

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет транспорту та інженерії

(повне найменування факультету)

Кафедра автомобільного транспорту

(повна найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**ФОРМУВАННЯ ПАРКУ РУХОМОГО СКЛАДУ
ЕЛЕКТРОБУСІВ ДЛЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ
У М. ЛУЦЬК**

спеціальність 274 Автомобільний транспорт
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Автомобільний транспорт»
(назва освітньої програми)

**Виконав: здобувач вищої освіти
групи АТ-43
Марко ЛЕВЧИК**

(підпис)

**Керівник:
к.т.н., доцент
Валерій ДЕМБІЦЬКИЙ**

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2026 р.
к.т.н., доцент,
гарант освітньої програми:
Олег ЗАХАРЧУК

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет транспорту та механічної інженерії
Кафедра автомобілів і транспортних технологій
Ступінь вищої освіти: бакалавр
Галузь знань: 27 Транспорт
Спеціальність: 274 Автомобільний транспорт
Освітня програма: «Автомобільний транспорт»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В. ОНИЩУК

«___» _____ 2026 р.

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

Маркові ЛЕВЧИКУ

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: *«Формування парку рухомого складу електробусів для пасажирських перевезень у м. Луцьк».*

Керівник роботи: к.т.н., доцент Валерій ДЕМБІЦЬКИЙ

затверджені наказом вищого навчального закладу від «31» грудня 2025 р. № 562/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «01» червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: *характеристики транспортної системи та маршрутної мережі. Луцьк; дані про дію парку міського пасажирського транспорту; параметри міських автобусних маршрутів, зокрема довжина оборотного рейсу, пасажиропотік, пасажиромісткість, режим роботи та добовий пробіг; техніко-експлуатаційні характеристики електробусів; вимоги до запасу ходу, схеми заряджання, зарядної інфраструктури та експлуатаційного резерву; показники енергоефективності, технічної готовності й організації технічної експлуатації рухомого стану.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити):

1 Теоретичні основи формування парку електробусів

2 Аналіз умов пасажирських перевезень у м. Луцьк

3. Формування парку електробусів для пасажирських перевезень у м. Луцьк

4 Оцінка ефективності запропонованих рішень

5. Перелік графічного матеріалу:

Титульний аркуш, мета, об'єкт, предмет, завдання досліджень; основні результати досліджень, висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічна частина	<i>І. ПАВЛОВА, к.т.н., доцент каф. АТТ</i>		
Технологічна частина	<i>В. ПРИДЮК, к.т.н., доцент каф. АТТ</i>		

7. Дата видачі завдання «03» лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз, вибір та обґрунтування вихідних даних</i>	<i>20.04.2026</i>	
2	<i>Теоретичні основи формування парку електробусів</i>	<i>02.05.2026</i>	
3	<i>Аналіз умов пасажирських перевезень у м. Луцьк</i>	<i>09.05.2026</i>	
4	<i>Формування парку електробусів для пасажирських перевезень у м. Луцьк</i>	<i>16.05.2026</i>	
5	<i>Оцінка ефективності запропонованих рішень</i>	<i>23.05.2026</i>	
6	<i>Перевірка кваліфікаційної роботи керівником</i>	<i>28.05.2026</i>	
7	<i>Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини відповідно діючих вимог</i>	<i>30.05.2026</i>	
8	<i>Перевірка роботи на плагіат</i>	<i>за два тижні до захисту</i>	
9	<i>Захист кваліфікаційної роботи</i>	<i>згідно графіка захистів</i>	
10			

Здобувач вищої освіти

(підпис)*М. ЛЕВЧИК*
(ініціали, прізвище)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)*В. ДЕМБІЦЬКИЙ*
(ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

Левчик М.О. Формування парку рухомого складу електробусів для пасажирських перевезень у м. Луцьк. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Автомобільний транспорт» спеціальності 274 Автомобільний транспорт. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел посилання. Обсяг кваліфікаційної роботи становить 66 сторінок основного тексту, 10 таблиць, 7 рисунків та 35 джерел за переліком посилань.

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання формування парку електробусів для міських пасажирських перевезень у м. Луцьк. Актуальність теми зумовлена необхідністю оновлення рухомого складу міського транспорту, підвищення енергоефективності перевезень, зменшення негативного впливу транспорту на довкілля та поліпшення якості транспортного обслуговування населення. У роботі проаналізовано теоретичні й нормативні основи впровадження електробусів, їх класифікацію, техніко-експлуатаційні особливості та критерії вибору для міських маршрутів. Охарактеризовано транспортну систему м. Луцьк, маршрутну мережу, діючий парк рухомого складу та вихідні дані для обґрунтування структури електробусного парку. Запропоновано підхід до групування маршрутів за довжиною оборотного рейсу, пасажиромісткістю та умовами експлуатації. Обґрунтовано необхідний запас ходу електробусів, доцільні схеми заряджання, потребу в рухомому складі та резерві. Практична цінність роботи полягає в можливості використання результатів для планування оновлення автобусного парку, вибору типів електробусів, розвитку зарядної інфраструктури та удосконалення технічної експлуатації міського пасажирського транспорту.

Під час виконання роботи було використано інструменти штучного інтелекту для форматування тексту, створення рисунків, систематизації

матеріалів та створення таблиць, виключно як допоміжний засіб для пошуку ідей, уточнення формулювань та опрацювання літератури. Усі твердження, висновки та результати дослідження належать автору та ґрунтуються на власному аналізі.

Ключові слова: електробус, міські пасажирські перевезення, парк рухомого складу, маршрутна мережа, зарядна інфраструктура, технічна експлуатація.

ANNOTATION

Levchyk M.O. Formation of a fleet of electric buses for passenger transportation in the city of Lutsk. Manuscript.

Bachelor's qualification work OP "Automobile Transport" specialty 274 Automobile Transport. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

Bachelor's qualification work consists of an introduction, four sections, conclusions, a list of references. The volume of the qualification work is 66 pages of the main text, 10 tables, 7 figures and 35 sources according to the list of references.

The qualification work considers the issue of forming a fleet of electric buses for urban passenger transportation in the city of Lutsk. The relevance of the topic is due to the need to update the rolling stock of urban transport, increase the energy efficiency of transportation, reduce the negative impact of transport on the environment and improve the quality of transport services for the population. The paper analyzes the theoretical and regulatory foundations of the introduction of electric buses, their classification, technical and operational features and selection criteria for urban routes. The transport system of Lutsk, the route network, the existing rolling stock fleet and the initial data for substantiating the structure of the electric bus fleet are characterized. An approach to grouping routes by the length of the return trip, passenger capacity and operating conditions is proposed. The necessary range of electric buses, appropriate charging schemes, the need for rolling stock and a reserve are substantiated. The practical value of the work lies in the possibility of using the results for planning the renewal of the bus fleet, selecting types of electric buses, developing charging infrastructure and improving the technical operation of urban passenger transport.

During the work, artificial intelligence tools were used to format text, create drawings, systematize materials and create tables, exclusively as an auxiliary tool for searching for ideas, clarifying formulations and reviewing literature. All statements, conclusions and research results belong to the author and are based on his own analysis.

Keywords: electric bus, urban passenger transportation, rolling stock fleet, route network, charging infrastructure, technical operation.

ЗМІСТ

Вступ	9
1 Теоретичні та нормативні основи формування парку електробусів для міських пасажирських перевезень	12
1.1 Сучасні тенденції розвитку міського пасажирського транспорту. . .	12
1.2 Електробуси як складова сталої міської мобільності.	15
1.3 Класифікація електробусів та їх техніко-експлуатаційні особливості.	18
1.4 Критерії вибору рухомого складу для міських маршрутів.	23
1.5 Методичні підходи до формування парку рухомого складу електробусів.	28
Висновки до розділу	31
2 Аналіз умов пасажирських перевезень у м. Луцьк	33
2.1 Загальна характеристика транспортної системи м. Луцьк.	33
2.2 Аналіз маршрутної мережі м. Луцьк.	36
2.3 Характеристика діючого парку рухомого складу.	39
2.4 Визначення вихідних даних для формування парку електробусів. . .	40
Висновки до розділу.	44
3 Формування парку електробусів для пасажирських перевезень у м. Луцьк. .	47
3.1 Вибір типу та технічних параметрів електробусів для умов м. Луцьк. .	47
3.2 Необхідний запас ходу електробусів.	50
3.3 Розрахунок кількості електробусів.	54
Висновки до розділу.	56
4 Оцінка ефективності прийнятих технічних рішень	59
4.1 Вибір моделей для формування парку.	59
4.2 Техніко-експлуатаційна оцінка запропонованого парку електробусів.	60

Висновки до розділу.....	63
Висновки	65
Перелік джерел посилання	67

ВСТУП

Актуальність теми зумовлена необхідністю модернізації міського пасажирського транспорту України на засадах енергоефективності, екологічної безпеки та підвищення якості транспортного обслуговування населення. Для міст, зокрема для м. Луцьк, питання оновлення рухомого складу є особливо важливим у зв'язку зі зношеністю частини автобусного парку, зростанням вимог до надійності перевезень, комфорту пасажирів та зменшення шкідливого впливу транспорту на довкілля.

Електробуси є перспективним видом міського рухомого складу, що поєднує екологічні переваги, нижчий рівень шуму, високий рівень енергоефективності та потенціал зниження експлуатаційних витрат у довгостроковій перспективі. Водночас їх ефективне впровадження потребує не лише закупівлі транспортних засобів, а й комплексного підходу до формування парку: вибору типу електробусів з урахуванням умов експлуатації, обґрунтування чисельності рухомого складу, визначення режимів роботи, організації зарядної інфраструктури та резерву, а також оцінювання техніко-експлуатаційної ефективності.

Тема є особливо актуальною, оскільки безпосередньо пов'язана з вирішенням професійних завдань технічної експлуатації рухомого складу: забезпеченням працездатності транспортних засобів, плануванням їх використання на маршрутах, урахуванням впливу дорожніх і кліматичних умов на витрати енергії та запас ходу, а також організацією технічного обслуговування і підтримання експлуатаційної надійності електробусів.

					КРБ 70.00.00.00.00 ПЗ					
Зм.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата	Формування парку рухомого складу електробусів для пасажирських перевезень у м. Луцьк			Літера	Аркш.	Аркшів
Розробив	Левчик							Д	9	72
Перевірив	Дембіцький									
Н. контр.	Булук							ЛНТУ, кафедра АТ, гр. АТ-43		
Затверд.	Захарчук О.									

На відміну від традиційного автобусного транспорту, електробуси висувають нові вимоги до експлуатаційної служби підприємства, зокрема щодо контролю тягових батарей, планування циклів заряджання, діагностування електротехнічних систем і узгодження транспортної роботи з енергетичною інфраструктурою.

Практична значущість теми полягає в можливості розроблення обґрунтованих пропозицій щодо формування парку електробусів для конкретних умов м. Луцьк з урахуванням реальної маршрутної мережі, характеристик пасажиропотоків та особливостей міської транспортної системи. Результати роботи можуть бути використані для прийняття рішень щодо оновлення рухомого складу, планування експлуатаційної діяльності перевізника та підвищення ефективності функціонування міського пасажирського транспорту.

Тема кваліфікаційної роботи є актуальною як з науково-прикладної, так і з практичної точки зору, оскільки спрямована на розв'язання важливого завдання технічної експлуатації міського електричного автобусного транспорту в умовах сучасного розвитку транспортної системи міста.

Метою кваліфікаційної роботи є обґрунтування структури та параметрів парку електробусів для міських пасажирських перевезень у м. Луцьк з урахуванням характеристик маршрутної мережі, умов експлуатації, вимог до енергоефективності, організації зарядної інфраструктури та забезпечення ефективної технічної експлуатації рухомого складу.

Об'єктом дослідження є процес організації та технічної експлуатації міського пасажирського транспорту з використанням електробусів у системі перевезень м. Луцьк.

Предметом дослідження є техніко-експлуатаційні параметри та організаційні рішення щодо формування парку електробусів для міських пасажирських перевезень з урахуванням характеристик маршрутної мережі, режимів роботи рухомого складу та вимог до зарядної інфраструктури.

Виходячи з поставленої мети визначено завдання досліджень:

- проаналізувати теоретичні, нормативні та методичні основи формування парку електробусів для міських пасажирських перевезень;
- охарактеризувати транспортну систему м. Луцьк, маршрутну мережу, діючий парк рухомого складу та передумови впровадження електробусів;
- сформувати вихідні дані та виконати групування міських автобусних маршрутів за режимами експлуатації;
- обґрунтувати техніко-експлуатаційні параметри парку електробусів, зокрема необхідний запас ходу, схеми заряджання, кількість рухомого складу та резерв;
- оцінити практичну ефективність запропонованих рішень.

Практична цінність кваліфікаційної роботи полягає в можливості використання її результатів для обґрунтування організаційно-технічних рішень щодо поетапного формування парку електробусів для міських пасажирських перевезень у м. Луцьк. Запропонований у роботі підхід дає змогу враховувати особливості маршрутної мережі, довжину оборотних рейсів, пасажиромісткість рухомого складу, потребу в експлуатаційному резерві, необхідний запас ходу електробусів та можливі схеми організації заряджання.

Результати дослідження можуть бути використані органами місцевого самоврядування, транспортними підприємствами та перевізниками під час планування оновлення рухомого складу, вибору типорозмірів електробусів, визначення потреби в зарядній інфраструктурі та удосконалення системи технічної експлуатації міського пасажирського транспорту. Практичне впровадження запропонованих рішень сприятиме підвищенню енергоефективності перевезень, зниженню негативного впливу транспорту на довкілля, поліпшенню якості транспортного обслуговування населення та раціональнішому використанню рухомого складу в умовах міської транспортної системи м. Луцьк.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ТА НОРМАТИВНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ПАРКУ ЕЛЕКТРОБУСІВ ДЛЯ МІСЬКИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

1.1 Сучасні тенденції розвитку міського пасажирського транспорту

Сучасний розвиток міського пасажирського транспорту характеризується переходом від моделі, орієнтованої переважно на індивідуальний автомобільний рух, до моделі сталої міської мобільності, у центрі якої перебувають громадський транспорт, безпека, доступність, екологічність і цифрова інтеграція транспортних послуг. Такий підхід зумовлений зростанням урбанізації, перевантаженням вулично-дорожньої мережі, екологічними викликами та необхідністю підвищення якості транспортного обслуговування населення. Європейська комісія наголошує, що понад 70% населення ЄС проживає в міських територіях, які формують значну частку транспортних викидів парникових газів, що робить міський транспорт ключовим об'єктом трансформації [1].

Однією з провідних тенденцій є декарбонізація міських перевезень. У практиці європейських міст і на рівні міжнародної транспортної політики зростає роль низько- та безвуглецевих видів транспорту, зокрема електробусів. У межах Нової рамки ЄС для міської мобільності (The New EU Urban Mobility Framework) визначено орієнтири розвитку міських транспортних систем як безпечних, доступних, інклюзивних, «розумних», стійких та безвикидних (рис. 1.1). Окремо підкреслюється необхідність пріоритету громадського транспорту, інтегрованого планування та зниження негативного впливу транспорту на здоров'я і довкілля [2].

Важливою технологічною тенденцією є електрифікація автобусного рухомого складу. За даними ІЕА, світовий ринок електробусів продовжує зростати: у 2024 році глобальні продажі електробусів перевищили 70 тис. одиниць, а річний приріст становив близько 30%. У Європі продажі

електробусів також зросли, а частка батарейних міських автобусів у нових закупівлях суттєво збільшується [3]. Це свідчить про перехід електробусів із пілотної стадії до етапу системного оновлення міських парків. Це означає появу нових експлуатаційних задач: планування пробігу з урахуванням запасу ходу, організація циклів заряджання, керування технічним станом батарей, діагностика силової електроніки та електроприводу.

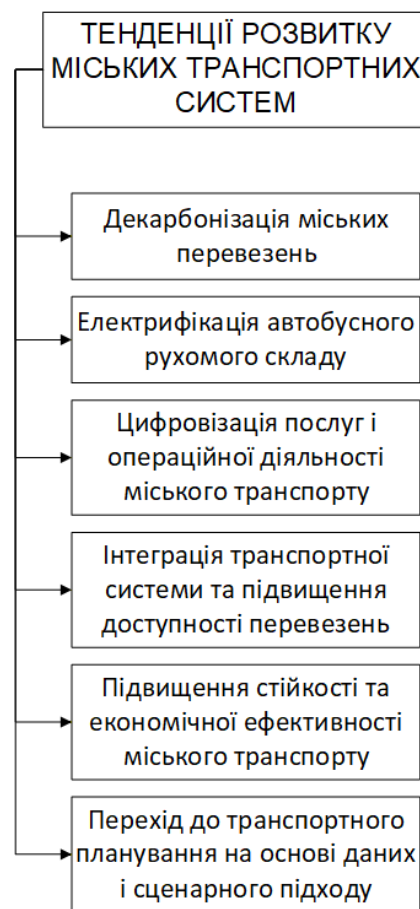


Рисунок 1.1 – Розвиток міських транспортних систем

Наступною тенденцією є цифровізація послуг і операційної діяльності міського транспорту. У практиці транспортних операторів активно впроваджуються безконтактна оплата проїзду, інтегровані квиткові системи, цифрові сервіси для пасажирів, аналітика попиту та інструменти керування доходами. За оцінками UITP, у 2024 році серед пріоритетів розвитку сектору виділяються саме цифрові сервіси, інтегровані тарифні рішення та підвищення

якості послуг [4]. Для експлуатаційної діяльності це означає перехід до більш точного планування випуску рухомого складу, обліку навантаження на маршрутах і контролю показників використання транспортних засобів.

Суттєвою тенденцією залишається інтеграція транспортної системи та підвищення доступності перевезень. Йдеться про поєднання різних видів транспорту (автобус, тролейбус, приміські маршрути, мікромобільність), узгодження тарифної політики, а також адаптацію послуг до потреб різних груп населення. У міжнародній практиці зростає увага до соціально орієнтованих тарифів, доступності для маломобільних груп та підвищення інклюзивності транспортних систем [1], [2]. Це безпосередньо впливає на формування парку рухомого складу, оскільки вимагає врахування місткості, компоновки салону, низькопідлогового виконання, умов посадки/висадки та надійності роботи у щільному міському циклі.

Окремо слід відзначити тенденцію до підвищення стійкості (resilience) та економічної ефективності міського транспорту. Після пандемічних і енергетичних коливань оператори громадського транспорту приділяють підвищену увагу стабільності витрат, особливо енергетичних, ремонтних і капітальних, а також пошуку нових джерел фінансування. За даними UITP, у 2024 році очікувалося зростання операційних витрат, включаючи енергетичні та витрати на технічне обслуговування, що посилює вимоги до обґрунтованості вибору рухомого складу та структури парку [4]. Для експлуатаційної спеціальності це підкреслює важливість оцінювання повної вартості життєвого циклу транспортного засобу, а не лише його закупівельної ціни.

Ще одна стратегічна тенденція – перехід до транспортного планування на основі даних і сценарного підходу. Міжнародні аналітичні звіти (зокрема ITF/OECD) показують, що міста можуть досягати значного скорочення викидів за умови поєднання технічних рішень (електрифікація), організаційних рішень (управління попитом, пріоритет громадського транспорту) та інтегрованого планування розвитку транспортної інфраструктури [5]. Це формує сучасний

підхід до розвитку міського пасажирського транспорту: від «оновлення окремих автобусів» – до комплексного формування ефективного парку, узгодженого з маршрутною мережею, енергетичною інфраструктурою та вимогами міста.

Отже, сучасні тенденції розвитку міського пасажирського транспорту свідчать про необхідність переходу до екологічно чистого, цифрово інтегрованого, доступного та експлуатаційно керованого громадського транспорту. У цьому контексті електробуси є одним із ключових напрямів оновлення рухомого складу, а питання формування їхнього парку набуває особливої актуальності для фахівців з технічної експлуатації автомобільного транспорту.

1.2 Електробуси як складова сталої міської мобільності

Сучасна концепція сталої міської мобільності передбачає перехід від домінування індивідуального автомобільного транспорту до збалансованої транспортної системи, у якій пріоритет надається громадському транспорту, мультимодальності, доступності та екологічній безпеці. У межах нової рамки ЄС для міської мобільності наголошується, що перехід до безпечної, доступної, інклюзивної, «розумної», стійкої та безвикидної мобільності потребує фокусу саме на колективних видах перевезень і прискорених інвестицій у відповідні рішення [2].

У цьому контексті електробуси є одним із ключових інструментів трансформації міських транспортних систем, оскільки поєднують властивості громадського транспорту (масовість, маршрутність, керованість перевезень) із перевагами електричної тяги (відсутність локальних викидів, зниження шуму, можливість інтеграції в міську енергетичну інфраструктуру). Європейський підхід до сталої мобільності також прямо пов'язує якість транспортного середовища з показниками доступності, якості життя та зменшенням негативного впливу транспорту на міське середовище [2], [6].

Важливим аргументом на користь розвитку електробусних систем є те, що в Європі роль приватного автомобіля в пасажирських перевезеннях залишається дуже високою: за оцінками ЕЕА, легкові автомобілі формують близько 72% транспортної активності (у пасажиро-кілометрах), а частка громадського транспорту змінюється повільно [7]. Це означає, що саме підвищення якості та привабливості міського громадського транспорту, зокрема шляхом оновлення парку електробусами, є необхідною умовою для реального переходу до сталої мобільності [7].

Електробуси також розглядаються як важливий елемент реалізації політики декарбонізації транспорту на рівні ЄС. Директива (ЄС) 2019/1161 щодо чистих та енергоефективних дорожніх транспортних засобів посилила роль публічних закупівель як інструменту стимулювання ринку «чистого» рухомого складу, у тому числі автобусів [8]. У тексті директиви прямо підкреслюється, що закупівлі мають враховувати життєві енергетичні та екологічні впливи транспортних засобів, а також сприяти розвитку ринку чистого транспорту [8]. Для міських перевезень це створює нормативно-економічні передумови для поступового переходу від традиційних автобусів до електробусів.

Разом із оновленням рухомого складу критично важливою умовою сталої мобільності є наявність сумісної та достатньої зарядної інфраструктури. Регламент (ЄС) 2023/1804 (AFIR) встановлює обов'язкові цілі щодо розгортання інфраструктури альтернативних видів палива та визначає технічні вимоги до зарядних рішень, у тому числі для електробусів [9]. Зокрема, у регламенті визначені базові вимоги до інтероперабельності (Type 2, Combo 2), а також передбачено стандарти для автоматизованого контактного заряджання (пантографні системи), що є важливим для міських маршрутів із підзарядкою на кінцевих зупинках [9]. Це підсилює роль електробуса як системного елемента міської мобільності, а не окремого транспортного засобу.

Практична значущість електробусів у міському транспорті підтверджується і глобальною динамікою ринку. За даними ІЕА, у 2024 році

світові продажі електробусів перевищили 70 тис. одиниць, а поширення електробусів поза Китаєм продовжує зростати [11]. Це свідчить про те, що електробус уже не є експериментальним рішенням, а став повноцінним напрямом оновлення міського громадського транспорту, який активно масштабується [11]. Для українських міст, зокрема для Луцька, це означає можливість спиратися на накопичений міжнародний досвід при формуванні власної моделі експлуатації електробусного парку.

Водночас інтеграція електробусів у систему сталої міської мобільності не може зводитися лише до закупівлі техніки. За матеріалами UITP, масштабна електрифікація автобусних парків впливає на бізнес-моделі операторів, порядок фінансування, розподіл відповідальності за зарядну інфраструктуру, організацію експлуатації та технічного обслуговування [11]. У практиці міст постає питання: хто є власником інфраструктури (оператор, муніципалітет або третя сторона), яким є строк її амортизації, як забезпечити рівний доступ у разі конкурсного обслуговування маршрутів [11]. Отже, електробус у моделі сталої мобільності — це не лише «екологічний автобус», а елемент більш широкої організаційно-технічної системи.

Особливо важливо, що електробуси формують нові вимоги до експлуатаційної діяльності автотранспортного підприємства. За даними UITP, на практиці може виникати потреба у більшій кількості автобусів з нульовими викидами порівняно з дизельними аналогами для виконання того самого транспортного завдання через обмеження запасу ходу та параметри заряджання [11]. Крім того, фактичний запас ходу залежить від клімату, рельєфу, завантаження маршруту та роботи систем HVAC [11]. Це означає, що при формуванні парку електробусів необхідно враховувати не лише пасажиропотоки, а й реальні умови експлуатації на конкретних міських маршрутах.

Електробуси також мають важливий соціально-екологічний ефект у міському середовищі. ЕЕА підкреслює, що попри загальне покращення якості повітря в Європі, забруднення повітря залишається найбільшим екологічним

ризиком для здоров'я, а для діоксиду азоту (NO_2) ключовим джерелом у містах є саме транспорт, передусім дорожній [12]. Одночасно транспортний шум залишається одним із провідних факторів негативного впливу на здоров'я: за даними ЕЕА, понад 20% європейців зазнають шкідливого впливу транспортного шуму, причому основним джерелом є дорожній рух [13]. У цьому аспекті електробуси є важливим компонентом політики покращення якості міського середовища, особливо на маршрутах із високою інтенсивністю руху в житлових та центральних районах [12], [13].

Системна роль електробусів у сталій мобільності також підтверджується підходами SUMP (Sustainable Urban Mobility Plan). Європейські настанови з SUMP розглядають міську мобільність як інтегровану сферу планування, де рішення щодо маршрутної мережі, інфраструктури, рухомого складу, доступності та екологічних цілей мають прийматися комплексно [11]. Тому впровадження електробусів слід розглядати не ізольовано, а як складову довгострокового плану розвитку міського транспорту, пов'язаного з тарифною політикою, пересадковими вузлами, пріоритетом громадського транспорту та цифровими сервісами [2], [11].

Отже, електробуси є важливою складовою сталої міської мобільності, оскільки поєднують екологічні, соціальні та транспортно-експлуатаційні переваги. Для цілей цієї кваліфікаційної роботи (спеціальність 274, експлуатаційний профіль) це означає, що формування парку електробусів у м. Луцьк має ґрунтуватися на комплексному підході: з урахуванням міських мобільнісних цілей, нормативних вимог ЄС і національної політики, реальних умов маршрутної роботи, параметрів зарядної інфраструктури та вимог до технічної експлуатації рухомого складу [2], [5]–[13].

1.3 Класифікація електробусів та їх техніко-експлуатаційні особливості

Електробуси як різновид міського пасажирського рухомого складу доцільно розглядати не лише як «екологічну альтернативу» дизельним

автобусам, а як окремий клас транспортних засобів із власними вимогами до формування парку, режимів експлуатації, зарядної інфраструктури, технічного обслуговування та організації перевезень. Це особливо важливо, оскільки ефективність електробусного парку визначається не тільки конструкцією машини, а й узгодженістю параметрів маршруту, графіка роботи, енергоспоживання та заряджання [14], [15].

У практиці проектування та експлуатації міських систем перевезень електробуси класифікують за кількома ознаками (див. також рис. 1.2).

1) За нормативною транспортною категорією та призначенням (М2/М3, міське/приміське виконання). В українській системі технічного регулювання застосовується європейська/UNECE-класифікація категорій колісних транспортних засобів, де для пасажирських перевезень використовують категорії М2 та М3 (залежно від максимальної маси). Це важливо для вибору шасі, місткості, допустимого навантаження на осі та умов допуску до експлуатації [16]. Додатково для автобусів у міжнародній практиці застосовують поділ за класами (міські, приміські, міжміські), що пов'язано з часткою сидячих/стоячих місць і характером маршруту [17].

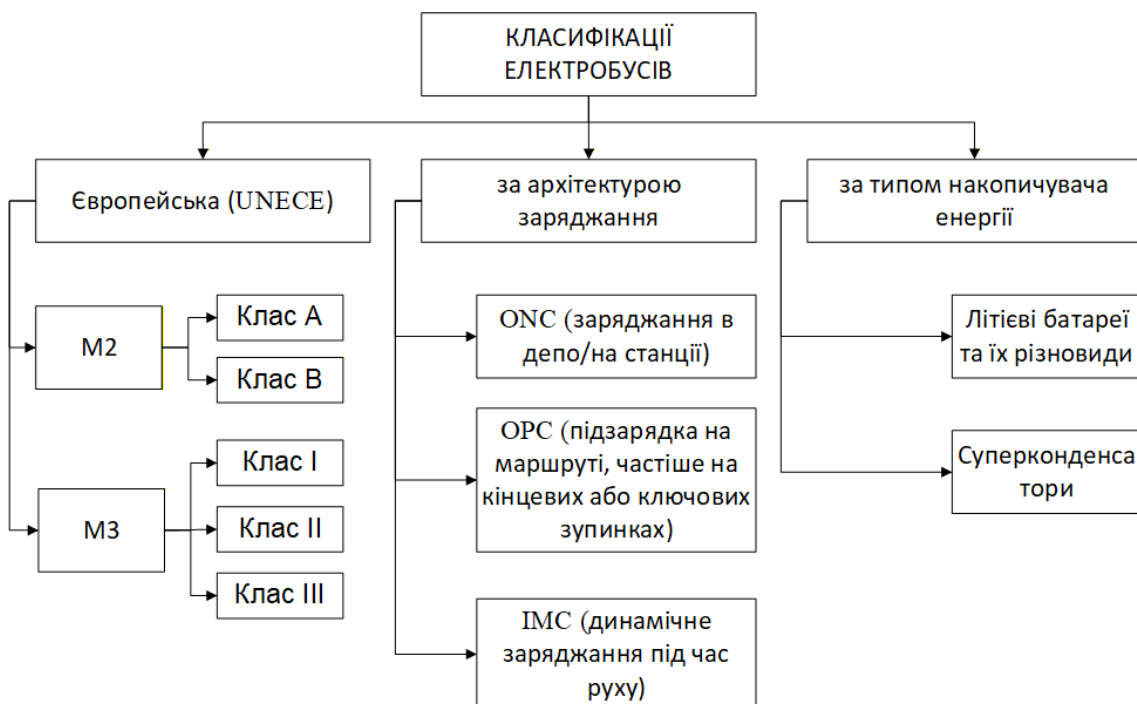


Рисунок 1.2 – Класифікації електробусів за деякими ознаками

2) За способом енергопостачання на маршруті (архітектурою заряджання). Для експлуатаційного аналізу найбільш практичною є класифікація за схемою заряджання, оскільки саме вона визначає потрібну ємність батареї, добовий пробіг, режим роботи водіїв і вимоги до депо. У сучасних українських фахових джерелах виокремлюють три базові групи електробусів [15]:

- ONC (Over Night Charging) – заряджання переважно в депо/на станції;
- OPC (Opportunity Charging) – підзарядка на маршруті (частіше на кінцевих або ключових зупинках);
- IMC (In-Motion Charging) – динамічне заряджання під час руху (гібридні схеми живлення, зокрема наближені до «тролейбус + автономний хід»).

Такий поділ є особливо корисним для міст України, де часто застосовують змішані рішення через обмеження мережевої потужності та різні типи маршрутів [15].

3) За типом накопичувача енергії. Найпоширенішими є електробуси з літій-іонними акумуляторними батареями, однак у технічній літературі також розглядаються рішення на суперконденсаторах (іоністорах) або комбіновані системи. Вибір накопичувача впливає на запас ходу, масу, час заряджання, ресурс та вимоги до температурного режиму [15], [18].

4) За конструктивною місткістю та умовами перевезень. У міських умовах (зокрема для маршрутів із високим пасажирообігом) найбільш релевантними є електробуси I класу (міського типу), для яких критичними параметрами є пасажиромісткість, площа для стоячих пасажирів, ширина проходів, швидкість пасажирообміну та кількість дверей. Українські дослідження прямо акцентують на електробусах I класу та пов'язаних із ними параметрах технічної досконалості [18].

З позицій експлуатації електробус має низку особливостей, які необхідно врахувати під час формування парку для м. Луцьк (див. також рис. 1.3).

1. Енергетична автономність та залежність від режиму маршруту. Запас ходу електробуса є змінною величиною, що залежить від профілю маршруту,

інтенсивності зупинок, завантаження салону, температури зовнішнього середовища, роботи систем опалення/кондиціонування та стилю керування. Тому в експлуатаційних розрахунках не можна використовувати лише «паспортний» пробіг; потрібна прив'язка до конкретних міських умов [15], [18]. Для даної роботи це означає необхідність подальшого розрахунку енерговитрат на маршрутах Луцька з урахуванням сезонності.

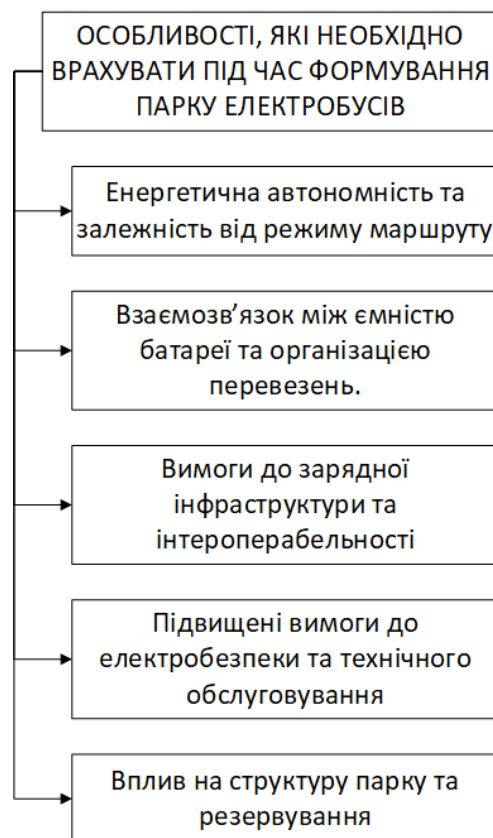


Рисунок 1.3 – Особливості експлуатації електробусів

2. Взаємозв'язок між ємністю батареї та організацією перевезень. Для ОНС-схеми зазвичай потрібна більша ємність батареї, що підвищує масу транспортного засобу та вартість, але спрощує інфраструктуру маршруту. Для ОРС-схеми батарея може бути меншої ємності, однак виникає залежність від надійності швидких зарядних пунктів і точності дотримання розкладу. ІМС-рішення зменшують вимоги до великої батареї, але потребують складнішої інфраструктурної інтеграції [15]. Це є ключовим компромісом при формуванні

парку: «більша батарея – менше маршрутної інфраструктури» або «менша батарея – більше інфраструктури та диспетчерської точності» [15].

3. Вимоги до зарядної інфраструктури та інтероперабельності. Сучасне європейське регулювання (AFIR, Регламент (ЄС) 2023/1804) встановлює технічні орієнтири для заряджання електробусів: для провідного заряджання визначено застосування роз'ємів Type 2 (AC) та Combo 2 (CCS2) (DC), а для автоматизованого заряджання електробусів передбачено інтерфейси ACD (зокрема пантографні системи) [19]. Це важливо для уникнення «закритих» рішень одного виробника та забезпечення перспективної сумісності парку й зарядних станцій [19].

4. Підвищені вимоги до електробезпеки та технічного обслуговування. На відміну від традиційного автобуса, електробус має високовольтну систему тягового приводу та накопичувач енергії, що висуває спеціальні вимоги до електробезпеки, діагностування ізоляції, роботи з REESS (акумуляторною системою), процедур відключення високої напруги та підготовки персоналу. Ці вимоги систематизуються в нормативних документах UNECE/ЄС щодо електричного приводу та безпеки [20]. Це означає необхідність адаптації процесів ТО і діагностики (персонал, оснащення, регламенти) під високовольтну техніку [20], [21].

5. Вплив на структуру парку та резервування. Електробусний парк формується з урахуванням не лише пасажиропотоку, а й доступності зарядних потужностей, часу заряджання, добового обороту машини та резерву на випадок збоїв інфраструктури. Практично це означає, що коефіцієнт технічної готовності та випуску повинен аналізуватися разом із коефіцієнтом енергетичної готовності (наявність зарядного вікна, справність зарядного поста, обмеження за потужністю) [15], [19]. Саме ця риса відрізняє експлуатаційне планування електробусів від традиційних автобусів.

Для українських умов класифікація та вибір електробусів має проводитися з урахуванням таких практичних чинників:

- стан міської транспортної інфраструктури та енергомережі (можливість підведення потужності до депо/кінцевих зупинок);
- тип маршрутів (радіальні, кільцеві, короткі/довгі, з високою або середньою інтенсивністю пасажирообміну);
- кліматичні умови (зимова експлуатація підвищує споживання енергії);
- інституційні й нормативні умови, визначені законодавством України про автомобільний і міський електричний транспорт [21], [22].

Українські профільні та наукові джерела підкреслюють, що для міських перевезень доцільно поєднувати технічну класифікацію електробусів (тип батареї, спосіб заряджання, клас транспортного засобу) з експлуатаційною (умови маршруту, графік, інфраструктурне забезпечення) [15], [18]. Саме такий підхід є методично правильним для подальшого обґрунтування парку електробусів у м. Луцьк.

1.4 Критерії вибору рухомого складу для міських маршрутів

Вибір рухомого складу для міських пасажирських маршрутів (зокрема електробусів) доцільно розглядати насамперед як експлуатаційне завдання, а не лише як закупівлю техніки. У практиці міських перевезень вирішальним є не тільки сам тип транспортного засобу, а й його узгодженість із параметрами маршруту, режимами роботи, пасажиропотоками, вимогами доступності, інфраструктурою заряджання та організацією технічної експлуатації [21], [23]. Такий підхід відповідає сучасній логіці сталої мобільності та вимогам до «чистого» громадського транспорту, що закріплені в європейській нормативній базі [19], [24].

У контексті формування парку електробусів для м. Луцьк критерії вибору доцільно систематизувати за кількома взаємопов'язаними групами (рис. 1.4).

Першою групою є маршрутно-експлуатаційні критерії, оскільки саме вони визначають придатність конкретної моделі електробуса до роботи на

певному маршруті. До них належать: довжина рейсу (в обидва напрями), середня експлуатаційна швидкість, кількість зупинок, тривалість оборотного рейсу, добовий пробіг, профіль руху (частота розгонів/гальмувань), рельєф, сезонні умови та завантаження салону [25], [26].

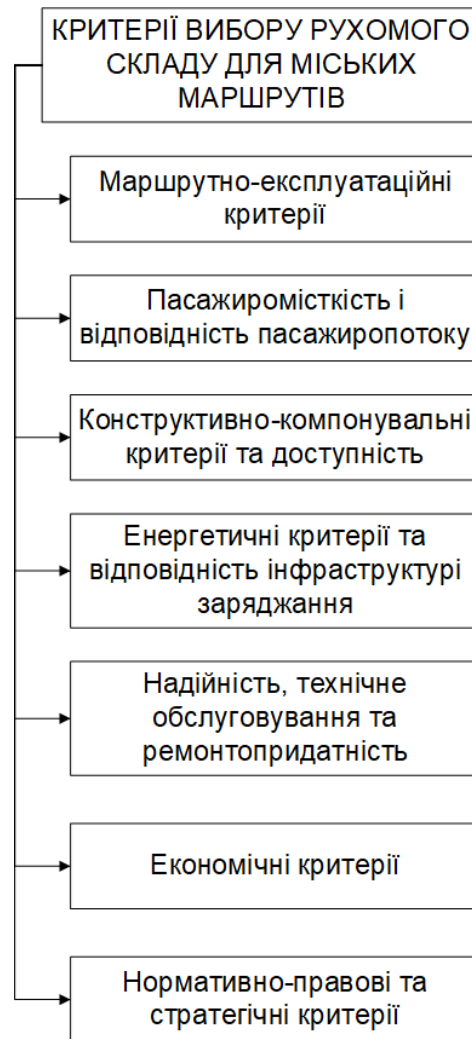


Рисунок 1.4 – Критерії вибору рухомого складу для міських маршрутів

У сучасних підходах до планування електрифікації автобусних маршрутів підкреслюється, що пріоритизація маршрутів має базуватися на моделюванні сукупної вартості володіння (ТСО) та енергоефективності з урахуванням експлуатаційних характеристик маршруту – довжини, профілю швидкості, температури, висотного профілю та пасажирського навантаження [25]. Українські дослідження також підтверджують значущість саме

маршрутних параметрів: довжина рейсу, кількість зупинок та середня швидкість прямо впливають на ефективність застосування електричного (і гібридного) рухомого складу [26]. Отже, на етапі вибору рухомого складу необхідно оцінювати не «середній» електробус, а електробус для конкретного типу маршруту.

Друга група – пасажиромісткість і відповідність пасажиропотоку. Для міських маршрутів ключовим є забезпечення необхідної провізної спроможності у години «пік» без надмірного резервування місткості в міжпікові періоди. Тому під час вибору електробусів слід враховувати:

- максимальний та середньогодинний пасажиропотік;
- нерівномірність попиту за часом доби;
- частоту руху;
- допустимий рівень наповнення салону;
- частку стоячих/сидячих пасажирів [21], [23].

З позицій технічної експлуатації це означає, що модель рухомого складу треба узгоджувати з транспортною роботою маршруту (пас.-км, рейси/добу, інтервал руху), а не лише з формальною номінальною місткістю. Для Луцька це особливо актуально, оскільки мережа міських маршрутів включає як відносно навантажені напрямки, так і маршрути зі змінною інтенсивністю попиту, де надмірно великий електробус може бути експлуатаційно та економічно неефективним.

Третя група – конструктивно-компонувальні критерії: клас автобуса, довжина кузова, кількість і розміщення дверей, тип підлоги (низькопідлоговий/частково низькопідлоговий), планування салону, наявність місць для маломобільних пасажирів. Для міських перевезень ці параметри безпосередньо впливають на швидкість посадки-висадки, час простою на зупинках, комфорт і безпеку [27].

У європейській практиці для міських маршрутів традиційно орієнтуються на транспортні засоби класу I, а також на вимоги щодо доступності для осіб з обмеженою мобільністю [27].

Для електробусів ці критерії мають ще один вимір: компонування батарейних модулів (дах/задня частина/підлога) впливає на масу, центр ваги, розподіл навантаження на осі, ремонтпридатність і внутрішній простір салону. Тому вибір компоновки має оцінюватися разом із вимогами до технічного обслуговування та ресурсом підвіски, шин і гальмівної системи.

Четверта група – енергетичні критерії, які для електробусів є визначальними. До них належать:

- ємність тягової батареї;
- фактичне енергоспоживання (кВт·год/км) у міському циклі;
- запас ходу в реальних умовах;
- час заряджання;
- тип заряджання (нічне депо/денне «opportunity charging»/комбіноване);
- сумісність із зарядною інфраструктурою [24; 25].

П'ята група – критерії технічної експлуатації. До них слід віднести:

- надійність вузлів і систем (тяговий привід, батарея, система терморегулювання, силова електроніка);
- міжсервісні інтервали;
- доступність сервісної підтримки та запасних частин;
- потребу в спеціальному обладнанні для ТО і діагностики;
- вимоги до кваліфікації персоналу;
- умови гарантії та сервісного контракту [21].

Крім того, для міського перевізника важливо передбачити технологічну готовність ремонтної бази: наявність електробезпечних робочих місць, діагностичного обладнання, систем пожежної безпеки, персоналу з допуском до робіт на високовольтному обладнанні. Це безпосередньо впливає на коефіцієнт технічної готовності парку.

Шоста група – економічні критерії, які мають оцінюватися протягом життєвого циклу рухомого складу. Для електробусів недостатньо порівнювати лише закупівельну ціну; необхідно враховувати:

- капітальні витрати (рухомий склад та зарядна інфраструктура);

- вартість електроенергії;
- витрати на ТО і ремонт;
- ресурс та заміну батарей;
- втрати від простоїв;
- залишкову вартість;
- організаційні витрати на адаптацію депо.

Саме тому в міжнародних рекомендаціях пріоритетним є підхід ТСО (Total Cost of Ownership), який дає змогу порівнювати альтернативні варіанти формування парку (наприклад, менша кількість електробусів великої місткості або більша кількість електробусів середньої місткості) з урахуванням реальної транспортної роботи [25]. Для бакалаврської роботи це може бути основою подальшого аналітичного розділу з обґрунтуванням структури парку.

Сьома група – нормативно-правові та стратегічні критерії. Вибір рухомого складу має відповідати:

- вимогам законодавства України щодо автомобільного транспорту та організації перевезень [21];
- державній транспортній політиці та стратегічним пріоритетам розвитку транспортної системи [23];
- вимогам щодо екологічності та доступності громадського транспорту [8], [24], [27].

У європейському контексті суттєве значення мають підходи до закупівель «чистих» транспортних засобів (Clean Vehicles Directive), які стимулюють перехід до низько- та нульовикидного рухомого складу [24]. Для українських міст, зокрема Луцька, це важливо з огляду на перспективи міжнародного фінансування, участі в програмах відновлення та гармонізації підходів до міської мобільності з практиками ЄС [21], [23].

Отже, для формування парку рухомого складу електробусів для пасажирських перевезень у м. Луцьк вибір рухомого складу доцільно здійснювати за багатокритеріальною моделлю, у якій базовими є:

1. відповідність маршрутам (довжина, швидкість, рельєф, інтенсивність руху);
2. відповідність пасажиропотоку (місткість, частота руху, комфорт);
3. конструктивна придатність до міського циклу (двері, низька підлога, доступність);
4. енергетична сумісність із зарядною інфраструктурою (тип/потужність заряджання, запас ходу);
5. експлуатаційна надійність і сервісопридатність (ТО, ремонт, кадри, діагностика);
6. економічна ефективність за життєвий цикл (ТСО);
7. відповідність нормативним і стратегічним вимогам.

1.5 Методичні підходи до формування парку рухомого складу електробусів

Формування парку електробусів для міських пасажирських перевезень є багатокритеріальним завданням, у якому поєднуються технічні, експлуатаційні, енергетичні, економічні та організаційні аспекти. В рамках завдань даної роботи ключовим є саме експлуатаційний контур прийняття рішень: відповідність параметрів електробуса умовам маршруту, забезпечення надійного випуску на лінію, організація заряджання, технічного обслуговування, резервування та мінімізація витрат життєвого циклу [11], [21], [28].

У сучасній практиці перехід до електробусів розглядається не як проста заміна дизельних автобусів «один до одного», а як реінжиніринг транспортної системи. Зокрема, аналітичні матеріали UITP підкреслюють, що електрифікація парку потребує узгодження рішень між оператором, транспортною владою та енергопостачальником, а також переоцінки підходів до фінансування, інфраструктури, експлуатації та управління даними [11]. Це особливо важливо для міських систем, де рішення щодо парку безпосередньо

впливають на графіки, інтервали руху, обіг автобусів і структуру витрат підприємства [11].

Базовим методичним принципом є поетапність та ітеративність. У міжнародних рекомендаціях з електрифікації автобусних перевезень запропоновано логіку, за якої спочатку оцінюється операційна придатність маршрутів і депо, далі – параметри рухомого складу та зарядної інфраструктури, після чого виконується уточнення плану на основі фактичних даних експлуатації [29] (див. рис. 1.5). Такий підхід є доцільним і для міста Луцьк, оскільки дозволяє уникнути помилок надмірної закупівлі або, навпаки, дефіциту рухомого складу в пікові періоди.

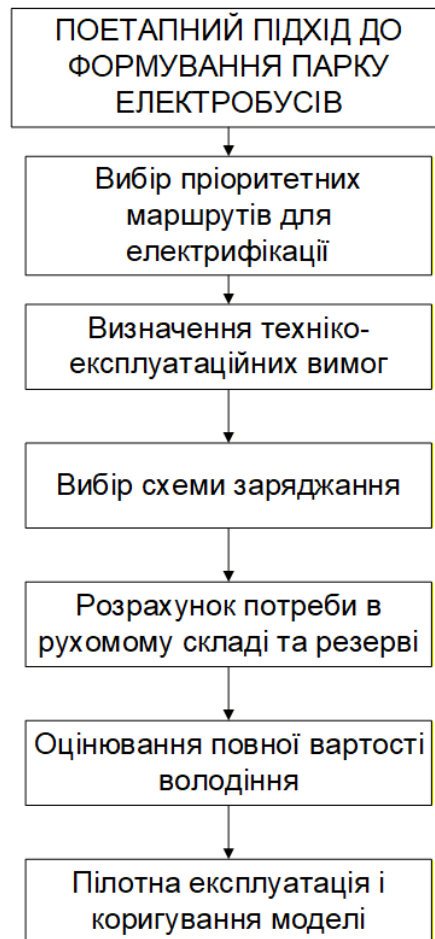


Рисунок 1.5 – Поетапний підхід до формування парку рухомого складу електробусів

У структурі поетапного підходу доцільно виділяти такі етапи:

1. Вибір пріоритетних маршрутів для електрифікації (за довжиною, профілем, пасажиропотоком, режимом руху, наявністю місць для заряджання, стабільністю графіка) [30].
2. Визначення техніко-експлуатаційних вимог до електробусів (клас/місткість, запас ходу, енергоспоживання, допустимий час заряджання, тип батареї, кліматичне виконання) [28], [30].
3. Вибір схеми заряджання (нічна в депо, денна opportunity charging, змішана схема) з урахуванням електромережових обмежень [11], [30].
4. Розрахунок потреби в рухомому складі та резерві з урахуванням обігу, часу простоїв на заряджання, технічного обслуговування та сезонних коливань [11], [29].
5. Оцінювання повної вартості володіння (ТСО) та порівняння альтернативних конфігурацій парку [11], [30].
6. Пілотна експлуатація і коригування моделі (уточнення норм енергоспоживання, графіків заряджання, коефіцієнта технічної готовності, структури резерву) [30], [31].

Такий алгоритм відповідає практиці транспортних операторів, де електрифікація парку розглядається як поєднання технічної модернізації та зміни бізнес-моделі перевезень [11].

Також можливим є застосування експлуатаційно-орієнтованого підходу, у центрі якого – забезпечення заданої транспортної роботи при нормативній якості перевезень. У цьому підході парк електробусів визначається через показники експлуатації:

- добовий пробіг на маршруті;
- тривалість рейсу/обігу;
- час відстою та можливість заряджання;
- середнє питоме енергоспоживання (кВт·год/км);
- сезонний вплив температури та роботи кліматичних систем;
- коефіцієнт технічної готовності;
- потреба в резервних одиницях.

UITP прямо зазначає, що на реальний запас ходу електробуса впливають клімат, профіль маршруту, рельєф, а також споживання енергії системами HVAC, що робить неможливим використання лише «паспортного» значення запасу ходу при формуванні парку [11]. Отже, у методиці розрахунку для Луцька слід закладати експлуатаційний коефіцієнт корекції запасу ходу (з урахуванням зимового режиму, пікового завантаження та дорожніх умов) [11], [31].

Висновки до розділу

Обґрунтовано теоретичні та нормативні засади формування парку електробусів для міських пасажирських перевезень і встановлено, що це завдання має комплексний характер та безпосередньо належить до сфери технічної експлуатації рухомого складу. Показано, що сучасний розвиток міського пасажирського транспорту відбувається в руслі сталої міської мобільності, де ключовими пріоритетами є декарбонізація, цифровізація, доступність, інтегрованість транспортної системи та підвищення економічної стійкості перевезень. Саме в такому контексті електробуси розглядаються як один із базових напрямів оновлення міського рухомого складу.

Встановлено, що електробуси є не лише екологічно чистим видом транспорту, а й системним елементом сталої міської мобільності, ефективність якого визначається поєднанням транспортних, енергетичних, інфраструктурних та організаційних рішень. Обґрунтовано, що впровадження електробусів має спиратися на комплексне врахування цілей міської мобільності, вимог до зарядної інфраструктури, особливостей маршрутної мережі та умов експлуатації, а не зводиться лише до закупівлі транспортних засобів.

На основі аналізу класифікаційних підходів показано, що для задачі формування парку в м. Луцьк найбільш доцільним є поєднання технічної класифікації електробусів з експлуатаційною класифікацією. Особливо

важливим для подальших розрахунків є поділ електробусів за архітектурою заряджання, оскільки саме він визначає компроміс між ємністю батареї, вимогами до інфраструктури та режимами роботи рухомого складу.

Обґрунтовано, що ключовими техніко-експлуатаційними особливостями електробусів є змінність фактичного запасу ходу залежно від умов маршруту та сезону, взаємозв'язок між ємністю батареї та організацією перевезень, а також підвищені вимоги до електробезпеки, діагностики й технічного обслуговування. Це підтверджує необхідність переходу від використання паспортних характеристик до експлуатаційно орієнтованих розрахунків на основі реальних умов роботи міських маршрутів.

Систематизовано критерії вибору рухомого складу для міських маршрутів і доведено, що вибір електробусів доцільно здійснювати за багатокритеріальною моделлю, яка охоплює: маршрутно-експлуатаційні, пасажиромісткісні, конструктивно-компонувальні, енергетичні, експлуатаційно-технічні, економічні та нормативно-правові критерії.

Визначено методичні підходи до формування парку електробусів і показано, що найбільш обґрунтованим є поетапний, ітеративний та експлуатаційно-орієнтований підхід, який включає: відбір пріоритетних маршрутів, формування техніко-експлуатаційних вимог до електробусів, вибір схеми заряджання, розрахунок потреби в рухомому складі та резерві, оцінювання ТСО, а також коригування моделі за результатами пілотної експлуатації. Такий підхід є придатним для подальшого аналітичного обґрунтування структури парку електробусів у м. Луцьк.

Отримані результати формують необхідну теоретико-методичну основу для наступних розділів кваліфікаційної роботи.

2 АНАЛІЗ УМОВ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ У М. ЛУЦЬК

2.1 Загальна характеристика транспортної системи м. Луцьк

Місто Луцьк є адміністративним центром Волинської області та найбільшим міським вузлом регіону, що формує основний попит на щоденні пасажирські перевезення в межах міста і прилеглої громади. Для цілей цієї кваліфікаційної роботи важливо, що транспортна система Луцька функціонує у форматі міської територіальної громади, а отже охоплює не лише власне міські, а й частину приміських/підвізних сполучень. За даними офіційної статистики, чисельність населення м. Луцьк на 1 січня 2022 року становила 215 986 осіб; це є доцільною базою для подальших розрахунків, оскільки повоєнна демографічна динаміка потребує окремого уточнення за локальними джерелами [32].

Управління та організація міських перевезень у Луцьку здійснюються через інституційну систему міської ради, зокрема профільний напрям транспорту та комунальне підприємство КП «Луцьке підприємство електротранспорту». На офіційному сайті міської ради [33] наведено контактні та організаційні дані підприємства, його структуру (служба руху, інженерний блок, диспетчерський пункт), що є важливим з позицій технічної експлуатації та подальшого впровадження електробусів. Наявність сформованої експлуатаційної та диспетчерської структури є суттєвою передумовою для інтеграції нового електричного рухомого складу.

Важливою рисою транспортної системи Луцька є наявність цифрової платформи “Транспорт Луцька”, на якій зосереджено ключові елементи управління міською мобільністю: розклади руху, маршрути, перелік перевізників, парк громадського транспорту, е-квиток, сервіси онлайн-відстеження, е-мапа, модуль звернень, а також розділ стратегічних документів [33]. Для задачі формування парку електробусів це є принципово важливим,

оскільки забезпечує доступ до маршрутних та експлуатаційних даних, які потрібні для обґрунтування складу парку, резерву та схеми заряджання.

За даними Луцької міської ради, у місті вже реалізовано низку елементів сучасної транспортної політики, зокрема електронну оплату проїзду (АСООП/е-квиток) [33]. Розрахунок за проїзд у громадському транспорті проводиться електронними носіями, а також функціонує мережа терміналів поповнення. Така цифровізація є важливою для експлуатаційного аналізу, оскільки створює основу для обліку пасажиропотоку, оцінки навантаження на маршрути та прийняття рішень щодо електрифікації.

Загальна структура пасажирських перевезень у Луцьку поєднує міський електричний транспорт (тролейбус) та автобусні перевезення, що виконуються комунальним і приватними перевізниками [33]. У відкритих даних міської ради (за 2021 р.) вказано, що загальна кількість перевезених пасажирів становила 32 898 741 пасажир, з них 24 707 266 платних та 8 191 475 пільгових [33]. Окремо зазначено, що міським електричним транспортом перевезено 12,3 млн пасажирів, а перевезення електротранспортом забезпечувалося на 13 маршрутах із використанням 42 тролейбусів, серед яких 12 нових низькопідлогових [33]. Ці показники можна використовувати як базову характеристику масштабу системи та ролі електротранспорту в міських перевезеннях.

З погляду технічної експлуатації важливо, що міська транспортна система має значну зупинкову мережу: 717 зупинок у межах Луцької міської територіальної громади, з них 454 – у місті Луцьку та 263 – у населених пунктах громади [33]. Така просторова розгалуженість напряму впливає на режими руху (часті зупинки, розгони/гальмування), а отже – на енергоспоживання електробусів, потребу в резерві ходу та вимоги до графіка заряджання.

В місті вже функціонує розвинена система маршрутної та сервісної інформації: доступні розділи «Маршрути», «Розклад руху», «Транспорт онлайн», «Е-мапа», «Розумні зупинки і табло», а також інтеграція з зовнішніми

сервісами планування поїздок (EasyWay, CityCard) [33]. Це свідчить про достатній рівень цифрової готовності міста до подальшої оптимізації маршрутної роботи та впровадження електробусів на основі даних.

Окремо слід відзначити структуру парку, оприлюднену на порталі “Транспорт Луцька”, де подано дані за перевізниками, моделями, екологічним стандартом, пасажиромісткістю та пристосованістю до перевезення осіб з інвалідністю. Для КП «Луцьке підприємство електротранспорту» наведено тролейбусні моделі (зокрема ЗиУ, Богдан, Jelcz, ПМЗ, SAM) з характеристиками місткості та кількості одиниць; для автобусних перевізників – моделі різних екологічних стандартів (Євро-2, Євро-3, Євро-4, Євро-5), включно з низькопідлоговими та частково доступними машинами. Така деталізація є цінною для подальшого аналізу заміщення автобусів електробусами.

Важливим є й те, що транспортний портал Луцька прямо позиціонує розвиток системи в контексті екологічних і “розумних” технологій. Це підтверджує, що впровадження електробусів у Луцьку доцільно розглядати як частину ширшої політики сталої міської мобільності, а не ізольоване технічне рішення.

Отже, транспортна система м. Луцьк характеризується такими ознаками, важливими для подальшого формування парку електробусів:

- наявність комбінованої системи перевезень (електротранспорт + автобуси різних перевізників);
- сформована експлуатаційна база комунального електротранспортного підприємства;
- функціонування електронного квитка та цифрових сервісів моніторингу;
- значна зупинкова мережа в межах громади;
- доступність структурованих даних про парк, маршрути та перевізників.

Саме ці характеристики створюють належне підґрунтя для наступного етапу дослідження – аналізу маршрутної мережі та вибору експлуатаційно доцільних маршрутів для впровадження електробусів.

2.2 Аналіз маршрутної мережі м. Луцьк

Аналіз маршрутної мережі м. Луцьк доцільно виконувати з позицій технічної експлуатації рухомого складу, тобто як основу для подальшого обґрунтування складу парку електробусів, режимів їх роботи та схеми заряджання. Такий підхід безпосередньо впливає з положень, що ефективність електробусів визначається не лише типом транспортного засобу, а насамперед узгодженістю з параметрами маршруту, графіком руху, інтенсивністю зупинок, сезонними умовами та інфраструктурними обмеженнями.

Загальна структура маршрутної мережі Луцька має комбінований характер і поєднує:

1. маршрути міського електротранспорту (тролейбусні);
2. автобусні маршрути різних перевізників;
3. маршрути в межах територіальної громади, що забезпечують зв'язок міста з прилеглими населеними пунктами.

Характеристики маршрутної мережі м. Луцьк наведено в таблиці 2.1 та на рисунку 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики маршрутної мережі м. Луцьк

№ маршруту	Тип	Пасажиро-місткість ТЗ*	Протяжність, км			Кількість ТЗ на маршруті*, од.
			прямий	зворотний	загальна	
1	А	38	14,8	14,8	29,6	8
2	А	60	12,1	12,3	24,4	4
3	А	60	18,0	18,0	36,0	8
5	А	38	22,1	22,1	44,2	4
7	А	38	18,0	18,0	36,0	4
9	А	60	23,3	23,3	46,6	7
10	А	60	21,5	22,5	44,0	6
11	А	60	12,3	14,6	26,9	6
12	А	75	19,7	19,7	39,4	6
19	А	38	23,0	23,0	46,0	10
22	А	38	17,9	17,9	35,8	7
22а	А	38	20,2	20,2	40,4	2

№ маршруту	Тип	Пасажиро-місткість ТЗ*	Протяжність, км			Кількість ТЗ на маршруті*, од.
			прямий	зворотний	загальна	
24	A	75	16,9	16,7	33,6	4
25	A	38...60	14,6	14,6	29,2	8
26	A	38...55	11,9	11,9	23,8	4
26a	A	38...55	11,3	11,3	22,6	2
27	A	38	14,0	11,5	25,5	1
27a	A	38	14,1	13,7	27,8	3
28	A	60	12,3	12,0	24,3	8
30	A	38...60	23,9	23,9	47,8	8
31	A	38	17,0	17,0	34,0	8
32	A	80	21,1	21,1	42,2	7
1	T	105**	14,7	13,2	27,9	4
2	T	105**	12,8	16,4	29,2	4
3	T	105**	13,9	14,1	28,0	1
4	T	105**	10,9	11,1	22,0	2
4a	T	105**	11,1	11,2	22,3	1
5	T	105**	11,2	11,2	22,4	2
7	T	105**	12,1	12,1	24,2	4
15	T	105**	10,3	—	10,3	5
15a	T	105**	—	10,3	10,3	5
Примітки: * - за даними Луцької міської ради [33]						
** - фактична місткість тролейбусів Т701, які використовуються на маршруті						

Також для маршрутів наведених в таблиці 2.1 визначено час руху та середнє експлуатаційну швидкість (табл. 2.2). Час руху та експлуатаційну швидкість прийнято на основі відкритих довідкових джерел (маршрутні сервіси, транспортні довідники, описи маршрутів), які містять довжину маршруту та час поїздки для міських маршрутів Луцька.

Такий підхід є коректним для попередніх техніко-експлуатаційних розрахунків, оскільки враховує варіативність умов міського руху (світлофорне регулювання, затори, пасажирообмін на зупинках) і забезпечує порівнянність маршрутів у межах єдиної методики.

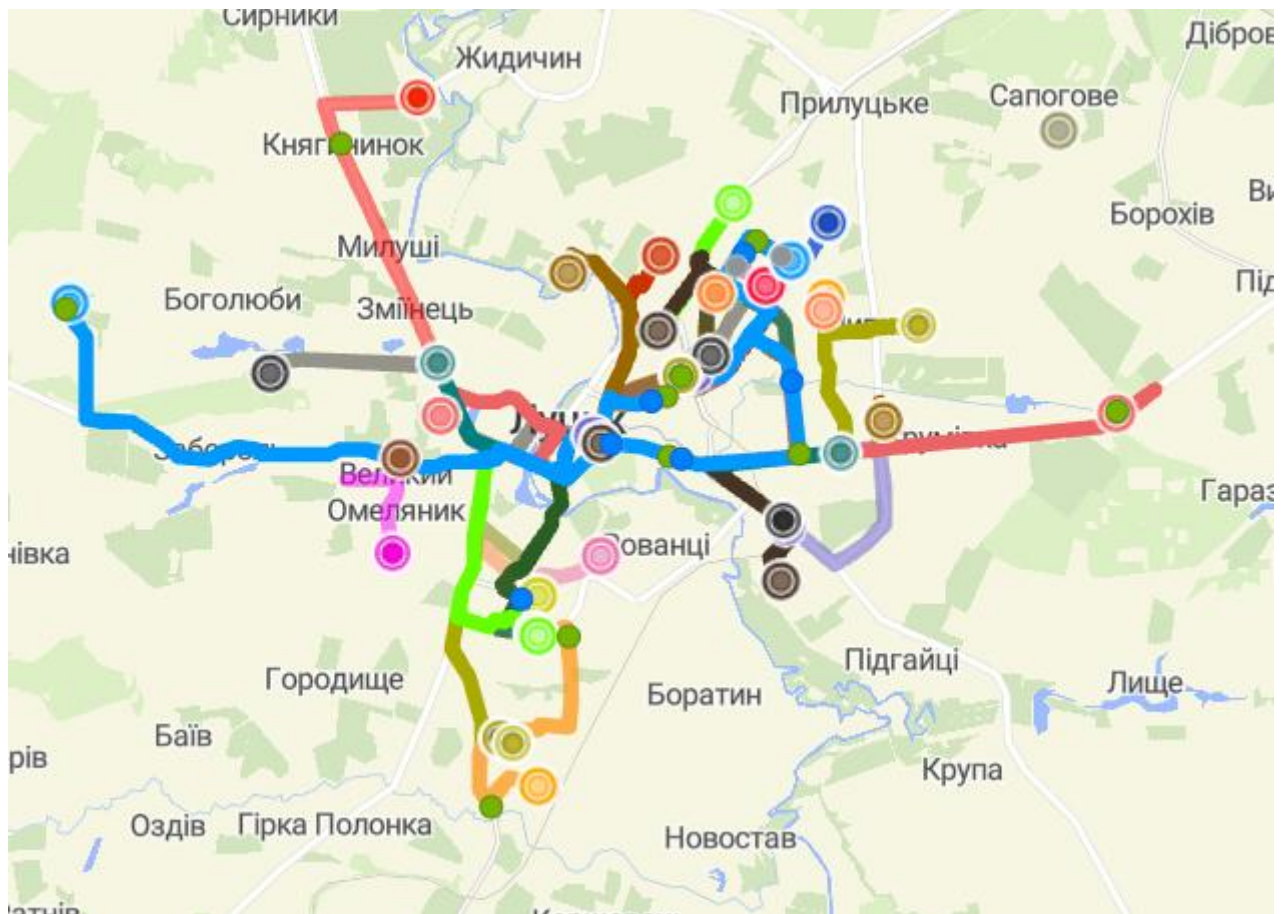


Рисунок 2.1 – Маршрути громадського транспорту Луцької територіальної громади

Таблиця 2.2 – Час руху на маршрутах

№ маршруту	Тип	Середня експлуатаційна швидкість руху, км/год	Час руху, год		
			прямий напрям	зворотний напрям	загальний, без врахування відстою
1	A	22,5	0,67	0,67	1,34
2	A	16,3	0,75	0,75	1,50
3	A	17,7	1,02	1,02	2,04
5	A	26,6	0,83	0,83	1,66
7	A	19,6	0,91	0,91	1,82
9	A	25,5	0,92	0,92	1,84
10	A	25,1	0,83	0,91	1,74
11	A	18,9	0,67	0,75	1,42
12	A	22,6	0,87	0,87	1,74
19	A	36,8	0,67	0,67	1,34
22	A	23,9	0,75	0,75	1,50
22a	A	30,4	0,67	0,67	1,34
24	A	21,0	0,87	0,87	1,74

№ маршруту	Тип	Середня експлуатаційна швидкість руху, км/год	Час руху, год		
			прямий напрям	зворотний напрям	загальний, без врахування відстою
25	A	16,7	0,87	0,87	1,74
26	A	17,8	0,67	0,67	1,34
26a	A	15,1	0,75	0,75	1,50
27	A	21,1	0,67	0,67	1,34
27a	A	21,1	0,67	0,58	1,25
28	A	22,4	0,58	0,58	1,16
30	A	28,7	0,83	0,83	1,66
31	A	18,5	0,92	0,92	1,84
32	A	28,1	0,75	0,75	1,50
1	T	15,8	0,83	0,83	1,66
2	T	15,3	0,75	0,83	1,58
3	T	18,7	0,75	0,75	1,50
4	T	14,8	0,75	0,75	1,50
4a	T	16,8	0,67	0,67	1,34
5	T	17,2	0,65	0,65	1,30
7	T	16,9	0,71	0,71	1,42
15	T	14,5	0,75	–	0,75
15a	T	14,5	–	0,75	0,75

Дані наведені в таблицях 2.1 та 2.2 будуть основою для формування вхідних вимог для обґрунтування структури парку рухомого складу.

2.3 Характеристика діючого парку рухомого складу

Діючий парк рухомого складу міських пасажирських перевезень у м. Луцьк представлений двома основними складовими: автобусним парком (маршрутні автобуси різної місткості) та тролейбусним парком (електричний транспорт на контактній мережі). Така структура є типовою для середніх міст України й забезпечує поєднання маршрутної гнучкості автобусних перевезень із екологічними перевагами електротранспорту. Водночас аналіз маршрутної мережі та розрахованих техніко-експлуатаційних показників свідчить, що система працює в умовах значної неоднорідності за довжиною маршрутів, інтенсивністю руху та швидкісним режимом, що безпосередньо впливає на вимоги до формування парку рухомого складу.

Саме конструктивний аспект є ключовим під час формування парку рухомого складу, оскільки він безпосередньо визначає надійність, ремонтпридатність, енергоефективність, придатність до конкретних умов маршруту та витрати на технічне обслуговування.

Автобусний парк, що обслуговує міські та приміські маршрути Луцької громади, зазвичай включає транспортні засоби різної місткості (малі, середні, великі) та різного рівня адаптації до міських перевезень.

Діючий парк рухомого складу м. Луцьк характеризується конструктивною неоднорідністю, що ускладнює експлуатацію та підвищує вимоги до системи технічного обслуговування. Основні проблеми пов'язані із зношеністю кузовів і ходової частини, різнотипністю агрегатів, підвищеним навантаженням на дверні та гальмівні системи у міському циклі, а також обмеженнями ремонтпридатності та діагностування.

З позиції формування парку електробусів це означає, що під час вибору нового рухомого складу необхідно враховувати не лише пасажиромісткість і дальність ходу, а й конструктивну придатність до міських умов експлуатації: низькопідлоговість, ресурс ходової частини, надійність тягового електроприводу, доступність сервісу, уніфікацію вузлів та зручність технічного обслуговування.

2.4 Визначення вихідних даних для формування парку електробусів

Формування парку електробусів для міських пасажирських перевезень у м. Луцьк потребує визначення системи вихідних даних, яка забезпечує подальші розрахунки чисельності рухомого складу, вибір типу електробусів, схеми заряджання та резерву. Відповідно до положень, узагальнених у розділі 1, таке завдання має вирішуватися на основі експлуатаційно-орієнтованого та поетапного підходу, де ключовими є маршрутні параметри, пасажиромісткість, енергетичні характеристики, умови технічної експлуатації та показники готовності парку.

У даній роботі для попереднього формування парку електробусів маршрути міської мережі пропонується згрупувати за бікритеріальним принципом, використовуючи дві визначальні ознаки: довжину оборотного рейсу та пасажиромісткість рухомого складу. Такий підхід дозволяє одночасно врахувати енергетичне навантаження на електробус і вимоги до провізної спроможності на маршруті. Для кожної сформованої групи як вихідні дані для подальших розрахунків доцільно приймати максимальні значення зазначених показників, а саме: максимальну довжину оборотного рейсу та максимальну пасажиромісткість автобуса. Це забезпечує консервативний характер розрахунку та створює запас надійності при визначенні типу електробуса, параметрів батареї та чисельності рухомого складу.

Результати групування наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Бікритеріальне групування маршрутів

Маршрут	Пасажиромісткість, пас.	Прийнята (q_{max}), пас.	Довжина обороту ($L_{об}$), км	Група за довжиною	Група за місткістю	Бікритеріальна група
1	38	38	29,6	L2	P1	L2P1
2	60	60	24,4	L1	P2	L1P2
3	60	60	36,0	L3	P2	L3P2
5	38	38	44,2	L3	P1	L3P1
7	38	38	36,0	L3	P1	L3P1
9	60	60	46,6	L4	P2	L4P2
10	60	60	44,0	L3	P2	L3P2
11	60	60	26,9	L2	P2	L2P2
12	75	75	39,4	L3	P2	L3P2
19	38	38	46,0	L4	P1	L4P1
22	38	38	35,8	L3	P1	L3P1
22a	38	38	40,4	L3	P1	L3P1
24	75	75	33,6	L2	P2	L2P2
25	38...60	60	29,2	L2	P2	L2P2
26	38...55	55	23,8	L1	P2	L1P2
26a	38...55	55	22,6	L1	P2	L1P2
27	38	38	25,5	L2	P1	L2P1

Маршрут	Пасажиromісткість, пас.	Прийнята (q_{max}), пас.	Довжина обороту ($L_{об}$), км	Група за довжиною	Група за місткістю	Бікритеріальна група
27a	38	38	27,8	L2	P1	L2P1
28	60	60	24,3	L1	P2	L1P2
30	38...60	60	47,8	L4	P2	L4P2
31	38	38	34,0	L2	P1	L2P1
32	80	80	42,2	L3	P2	L3P2
1	105	105	27,9	L2	P3	L2P3
2	105	105	29,2	L2	P3	L2P3
3	105	105	28,0	L2	P3	L2P3
4	105	105	22,0	L1	P3	L1P3
4a	105	105	22,3	L1	P3	L1P3
5	105	105	22,4	L1	P3	L1P3
7	105	105	24,2	L1	P3	L1P3
15	105	105	10,3	L1	P3	L1P3
15a	105	105	10,3	L1	P3	L1P3

За результатами бікритеріального групування встановлено, що маршрутна мережа Луцька формує 9 комбінованих груп L_iP_j (табл. 2.4), для кожної групи визначено максимальні значення довжини оборотного рейсу та пасажиромісткості, які доцільно використовувати як вихідні дані при попередньому розрахунку типорозмірної структури парку електробусів. Такий підхід забезпечує консервативність оцінки та створює запас надійності на етапі вибору технічних параметрів електробусів і схеми їх експлуатації.

Таблиця 2.4 – Узагальнена таблиця вихідних даних за бікритеріальними групами

Бікритеріальна група	Характеристика групи	Маршрути у групі	Кількість маршрутів	$L_{об}$, км	q_{max} , пас.
L1P2	Короткі, середня місткість	2(A), 26(A), 26a(A), 28(A)	4	24,4	60

Бікритеріальна група	Характеристика групи	Маршрути у групі	Кількість маршрутів	$L_{об}$, км	q_{max} , пас.
L1P3	Короткі, велика місткість	4(T), 4a(T), 5(T), 7(T), 15(T), 15a(T)	6	24,2	105
L2P1	Середні, мала місткість	1(A), 27(A), 27a(A), 31(A)	4	34,0	38
L2P2	Середні, середня місткість	11(A), 24(A), 25(A)	3	33,6	75
L2P3	Середні, велика місткість	1(T), 2(T), 3(T)	3	29,2	105
L3P1	Довгі, мала місткість	5(A), 7(A), 22(A), 22a(A)	4	44,2	38
L3P2	Довгі, середня місткість	3(A), 10(A), 12(A), 32(A)	4	44,0	80
L4P1	Дуже довгі, мала місткість	19(A)	1	46,0	38
L4P2	Дуже довгі, середня місткість	9(A), 30(A)	2	47,8	60

У межах бікритеріального групування маршрутів доцільно окремо виділити суто тролейбусні групи L1P3 та L2P3, які представлені виключно маршрутами міського електротранспорту з фактичною пасажиромісткістю 105 пасажирів. Оскільки зазначені маршрути вже обслуговуються електричним рухомим складом, їх заміна на акумуляторні електробуси на початковому етапі формування парку не є пріоритетною. Доцільніше розглядати ці групи як базу існуючого електротранспорту, а пріоритет електрифікації спрямувати на автобусні маршрути. Однак в перспективі ці групи доцільно розглядати з меоб заміни на електробуси з одночасним коригуванням маршрутів.

За результатами бікритеріального групування маршрутів встановлено, що найбільш доцільним є застосування підзарядки електробусів на лінії для груп L4P2, L4P1 та L3P2, оскільки вони характеризуються найбільшою довжиною оборотного рейсу та, відповідно, підвищеним енергетичним

навантаженням. Для груп L3P1 та L2P2 підзарядка на лінії є умовно доцільною і повинна визначатися з урахуванням тривалості відстою на кінцевих зупинках та інтенсивності експлуатації. Для груп L2P1 та L1P2 у більшості випадків достатньо нічного заряджання в депо, а підзарядка на лінії може розглядатися як резервний або піковий режим експлуатації.

Додатково до бікритеріального групування (за довжиною оборотного рейсу та пасажиромісткістю) доцільно враховувати інфраструктурну ознаку – наявність дублювання автобусного маршруту тролейбусним. Для таких маршрутів уже існує контактна мережа та пов'язана з нею енергетична інфраструктура, що створює сприятливі умови для організації підзарядки електробусів на лінії (насамперед на кінцевих або вузлових зупинках). У мережі м. Луцьк до цієї категорії належать, зокрема, автобусні маршрути 1, 2, 3, 5 і 7, які мають тролейбусні аналоги. Це дозволяє підвищити пріоритет їх електрифікації навіть у випадках, коли за довжиною маршруту вони не належать до найбільш енергоємних груп.

Висновки до розділу

Встановлено, що транспортна система м. Луцьк має сприятливі передумови для поетапного впровадження електробусів: комбіновану структуру перевезень (автобус + тролейбус), наявну експлуатаційну базу КП «Луцьке підприємство електротранспорту», а також достатній рівень цифровізації (електронний квиток, онлайн-моніторинг, маршрутні сервіси). Це створює організаційну та інформаційну основу для обґрунтування структури парку електробусів.

Аналіз маршрутної мережі показав її виражену неоднорідність за довжиною маршрутів, пасажиромісткістю та кількістю транспортних засобів на лінії, що безпосередньо впливає на вимоги до типу електробуса, ємності тягової батареї та режимів заряджання. Дані табл. 2.1–2.2 обґрунтовано прийнято як базу для подальших техніко-експлуатаційних розрахунків.

Встановлено, що діючий парк рухомого складу Луцька є конструктивно неоднорідним, що ускладнює технічну експлуатацію та підвищує вимоги до технічного обслуговування. У зв'язку з цим під час формування парку електробусів доцільно враховувати не лише пасажиромісткість і дальність ходу, а й конструктивну придатність рухомого складу до міських умов (ремонт придатність, уніфікація, надійність, сервісна підтримка).

Для попереднього формування парку електробусів застосовано бікритеріальний підхід до групування маршрутів за двома ознаками: довжиною оборотного рейсу та пасажиромісткістю. Такий підхід дозволяє одночасно врахувати енергетичне навантаження на електробус і вимоги до провізної спроможності, а використання максимальних значень у межах груп забезпечує консервативність розрахунку. За результатами групування сформовано 9 бікритеріальних груп маршрутів.

Окремо виділено суто тролейбусні групи L1P3 та L2P3, які вже обслуговуються електричним транспортом (тролейбусами) і тому не є пріоритетними для первинної заміни на акумуляторні електробуси. На початковому етапі формування парку електробусів доцільно спрямувати пріоритет на автобусні маршрути, залишаючи тролейбусні групи як базу чинного електротранспорту.

За результатами аналізу бікритеріальних груп визначено пріоритети щодо підзарядки електробусів на лінії: найбільш доцільною вона є для груп L4P2, L4P1, L3P2 (найбільша довжина оборотного рейсу), умовно доцільною – для L3P1, L2P2, а для L2P1, L1P2 у більшості випадків достатнім є нічне заряджання в депо. Така диференціація створює основу для подальшого вибору схеми заряджання (ОНС/ОРС/комбінована) у наступному розділі.

Додатково обґрунтовано необхідність врахування інфраструктурної ознаки – дублювання автобусних маршрутів тролейбусними. Для маршрутів 1, 2, 3, 5, 7 наявність тролейбусних аналогів свідчить про вищу інфраструктурну готовність до організації підзарядки електробусів на лінії, що підвищує їхній пріоритет при плануванні пілотної електрифікації.

Отримані результати формують достатню вихідну базу для наступного етапу – вибору типорозмірної структури парку електробусів, параметрів батарей і схеми експлуатації на пріоритетних маршрутах м. Луцьк.

3 ФОРМУВАННЯ ПАРКУ ЕЛЕКТРОБУСІВ ДЛЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ У М. ЛУЦЬК

3.1 Вибір типу та технічних параметрів електробусів для умов м. Луцьк

Вибір типу електробусів для умов м. Луцьк доцільно виконувати як завдання технічної експлуатації, тобто з урахуванням параметрів маршрутної роботи, структури перевезень і вимог до провізної спроможності, а не лише як процедуру закупівлі транспортних засобів. Такий підхід відповідає положенням розділу 1, де підкреслено, що ефективність електробусного парку визначається узгодженістю характеристик рухомого складу з параметрами маршруту, режимами роботи та інфраструктурними умовами.

На даному етапі доцільно здійснювати визначення типу електробусів насамперед за параметром пасажиромісткості, тоді як параметри запасу ходу та ємності тягової батареї будуть обґрунтовані окремо в наступних підпунктах. Такий підхід є доцільним, оскільки запас ходу електробуса залежить від конкретних умов експлуатації (довжини маршруту, клімату, завантаження, режиму HVAC, схеми заряджання), а сучасні виробники пропонують виконання однієї моделі з різними конфігураціями батарейних систем. Це узгоджується з попередніми результатами щодо змінності фактичного запасу ходу та необхідності його окремого маршрутного розрахунку.

У розділі 2 для маршрутів м. Луцьк виконано бікритеріальне групування за довжиною оборотного рейсу та пасажиромісткістю рухомого складу.

При цьому для подальших розрахунків прийнято максимальні значення параметрів у межах груп, що забезпечує консервативність вибору. Саме ці результати є базою для визначення типорозмірної структури парку електробусів.

За результатами групування для автобусних маршрутів виділено такі ключові рівні пасажиромісткості:

- мала місткість — близько 38 пас. (групи P1);
- середня місткість — 55–60 пас. (частина груп P2);

- підвищена середня місткість — 75–80 пас. (частина груп Р2).

Для умов Луцька доцільно формувати парк електробусів не як набір «універсальних» машин, а як типорозмірну структуру з 2–3 базових класів, прив’язаних до фактичної провізної потреби маршрутів (рис. 3.1).

З урахуванням структури маршрутів Луцька та прийнятого в роботі підходу пропонується така базова номенклатура:

1. Електробуси малого класу (умовно 8–9,5 м). Для маршрутів із прийнятою пасажиромісткістю до 40 пас. (групи Р1).
2. Електробуси середнього класу (умовно 10,5–12 м). Для маршрутів із прийнятою пасажиромісткістю 55–60 пас. (основна частина Р2).
3. Електробуси середнього/великого міського класу (переважно 12 м). Для маршрутів із прийнятою пасажиромісткістю 75–80 пас. (маршрути з підвищеною провізною потребою в межах Р2).

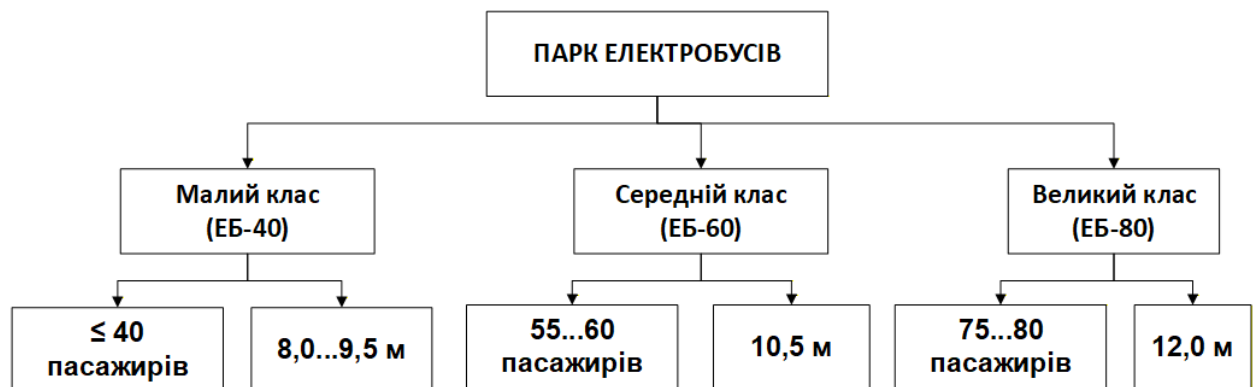


Рисунок 3.1 – Структура парку рухомого складу електробусів

Такий поділ дозволяє мінімізувати надлишкову місткість на менш навантажених маршрутах і водночас не знижувати якість перевезень на напрямках із вищим пасажиропотоком.

Рекомендовані технічні параметри електробусів для умов м. Луцьк

Зважаючи на те, що запас ходу визначатиметься окремо, доцільно зафіксувати базові технічні параметри, які мають бути використані при відборі моделей електробусів для подальшого розрахунку.

Для міських перевезень у м. Луцьк доцільно приймати електробуси:

- категорії МЗ, класу І (міський тип);
- у низькопідлоговому виконанні (або максимально наближеному до нього);
- з місцем для перевезення маломобільних пасажирів;
- з кількома широкими дверними прорізами для інтенсивного пасажирообміну;
- із сумісністю із сучасною зарядною інфраструктурою (депо та/або маршрутною), з урахуванням подальшого вибору схеми ОНС/ОПС.

3.2 Необхідний запас ходу електробусів

Визначення необхідного запасу ходу електробусів для умов м. Луцьк є ключовим етапом формування парку, оскільки саме цей параметр безпосередньо впливає на вибір конфігурації батарейної системи, схеми заряджання (ОНС/ОПС/комбінована), режиму випуску на лінію та загальної чисельності рухомого складу.

Відповідно до прийнятого у розділі 2 бікритеріального підходу, для розрахунку запасу ходу доцільно використовувати максимальні значення довжини оборотного рейсу в межах кожної групи маршрутів, що забезпечує адекватність оцінки.

Необхідний запас ходу електробуса доцільно визначати не як «паспортне» значення виробника, а як розрахунковий експлуатаційний параметр, який забезпечує виконання транспортної роботи на маршруті з урахуванням:

- довжини оборотного рейсу;
- кількості оборотів (рейсів) за зміну/добу;
- сезонної зміни енергоспоживання;
- резерву на відхилення режиму руху;
- прийнятої схеми заряджання (ОНС/ОПС).

Для цього використовується поняття необхідного експлуатаційного запасу ходу $L_{\text{необ}}$, який має гарантувати стабільну роботу електробуса у заданому режимі без порушення розкладу.

Для узагальненого розрахунку доцільно використовувати залежність:

$$L_{\text{необ}} = L_{\text{баз}} \cdot k_{\text{рез}}, \quad (3.1)$$

де, $L_{\text{баз}}$ – базова відстань, яку електробус повинен гарантовано пройти між заряджаннями, км;

$k_{\text{рез}}$ – коефіцієнт експлуатаційного резерву (враховує нерівномірність руху, затори, відхилення розкладу, погодні чинники).

Величина $L_{\text{баз}}$ визначається залежно від прийнятої схеми заряджання:

- для ОНС — як добовий (або змінний) пробіг між заїздами в депо;
- для ОРС — як пробіг між двома послідовними підзарядками на лінії;
- для комбінованої схеми — як пробіг між основними етапами заряджання (парк + маршрут).

Відповідно, для умов Луцька доцільно диференціювати вимоги до запасу ходу за групами маршрутів:

1. Для груп, орієнтованих на ОНС (нічне заряджання). Необхідний запас ходу має покривати значну частину добового пробігу або повний пробіг за зміну. Це характерно насамперед для коротких і частини середніх маршрутів, де підзарядка на лінії не є обов'язковою.
2. Для груп, орієнтованих на ОРС (підзарядка на лінії). Необхідний запас ходу може бути меншим, оскільки електробус поповнює енергію на кінцевих або вузлових зупинках. У цьому випадку запас ходу визначається відстанню між точками заряджання та резервом на можливі затримки.

3. Для комбінованої схеми. Розрахунковий запас ходу формується як проміжний варіант: частина енергії забезпечується в депо, частина — на маршруті.

У розділі 2 для маршрутної мережі Луцька сформовано 9 бікритеріальних груп, для яких визначено максимальні значення довжини оборотного рейсу та пасажиромісткості. Для подальшого визначення запасу ходу електробусів доцільно використовувати саме ці узагальнені дані, оскільки вони вже враховують принцип «максимального навантаження» в межах групи.

Для автобусних маршрутів найбільш важливими є такі групи:

- L1P2: $L_{об}^{max}=24,4$ км;
- L2P1: $L_{об}^{max}=34,0$ км;
- L2P2: $L_{об}^{max}=33,6$ км;
- L3P1: $L_{об}^{max}=44,2$ км;
- L3P2: $L_{об}^{max}=44,0$ км;
- L4P1: $L_{об}^{max}=46,0$ км;
- L4P2: $L_{об}^{max}=47,8$ км.

Отже, при попередньому проєктуванні доцільно орієнтуватися на те, що один оборотний рейс для найбільш енергоємних автобусних груп становить близько 44–48 км, а для коротких/середніх груп — 24–34 км.

З урахуванням структури маршрутів, прийнятої логіки заряджання та можливості замовлення електробусів із потрібною конфігурацією батареї, у даній роботі доцільно визначати необхідний запас ходу на рівні типорозмірних груп ЕБ-40, ЕБ-60, ЕБ-80.

Для типу ЕБ-40 характерні маршрути груп L2P1, L3P1, L4P1, де максимальна довжина оборотного рейсу змінюється від 34,0 до 46,0 км. З огляду на те, що частина цих маршрутів належить до довгих і дуже довгих (L3, L4), для них доцільно передбачати:

- або підвищений запас ходу (у разі ОНС),
- або можливість підзарядки на лінії (у разі ОРС/комбінованої схеми).

Для попереднього етапу розрахунку доцільно приймати:

- мінімальний операційний рівень — не менше 1 оборотного рейсу з резервом;
- рекомендований рівень для ОНС — покриття кількох оборотів (визначається за добовим графіком);
- рекомендований рівень для ОРС — покриття інтервалу між підзарядками (1–2 обороти залежно від організації заряджання).

Для типу ЕБ-60 характерні групи L1P2, L2P2, L4P2 та частина маршрутів L3P2 (для маршрутів з місткістю 60 пас.). Довжина обороту для цих груп становить від 24,4 до 47,8 км, що свідчить про значну варіативність умов експлуатації. Особливої уваги потребує група L4P2, де зосереджено найдовші автобусні маршрути (зокрема маршрут 30А — 47,8 км).

Для цієї типорозмірної групи доцільно застосовувати диференційований підхід:

- для L1P2–L2P2 можливе переважне використання ОНС;
- для L4P2 і частини L3P2 доцільно передбачати ОРС або комбіновану схему, що дозволить зменшити вимоги до батареї та стабілізувати роботу на лінії.

Тип ЕБ-80 призначений для маршрутів із підвищеною провізною потребою (зокрема 12А, 24А, 32А), що у бікритеріальному групуванні віднесені до L2P2 та L3P2 з максимальними значеннями місткості 75–80 пас. і довжини обороту до 44,0 км. Для цих маршрутів доцільно забезпечити підвищений експлуатаційний запас ходу, оскільки зростання пасажирського навантаження, часті зупинки та інтенсивні розгони/гальмування можуть збільшувати фактичне енергоспоживання.

Для попереднього розрахунку приймаємо:

$$L_{\text{необ}} = L_{\text{баз}} \cdot n \cdot k_{\text{рез}}, \quad (3.2)$$

де n — кількість оборотних рейсів між заряджаннями (прийнята залежно від схеми ONC/OPC);

Прийняті параметри:

- $k_{\text{рез}}=1,20$ (20 % резерв на затримки, погодні умови, відхилення графіка);
- для груп з ONC (нічне заряджання) прийнято:
 - L1P2: $n = 4$,
 - L2P1: $n = 3$;
- для груп з комбінованою/умовною OPC:
 - L2P2: $n = 3$,
 - L3P1: $n = 2$;
- для груп з пріоритетною OPC:
 - L3P2, L4P1, L4P2: $n = 2$.

Такий вибір відповідає раніше сформованим пріоритетам підзарядки на лінії: L4P2, L4P1, L3P2 — пріоритетно OPC; L3P1, L2P2 — умовно доцільно; L2P1, L1P2 — переважно ONC.

Результати розрахунків наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Розрахунковий необхідний запас ходу електробусів за бікритеріальними групами

Бікритеріальна група	$L_{\text{об}}^{\text{max}}$, км	Рекомендована схема заряджання	Розрахунковий запас ходу $L_{\text{необ}}$, км	Прийнятий запас ходу (округлено), км
L1P2	24,4	ONC	117,1	120
L2P1	34,0	ONC	122,4	125
L2P2	33,6	Комбінована (ONC/OPC)	121,0	125
L3P1	44,2	Комбінована / OPC	106,1	110
L3P2	44,0	OPC (пріоритетно)	105,6	110
L4P1	46,0	OPC (пріоритетно)	110,4	115

Бікритеріальна група	$L_{об}^{max}$, км	Рекомендована схема заряджання	Розрахунковий запас ходу $L_{необ}$, км	Прийнятий запас ходу (округлено), км
L4P2	47,8	ОРС (пріоритетно)	114,7	115

За результатами розрахунку встановлено, що для автобусних бікритеріальних груп м. Луцьк необхідний експлуатаційний запас ходу між заряджаннями становить 110–125 км (з урахуванням 20 % резерву), залежно від довжини оборотного рейсу та прийнятої схеми заряджання.

3.3 Розрахунок кількості електробусів

Розрахунок необхідної кількості електробусів для м. Луцьк доцільно виконувати на основі результатів аналізу маршрутної мережі (табл. 2.1–2.2) та прийнятого бікритеріального групування маршрутів (табл. 2.3–2.4), оскільки саме ці дані визначають потребу в пасажиромісткості, довжині оборотного рейсу та режимі роботи рухомого складу. Вихідною базою для розрахунку приймається фактична кількість транспортних засобів на маршрутах, наведена у розділі 2, з подальшим коригуванням на коефіцієнт технічної готовності парку.

Розрахунок виконується для автобусних маршрутів, оскільки суто тролейбусні групи L1P3 та L2P3 вже обслуговуються електричним транспортом і на початковому етапі не є пріоритетними для заміни на акумуляторні електробуси.

Для попереднього розрахунку прийнято:

- $N_{л}$ – кількість електробусів на лінії (за фактичною кількістю ТЗ на маршрутах);
- $\alpha_{тг}$ – коефіцієнт технічної готовності парку (прийнято 0,90 для міських умов експлуатації);
- $N_{інв}$ – інвентарна кількість електробусів.

Розрахункова залежність:

$$N_{\text{інв}} = \left\lceil \frac{N_{\text{л}}}{\alpha_{\text{тг}}} \right\rceil \quad (3.3)$$

де $\left\lceil \frac{N_{\text{л}}}{\alpha_{\text{тг}}} \right\rceil$ – округлення до більшого цілого.

Результати розрахунків наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.4 – Розрахунок необхідної кількості електробусів за бікритеріальними групами

Група ТЗ	Маршрути у групі	$N_{\text{л}}$, од.	Розрахункова інвентарна кількість $N_{\text{інв}}$, од.	Примітка щодо заряджання
L1P2	2, 26, 26а, 28	18	20	Переважно нічне заряджання в депо
L2P1	1, 27, 27а, 31	20	23	Нічне заряджання; для маршруту 1 можливе пріоритетне лінійне підзаряджання (дублює тролейбус)
L2P2	11, 24, 25	18	20	Підзарядка на лінії — умовно доцільна
L3P1	5, 7, 22, 22а	17	19	Підзарядка на лінії — умовно доцільна; маршрути 5 і 7 мають тролейбусні аналоги
L3P2	3, 10, 12, 32	27	30	Доцільна підзарядка на лінії
L4P1	19	10	12	Доцільна підзарядка на лінії
L4P2	9, 30	15	17	Пріоритетна підзарядка на лінії
Разом		125	141	—

Отримані результати показують, що для повної заміни автобусних маршрутів м. Луцьк на електробуси (без урахування існуючих тролейбусних маршрутів) необхідно сформувати парк у кількості 141 електробус. Така величина включає: 125 електробусів лінійного випуску (еквівалентно поточній

кількості автобусів на маршрутах) та 16 електробусів резерву, що забезпечують компенсацію простоїв на технічному обслуговуванні, ремонті та можливих відхиленнях у графіках.

Слід підкреслити, що найбільша потреба в електробусах припадає на групи L3P2 (30 од.), L2P1 (23 од.) та L1P2/L2P2 (по 20 од.), що узгоджується з результатами попереднього аналізу маршрутної мережі, де саме ці групи охоплюють найбільшу кількість маршрутів і значну частку рухомого складу. Водночас для груп L4P1 та L4P2, хоча їх чисельність менша, критичним є питання організації підзарядки на лінії через підвищене енергетичне навантаження, зумовлене великою довжиною оборотного рейсу.

Отже, на етапі попереднього проектування доцільно приймати цільову інвентарну чисельність парку 141 електробус, із подальшим уточненням за результатами детального розрахунку графіків руху, фактичних інтервалів, тривалості відстою на кінцевих зупинках та обраної схеми зарядної інфраструктури.

Висновки до розділу

Застосовано методичний підхід до побудови парку електробусів для пасажирських перевезень у м. Луцьк, який базується на поєднанні маршрутно-експлуатаційного аналізу, бікритеріального групування маршрутів та поетапного визначення ключових параметрів рухомого складу (пасажиромісткість, запас ходу, чисельність парку). Такий підхід забезпечує узгодженість технічних рішень із фактичними умовами міської маршрутної мережі.

Обґрунтовано, що на етапі вибору типу електробусів для умов м. Луцьк доцільно орієнтуватися насамперед на пасажиромісткість, оскільки параметри запасу ходу та ємності тягової батареї можуть бути адаптовані виробником до потреб конкретного замовника. У результаті сформовано типорозмірну структуру парку з трьох розрахункових типів: ЕБ-40, ЕБ-60 та ЕБ-80, що

відповідають основним групам провізної потреби на автобусних маршрутах міста.

Визначено базові технічні вимоги до електробусів для експлуатації в Луцьку: міське виконання (категорія МЗ, клас І), низькопідлогова конструкція, придатність до перевезення маломобільних пасажирів, забезпечення інтенсивного пасажирообміну та сумісність із деповою і/або маршрутною зарядною інфраструктурою. Це створює основу для подальшого відбору конкретних моделей рухомого складу в межах прийнятих типорозмірних груп.

Для автобусних бікритеріальних груп маршрутів розраховано необхідний експлуатаційний запас ходу між заряджаннями з урахуванням максимальної довжини оборотного рейсу в межах групи, кількості оборотів між заряджаннями та 20 % експлуатаційного резерву. Встановлено, що розрахункові значення становлять 110–125 км, що є достатньою базою для подальшого визначення параметрів тягових батарей та вибору режимів заряджання.

Підтверджено доцільність диференційованого застосування схем заряджання залежно від груп маршрутів: для коротких і частини середніх маршрутів доцільним є переважно нічне заряджання в депо (ОНС), тоді як для довгих і дуже довгих маршрутів обґрунтовано підзарядку на лінії (ОРС) або комбіновану схему. Особливу перевагу для ОРС мають маршрути, що дублюють тролейбусні коридори, оскільки вони характеризуються вищою інфраструктурною готовністю.

На основі аналізу маршрутної мережі та фактичної кількості транспортних засобів на автобусних маршрутах виконано розрахунок чисельності електробусного парку з урахуванням коефіцієнта технічної готовності 0,90. Встановлено, що для повної заміни автобусного рухомого складу (без урахування чинних тролейбусних маршрутів) необхідно сформувати парк у кількості 141 електробус, з яких 125 од. — лінійний випуск і 16 од. — резерв.

Найбільша потреба в електробусах припадає на групи L3P2 (30 од.), L2P1 (23 од.), L1P2 (20 од.) та L2P2 (20 од.), водночас для груп L4P1 і L4P2 критичним фактором залишається організація підзарядки на лінії, оскільки саме ці групи характеризуються найбільшим енергетичним навантаженням через значну довжину оборотного рейсу.

4 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИЙНЯТИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

4.1 Вибір моделей для формування парку

На етапі оцінки ефективності прийнятих технічних рішень доцільно сформулювати перелік базових моделей електробусів, які можуть бути використані для комплектування парку з урахуванням раніше визначених груп маршрутів за довжиною та необхідною пасажиромісткістю. Ключовими критеріями відбору на цьому етапі є: (1) відповідність місткості умовам міських маршрутів м. Луцьк; (2) наявність/готовність моделі до серійного виробництва; (3) орієнтація на українських виробників; (4) достатній або перспективно налаштовуваний запас ходу.

З огляду на зазначене, доцільно розглядати насамперед моделі українського виробництва (Львів, Чернігів, Луцьк), які покривають середній і великий класи міських перевезень (табл. 4.1). При цьому для практичного проектування парку в м. Луцьк особливу увагу слід приділити моделям класу 9,5–10,2 м (для маршрутів із помірним пасажиропотоком) та 12 м (для напрямків із вищим навантаженням).

Таблиця 4.1 – Запропоновані транспортні засоби для формування парку електробусів

Модель, марка	Виробник	Пасажиромісткість	Запас ходу
Malva Electro A08611 (Еталон)	Корпорація «Еталон» / Чернігівський автозавод (ЧАЗ)	до 55 пас. (24 місця для сидіння)	до 200 км
Electron E181 (Електрон)	Концерн «Електрон» / Electronmash (Львів)	до 90 пас. (30 місць для сидіння)	300–350 км

Модель, марка	Виробник	Пасажиromісткість	Запас ходу
Electron E19101 (Електрон)	СП «Електронтранс» (Львів)	до 100 пас. (36 місць для сидіння)	орієнтовно 200 км у міській експлуатації
12-метровий електробус «Богдан»	АТ «АК «Богдан Моторс»	до 80 пас.	щонайменше 200 км

Наведений в таблиці 4.1 перелік моделей може бути використаний як база для техніко-економічного порівняння за показниками вартості придбання, витрат на енергію, потреби в зарядній інфраструктурі та узгодженості з існуючою маршрутною мережею міста. Водночас наявність моделей різної місткості у вітчизняних виробників дає змогу сформувати комбінований парк, що є більш гнучким для реальних умов експлуатації міського транспорту м. Луцьк.

4.2 Техніко-експлуатаційна оцінка запропонованого парку електробусів

Техніко-експлуатаційна оцінка запропонованого парку виконується з урахуванням конкретних моделей електробусів, підібраних у п. 4.1, та результатів розділу 3 (типорозмірна структура ЕБ-40 / ЕБ-60 / ЕБ-80, необхідний запас ходу 110–125 км між заряджаннями, рекомендовані схеми ОНС/ОРС) (табл. 4.2). Такий підхід дає змогу перевірити, наскільки реальні моделі українських виробників відповідають умовам маршрутної мережі м. Луцьк за місткістю та запасом ходу.

На цьому етапі оцінювання ключовими є такі критерії:

- відповідність пасажиромісткості бікритеріальним групам маршрутів;
- достатність запасу ходу відносно розрахованих значень (110–125 км);
- придатність до міського режиму (низька підлога, інтенсивний пасажирообмін, доступність);
- експлуатаційна доцільність у складі комбінованого парку.

Таблиця 4.2 – Техніко-експлуатаційна оцінка запропонованих моделей електробусів

Модель	Виробник	Пасажиromісткість	Техніко-експлуатаційна оцінка для умов м. Луцьк
Malva Electro A08611 (Еталон)	Корпорація «Еталон» / ЧАЗ	24 сид. + 29 стоячих (+2 відкидні), фактично близько 53–55 пас.	Придатний для груп L1P2, L2P2 та частини маршрутів із помірним пасажиропотоком. Запас ходу суттєво перевищує розрахункові 110–125 км, що забезпечує експлуатаційний резерв навіть за зимових умов. Доцільний як модель для коротких/середніх маршрутів із переважним ОНС або комбінованим режимом.
Electron E181	«Електронтранс» / Electronmassh (Львів)	до 90 пас. (30 сидячих)	Найбільш універсальна модель для Луцька: перекриває потреби груп L2P2, L3P2, а також може застосовуватися на частині L4P2 за ОРС. Високий запас ходу дає значний резерв і дозволяє гнучко обирати ОНС/ОРС. Доцільна як базова модель для маршрутів із підвищеним пасажиропотоком
Electron E19101	СП «Електронтранс» (Львів)	до 100 пас. (36 сидячих)	Високомістка 12-метрова модель, доцільна для найбільш навантажених маршрутів груп L3P2 та перспективно L4P2. Запас ходу перевищує розрахункову потребу, тому модель придатна як для ОНС (на частині маршрутів), так і для ОРС/комбінованої схеми. Перевага — висока провізна спроможність; обмеження — доцільність використання насамперед на маршрутах із стабільно високим попитом.
12-метровий міський електробус «Богдан»	АТ «АК «Богдан Моторс»	не менше 80 пас.	Важливий варіант для формування парку саме в Луцьку з огляду на локалізацію виробництва. За місткістю та запасом ходу відповідає вимогам груп L3P2–L4P2. Технічно придатний для міських перевезень; доцільний для маршрутизованого застосування з ОРС на довгих напрямках. Перспективний з позиції сервісної підтримки та регіональної кооперації.

Проведена оцінка показує, що запропоновані моделі покривають насамперед середній та підвищений рівні пасажиромісткості (умовні типи ЕБ-60 та ЕБ-80), які є визначальними для більшості автобусних груп Луцька. Це узгоджується з результатами розділу 3, де найбільша потреба у рухомому складі припадає на групи L3P2, L2P2, L1P2.

1. Для груп P2 (середня місткість) найбільш збалансованим рішенням є:
 - Malva Electro A08611 — для коротких і частини середніх маршрутів (L1P2, L2P2);
 - Electron E181 — для маршрутів із підвищеним навантаженням у межах P2.
2. Для маршрутів підвищеної провізної потреби (умовний ЕБ-80) доцільно застосовувати:
 - Electron E181 (універсально, з великим запасом ходу),
 - Electron E19101 (акцент на провізній спроможності),
 - 12-метровий електробус «Богдан» (перспективно як базова 12-метрова платформа українського виробництва).
3. За критерієм запасу ходу всі розглянуті моделі мають характеристики, що перевищують розраховані в роботі потреби 110–125 км між заряджаннями, тобто є технічно достатніми для Луцька навіть із урахуванням експлуатаційного резерву.

У розділі 3 для маршрутів груп P1 було введено розрахунковий тип ЕБ-40. Водночас серед розглянутих у п. 4.1 моделей українських виробників переважають електробуси середнього та великого міського класу, тому для повного покриття потреб груп P1 можливі два підходи:

- використання компактних модифікацій/конфігурацій електробусів середнього класу з оптимізованою компоновкою;
- часткове застосування моделей класу ЕБ-60 на маршрутах P1 (із допустимим резервом місткості) у разі пріоритету уніфікації парку.

Для м. Луцьк другий варіант є експлуатаційно привабливим, оскільки зменшує номенклатуру парку та спрощує технічне обслуговування.

Техніко-експлуатаційна оцінка з урахуванням конкретних моделей українських електробусів підтверджує можливість формування парку для м. Луцьк на основі вітчизняних рішень. Найбільш універсальними для умов міста є моделі Electron E181 та 12-метровий електробус «Богдан», тоді як Malva Electro A08611 доцільно розглядати для маршрутів із помірним пасажиропотоком. Модель Electron E19101 є придатною для напрямків із підвищеною провізною потребою. Усі запропоновані моделі мають запас ходу, достатній для реалізації прийнятих у роботі схем ONC/OPC/комбінованого заряджання.

Висновки до розділу

Виконано оцінку ефективності прийнятих технічних рішень щодо формування парку електробусів для пасажирських перевезень у м. Луцьк на основі конкретних моделей українських виробників. За результатами відбору встановлено, що для умов міської маршрутної мережі доцільно орієнтуватися на комбінований парк, сформований переважно з електробусів середнього та великого класу (Malva Electro A08611, Electron E181, Electron E19101, 12-метровий електробус «Богдан»), які забезпечують необхідну пасажиромісткість для основних бікритеріальних груп маршрутів. Запропонований перелік моделей створює практичну основу для подальшого техніко-економічного порівняння, а також відповідає вимозі пріоритетного врахування вітчизняних виробників при формуванні парку.

Техніко-експлуатаційна оцінка підтвердила, що всі розглянуті моделі мають запас ходу, достатній для реалізації прийнятих у роботі режимів експлуатації (ONC/OPC/комбінована схема) з урахуванням розрахункової потреби 110–125 км між заряджаннями, а також забезпечують необхідний рівень провізної спроможності для більшості автобусних груп Луцька. Водночас встановлено, що для маршрутів груп Р1, де введено розрахунковий тип ЕБ-40, на практиці доцільним є або використання компактних

модифікацій, або часткова уніфікація парку за рахунок моделей класу ЕБ-60, що є експлуатаційно вигідним з позицій технічного обслуговування та організації сервісу. Загалом результати підтверджують технічну реалізованість запропонованого парку та доцільність переходу до підсумкової техніко-економічної оцінки проєкту.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання формування парку електробусів для міських пасажирських перевезень у м. Луцьк на основі експлуатаційно-орієнтованого підходу. Обґрунтовано, що ефективне впровадження електробусів потребує комплексного врахування параметрів маршрутної мережі, пасажиромісткості рухомого складу, режимів заряджання, технічної готовності парку та інфраструктурних умов міста.

За результатами аналізу транспортної системи м. Луцьк встановлено, що міська мережа має комбіновану структуру (автобусні та тролейбусні маршрути), сформовану експлуатаційну базу КП «Луцьке підприємство електротранспорту» та достатній рівень цифрової готовності (електронний квиток, онлайн-моніторинг, маршрутні сервіси), що створює організаційні передумови для поетапної електрифікації автобусних перевезень. Для розрахунків сформовано систему вихідних даних на основі параметрів маршрутів, часу руху, пасажиромісткості та кількості транспортних засобів.

Запропоновано бікритеріальний підхід до групування маршрутів за двома ключовими ознаками – довжиною оборотного рейсу та пасажиромісткістю рухомого складу – із прийняттям максимальних значень параметрів у межах груп як розрахункових. На цій основі сформовано типорозмірну структуру майбутнього парку електробусів (ЕБ-40, ЕБ-60, ЕБ-80), що забезпечує узгодження провізної спроможності з фактичними умовами маршрутної роботи та створює методичну основу для подальшого визначення запасу ходу і чисельності парку.

Для автобусних бікритеріальних груп м. Луцьк визначено необхідний експлуатаційний запас ходу електробусів між заряджаннями з урахуванням максимальної довжини оборотного рейсу, кількості оборотів між заряджаннями та експлуатаційного резерву. Встановлено, що розрахунковий запас ходу становить 110–125 км, а найбільш доцільним є диференційований

підхід до заряджання: ОНС (нічне заряджання в депо) для коротких і частини середніх маршрутів, ОРС (підзарядка на лінії) або комбінована схема – для довгих і дуже довгих маршрутів. Додатковою перевагою є наявність у Луцьку маршрутів, що дублюють тролейбусні коридори, що підвищує інфраструктурну придатність до лінійної підзарядки.

На основі аналізу маршрутної мережі та фактичної кількості транспортних засобів виконано розрахунок чисельності електробусного парку. Визначено, що для повної заміни автобусного рухомого складу необхідно сформувати парк у кількості 141 електробус, у тому числі 125 од. лінійного випуску та 16 од. резерву (за коефіцієнта технічної готовності $\alpha_{\text{тг}} = 0,90$). Найбільша потреба в електробусах припадає на групи маршрутів L3P2, L2P1, L1P2, L2P2, що доцільно врахувати при визначенні черговості впровадження.

Здійснено оцінку ефективності запропонованих технічних рішень та підтверджено можливість формування парку на основі моделей українських виробників (зокрема Malva Electro A08611, Electron E181, Electron E19101, 12-метровий електробус «Богдан»). Встановлено, що запропоновані моделі за пасажиромісткістю та запасом ходу відповідають умовам міських маршрутів Луцька й забезпечують технічну реалізованість проєкту. Отримані результати мають практичну цінність для обґрунтування оновлення рухомого складу, планування зарядної інфраструктури та поетапної електрифікації міського пасажирського транспорту.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. European Commission. Urban transport : Sustainable Urban Mobility (official web page). Mobility and Transport. Електронний ресурс. Режим доступу: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/urban-transport_en
2. European Commission. The New EU Urban Mobility Framework : Communication from the Commission COM(2021) 811 final. Strasbourg, 14.12.2021. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52021DC0811>
3. International Energy Agency. Global EV Outlook 2025 : report. Paris : IEA, 2025. 173 p. (Revised version, July 2025). Електронний ресурс. Режим доступу: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/7ea38b60-3033-42a6-9589-71134f4229f4/GlobalEVOutlook2025.pdf>
4. UITP (International Association of Public Transport). Global Economic Outlook 2024: Taking the Pulse of the Public Transport Sector : Statistics Brief. Brussels, October 2024. Електронний ресурс. Режим доступу: https://www.uitp.org/wp-content/uploads/sites/7/2025/08/20241008_Economic-Outlook-2024_WEB.pdf
5. International Transport Forum. ITF Transport Outlook 2021. Paris : OECD Publishing, 2021. 249 p. DOI: 10.1787/16826a30-en Електронний ресурс. Режим доступу: https://www.oecd.org/en/publications/2021/05/itf-transport-outlook-2021_fff2ec9f.html
6. EU Urban Mobility Observatory. SUMP Guidelines and Decision Makers Summary [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/sustainable-urban-mobility-plans/sump-guidelines-and-decision-makers-summary_en?utm_source.com
7. European Environment Agency. Sustainability of Europe's mobility systems 2025 [Електронний ресурс]. – ЕЕА web report, 2025. – Режим доступу: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/sustainability-of-europes-mobility-systems-2025?utm_source.com

8. European Parliament and the Council of the European Union. Directive (EU) 2019/1161 of 20 June 2019 amending Directive 2009/33/EC on the promotion of clean and energy-efficient road transport vehicles [Електронний ресурс]. – Official Journal of the European Union, 2019. – Режим доступу: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/1161/oj/eng?utm_source.com

9. European Parliament and the Council of the European Union. Regulation (EU) 2023/1804 of 13 September 2023 on the deployment of alternative fuels infrastructure [Електронний ресурс]. – Official Journal of the European Union, 2023. – Режим доступу: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1804/oj/eng?utm_source.com

10. International Energy Agency (IEA). Global EV Outlook 2025. Trends in heavy-duty electric vehicles [Електронний ресурс]. – Paris, 2025. – Режим доступу: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/trends-in-heavy-duty-electric-vehicles?utm_source.com

11. UITP (International Association of Public Transport). Large-scale Bus Electrification : Knowledge Brief [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу: https://www.uitp.org/wp-content/uploads/sites/7/2025/04/Large-scale-Bus-Electrification-KB-Final.pdf?utm_source.com

12. European Environment Agency. Air quality status report 2025 [Електронний ресурс]. – ЕЕА web report, 2025. – Режим доступу: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/air-quality-status-report-2025?utm_source.com

13. European Environment Agency. Environmental noise in Europe 2025 [Електронний ресурс]. – ЕЕА report 05/2025. – Published 24 Jun 2025. – Режим доступу: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/environmental-noise-in-europe-2025?utm_source.com

14. Тодоренко Д. В. Огляд міських колісних електричних транспортних засобів та перспективи їх використання / Д. В. Тодоренко // *Матеріали конференції* (ВНТУ). 2025. URL:

<https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/49629/23582.pdf> (дата звернення: 22.02.2026).

15. Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції (ХНУМГ ім. О. М. Бекетова), 2024: класифікація електробусів ONC/OPC/IMC. URL: https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/2024/Tezy_2024/Materiali_KONFERENCIA_23_25_ZOVTNA_2024.pdf (дата звернення: 22.02.2026).

16. Додаток 1 до технічного регламенту. Класифікація типу колісних транспортних засобів : офіц. документ / Міністерство розвитку громад та територій України. URL: <https://mtu.gov.ua/files/01.3.1%20%D0%94%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BA%201.%20%D0%9A%D0%BB%D0%B0%D1%81%D0%B8%D1%84%D1%96%D0%BA%D0%B0%D1%86%20%D1%82%D0%B8%D0%BF%D1%83.pdf> (дата звернення: 22.02.2026).

17. Regulation No 107 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UNECE) — Uniform provisions concerning the approval of category M2 or M3 vehicles with regard to their general construction [2018/237] // Publications Office of the European Union. 2018. CELEX: 42018X0237. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/51888617-1872-11e8-ac73-01aa75ed71a1/> (дата звернення: 22.02.2026).

18. Войтків С. В. Аналіз технічної досконалості міських електробусів різних типів / С. В. Войтків // *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2022. URL: <https://veit.khadi.kharkov.ua/article/view/255251> (дата звернення: 22.02.2026).

19. Regulation (EU) 2023/1804 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU // *Official Journal of the European Union*. 2023. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A32023R1804> (дата звернення: 22.02.2026).

20. Regulation No 100 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UNECE) — Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train [2015/505] // *Official Journal of the European Union*. 2015 (consolidated version). URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2015/100/oj/eng> (дата звернення: 22.02.2026).

21. Про автомобільний транспорт : Закон України від 05.04.2001 № 2344-III // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2344-14> (дата звернення: 22.02.2026).

22. Про міський електричний транспорт : Закон України від 29.06.2004 № 1914-IV // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1914-15> (дата звернення: 22.02.2026).

23. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025–2027 роках : Постанова Кабінету Міністрів України від 27.12.2024 № 1550 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1550-2024-%D0%BF> (дата звернення: 22.02.2026).

24. Directive (EU) 2019/1161 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 amending Directive 2009/33/EC on the promotion of clean and energy-efficient road transport vehicles // EUR-Lex. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/1161/oj/eng> (дата звернення: 22.02.2026).

25. Senthilkumar D. A., Sankar B. Planning for Electrification of Rural and Intercity Buses: Strategies for Route, Depot and Charging Location Selection. Brussels : UITP, 2022/2025. URL: <https://www.uitp.org/wp-content/uploads/sites/7/2025/04/Knowledge-Brief-Route-and-Depot-selection-for-long-range-buses.pdf> (дата звернення: 22.02.2026).

26. Козевич Д. Р. Дослідження методів оцінки економічної ефективності використання автобусів різних типів на міських маршрутах : дипломна робота / Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Тернопіль, 2024. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/42339/1/%D0%9A%D0%BE%D0%B7%D0>

[%B5%D0%B2%D0%B8%D1%87%D0%94%D0%A0.pdf](#) (дата звернення: 22.02.2026).

27. Directive 2001/85/EC of the European Parliament and of the Council relating to special provisions for vehicles used for the carriage of passengers comprising more than eight seats in addition to the driver's seat (consolidated text) // EUR-Lex. URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2001L0085:20070101:EN:PDF> (дата звернення: 22.02.2026).

28. Zhang M., et al. Optimal Electric Bus Charging Scheduling with Multiple Vehicle and Charger Types Considering Compatibility // Sustainability. 2025. Vol. 17, No. 8. Art. 3294. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/8/3294> (date of access: 22.02.2026).

29. Zhou Y., et al. Charging facility planning and scheduling problems for battery electric bus systems: A comprehensive review // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2024. Vol. 183. (bibliographic record). URL: <https://ideas.repec.org/a/eee/transe/v183y2024ics136655452400053x.html> (date of access: 22.02.2026).

30. Gadepalli R., Dhok D., Nandy R., Bhamidipati S. Planning for Electrification of Rural and Intercity Buses: Strategies for Route, Depot and Charging Location Selection. Knowledge Brief. Brussels : UITP, 2022. URL: <https://www.uitp.org/wp-content/uploads/sites/7/2025/04/Knowledge-Brief-Route-and-Depot-selection-for-long-range-buses.pdf> (date of access: 22.02.2026).

31. Аргун Щ. В., Гнатов А. В. Екологічний та енергоефективний автомобільний транспорт та його інфраструктура // Вісник ЖДТУ (електронний ресурс). 2016. URL: <https://vtn.ztu.edu.ua/article/download/80306/76190/0> (дата звернення: 22.02.2026).

32. Демографічна статистика [Електронний ресурс] // Головне управління статистики у Волинській області. – Режим доступу: https://www.lutsk.ukrstat.gov.ua/demogr_r21.html (дата звернення: 22.02.2026).

33. Транспорт міста [Електронний ресурс] // Офіційний сайт Луцької міської ради. – Режим доступу: <https://www.lutskrada.gov.ua/pages/transport-mista> (дата звернення: 22.02.2026).

34. Навчальні та кваліфікаційні роботи : методичні вказівки до оформлення навчальних та кваліфікаційних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів освітньо-професійних програм: «Автомобільний транспорт», «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)» галузь знань 27 Транспорт, спеціальностей: 274 Автомобільний транспорт, 275 Транспортні технології (на автомобільному транспорті) денної та заочної форм навчання / уклад. В. М. Придюк, В. А. Кищун, В. М. Дембіцький, В. І. Павлюк. – Луцьк : Луцький НТУ, 2019. – 56 с.

35. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання [Чинний від 2017-07-11]. Вид. офіц. Київ, 2016. 32 с.