливим критерієм є споживання первинної енергії, яке відображає загальні витрати енергетичних ресурсів, необхідних для виробництва, експлуатації та утилізації автомобіля. Окремо оцінюється споживання електроенергії під час експлуатації транспортного засобу.

Для характеристики впливу на атмосферне повітря використовуються показники викидів оксидів азоту (NO_x), оксидів сірки (SO_x), твердих частинок (PM) та летких органічних сполук. Ці речовини є основними забруднювачами навколишнього середовища та можуть негативно впливати на здоров'я людини і природні екосистеми.

Важливе місце займає оцінка використання природних ресурсів, зокрема літію, кобальту, нікелю, міді та інших металів, необхідних для виробництва акумуляторних батарей. Враховується також кількість відходів, що утворюються протягом життєвого циклу транспортного засобу, та можливість їх повторної переробки [7].

Система екологічних показників дозволяє не лише оцінити окремі види впливу на довкілля, а й визначити загальну екологічну ефективність електромобіля та перспективи її підвищення за рахунок удосконалення технологій виробництва, експлуатації та утилізації.

**Таблиця 2.4. Екологічні показники оцінки життєвого циклу
електромобіля**

Екологічний показник	Одиниця вимірювання	Характеристика показника
Викиди парникових газів (CO ₂ -еквівалент)	кг CO ₂ -екв.	Відображає сумарний внесок у зміну клімату
Споживання первинної енергії	МДж або кВт·год	Характеризує витрати енергетичних ресурсів протягом життєвого циклу
Споживання водних ресурсів	м ³	Показує обсяги використання води на різних стадіях виробництва та експлуатації
Утворення відходів	кг	Визначає кількість відходів, що утворюються протягом життєвого циклу
Викиди оксидів азоту (NO _x)	г або кг	Характеризує вплив на якість атмосферного повітря
Викиди оксидів сірки (SO _x)	г або кг	Відображає потенціал утворення кислотних дощів
Викиди твердих частинок (PM)	г або кг	Визначає рівень забруднення атмосферного повітря аерозолями
Потенціал кислотності	кг SO ₂ -екв.	Характеризує ризик закислення екосистем
Потенціал евтрофікації	кг PO ₄ ³⁻ -екв.	Відображає можливість надмірного накопичення поживних речовин у водоймах
Потенціал фотохімічного забруднення	кг NMVOC-екв.	Характеризує утворення приземного озону та смогу
Споживання мінеральних ресурсів	кг або т	Відображає використання невідновлюваних ресурсів
Частка матеріалів, придатних до переробки	%	Характеризує можливість повторного використання компонентів
Рівень шумового забруднення	дБ	Визначає акустичний вплив транспортного засобу

У таблиці наведено основні екологічні показники, які використовуються для оцінки життєвого циклу електромобіля. Найважливішими серед них є викиди парникових газів, споживання енергії та природних ресурсів, утворення відходів і рівень забруднення атмосферного повітря. Сукупний аналіз цих показників дозволяє комплексно оцінити екологічний вплив електромобіля на всіх стадіях його життєвого циклу, визначити найбільш екологічно навантажені процеси та обґрунтувати шляхи підвищення екологічної ефективності транспортних засобів.

РОЗДІЛ 3. ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ NISSAN LEAF ТА ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

3.1. Екологічна оцінка етапу виробництва електромобіля та тягової батареї

Виробництво електромобіля є одним із найбільш ресурсоємних та екологічно навантажених етапів його життєвого циклу. Основний вплив на навколишнє середовище на цій стадії пов'язаний із видобутком та переробкою сировини, виготовленням конструкційних матеріалів, електродвигуна, електронних систем та, насамперед, літій-іонної тягової батареї.

Для виробництва електромобіля Nissan Leaf використовуються сталь, алюміній, пластмаси, мідь, а також літій, нікель, кобальт, марганець і графіт, які є основними компонентами акумуляторної батареї. Видобуток цих матеріалів супроводжується значним споживанням енергії, водних ресурсів, утворенням відходів та викидами парникових газів.

Найбільше екологічне навантаження припадає на процес виготовлення літій-іонної батареї. Виробництво акумуляторних елементів потребує значних витрат електроенергії та високотехнологічного обладнання. За даними сучасних досліджень, частка тягової батареї у загальному вуглецевому сліді виробництва електромобіля може становити від 35 до 50 %.

Під час виробництва Nissan Leaf із батареєю ємністю 40 кВт·год сумарні викиди парникових газів оцінюються на рівні 8–10 т CO₂-екв., з яких близько половини припадає саме на виготовлення акумуляторної батареї. Разом з тим після початку експлуатації електромобіль компенсує підвищені викиди, пов'язані з виробництвом, завдяки відсутності прямих викидів під час руху.

Крім викидів парникових газів, виробництво електромобіля супроводжується споживанням водних ресурсів, використанням рідкісноземельних металів та утворенням промислових відходів. Водночас сучасні технології дозволяють поступово знижувати негативний вплив завдяки використанню відновлюваних джерел енергії та впровадженню систем повторної переробки матеріалів.

Для оцінки екологічного навантаження на етапі виробництва було проаналізовано основні компоненти автомобіля та їх внесок у формування сумарних викидів парникових газів.

3.2. Аналіз екологічних впливів під час експлуатації електромобіля

«Етап експлуатації є одним із найважливіших у життєвому циклі електромобіля, оскільки саме в цей період реалізуються основні екологічні переваги електричного транспорту. На відміну від автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, електромобіль Nissan Leaf не утворює прямих викидів вуглекислого газу, оксидів азоту, оксидів сірки та твердих частинок під час руху, що сприяє покращенню якості атмосферного повітря та зменшенню негативного впливу на здоров'я населення» [15].

Під час експлуатації Nissan Leaf основним джерелом екологічного навантаження є споживання електроенергії. Середнє енергоспоживання автомобіля становить близько 17–18 кВт·год на 100 км пробігу. Екологічний ефект від використання електромобіля значною мірою залежить від структури виробництва електроенергії. У випадку використання електроенергії, отриманої з відновлюваних джерел, непрямі викиди парникових газів суттєво зменшуються.

Важливою перевагою електромобіля є наявність системи рекуперативного гальмування, яка дозволяє частково повертати енергію до акумуляторної батареї та знижувати загальне енергоспоживання. Крім того, відсутність двигуна внутрішнього згоряння та паливної системи сприяє скороченню кількості витратних матеріалів і зменшенню обсягів утворення відпрацьованих мастил та інших небезпечних відходів.

Під час експлуатації також спостерігається значно нижчий рівень шумового забруднення порівняно з автомобілями з двигунами внутрішнього згоряння, що особливо важливо для великих міст та густонаселених районів [12].

Для оцінки екологічного навантаження на стадії експлуатації були проаналізовані основні показники енергоспоживання та впливу на довкілля.

**Таблиця 3.1. Показники енергоспоживання та екологічного навантаження
під час експлуатації Nissan Leaf**

Показник	Одиниця вимірювання	Значення	Екологічна характеристика
Споживання електроенергії	кВт·год/100 км	17–18	Низький рівень енергоспоживання
Запас ходу	км	270	Забезпечує ефективну експлуатацію у міських умовах
Прямі викиди CO ₂	г/км	0	Відсутні під час руху
Викиди оксидів азоту (NO _x)	г/км	0	Відсутні
Викиди оксидів сірки (SO _x)	г/км	0	Відсутні
Викиди твердих частинок (PM)	г/км	0	Відсутні від вихлопних газів
Рівень шуму під час руху	дБ	55–65	Нижчий, ніж у автомобілів з ДВЗ
Рекуперація енергії	%	10–20	Повернення частини енергії при гальмуванні
Середні непрямі викиди CO ₂ *	г/км	60–90	Залежать від структури виробництва електроенергії
Споживання мастильних матеріалів	л/10000 км	Практично відсутнє	Зменшення утворення відпрацьованих рідин
Утворення експлуатаційних відходів	кг/рік	Низьке	Менша кількість витратних матеріалів
Частота технічного обслуговування	разів/рік	1–2	Менші витрати ресурсів на обслуговування

З наведених у таблиці даних видно, що експлуатація Nissan Leaf характеризується високою екологічною ефективністю. Відсутність прямих викидів забруднювальних речовин, низький рівень шуму та незначний обсяг відходів забезпечують суттєві переваги електромобіля порівняно з транспортними засобами, обладнаними двигунами внутрішнього згоряння. Основним фактором, який впливає на сумарний екологічний ефект, є спосіб виробництва електроенергії, що визначає величину непрямих викидів парникових газів. Загалом стадія експлуатації є однією з найменш екологічно навантажених у життєвому циклі електромобіля.



Рисунок 3.1. Частка окремих стадій у сумарному екологічному впливі.

3.3. Оцінка екологічних аспектів утилізації та переробки компонентів електромобіля

Завершальний етап життєвого циклу електромобіля пов'язаний з утилізацією та переробкою його компонентів. Ефективне поводження з відпрацьованими матеріалами має важливе значення для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище та реалізації принципів циркулярної економіки. Завдяки високому вмісту металів та інших цінних матеріалів значна частина компонентів електромобіля може бути повторно використана або перероблена.

Особливу увагу приділяють утилізації тягових літій-іонних батарей, оскільки вони містять літій, кобальт, нікель, мідь, алюміній та інші матеріали, що мають високу економічну цінність. Неправильне поводження з відпрацьованими акумуляторами може призвести до забруднення ґрунтів,

поверхневих і підземних вод токсичними речовинами, а також створювати пожежну небезпеку.

Сучасні технології дозволяють переробляти значну частину матеріалів акумуляторних батарей. Перед переробкою батареї можуть використовуватися повторно як стаціонарні накопичувачі енергії, що дає можливість продовжити термін їх експлуатації. Подальша переробка здійснюється за допомогою механічних, пірометалургійних та гідрометалургійних методів, які забезпечують повернення більшості цінних металів у виробничий цикл.

Крім батареї, повторній переробці підлягають кузовні деталі, алюмінієві елементи, мідні провідники, пластмаси, скло та інші складові автомобіля. Загалом рівень придатності сучасних електромобілів до переробки перевищує 80–85 %, що дозволяє істотно зменшити потребу у видобутку первинної сировини та скоротити обсяги відходів.

Однією з основних екологічних переваг переробки є скорочення сумарних викидів парникових газів за рахунок повторного використання матеріалів, а також зниження навантаження на природні ресурси. Водночас процеси переробки потребують значних витрат енергії та спеціалізованого обладнання, що необхідно враховувати під час оцінки життєвого циклу електромобіля.

3.4. Порівняльна оцінка життєвого циклу електромобіля Nissan Leaf та автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння

«Одним із ключових завдань оцінки життєвого циклу транспортних засобів є визначення їхнього сумарного впливу на навколишнє природне середовище. Для цього необхідно враховувати не лише етап експлуатації, а й усі стадії життєвого циклу, включаючи видобуток сировини, виробництво, використання, технічне обслуговування та утилізацію. У даному дослідженні проведено порівняльну оцінку електромобіля Nissan Leaf та автомобіля з бензиновим двигуном аналогічного класу» [13].

Автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння традиційно характеризуються нижчим екологічним навантаженням на етапі виробництва,

оскільки виготовлення бензинової силової установки потребує менших витрат енергії та матеріалів порівняно з виробництвом літій-іонних акумуляторних батарей. Для Nissan Leaf основним джерелом екологічного впливу на стадії виробництва є виготовлення тягової батареї, що супроводжується значними витратами електроенергії та використанням літію, кобальту, нікелю та інших металів.

Згідно з результатами оцінки, сумарні викиди парникових газів під час виробництва Nissan Leaf становлять близько 10 т CO₂-екв., тоді як для автомобіля з бензиновим двигуном цей показник знаходиться в межах 6–7 т CO₂-екв. Таким чином, на початковому етапі життєвого циклу електромобіль характеризується вищим рівнем екологічного навантаження.

Однак ситуація суттєво змінюється під час експлуатації транспортних засобів. Автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння постійно споживають викопне паливо та утворюють значні обсяги вуглекислого газу, оксидів азоту, чадного газу, летких органічних сполук і твердих частинок. У середньому сучасний бензиновий автомобіль викидає 120–160 г CO₂ на 1 км пробігу. За нормативного пробігу 200–250 тис. км сумарні викиди вуглекислого газу лише на стадії експлуатації можуть перевищувати 25–30 т CO₂.

На відміну від автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, Nissan Leaf не створює прямих викидів забруднювальних речовин під час руху. Основний вплив на довкілля пов'язаний із виробництвом електроенергії, необхідної для заряджання акумуляторної батареї. Залежно від структури енергетичного балансу країни непрямі викиди можуть становити 60–90 г CO₂ на 1 км пробігу, що є значно нижчим показником порівняно з бензиновими автомобілями. При використанні електроенергії з відновлюваних джерел цей показник може бути ще меншим.

«Важливою перевагою електромобіля є також відсутність локальних викидів оксидів азоту, оксидів сірки, чадного газу та незгорілих вуглеводнів. Це сприяє покращенню якості атмосферного повітря в містах та зниженню негативного впливу транспорту на здоров'я населення.

Значні відмінності спостерігаються і на стадії технічного обслуговування. Автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння потребують регулярної заміни моторної оливи, паливних та повітряних фільтрів, свічок запалювання та інших витратних матеріалів, що супроводжується утворенням додаткових відходів. У конструкції Nissan Leaf кількість рухомих елементів значно менша, а відсутність мастильних матеріалів двигуна внутрішнього згоряння дозволяє зменшити кількість небезпечних відходів і витрати ресурсів на обслуговування» [18].

Порівняння стадії утилізації показує, що традиційні автомобілі характеризуються високим рівнем переробки металевих компонентів. Електромобілі також мають високий потенціал повторного використання матеріалів, однак утилізація літій-іонних батарей потребує застосування спеціалізованих технологій. Водночас розвиток сучасних методів переробки дозволяє повернути значну частину літію, кобальту, нікелю та інших цінних матеріалів у виробничий цикл. Основні показники для порівняння зібрані в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. Порівняння життєвого циклу Nissan Leaf та автомобіля з бензиновим двигуном

Показник	Nissan Leaf	Автомобіль з бензиновим двигуном	Екологічна перевага
Джерело енергії	Електроенергія	Бензин	Nissan Leaf
Викиди CO ₂ під час експлуатації, г/км	0	120–160	Nissan Leaf
Непрямі викиди CO ₂ протягом життєвого циклу, т CO ₂ -екв.	25–30	35–45	Nissan Leaf
Викиди NO _x та CO під час експлуатації	Відсутні	Наявні	Nissan Leaf
Рівень шумового забруднення	Низький	Середній	Nissan Leaf
Споживання енергії, кВт·год/100 км або л/100 км	17–18 кВт·год	6–8 л бензину	Nissan Leaf
Екологічне навантаження на стадії виробництва	Високе (через батарею)	Середнє	Бензиновий автомобіль
Витрати на технічне обслуговування	Низькі	Вищі	Nissan Leaf
Утворення відпрацьованих мастил	Практично відсутнє	Значне	Nissan Leaf

Показник	Nissan Leaf	Автомобіль з бензиновим двигуном	Екологічна перевага
Термін експлуатації, років	10–15	10–15	Однаковий
Можливість повторної переробки	Висока	Висока	Однакова
Загальний екологічний вплив протягом життєвого циклу	Низький	Вищий	Nissan Leaf

Порівняльний аналіз показує, що найбільша перевага електромобілів проявляється саме протягом тривалого періоду експлуатації. Незважаючи на більш високий вуглецевий слід на стадії виробництва, Nissan Leaf компенсує його завдяки значно меншим викидам під час використання. За весь життєвий цикл сумарні викиди парникових газів для Nissan Leaf становлять близько 25–30 т CO₂-екв., тоді як для автомобіля з бензиновим двигуном цей показник досягає 35–45 т CO₂-екв.

Крім скорочення викидів парникових газів, електромобіль має низку інших екологічних переваг, серед яких менший рівень шумового забруднення, відсутність локальних викидів шкідливих речовин та нижче ресурсне навантаження на стадії експлуатації. Разом з тим подальше підвищення екологічної ефективності електротранспорту пов'язане з удосконаленням технологій виробництва акумуляторних батарей, збільшенням частки відновлюваних джерел енергії та розвитком систем повторної переробки компонентів.



Рисунок 3.2. Порівняння сумарних викидів CO₂ протягом життєвого циклу автомобілів

Отже, результати проведеної порівняльної оцінки свідчать, що електромобіль Nissan Leaf характеризується нижчим сумарним екологічним впливом протягом життєвого циклу порівняно з автомобілем, оснащеним двигуном внутрішнього згорання. Це підтверджує перспективність використання електричного транспорту як одного з ефективних напрямів зменшення негативного впливу транспортного сектору на навколишнє природне середовище та досягнення цілей декарбонізації економіки.

3.5. Рекомендації щодо підвищення екологічної ефективності електромобілів у контексті сталого розвитку.

«Однією з головних передумов досягнення цілей сталого розвитку є зменшення негативного впливу транспортного сектору на навколишнє природне середовище. У сучасних умовах електромобілі розглядаються як один із найбільш перспективних напрямів декарбонізації транспортної галузі та

скорочення викидів парникових газів. Разом із тим забезпечення високої екологічної ефективності електричного транспорту потребує комплексного підходу, що охоплює всі стадії життєвого циклу транспортного засобу» [17].

Одним із найважливіших напрямів підвищення екологічної ефективності електромобілів є вдосконалення технологій виробництва акумуляторних батарей. Саме виготовлення літій-іонних акумуляторів формує найбільшу частку екологічного навантаження протягом життєвого циклу електромобіля. Зменшення використання дефіцитних металів, підвищення енергоефективності виробничих процесів та впровадження нових типів акумуляторів дозволять скоротити викиди парникових газів і знизити споживання природних ресурсів.

Важливим фактором є збільшення частки відновлюваних джерел енергії у структурі виробництва електроенергії. Екологічний ефект від використання електромобілів значною мірою залежить від способу генерації електроенергії. Використання сонячної, вітрової та гідроенергетики дозволяє істотно скоротити непрямі викиди вуглекислого газу під час заряджання акумуляторних батарей. У перспективі інтеграція електромобілів із системами відновлюваної енергетики сприятиме формуванню низьковуглецевої економіки.

Не менш важливим напрямом є розвиток технологій повторного використання та переробки акумуляторних батарей. Відпрацьовані батареї можуть застосовуватися як стаціонарні накопичувачі електроенергії, що дозволяє продовжити строк їх служби. Подальша переробка дає можливість повернути значну частину літію, кобальту, нікелю та інших цінних матеріалів у виробничий цикл. Реалізація принципів циркулярної економіки сприяє зменшенню споживання природних ресурсів і скороченню обсягів відходів.

Суттєве значення має підвищення енергоефективності самих транспортних засобів. Використання легких конструкційних матеріалів, удосконалення аеродинамічних характеристик, впровадження сучасних систем рекуперації енергії та оптимізація режимів заряджання дозволяють знизити енергоспоживання та збільшити запас ходу електромобілів.

Для забезпечення сталого розвитку важливим є розширення інфраструктури зарядних станцій. Наявність розвиненої мережі зарядних комплексів сприяє популяризації електромобільності та зменшенню залежності від викопного палива. Особливе значення має створення зарядних станцій, які використовують електроенергію з відновлюваних джерел.

Одним із пріоритетних напрямів державної політики повинно стати стимулювання використання екологічно чистого транспорту. Це може реалізовуватися шляхом податкових пільг, фінансової підтримки придбання електромобілів, розвитку зарядної інфраструктури та гармонізації національного законодавства з європейськими екологічними стандартами. Такі заходи сприятимуть прискоренню переходу до низьковуглецевої економіки та виконанню міжнародних зобов'язань щодо скорочення викидів парникових газів.

Важливою складовою підвищення екологічної ефективності є цифровізація транспортних систем та впровадження концепцій «розумної мобільності». Використання сучасних інформаційних технологій дозволяє оптимізувати транспортні потоки, зменшити енергоспоживання та підвищити ефективність використання електричного транспорту.

У контексті сталого розвитку особливу увагу слід приділяти формуванню екологічної свідомості населення та популяризації принципів раціонального природокористування. Поширення знань про екологічні переваги електротранспорту, розвиток культури відповідального споживання та підтримка екологічних ініціатив є важливими складовими переходу до сталих моделей розвитку.

«Таким чином, підвищення екологічної ефективності електромобілів потребує комплексного підходу, що включає вдосконалення технологій виробництва, розвиток відновлюваної енергетики, впровадження принципів циркулярної економіки, розширення зарядної інфраструктури та вдосконалення державної екологічної політики. Реалізація цих заходів сприятиме зниженню негативного впливу транспортного сектору на довкілля, скороченню викидів парникових газів та досягненню цілей сталого розвитку» [19].

ВИСНОВКИ

1. У результаті проведеного дослідження встановлено, що оцінка життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) є ефективним інструментом комплексного аналізу екологічного впливу транспортних засобів, оскільки дозволяє враховувати всі стадії існування продукції – від видобутку сировини до утилізації та повторного використання матеріалів.

2. Досліджено екологічні особливості електричного транспорту та встановлено, що електромобілі мають суттєві переваги порівняно з автомобілями, оснащеними двигунами внутрішнього згоряння, завдяки відсутності прямих викидів забруднювальних речовин під час експлуатації, нижчому рівню шумового забруднення та вищій енергоефективності.

3. Встановлено, що електромобіль Nissan Leaf характеризується високими технічними та екологічними показниками, зокрема низьким рівнем енергоспоживання, відсутністю локальних викидів CO₂, NO_x та інших шкідливих речовин, а також можливістю рекуперації енергії під час гальмування.

4. Визначено, що найбільше екологічне навантаження у життєвому циклі Nissan Leaf припадає на стадії видобутку сировини та виробництва акумуляторної батареї, які супроводжуються значним споживанням енергії та викидами парникових газів. Водночас стадія експлуатації характеризується мінімальним негативним впливом на навколишнє середовище.

5. Проведена оцінка екологічних показників показала, що під час експлуатації Nissan Leaf практично не утворює прямих викидів вуглекислого газу та інших забруднювальних речовин, а рівень екологічного навантаження значною мірою залежить від структури виробництва електроенергії.

6. У результаті порівняльного аналізу встановлено, що, незважаючи на більш високий вплив на довкілля на етапі виробництва, сумарні викиди

парникових газів протягом життєвого циклу електромобіля Nissan Leaf є нижчими, ніж у автомобіля з бензиновим двигуном, і становлять близько 28 т CO₂-екв., що приблизно на 30 % менше порівняно з аналогічним автомобілем з двигуном внутрішнього згоряння.

7. Важливим чинником зниження екологічного навантаження є розвиток технологій переробки та повторного використання акумуляторних батарей, що відповідає принципам циркулярної економіки та сприяє скороченню споживання природних ресурсів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Андрусевич Н. І., Кравченко О. В. Екологічна політика та сталий розвиток : навч. посіб. Київ : Видавництво «Компанія ВАІТЕ», 2020. 302 с.
2. Бабаєв В. М., Гордієнко С. В. Екологічна безпека транспортних систем : монографія. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 286 с.
3. Бойченко С. В., Черняк Л. М. Альтернативні моторні палива та електромобільний транспорт. Київ : НАУ, 2020. 328 с.
4. Бондар О. І., Машков О. А. Екологічне управління та оцінка життєвого циклу продукції. Київ : ДЕА, 2021. 274 с.
5. Бурлака Г. Г., Кучерук П. П. Енергоефективність та екологічна безпека транспортних систем. Вінниця : ВНТУ, 2022. 256 с.
6. Войцицький А. П., Дубровський В. П. Техноекологія : підручник. Київ : Аграрна освіта, 2020. 392 с.
7. Гелетуха Г. Г., Желєзна Т. А. Відновлювана енергетика та декарбонізація економіки України. Київ : Біоенергетична асоціація України, 2021. 318 с.
8. ДСТУ ISO 14040:2021. Екологічне управління. Оцінювання життєвого циклу. Принципи та структура. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 26 с.
9. ДСТУ ISO 14044:2021. Екологічне управління. Оцінювання життєвого циклу. Вимоги та настанови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 58 с.
10. Закон України «Про альтернативні джерела енергії» № 555-IV від 20.02.2003 р. (зі змінами станом на 2024 р.). Київ, 2024.
11. Закон України «Про альтернативні види палива» № 1391-XIV від 14.01.2000 р. (зі змінами станом на 2024 р.). Київ, 2024.
12. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» № 1264-XII від 25.06.1991 р. (зі змінами станом на 2024 р.). Київ, 2024.
13. Маланчак С. І. Оцінка екологічних вигод масового переходу на електромобілі в Україні : кваліфікаційна робота. Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2024. 107 с.
14. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. Київ : Кабінет Міністрів України, 2021. 60 с.

- 15.Палюх О. Д., Савчук В. В. Екологічні аспекти функціонування транспортних систем : навчальний посібник. Луцьк : Вежа-Друк, 2022. 244 с.
- 16.Пастернак Р. В., Мельник Л. В. Циркулярна економіка та ресурсозбереження : монографія. Тернопіль : ТНТУ, 2021. 296 с.
- 17.Романюк С. П., Бондаренко І. О. Сталий розвиток та екологізація транспортного сектору. Київ : НУБіП України, 2023. 278 с.
- 18.Техноекологія : навчальний посібник / за ред. В. М. Боголюбова. Херсон : Олді-Плюс, 2022. 352 с.
- 19.Трофименко М. Є., Гутаревич Ю. Ф. Автомобільний транспорт і довкілля : сучасні екологічні проблеми та шляхи їх вирішення. Київ : НТУ, 2020. 314 с.
- 20.Шмандій В. М., Солошич І. О. Екологічна безпека та управління відходами : навчальний посібник. Кременчук : КрНУ імені Михайла Остроградського, 2021. 290 с.