

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 «МАГІСТР»**

**ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНОГО ЗАПАСУ ХОДУ
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ КАТЕГОРІЇ МЗ**

спеціальність 274 Автомобільний транспорт
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Інжиніринг автомобільного транспорту»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ІАТм-21
Денис ДИФОРТ

(підпис)

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

(підпис)

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

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет транспорту та механічної інженерії

Кафедра автомобілів і транспортних технологій

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 27 Транспорт

Спеціальність: 274 Автомобільний транспорт

Освітня програма: «Інжиніринг автомобільного транспорту»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В. ОНИЩУК

«___» _____ 2025 р.

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

Дифорт Денис Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Визначення необхідного запасу ходу транспортних засобів категорії М3»

Керівник роботи: к.т.н., доцент Дембіцький Валерій Миколайович

затверджені наказом вищого навчального закладу від «26» листопада 2025 р. № 502/01-02

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

3. Вихідні дані до роботи: характеристика міських маршрутів, режими роботи автобусів на міських маршрутах, технічні характеристики електробусів

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

1. Теоретичні основи визначення запасу ходу транспортних засобів.

2. Аналіз умов експлуатації автобусів на міських маршрутах.

3. Визначення запасу ходу електробуса.

4. Оцінка ефективності запропонованих рішень.

5. Висновки до роботи

5. Перелік ілюстративного 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

7. Дата видачі завдання «26» листопада 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз вихідних даних	11.04.2026	
2	Теоретичні основи визначення запасу ходу транспортних засобів	25.04.2026	
3	Аналіз умов експлуатації автобусів на міських маршрутах	09.05.2026	
4	Визначення запасу ходу електробуса	16.05.2026	
5	Оцінка ефективності запропонованих рішень	23.05.2026	
6	Формування висновків	30.05.2026	
7	Перевірка кваліфікаційної роботи керівником	01.06.2026	
8	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу відповідно діючих вимог	02.06.2026	
9	Перевірка роботи на плагіат	після 01.06.2026	
10	Захист кваліфікаційної роботи	згідно графіка захистів	

Здобувач вищої освіти

_____ (Д. ДИФОРТ)
 (підпис) (ініціали, прізвище)

Керівник кваліфікаційної роботи

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

АНОТАЦІЯ

Дифорт Д.Ю. Визначення необхідного запасу ходу транспортних засобів категорії М3.

Кваліфікаційна робота магістра освітньо-наукової програми «Інжиніринг автомобільного транспорту» спеціальності 274 Автомобільний транспорт. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел посилань. Обсяг кваліфікаційної роботи становить 82 сторінки основного тексту, 18 таблиць, 2 рисунка та 79 джерел за переліком посилань.

У кваліфікаційній роботі досліджено питання визначення необхідного запасу ходу транспортних засобів категорії М3 в умовах міської експлуатації. Розглянуто теоретичні засади формування запасу ходу автобуса, проаналізовано чинники, що впливають на енергоспоживання, зокрема параметри маршрутного циклу, пасажиронавантаження, швидкісний режим, кількість зупинок, транспортні затримки та сезонні умови. На прикладі міського маршруту № 32 м. Луцька виконано розрахунок добового пробігу, витрат енергії та необхідного експлуатаційного резерву. Проведено порівняння отриманих результатів із характеристиками електробуса Електрон Е19101 та обґрунтовано потребу в раціональній організації заряджання для забезпечення стабільної роботи маршруту.

Ключові слова: транспортний засіб категорії М3, міський автобус, електробус, запас ходу, необхідний запас ходу, енергоспоживання, маршрутний цикл, міський маршрут, пасажиронавантаження, експлуатаційний резерв, заряджання електробуса, міські пасажирські перевезення.

ANNOTATION

Dyfort D.Yu. Determination of the required range of vehicles of category M3.

Master's qualification work of the educational and scientific program "Road Transport Engineering" specialty 274 Road Transport. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

Master's qualification work consists of an introduction, four sections, conclusions, a list of references. The volume of the qualification work is 82 pages of the main text, 18 tables, 2 figures and 79 sources according to the list of references.

The qualification work investigates the issue of determining the required range of vehicles of category M3 in urban operation. The theoretical principles of forming the bus range are considered, and factors affecting energy consumption are analyzed, in particular, the parameters of the route cycle, passenger load, speed regime, number of stops, transport delays and seasonal conditions. Using the example of city route No. 32 of Lutsk, the daily mileage, energy consumption and required operating reserve were calculated. The results were compared with the characteristics of the Electron E19101 electric bus and the need for rational organization of charging to ensure stable operation of the route was substantiated.

Keywords: M3 category vehicle, city bus, electric bus, range, required range, energy consumption, route cycle, city route, passenger load, operating reserve, charging of an electric bus, city passenger transportation.

ЗМІСТ

Вступ	8
1 Теоретичні засади визначення запасу ходу транспортних засобів категорії МЗ.	12
1.1 Сутність поняття запасу ходу транспортних засобів категорії МЗ.	12
1.2 Особливості експлуатації автобусів на міських маршрутах.	16
1.3 Вплив умов руху на енергоспоживання автобуса.	21
1.4 Методи оцінювання витрат енергії та визначення необхідного запасу ходу.	25
1.5 Аналіз сучасних досліджень і підходів щодо вибору раціонального запасу ходу автобусів.	30
Висновки до розділу.	33
2 Аналіз умов експлуатації автобуса на міському маршруті Луцька. ...	35
2.1 Загальна характеристика маршрутної мережі міста Луцька та вибір об'єкта дослідження.	35
2.2 Характеристика обраного міського автобусного маршруту.	38
2.3 Умови роботи автобуса на маршруті.	41
2.4 Формування вихідних даних для визначення необхідного запасу ходу.	44
2.5 Обґрунтування розрахункового циклу роботи автобуса на маршруті.	48
Висновки до розділу.	52
3 Визначення необхідного запасу ходу автобуса.	54
3.1 Вибір розрахункової моделі визначення запасу ходу.	54
3.2 Розрахунок енергоспоживання автобуса на одному оборотному рейсі маршруту.	57

3.3 Розрахунок добової потреби в енергії з урахуванням режиму роботи на маршруті.	63
3.4 Визначення необхідного запасу ходу автобуса з урахуванням резерву.	65
Висновки до розділу.	69
4 Оцінка ефективності прийнятих рішень.	71
4.1 Вплив вибраного запасу ходу на організацію роботи маршруту та потребу в заряджанні/обслуговуванні.	71
4.2 Організація роботи електробусів на маршруті.	73
4.3 Техніко-економічна оцінка отриманих результатів.	76
Висновки до розділу.	79
Висновки.	81
Перелік джерел посилання	83

ВСТУП

Актуальність теми зумовлена сучасними тенденціями розвитку міського пасажирського транспорту, що орієнтовані на підвищення енергоефективності, зниження викидів та поступовий перехід до використання автобусів з альтернативними джерелами енергії. За даними Міжнародного енергетичного агентства, у 2024 році світові продажі електробусів перевищили 70 тис. одиниць, а сегмент електричних автобусів продовжує стабільно зростати. У країнах Європи також посилюється курс на впровадження беземісійного громадського транспорту, а органи влади та оператори міських перевезень розглядаються як ключові учасники цієї трансформації.

У цих умовах одним із найбільш важливих техніко-експлуатаційних параметрів автобусів категорії МЗ є запас ходу, оскільки саме він визначає можливість стабільного виконання маршрутної роботи без порушення графіка руху, додаткових простоїв та надлишкових витрат на енергозабезпечення. Міжнародна практика впровадження електробусів свідчить, що вибір типу рухомого складу та стратегії його енергозабезпечення має здійснюватися відповідно до конкретних умов міського маршруту, а не лише за паспортними характеристиками транспортного засобу. Для міських перевезень вирішальне значення мають довжина маршруту, інтенсивність руху, кількість зупинок, режим розгону і гальмування, пасажиронавантаження, рельсф, сезонні умови експлуатації та організація зарядної інфраструктури.

З огляду на це, визначення необхідного запасу ходу автобуса категорії МЗ, що працює на міському маршруті, є важливим науково-прикладним завданням. Його розв'язання дає змогу обґрунтовано вибрати параметри рухомого складу, знизити ризик недостатнього енергетичного резерву в реальних умовах експлуатації, підвищити надійність транспортного обслуговування населення та забезпечити раціональну організацію роботи автобусів на маршрутах міста.

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні необхідного запасу ходу транспортних засобів категорії МЗ для роботи на міському маршруті з

урахуванням реальних умов експлуатації, параметрів маршрутного циклу, енергоспоживання, пасажиронавантаження, сезонних чинників та потреби в експлуатаційному резерві, що дасть змогу підвищити надійність і ефективність організації міських пасажирських перевезень.

Об'єктом дослідження є процес експлуатації транспортних засобів категорії МЗ на міському автобусному маршруті в умовах змінного пасажиронавантаження, нерівномірного швидкісного режиму, транспортних затримок та сезонних коливань енергоспоживання.

Предметом дослідження є закономірності формування необхідного запасу ходу транспортного засобу категорії МЗ на міському маршруті залежно від параметрів та умов руху, пасажиронавантаження, енергоспоживання та експлуатаційного резерву.

Для досягнення поставленої мети у кваліфікаційній роботі визначено такі завдання досліджень:

1. узагальнити теоретичні засади визначення запасу ходу транспортних засобів категорії МЗ;
2. проаналізувати основні чинники, що впливають на формування необхідного запасу ходу автобуса в умовах міської експлуатації;
3. дослідити особливості експлуатації автобуса на міських маршрутах;
4. сформувати систему вихідних даних, необхідних для розрахунку енергоспоживання та запасу ходу автобуса;
5. виконати розрахунок необхідного запасу ходу автобуса категорії МЗ на обраному міському маршруті;
6. порівняти розрахунковий необхідний запас ходу з паспортними даними реального автобуса;
7. обґрунтувати раціональну схему організації роботи електробуса на маршруті.

Науково-практична цінність роботи полягає в удосконаленні підходу до визначення необхідного запасу ходу транспортних засобів категорії МЗ на основі врахування реальних умов міської експлуатації, параметрів маршрутного циклу,

енергоспоживання, пасажиронавантаження та експлуатаційного резерву. У роботі обґрунтовано доцільність переходу від використання лише паспортних характеристик автобуса до маршрутно-орієнтованого оцінювання його здатності стабільно виконувати транспортну роботу.

Методи дослідження, застосовані у кваліфікаційній роботі, ґрунтуються на положеннях системного аналізу, маршрутно-орієнтованого підходу до оцінювання умов експлуатації автобусів, методах порівняльного та розрахунково-аналітичного аналізу. Для визначення необхідного запасу ходу транспортного засобу категорії МЗ використано методи аналізу маршрутного циклу, узагальнення експлуатаційних чинників, розрахунку добового пробігу, оцінювання енергоспоживання та визначення експлуатаційного резерву. Емпірична частина роботи виконана на основі аналізу параметрів міського маршруту, технічних характеристик автобуса, умов руху, пасажиронавантаження, сезонних чинників та нормативних джерел. Для обґрунтування отриманих результатів застосовано порівняння розрахункового необхідного запасу ходу з паспортними характеристиками автобуса.

Під час виконання роботи було використано інструменти штучного інтелекту для форматування тексту, систематизації матеріалів та створення таблиць, виключно як допоміжний засіб для пошуку інформації, уточнення формулювань та опрацювання літератури. Усі твердження, висновки та результати дослідження належать автору та ґрунтуються на власному аналізі.

Апробація результатів роботи. Опубліковано тези доповіді Д. Дифорт. Визначення необхідного запасу ходу автобусів категорії МЗ: актуальність, виклики та інженерні підходи \\\ Тези V студентської науково-технічної конференції факультету транспорту та механічної інженерії “ Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії ”. Луцьк: ЛНТУ – 2025р.– с. 248-251. Прийнято участь у 87-й Міжнародній науковій конференції студентів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету з доповіддю на тему «Вплив зовнішніх чинників на витрату електричної енергії транспортними засобами з електричним приводом» (07-11 квітня 2025 р.) та у 88-

й Міжнародній науковій конференції студентів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету з доповіддю на тему «Аналіз їздових циклів автобусів» (30 березня – 03 квітня 2026 р.)..

На захист виноситься обґрунтування доцільності визначення запасу ходу транспортного засобу категорії МЗ на основі реальних умов експлуатації конкретного міського маршруту. У роботі систематизовано основні чинники, що впливають на формування необхідного запасу ходу, запропоновано маршрутно-орієнтований підхід до його розрахунку з урахуванням добового пробігу, енергоспоживання, сезонних умов та експлуатаційного резерву. Також на захист виносяться результати розрахунку необхідного запасу ходу автобуса на міському маршруті № 32 м. Луцька, результати порівняння отриманих значень із характеристиками електробуса та обґрунтування потреби в проміжному заряджанні або коригуванні режиму його роботи для забезпечення стабільного виконання графіка руху.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАПАСУ ХОДУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ КАТЕГОРІЇ МЗ

1.1 Сутність поняття запасу ходу транспортних засобів категорії МЗ

Транспортні засоби категорії МЗ відповідно до чинної європейської класифікації є механічними транспортними засобами, призначеними для перевезення пасажирів, які мають більше восьми місць для сидіння, крім місця водія, та максимальну масу понад 5 т [1]. До цієї категорії належить переважна більшість міських, приміських і міжміських автобусів великої та особливо великої місткості. Для міських умов експлуатації особливе значення мають автобуси класу I, конструктивно пристосовані до інтенсивного пасажирообміну, частих зупинок, руху в умовах щільного транспортного потоку та багаторазових режимів розгону і гальмування. За таких умов одним із визначальних техніко-експлуатаційних показників є запас ходу транспортного засобу, оскільки саме він характеризує здатність автобуса виконувати транспортну роботу на маршруті без вимушеного поповнення енергії або пального [1], [2].

У загальному розумінні запас ходу слід трактувати як максимальну відстань, яку транспортний засіб може подолати від моменту повного заправлення або повного зарядження до досягнення гранично допустимого рівня енергетичного ресурсу за заданих умов руху та навантаження. Для автобусів із двигунами внутрішнього згоряння цей показник визначається співвідношенням між об'ємом запасу пального та його середньою експлуатаційною витратою. Для автобусів з електричною тягою запас ходу формується ємністю тягової батареї, ступенем доступного використання накопиченої енергії, енергоспоживанням у русі, а також витратами енергії на допоміжні системи. На відміну від легкових автомобілів, для автобусів категорії МЗ поняття запасу ходу має виражений виробничо-експлуатаційний зміст, оскільки воно безпосередньо пов'язане не лише з технічними можливостями транспортного засобу, а й з виконанням графіка руху, випуском на лінію, організацією підзаряджання або заправлення та забезпеченням безперервності перевезень [3], [4].

Для міських автобусів доцільно розмежовувати паспортний, нормативний і необхідний запас ходу. Паспортний запас ходу встановлюється виробником за стандартизованих або спеціально визначених умов випробувань. Нормативний запас ходу характеризує результат, отриманий за встановленою методикою оцінювання. Необхідний запас ходу є розрахунковою величиною, що визначається з урахуванням конкретних умов експлуатації маршруту та забезпечує виконання заданого обсягу транспортної роботи з належним резервом на відхилення режимів руху, зміну пасажиронавантаження, метеорологічні впливи та інші дестабілізуючі чинники. Саме необхідний запас ходу є найбільш важливим показником у задачах вибору рухомого складу для міських маршрутів, оскільки орієнтація виключно на паспортні характеристики може призвести до помилок під час планування роботи автобусів на лінії [2], [3], [4].

Сутність запасу ходу автобуса категорії МЗ розкривається через енергетичний баланс транспортного засобу. У найзагальнішому вигляді він формується, з одного боку, наявним запасом енергії, а з іншого — сукупними витратами цієї енергії на подолання опору коченню, аеродинамічного опору, сил інерції під час розгону, підйомів на поздовжніх ухилах, а також на забезпечення роботи допоміжного обладнання. Для міського автобуса істотною особливістю є значна частка непрямих витрат енергії, пов'язаних із функціонуванням систем опалення, вентиляції та кондиціонування, внутрішнього й зовнішнього освітлення, дверних приводів, інформаційних систем, компресорного та іншого обладнання. Внаслідок цього запас ходу автобусів категорії МЗ визначається не лише характеристиками силової установки, а й усією сукупністю конструктивних та експлуатаційних параметрів [5], [6], [7].

У сучасних дослідженнях доведено, що енергоспоживання міських автобусів має виразно багатофакторний характер. За результатами аналізу експлуатаційних даних електробусів встановлено, що на зміну питомих витрат енергії істотно впливають умови дорожнього руху, середня швидкість сполучення, рівень транспортної затримки, зовнішня температура, режим роботи кліматичних систем, маса транспортного засобу та особливості дій водія [5]. Крім

того, для міських автобусів суттєвим чинником є пасажиронавантаження, оскільки збільшення кількості пасажирів прямо підвищує повну масу транспортного засобу, а отже — енерговитрати на розгін і рух на підйомах. Дослідження експлуатаційної ефективності міських електробусів також підтверджують, що автономний пробіг слід оцінювати не ізольовано, а в поєднанні з пасажиромісткістю, спорядженою та повною масою, умовами перевезень і призначенням автобуса на конкретному маршруті [2], [5].

Важливим чинником, що визначає запас ходу, є швидкісний режим руху. У міських умовах автобус працює в циклічному режимі з великою кількістю розгонів, уповільнень, зупинок і ділянок нерівномірної швидкості. За таких умов підвищується частка енергії, яка витрачається на подолання інерційних навантажень. Водночас для електробусів частина цієї енергії може бути повернена завдяки рекуперативному гальмуванню. У дослідженні, виконаному на основі річних експлуатаційних даних міського автобусного парку, встановлено, що повернення енергії під час рекуперації може становити понад третину від загальної енергії, необхідної для руху автобуса, а вплив швидкості на середнє енергоспоживання є статистично значущим [6]. Це свідчить про те, що запас ходу автобуса на міському маршруті повинен визначатися не за усередненими дорожніми умовами, а на основі реального циклу руху конкретного маршруту [4], [6].

Не менш істотним є вплив температурних умов експлуатації. За низьких температур частина енергії витрачається на підтримання температурного режиму тягової батареї та опалення салону, а за високих — на кондиціювання повітря. Це призводить до зменшення частки енергії, яка може бути безпосередньо використана для руху. За даними Національної лабораторії відновлюваної енергії США, холодна погода істотно знижує експлуатаційний запас ходу автобусів з електричною тягою, тому під час планування маршрутної роботи необхідно враховувати найгірші сезонні сценарії, а також можливість попередньої термопідготовки автобуса під час заряджання [3], [8]. Моніторингові дослідження міських електробусів у реальних умовах експлуатації також

підтверджують вагомий вплив кліматичних умов і використання кліматичного обладнання на фактичне енергоспоживання та досяжний запас ходу [5], [7].

Окрему групу чинників становлять маршрутні та інфраструктурні параметри. До них належать довжина маршруту, кількість зупинок, середня відстань між зупинками, час оборотного рейсу, величина поздовжніх ухилів, стан дорожнього покриття, інтенсивність транспортних потоків, наявність ділянок із затримками руху, місце розташування та потужність зарядної інфраструктури. У сучасних підходах до планування експлуатації електробусів підкреслюється, що вибір рухомого складу повинен базуватися на даних конкретного маршруту та репрезентативному циклі руху, сформованому за результатами спостережень за реальною роботою автобусів на лінії. Такий підхід дає змогу точніше визначати не тільки енергоспоживання, а й мінімально достатній запас ходу для забезпечення сталої маршрутної роботи [3], [4], [7].

Для цілей цієї роботи доцільно узагальнити чинники, що визначають необхідний запас ходу автобусів категорії МЗ, у вигляді табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні чинники, що визначають запас ходу транспортних засобів категорії МЗ

Група чинників	Складові чинники	Характер впливу на запас ходу
Конструктивні	споряджена маса, повна маса, пасажиромісткість, тип силової установки, ємність акумуляторної батареї або об'єм паливного бака, ефективність тягового приводу	визначають початковий енергетичний ресурс та базовий рівень витрат енергії
Експлуатаційні	пасажиронавантаження, кількість рейсів, тривалість роботи на маршруті, стиль керування, частота зупинок	змінюють фактичне енергоспоживання впродовж зміни
Дорожні	довжина маршруту, стан покриття, поздовжні ухили, криволінійні ділянки, затори	впливають на опір руху та втрати енергії
Транспортні	середня швидкість сполучення, інтенсивність руху, затримки на перехрестях, режим розгін–гальмування	визначають цикл руху та частку непродуктивних енерговитрат

Група чинників	Складові чинники	Характер впливу на запас ходу
Кліматичні	температура повітря, опади, вітер, сезонність, потреба в опаленні або кондиціюванні	змінюють витрати енергії на забезпечення комфорту і температурного режиму агрегатів
Організаційно-інфраструктурні	схема випуску на маршрут, місця та режими заряджання або заправлення, резерв енергії, розташування депо	визначають практично необхідний, а не лише теоретично можливий запас ходу

Отже, запас ходу транспортних засобів категорії МЗ слід розглядати як інтегральний показник, що відображає відповідність енергетичних можливостей автобуса реальним умовам його експлуатації. Для міських маршрутів цей показник не може бути прийнятий лише за паспортними даними виробника, оскільки його фактичне значення формується під впливом комплексу взаємопов'язаних конструктивних, дорожніх, транспортних, кліматичних та організаційних чинників. Саме тому визначення необхідного запасу ходу автобуса для міського маршруту повинно здійснюватися на основі маршрутно-орієнтованого підходу, який враховує реальний цикл руху, характер пасажиропотоку, сезонні умови та обов'язковий експлуатаційний резерв [2], [4], [5], [8].

1.2 Особливості експлуатації автобусів на міських маршрутах

Експлуатація автобусів на міських маршрутах суттєво відрізняється від роботи транспортних засобів на приміських і міжміських перевезеннях через високу інтенсивність транспортного процесу, значну нерівномірність умов руху та постійну зміну навантаження на транспортний засіб упродовж рейсу. Міський автобус функціонує в умовах частої зміни режимів руху, багаторазових зупинок для посадки і висадки пасажирів, обмеженої середньої експлуатаційної швидкості, затримок на регульованих перехрестях, впливу загальноміського транспортного потоку та необхідності суворого дотримання графіка руху. Саме

тому умови міської експлуатації формують специфічні вимоги як до конструкції автобуса, так і до визначення його необхідного запасу ходу [2], [3], [4].

Однією з головних ознак міських маршрутів є циклічність роботи автобуса. Упродовж зміни транспортний засіб багаторазово повторює однакові або близькі за структурою оборотні рейси, проте фактичні умови їх виконання можуть істотно змінюватися залежно від часу доби, рівня завантаження вулично-дорожньої мережі, пасажиропотоку та організації руху на окремих ділянках маршруту. Це означає, що експлуатаційні показники міського автобуса повинні оцінюватися не лише за середніми значеннями, а й з урахуванням варіації часу рейсу, тривалості простоїв на зупинках, величини затримок та зміни витрат енергії за окремими періодами доби [4], [9]. Міжнародна практика оцінювання міських автобусних систем засвідчує, що найбільший вплив на стабільність виконання маршруту мають не окремі пікові значення швидкості, а повторюваність затримок і втрат часу в реальному міському русі [9].

Важливою особливістю міської експлуатації автобусів є висока частота зупинок і значна роль пасажирообміну. На відміну від міжміських перевезень, де час стоянки на проміжних пунктах порівняно невеликий щодо тривалості руху, у міському сполученні зупинки є регулярним і конструктивно значущим елементом транспортного циклу. Тривалість простою автобуса на зупинці визначається кількістю пасажирів, що здійснюють посадку і висадку, схемою організації посадки, шириною дверних прорізів, умовами підходу до зупинки, наявністю черги транспортних засобів та необхідністю повторного відкривання дверей. Дослідження процесів обслуговування автобусів на зупинках підтверджують, що саме тривалість зупиночного простою та суміжні маневри з в'їзду і виїзду із зупинки істотно впливають на регулярність руху, пропускну здатність маршруту і загальні часові витрати рейсу [10], [11]. У практичному аспекті це означає, що для міського автобуса витрати часу і енергії формуються не тільки в русі, а й у процесах обслуговування пасажирів на маршруті [10].

Ще однією характерною ознакою міських маршрутів є суттєва нерівномірність пасажиронавантаження. На окремих ділянках та в окремі години

добу автобус може працювати як із незначним завантаженням, так і в режимі, близькому до максимально допустимого. Це безпосередньо впливає на споряджену і повну масу транспортного засобу під час руху, змінює динамічні властивості, інтенсивність зношування елементів ходової частини, гальмівної системи та шин, а також визначає фактичний рівень енергоспоживання. За сучасними підходами до оцінювання роботи міських автобусних систем, пасажиронавантаження слід розглядати не лише як показник транспортної роботи, а і як один із ключових параметрів, що визначає тривалість зупинок, швидкість сполучення, комфорт перевезень і стабільність дотримання розкладу [11], [12].

Експлуатація автобусів у міському середовищі також характеризується значним впливом зовнішніх транспортних затримок. До них належать затримки на світлофорних об'єктах, у зонах конфліктних перетинів, на ділянках зі зниженою пропускнуою здатністю, у місцях накопичення індивідуального транспорту та в межах зупиночних пунктів. У дослідженнях, присвячених пріоритетному руху маршрутних транспортних засобів, встановлено, що параметри транспортного потоку, співвідношення інтенсивності руху, пропускну здатність вуличної мережі та умови формування пасажиропотоку на зупинках мають безпосередній вплив на часові показники якості перевезень [13]. Для міського автобуса це означає, що фактичний час виконання рейсу значною мірою залежить від інфраструктурного середовища, а не лише від технічних характеристик самого транспортного засобу [9], [13].

Суттєвою особливістю експлуатації автобусів на міських маршрутах є підвищена частка руху в режимах розгону та гальмування. Саме цей режим є найбільш енергоємним, оскільки потребує додаткових витрат на подолання інерції під час багаторазового набору швидкості після кожної зупинки або зниження темпу руху. Для автобусів з електричною тягою частина цієї енергії може бути частково повернена внаслідок рекуперації, однак ефективність такого повернення також залежить від профілю маршруту, інтенсивності руху, дорожніх умов та фактичної маси автобуса [5], [6]. Тому для міських маршрутів особливе

значення має не стільки формальна довжина маршруту, скільки його мікроструктура: кількість зупинок, частота перехресть, наявність ділянок зі сповільненим рухом, характер поздовжнього профілю та повторюваність циклів уповільнення і прискорення [4], [6].

Окремої уваги потребує вплив кліматичних умов на роботу міського автобуса. У міському сполученні транспортний засіб працює протягом тривалої зміни, за якої істотного значення набувають витрати енергії на забезпечення комфорту пасажирів і водія. У холодний період року зростає потреба в опаленні салону, підігріві вітрового скла, підтриманні належного температурного режиму агрегатів, а в теплий — у кондиціюванні та вентиляції. Для електробусів така особливість має особливо важливе значення, оскільки допоміжні споживачі енергії можуть помітно зменшувати фактично доступний запас ходу впродовж зміни [3], [8]. Внаслідок цього міські маршрути мають оцінюватися не тільки за транспортною роботою в типовий день, а й за сезонними сценаріями експлуатації, коли умови використання енергії є найскладнішими [5], [8].

Ще однією характерною рисою міської експлуатації автобусів є жорсткий зв'язок між технічними параметрами транспортного засобу та організацією роботи маршруту. Автобус на міському маршруті є елементом системи, в якій взаємопов'язані розклад руху, тривалість оборотного рейсу, кількість автобусів на маршруті, резерв часу на кінцевих зупинках, інтервал руху, режим праці водіїв, а для електричних автобусів — ще й режими та місця заряджання. Сучасні дослідження у сфері планування міських автобусних перевезень наголошують, що невизначеність енергоспоживання та часових параметрів рейсу повинна враховуватися вже на етапі формування графіка роботи і вибору конфігурації енергозабезпечення маршруту [14], [15]. Отже, автобус на міському маршруті повинен розглядатися не як ізольований транспортний засіб, а як частина інтегрованої транспортно-експлуатаційної системи [14].

Узагальнення основних особливостей експлуатації автобусів на міських маршрутах доцільно подати у вигляді табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Основні особливості експлуатації автобусів на міських маршрутах

Особливість експлуатації	Прояв у реальних умовах роботи	Вплив на транспортно-експлуатаційні показники
Часті зупинки	багаторазова посадка і висадка пасажирів на маршруті	збільшення тривалості рейсу, підвищення витрат енергії на розгін
Нерівномірність швидкісного режиму	чергування розгону, уповільнення, зупинок і коротких ділянок сталого руху	зростання енергоємності руху, зниження стабільності графіка
Змінне пасажиронавантаження	коливання кількості пасажирів за ділянками маршруту і періодами доби	зміна повної маси автобуса, збільшення витрат енергії та часу обміну пасажирів
Залежність від міського транспортного середовища	затори, світлофорне регулювання, конфліктні точки, обмеження пропускної здатності	зменшення швидкості сполучення, поява нерегулярності руху
Значна роль зупиночного простою	вплив пасажиропотоку, схеми посадки, місткості зупинки	погіршення дотримання розкладу та збільшення часу оборотного рейсу
Сезонна зміна умов роботи	опалення взимку, кондиціювання влітку, зміни зчеплення та опору руху	зміна фактичного енергоспоживання і необхідного запасу ходу
Тісний зв'язок із графіком маршруту	залежність роботи автобуса від інтервалу, резервів часу та місця кінцевих зупинок	визначення потреби в кількості автобусів, заряджанні або заправленні

Таким чином, експлуатація автобусів на міських маршрутах є складним багатофакторним процесом, у якому транспортний засіб працює в умовах високої змінності режимів руху, значного впливу пасажиронавантаження, затримок зовнішнього транспортного середовища та сезонних коливань енергоспоживання. На відміну від стабільніших умов приміського чи міжміського сполучення, міський маршрут вимагає оцінювання автобуса не лише за технічними характеристиками, а за здатністю забезпечити стале виконання транспортної роботи в реальному міському циклі [4], [9], [13].

Для задачі визначення необхідного запасу ходу транспортних засобів категорії МЗ це має принципове значення, оскільки міська експлуатація формує підвищені вимоги до енергетичного резерву автобуса. Необхідний запас ходу повинен забезпечувати не тільки подолання номінальної довжини маршруту, а й

компенсацію втрат енергії, пов'язаних із повторюваними зупинками, коливанням маси транспортного засобу, затримками руху, сезонною роботою допоміжних систем та організаційними особливостями функціонування маршруту [3], [8], [14], [15].

1.3 Вплив умов руху на енергоспоживання автобуса

Енергоспоживання автобуса є змінною величиною, що формується під впливом сукупності умов руху, які визначають фактичний рівень витрат енергії під час виконання транспортної роботи. Для транспортних засобів категорії МЗ, що працюють на міських маршрутах, енергоспоживання не може розглядатися як стала паспортна характеристика, оскільки воно безпосередньо залежить від швидкісного режиму, інтенсивності розгонів і гальмувань, кількості зупинок, профілю маршруту, пасажиронавантаження, температурних умов, а також від тривалості роботи допоміжних систем. Саме тому в сучасних дослідженнях енергоспоживання міських автобусів оцінюється переважно за реальними умовами експлуатації, а не лише за результатами стандартизованих випробувань [16], [17], [18].

Одним із найбільш вагомих чинників є швидкісний режим руху. У міських умовах автобус рідко працює в усталеному режимі; натомість його рух характеризується постійним чергуванням фаз розгону, уповільнення, короткочасного рівномірного руху та повної зупинки. За таких умов зростає частка енергії, що витрачається на подолання інерції транспортного засобу, особливо при повторюваному наборі швидкості після кожної зупинки. Аналіз річних даних експлуатації міських електробусів показав, що середнє енергоспоживання істотно змінюється залежно від швидкості та часових умов роботи, а відновлення енергії під час рекуперативного гальмування становить значну частку від загальної енергії, необхідної для руху [18]. Отже, вплив швидкісного режиму на енергоспоживання є двоїстим: з одного боку, часті розгони підвищують витрати енергії, а з іншого — частина цієї енергії може бути

частково повернена, але лише за наявності відповідних технічних можливостей та сприятливого режиму гальмування [18].

Тісно пов'язаним зі швидкісним режимом є вплив кількості зупинок і щільності зупиночних пунктів. Для міських маршрутів характерною є висока частота зупинок, що збільшує кількість перехідних режимів і, відповідно, сумарні витрати енергії на тягу. Крім того, тривалість зупиночного простою опосередковано впливає на енергоспоживання через роботу допоміжних систем під час стоянки, а також через порушення ритмічності руху й подальшу потребу в інтенсивніших розгонах для компенсації втрат часу. Дослідження енергоспоживання електробусів на основі реальних маршрутних даних підтверджують, що показники транспортного потоку, тривалість рейсу та параметри зупиночного процесу належать до суттєвих чинників, які визначають витрати енергії на поїздку [17], [21].

Важливий вплив на енергоспоживання має дорожній профіль маршруту. Рух на підйомах потребує додаткових витрат енергії на подолання складової сили тяжіння, а на спусках частина цієї енергії може бути компенсована завдяки рекуперативному гальмуванню. Проте в реальних умовах рівень такої компенсації залежить від довжини ділянки, величини ухилу, завантаження транспортного засобу та режиму руху. Дослідження впливу дорожнього ухилу, пасажиронавантаження та рівня заторів на міські автобуси показало, що зі зростанням ухилу та ускладненням умов руху витрати пального й енергії зростають у відчутних межах [24]. Для міських маршрутів це означає, що навіть порівняно короткі ділянки з помітним поздовжнім ухилом можуть суттєво змінювати енергетичний баланс рейсу, особливо за умови повного пасажирського завантаження [24].

Окрему групу чинників становлять умови транспортного потоку. Інтенсивний міський рух, затримки на перехрестях, рух у щільному потоці, нерегулярність проїзду світлофорних об'єктів та періодичні затори призводять до збільшення тривалості рейсу й погіршення рівномірності руху. Це спричиняє додаткові втрати енергії не лише через збільшення кількості циклів розгін–

гальмування, а й через зростання часу роботи допоміжного обладнання під час вимушених простоїв. У роботах, присвячених моделюванню енергоспоживання електробусів за реальними даними, транспортні умови розглядаються як один із ключових блоків факторів, що визначають енергоспоживання на рівні окремої поїздки [16], [17], [22]. Це підтверджує доцільність урахування фактичної інтенсивності руху на маршруті під час визначення необхідного запасу ходу автобуса [16], [22].

Суттєвим чинником є маса транспортного засобу в експлуатації, яка для міського автобуса не є сталою. Зміна кількості пасажирів протягом рейсу безпосередньо впливає на повну масу автобуса, що, своєю чергою, визначає потребу в додатковій тязі під час розгону, русі на підйомах та в режимах частого маневрування. За результатами досліджень встановлено, що збільшення пасажирського навантаження зумовлює відчутне зростання енергетичних витрат, а його вплив є особливо помітним у міському циклі руху з частими зупинками та змінною швидкістю [23], [24]. У зв'язку з цим під час визначення енергоспоживання міського автобуса доцільно використовувати не споряджену, а експлуатаційну масу, яка відображає реальні умови перевезення пасажирів [23].

Не менш вагомими є кліматичні умови експлуатації. Зовнішня температура впливає на енергоспоживання автобуса двома основними шляхами: через зміну умов роботи тягової системи та через потребу в забезпеченні мікроклімату в салоні. У холодний період року зростають витрати енергії на опалення, підігрів окремих вузлів і підтримання робочого температурного режиму накопичувача енергії, а в теплий — на охолодження салону. Дані довготривалого моніторингу міського автобусного парку підтверджують наявність чіткої залежності між рівнем енергоспоживання, температурою зовнішнього середовища та середньою швидкістю руху [22]. Аналогічні висновки наведено і в дослідженнях Національної лабораторії відновлюваної енергії США, де наголошується, що низькі температури істотно скорочують фактичний запас ходу автобусів з електричною тягою [19], [20]. Отже, сезонний чинник повинен обов'язково

враховуватися під час розрахунку енергоспоживання автобуса на маршруті [20], [22].

Значний вплив на енергоспоживання має техніка керування транспортним засобом. За однакових дорожніх і транспортних умов різні водії можуть формувати відмінний профіль прискорень, інтенсивність гальмування та характер використання інерційного вибігу, що відображається на кінцевих енерговитратах. Сучасні дослідження з використанням інтелектуального аналізу даних свідчать, що керовані параметри руху належать до групи найбільш впливових ознак, які визначають енергоспоживання електробуса [23]. Це дає підстави стверджувати, що підвищення енергоефективності роботи міських автобусів пов'язане не лише з технічним удосконаленням рухомого складу, а й з оптимізацією стилю керування у межах реального міського циклу руху [17], [23].

Для узагальнення впливу умов руху на енергоспоживання автобуса доцільно подати їх систематизацію у вигляді табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Вплив основних умов руху на енергоспоживання автобуса

Умови руху	Механізм впливу	Очікуваний результат
Низька середня швидкість у щільному потоці	збільшення часу руху та кількості перехідних режимів	зростання сумарних витрат енергії на рейс
Часті розгони і гальмування	додаткові витрати енергії на подолання інерції	підвищення питомого енергоспоживання
Велика кількість зупинок	збільшення числа циклів «зупинка – розгін»	зростання витрат енергії на міському маршруті
Поздовжні ухили	додаткові витрати енергії на підйомах	збільшення енергоспоживання на складних ділянках профілю
Високе пасажиронавантаження	зростання повної маси транспортного засобу	підвищення витрат енергії під час розгону та руху
Низька або висока температура повітря	зростання навантаження на допоміжні системи	скорочення доступного запасу ходу
Нерівномірний стиль керування	збільшення інтенсивності прискорень і гальмувань	погіршення енергоефективності руху

Узагальнення сучасних наукових джерел дає підстави стверджувати, що енергоспоживання автобуса на міському маршруті формується внаслідок сумарної дії дорожніх, транспортних, кліматичних та експлуатаційних чинників, які взаємодіють між собою. Наприклад, вплив пасажиронавантаження посилюється на ділянках із поздовжніми ухилами, а вплив зовнішньої температури стає більш вираженим за низьких швидкостей і значної тривалості рейсу. Саме тому сучасні підходи до оцінювання енергоспоживання дедалі більше орієнтуються на багатofакторні моделі, побудовані за реальними даними маршрутної експлуатації [17], [22], [23].

Таким чином, умови руху є визначальним чинником формування енергоспоживання автобуса та, відповідно, необхідного запасу ходу транспортного засобу категорії МЗ. Для міських маршрутів найбільше значення мають нерівномірність швидкісного режиму, частота зупинок, профіль маршруту, інтенсивність транспортного потоку, пасажиронавантаження, кліматичні умови та стиль керування. Урахування цих чинників є необхідною передумовою для коректного розрахунку запасу ходу автобуса, що експлуатується на маршрутах міста Луцька [16], [17], [18], [20], [22], [23].

1.4 Методи оцінювання витрат енергії та визначення необхідного запасу ходу

Оцінювання витрат енергії автобуса та визначення необхідного запасу ходу є ключовими етапами обґрунтування параметрів транспортних засобів категорії МЗ для роботи на міських маршрутах. На сучасному етапі розвитку міського пасажирського транспорту ця задача розв'язується із застосуванням декількох груп методів, що відрізняються рівнем деталізації, складом вихідних даних, точністю результатів та придатністю до практичного використання. Узагальнення сучасних досліджень показує, що методи оцінювання енергоспоживання автобусів доцільно поділяти на нормативно-розрахункові, фізико-математичні, маршрутно-циклові, статистичні та методи, засновані на аналізі великих масивів

експлуатаційних даних [25], [26], [27]. Саме вибір адекватного методу визначає точність розрахунку необхідного запасу ходу, оскільки для міських маршрутів помилка в оцінюванні енергоспоживання безпосередньо впливає на вибір типу автобуса, режиму його енергозабезпечення та організацію роботи на лінії [26], [28].

Найпростішими є нормативно-розрахункові методи, що базуються на використанні усереднених питомих показників витрат енергії або пального на одиницю пробігу. Перевагою такого підходу є простота застосування та можливість швидкого попереднього оцінювання придатності транспортного засобу до роботи на конкретному маршруті. Водночас його недоліком є недостатнє врахування змінності швидкісного режиму, рельєфу, пасажиронавантаження, сезонних умов і впливу допоміжних систем. Саме тому усереднені нормативні значення можуть використовуватися переважно на стадії попереднього відбору варіантів, але не забезпечують достатньої точності для остаточного визначення необхідного запасу ходу автобуса на міському маршруті [25], [26]. Огляд сучасних підходів до оцінювання енергоспоживання електробусів свідчить, що моделі, засновані лише на середніх питомих витратах, мають обмежену придатність для маршрутів великих міст через високу варіативність умов експлуатації [25].

Більш обґрунтованими є фізико-математичні методи, у яких витрати енергії визначаються на основі балансу сил і потужностей, що діють на транспортний засіб у процесі руху. У межах такого підходу враховуються опір коченню, аеродинамічний опір, інерційні сили під час розгону, вплив поздовжніх ухилів, маса транспортного засобу та коефіцієнти корисної дії силової установки. Для електричних автобусів до розрахунку також включаються параметри накопичувача енергії, глибина допустимого використання його ємності, режим рекуперації та витрати енергії на допоміжне обладнання. Перевагою фізико-математичного підходу є його універсальність і можливість аналізу впливу окремих чинників на енергоспоживання, однак точність результатів істотно залежить від повноти вихідних даних та правильності прийнятих припущень

[25], [29]. У сучасних роботах підкреслюється, що такі моделі є особливо корисними для сценарного аналізу та порівняння альтернативних конфігурацій транспортного засобу або маршруту [29], [30].

Окрему і найбільш практично важливу групу становлять маршрутно-циклові методи. Їх сутність полягає в тому, що енергоспоживання автобуса визначається не за умовного усередненого пробігу, а за репрезентативним циклом руху конкретного маршруту. Такий цикл формується на основі реальних даних про швидкість руху, тривалість зупинок, розгони, гальмування, профіль маршруту, транспортні затримки та особливості пасажиропотоку. Саме цей підхід у сучасній практиці вважається найбільш доцільним для оцінювання енерговитрат міських автобусів, оскільки він найбільш повно відображає реальні умови експлуатації [16], [26], [31]. У робочих матеріалах Міжнародної ради з чистого транспорту наголошується, що розроблення реального циклу руху для цільового маршруту є базовим етапом моделювання витрат енергії та подальшого аналізу запасу ходу автобуса [16]. Подібний висновок міститься і в сучасних дослідженнях, присвячених оцінюванню енергоспоживання автобусів на основі реальних даних руху, де показано, що локалізовані цикли руху забезпечують вищу точність прогнозу порівняно з типовими стандартизованими циклами [31].

Для задач оперативного прогнозування дедалі ширше застосовуються статистичні методи та методи аналізу експлуатаційних даних. Їх особливістю є побудова залежностей між фактичним енергоспоживанням і сукупністю факторів, що характеризують умови роботи автобуса. До таких факторів належать середня швидкість, прискорення, тривалість простоїв, температура зовнішнього середовища, пасажиронавантаження, дорожній профіль, рівень заторів та стиль керування. Перевагою цього підходу є можливість врахування складних нелінійних залежностей, які складно формалізувати у традиційних розрахункових моделях [17], [22], [23]. Разом з тим використання статистичних методів потребує наявності достатнього обсягу достовірних експлуатаційних даних і не завжди дає змогу безпосередньо інтерпретувати фізичний зміст кожного параметра [25], [32]. Проте саме такі підходи сьогодні активно

використовуються для побудови прогнозних моделей енергоспоживання та підтримки рішень щодо експлуатації електробусів [23], [32].

Сучасним розвитком статистичних методів є методи, засновані на машинному навчанні та багатошарових прогностичних моделях. У відповідних дослідженнях показано, що такі моделі дають змогу досить точно прогнозувати витрати енергії на рейс або на окремі ділянки маршруту за умови врахування кінематичних показників руху, параметрів маршруту, погодних умов та характеристик транспортного засобу [23], [32], [33]. Особливо цінними вони є в задачах поточного прогнозування, де необхідно оперативно визначати очікуваний залишковий запас ходу автобуса в реальному часі. Водночас для магістерської кваліфікаційної роботи, орієнтованої на обґрунтування необхідного запасу ходу на конкретному міському маршруті, доцільніше використовувати підхід, що поєднує маршрутно-циклове моделювання з елементами фізико-математичного розрахунку, оскільки він є достатньо наочним, обґрунтованим і придатним для відтворення у практичних розрахунках [16], [19], [29].

У загальному вигляді визначення необхідного запасу ходу базується на встановленні енергії, потрібної для виконання заданого обсягу транспортної роботи, та на введенні експлуатаційного резерву. Спочатку розраховується або оцінюється витрата енергії на один рейс чи один оборотний рейс за конкретним маршрутом. Далі, з урахуванням кількості рейсів за зміну або відстані, яку автобус повинен подолати між двома послідовними циклами підзаряджання чи заправлення, визначається загальна потреба в енергії. Після цього вводиться резерв, який компенсує невизначеність умов руху, можливі затримки, сезонні коливання, старіння накопичувача енергії, нерівномірність пасажиронавантаження та інші фактори ризику [19], [20], [27]. Саме тому необхідний запас ходу завжди перевищує теоретично достатній пробіг, обчислений лише на основі середньої питомої витрати енергії [20], [27].

Для міських автобусів категорії М3 необхідний запас ходу доцільно трактувати як мінімально достатню відстань, яку автобус повинен гарантовано

подолати в реальних умовах маршруту з урахуванням установленого резерву без втрати здатності виконувати транспортну роботу. Такий підхід суттєво відрізняється від паспортного визначення запасу ходу, оскільки орієнтується не на ідеалізовані умови випробувань, а на конкретну систему експлуатації. У сучасних роботах з планування впровадження електробусів підкреслюється, що рішення щодо вибору місткості накопичувача енергії або схеми підзаряджання мають базуватися саме на маршрутному аналізі діапазону реального пробігу, а не на рекламних характеристиках виробника [16], [28], [34]. Це особливо важливо для міських маршрутів, де навіть відносно невелике відхилення фактичних витрат енергії від розрахункових може призвести до порушення графіка або необхідності позапланового зняття автобуса з лінії [28].

Узагальнення сучасних підходів доцільно подати у вигляді табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Основні методи оцінювання витрат енергії та визначення необхідного запасу ходу автобуса

Метод	Сутність методу	Переваги	Обмеження
Нормативно-розрахунковий	використання усереднених питомих витрат енергії на пробіг	простота, швидкість попередньої оцінки	низька точність у змінних міських умовах
Фізико-математичний	розрахунок енергії на основі сил опору, маси, швидкості, ухилів і коефіцієнтів ефективності	можливість аналізу впливу окремих факторів	потребує великого обсягу вихідних даних
Маршрутно-цикловий	моделювання енергоспоживання за реальним циклом руху конкретного маршруту	висока практична достовірність	потребує збирання маршрутних даних
Статистичний	побудова емпіричних залежностей за результатами спостережень	врахування реальної варіативності умов	залежність від якості та повноти вибірки
На основі машинного навчання	прогнозування витрат енергії за великою кількістю параметрів і зв'язків між ними	висока точність прогнозу в складних умовах	складність застосування та інтерпретації

З позицій практичного використання для задачі цієї роботи найбільш доцільним є комбінований методичний підхід. Його сутність полягає у поєднанні маршрутно-циклового опису реального руху автобуса на міському маршруті з розрахунком витрат енергії за елементами руху та подальшим введенням експлуатаційного резерву. Такий підхід, з одного боку, спирається на реальні умови експлуатації вулиць міста, а з іншого — забезпечує достатню аналітичну прозорість розрахунку. Саме тому він найбільш придатний для визначення необхідного запасу ходу автобуса категорії МЗ у межах магістерського дослідження, орієнтованого на конкретний маршрут міста Луцька [16], [19], [29], [34].

Таким чином, сучасні методи оцінювання витрат енергії та визначення необхідного запасу ходу автобуса еволюціонували від спрощених нормативних розрахунків до багатofакторних маршрутно-орієнтованих моделей, заснованих на реальних експлуатаційних даних. Для міських маршрутів найбільш обґрунтованими є ті підходи, які враховують фактичний цикл руху, змінність швидкості, затримки, рельєф, пасажиронавантаження, кліматичні умови та резерв енергії на невизначеність. Саме використання такого підходу створює методичну основу для коректного визначення необхідного запасу ходу автобуса категорії МЗ в умовах міської експлуатації [17], [22], [23], [27], [34].

1.5 Аналіз сучасних досліджень і підходів щодо вибору раціонального запасу ходу автобусів

Аналіз сучасних досліджень засвідчує, що раціональний запас ходу автобуса сьогодні розглядають не як максимально можливий паспортний показник, а як експлуатаційно обґрунтовану величину, достатню для стабільного виконання маршрутної роботи за конкретних умов руху. У більшості праць підкреслюється, що вибір запасу ходу повинен спиратися на реальні параметри маршруту, режим роботи транспорту, сезонні умови, пасажиронавантаження та

прийняту схему заряджання, оскільки саме ці чинники визначають фактичне енергоспоживання автобуса [16], [19], [25].

У сучасній науковій літературі можна виокремити два основні підходи до вибору раціонального запасу ходу. Перший підхід орієнтований на збільшення ємності накопичувача енергії для забезпечення максимальної автономності автобуса протягом зміни. Другий підхід передбачає помірний запас ходу, але поєднує його з продуманою організацією заряджання на кінцевих зупинках або в депо. Дослідники зазначають, що надмірне збільшення запасу ходу не завжди є найкращим рішенням, оскільки воно призводить до підвищення маси автобуса, збільшення вартості, ускладнення зарядної інфраструктури та зростання сукупних витрат протягом життєвого циклу транспортного засобу [28], [35].

Вагоме місце в сучасних дослідженнях займає маршрутно-орієнтований підхід. Його сутність полягає у тому, що раціональний запас ходу визначається не за усередненими довідковими значеннями, а за характеристиками конкретного маршруту. При цьому найбільш значущими вважаються довжина маршруту, середня швидкість руху, щільність зупинок, добовий пробіг, температура зовнішнього середовища та інтенсивність пасажиропотоку. За результатами новітніх досліджень саме довжина маршруту, температура та експлуатаційна швидкість є серед найвпливовіших факторів, що визначають потребу у збільшенні запасу ходу або навіть у розширенні автобусного парку після переходу на електричну тягу [22], [23], [36].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із вибором раціонального запасу ходу з позицій мінімізації загальних витрат. У таких роботах доводиться, що оптимальним є не найбільший можливий запас ходу, а такий, який забезпечує надійність перевезень без надлишкової маси батареї та без зайвих капітальних вкладень. Крім того, встановлено, що поліпшення умов руху автобусів, зокрема зменшення заторів і надання пріоритету громадському транспорту, може знизити потребу у великих батареях і, відповідно, зменшити вартість експлуатації електробусів [35], [37].

В українських публікаціях також простежується підхід, за яким вибір запасу ходу слід узгоджувати з особливостями маршрутної мережі, режимами заряджання та економічною доцільністю впровадження електробусів. Підкреслюється, що надлишковий запас ходу є небажаним, оскільки збільшує масу накопичувачів енергії та ускладнює конструкцію транспортного засобу, тоді як недостатній запас ходу знижує експлуатаційну надійність перевезень [27], [38].

Отже, сучасні дослідження дають підстави стверджувати, що раціональний запас ходу автобуса слід визначати як компроміс між експлуатаційною надійністю, енергоефективністю, вартістю транспортного засобу та можливостями зарядної інфраструктури. Для міських маршрутів найбільш обґрунтованим є підхід, за якого запас ходу визначають на основі параметрів конкретного маршруту з урахуванням обов'язкового резерву на сезонні, транспортні та організаційні відхилення.

Таблиця 1.5 – Сучасні підходи до вибору раціонального запасу ходу автобуса

Підхід	Сутність	Основна перевага	Основне обмеження
Максимізація автономності	вибір великої ємності накопичувача енергії для роботи без проміжного заряджання	висока автономність автобуса	збільшення маси та вартості
Маршрутно-орієнтований	визначення запасу ходу за параметрами конкретного маршруту	висока відповідність реальним умовам експлуатації	потребує детальних вихідних даних
Інфраструктурно-узгоджений	вибір запасу ходу з урахуванням місць і режимів заряджання	зменшення потреби у надлишковій ємності батареї	залежність від зарядної інфраструктури
Економічно оптимізований	вибір запасу ходу за критерієм мінімуму сукупних витрат	раціональне співвідношення витрат і надійності	складність багатофакторного обґрунтування

Саме такий підхід доцільно покласти в основу подальших розрахунків для автобуса категорії МЗ, що працює на маршруті міста Луцька [16], [20], [28], [36].

Висновки до розділу

У розділі узагальнено теоретичні засади визначення запасу ходу транспортних засобів категорії МЗ та встановлено, що цей показник є одним із ключових техніко-експлуатаційних параметрів автобуса, який визначає його здатність стабільно виконувати транспортну роботу на маршруті без порушення графіка руху та необхідності позапланового поповнення енергетичного ресурсу. Обґрунтовано, що для міських автобусів доцільно розмежовувати паспортний, нормативний і необхідний запас ходу, причому саме необхідний запас ходу має найбільше практичне значення, оскільки враховує реальні умови експлуатації маршруту та експлуатаційний резерв.

Встановлено, що експлуатація автобусів на міських маршрутах характеризується високою змінністю умов руху, значною частотою зупинок, нерівномірністю пасажиронавантаження, впливом транспортних затримок і сезонною зміною режимів роботи допоміжних систем. Це зумовлює специфічні вимоги до оцінювання запасу ходу, оскільки в умовах міського циклу руху фактичні витрати енергії суттєво відрізняються від паспортних або усереднених значень.

На основі аналізу сучасних досліджень визначено, що енергоспоживання автобуса формується під впливом комплексу взаємопов'язаних чинників, серед яких найбільше значення мають швидкісний режим руху, частота розгонів і гальмувань, кількість зупинок, поздовжній профіль маршруту, інтенсивність транспортного потоку, пасажиронавантаження, кліматичні умови та стиль керування транспортним засобом. Установлено, що для міських маршрутів саме ці чинники визначають реальний рівень витрат енергії та, відповідно, потребу в необхідному запасі ходу.

Проаналізовано сучасні методи оцінювання витрат енергії та визначення запасу ходу автобуса. Показано, що спрощені нормативно-розрахункові методи можуть бути використані лише для попередніх оцінок, тоді як для обґрунтованого визначення необхідного запасу ходу найбільш доцільними є

маршрутно-циклові та комбіновані підходи, що враховують реальні умови руху на конкретному маршруті, параметри транспортного засобу та резерв енергії на невизначеність експлуатаційних умов.

У результаті аналізу сучасних наукових підходів до вибору раціонального запасу ходу встановлено, що його слід визначати не за принципом максимальної автономності, а як компроміс між експлуатаційною надійністю, енергоефективністю, вартістю рухомого складу та можливостями системи енергозабезпечення. Для міських маршрутів найбільш обґрунтованим є маршрутно-орієнтований підхід, за якого раціональний запас ходу визначається за параметрами конкретного маршруту з урахуванням сезонних, транспортних та організаційних відхилень.

Отже, теоретичний аналіз підтвердив, що визначення необхідного запасу ходу транспортних засобів категорії МЗ повинно базуватися на комплексному врахуванні умов міської експлуатації, реального циклу руху та багатofакторного характеру енергоспоживання автобуса. Це створює методичну основу для подальшого аналізу умов роботи автобуса на міському маршруті м. Луцька та виконання практичних розрахунків у наступних розділах роботи.

2 АНАЛІЗ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОБУСА НА МІСЬКОМУ МАРШРУТІ ЛУЦЬКА

2.1 Загальна характеристика маршрутної мережі міста Луцька та вибір об'єкта дослідження

Маршрутна мережа міста Луцька є основою функціонування міського пасажирського транспорту та забезпечує транспортні зв'язки між житловими районами, центральною частиною міста, об'єктами соціальної інфраструктури, місцями прикладання праці та приміськими територіями Луцької міської територіальної громади. За даними офіційного транспортного порталу Луцької міської ради, у місті функціонує розгалужена мережа автобусних маршрутів, яка охоплює як радіальні, так і діаметральні та кільцеві сполучення, що дає змогу забезпечувати транспортну доступність різних районів міста [39]. Особливістю транспортної системи Луцька є поєднання автобусного і тролейбусного сполучення, що формує змішану модель міських перевезень і підвищує значення правильної організації маршрутної мережі в цілому [39], [40].

Сучасний розвиток громадського транспорту Луцька пов'язаний з упровадженням екологічних і розумних технологій, удосконаленням інформаційного забезпечення пасажирів, електронного квитка, диспетчеризації та оновленням підходів до планування маршрутів [40], [41]. У міській транспортній політиці простежується орієнтація на підвищення ефективності пасажирських перевезень, покращення доступності транспортних послуг та більш обґрунтований підбір рухомого складу для конкретних умов експлуатації [41], [42]. У цьому контексті дослідження параметрів роботи окремого автобусного маршруту є доцільним не лише з позицій технічної оцінки транспортного засобу, а й з точки зору удосконалення функціонування всієї міської маршрутної мережі [41].

Для подальшого дослідження в роботі обрано автобусний маршрут № 32 «Вересневе – с. Липини», який офіційно присутній у чинній маршрутній мережі міста Луцька [39]. Згідно з рішеннями та інформаційними повідомленнями

Луцької міської ради, маршрут № 32 було сформовано для забезпечення сполучення між мікрорайоном Вересневе, центральною частиною міста та напрямком на с. Липини, тобто він поєднує периферійні житлові зони з важливими міськими транспортними коридорами [43]. Схема його проходження охоплює вулиці Корольова, Львівську, Ковельську, Глушець, Паркову, Волі, Перемоги, Соборності, В'ячеслава Чорновола, Ветеранів, Відродження, Рівненську, Теремнівську та ділянки у с. Липини [43]. Таким чином, маршрут проходить через різнотипні за характером руху ділянки — периферійні, магістральні, центральні та наближені до приміської забудови, що є важливим для дослідження витрат енергії та потрібного запасу ходу автобуса [43].

Вибір саме маршруту № 32 як об'єкта дослідження зумовлений кількома обставинами. По-перше, цей маршрут є достатньо протяжним і охоплює значну частину міської території, що дає змогу дослідити вплив різних дорожніх і транспортних умов на енергоспоживання автобуса [43], [44]. По-друге, маршрут має виражений діаметральний характер, оскільки з'єднує віддалені райони через центральну частину Луцька, а отже характеризується суттєвою зміною інтенсивності руху, пасажиронавантаження і швидкісного режиму на різних ділянках [43], [45]. По-третє, за офіційним розкладом руху маршрут № 32 обслуговується протягом усього дня, починаючи з ранкових годин і до вечора, що свідчить про його регулярний характер та придатність для аналізу добового циклу роботи автобуса [44]. Зокрема, на офіційному сторінці розкладу для маршруту А32 наведено регулярні відправлення у робочі та вихідні дні, а також проходження через ключові зупинки, у тому числі в районі Соборності, що підтверджує його важливу роль у внутрішньоміських перевезеннях [44].

Ще одним аргументом на користь вибору маршруту № 32 є те, що він поєднує різні за транспортною характеристикою ділянки міського простору. На периферійних відрізках автобус працює в умовах меншої щільності руху, тоді як у центральній та серединній частинах міста потрапляє в середовище з вищою інтенсивністю транспортного потоку, більшою кількістю зупинок, світлофорних об'єктів і потенційних затримок. Саме така змінність умов руху є цінною для

дослідження, оскільки дає можливість оцінити енергоспоживання автобуса не в спрощених, а в реальних та неоднорідних експлуатаційних умовах [44], [45]. Крім того, маршрут обслуговує напрямки, пов'язані з житловими масивами, соціальними об'єктами та міжрайонними зв'язками, що дає підстави розглядати його як репрезентативний для міських автобусних перевезень Луцька [39], [43].

Для узагальнення причин вибору маршруту № 32 доцільно подати їх у вигляді табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні причини вибору маршруту № 32 як об'єкта дослідження

Критерій	Характеристика маршруту № 32	Значення для дослідження
Просторове охоплення	сполучає мікрорайон Вересневе, центральну частину Луцька та с. Липини	дає змогу оцінити роботу автобуса на різних типах міських ділянок
Характер маршруту	діаметральний, із проходженням через центр міста	забезпечує змінність умов руху та пасажиронавантаження
Регулярність роботи	офіційно діючий маршрут із розкладом руху упродовж дня	дає можливість аналізувати повний цикл експлуатації
Складність умов руху	поєднання периферійних, магістральних і центральних ділянок	дозволяє коректно оцінити вплив умов руху на витрати енергії
Репрезентативність	обслуговує житлові райони та важливі міські напрямки	робить результати придатними для практичного використання

Отже, маршрутна мережа міста Луцька характеризується достатньо розгалуженою структурою та поєднанням автобусних і тролейбусних сполучень, а її сучасний розвиток орієнтований на підвищення ефективності та якості перевезень [39], [40], [41]. У межах цієї мережі автобусний маршрут № 32 є доцільним об'єктом дослідження, оскільки він поєднує периферійні та центральні частини міста, працює в різномірних умовах руху, має регулярний характер експлуатації та є репрезентативним для оцінювання необхідного запасу ходу автобуса категорії М3 в умовах міста Луцька [43], [44], [45].

2.2 Характеристика обраного міського автобусного маршруту

Об'єктом дослідження у роботі є автобусний маршрут № 32, який у чинній маршрутній мережі Луцької міської територіальної громади визначений як маршрут «Вересневе – с. Липини». Наявність цього маршруту в актуальному переліку міських автобусних маршрутів підтверджується офіційним транспортним порталом Луцької міської ради, а також інформацією профільного відділу транспорту, де маршрут № 32 віднесено до діючих міських автобусних маршрутів громади. Там само зазначено, що перевезення на маршруті здійснює товариство «Бест Ленад Груп». [39], [40]

Маршрут № 32 має діаметральний характер і забезпечує транспортне сполучення між мікрорайоном Вересневе, центральною частиною Луцька та напрямком на с. Липини. Відповідно до оприлюдненої схеми руху, автобус курсує вулицями Корольова, Валерії Новодворської, Цукровою, Полонківською, Львівською, Червоного Хреста, Ковельською, Глушець, Парковою, Волі, Шопена, Перемоги, Соборності, В'ячеслава Чорновола, Ветеранів, Відродження, Рівненською, Теремнівською та далі у межах с. Липини. Така траєкторія руху свідчить, що маршрут проходить через різні за транспортними умовами зони міста: периферійні житлові райони, магістральні вулиці, центральну частину та приміську ділянку. [43]

З експлуатаційної точки зору маршрут № 32 є показовим, оскільки поєднує ділянки з різною інтенсивністю транспортного потоку, різною частотою зупинок і неоднаковим швидкісним режимом. У центральній частині міста автобус працює в умовах більшої щільності руху, більшої кількості регульованих перехресть і вищої ймовірності затримок, тоді як на периферійних відрізках умови руху є відносно стабільнішими. У сучасних дослідженнях підкреслюється, що саме зміна середньої швидкості на маршруті, варіація часу поїздки та нерівномірність інтервалів руху істотно впливають на якість транспортного обслуговування та режим роботи автобусного маршруту. [13], [46]

За офіційним розкладом руху маршруту А32, розміщеним на транспортному порталі Луцька, рух автобусів здійснюється протягом усього дня. Для зупинки «Школа № 16», яка є однією з кінцевих точок маршруту, перші відправлення у робочі дні відбуваються о 06:20 та 06:40, а останні – о 22:15 та 22:35; аналогічний режим наведено і для вихідних та святкових днів. Такий графік дає підстави віднести маршрут № 32 до маршрутів із тривалим добовим періодом експлуатації, що є важливим для подальшого визначення добової потреби в енергії та необхідного запасу ходу автобуса. [44]

Структура розкладу руху також свідчить, що маршрут має відносно регулярний характер обслуговування. Упродовж більшої частини дня на кінцевій зупинці простежується повторюваність відправлень переважно через 15–20 хв, хоча в окремі періоди можливі відхилення, пов'язані з добовою нерівномірністю транспортного процесу. Для міських маршрутів така характеристика є важливою, оскільки інтервал руху, тривалість оборотного рейсу та регулярність відправлень прямо впливають на вимоги до рухомого складу та на організацію його роботи на лінії. [44], [47]

З позицій технічної експлуатації маршрут № 32 є придатним для оцінювання необхідного запасу ходу автобуса ще й тому, що він включає значну кількість проміжних зупинок та проходить через ділянки з різною динамікою руху. Це означає, що в межах одного маршруту поєднуються часті розгони і гальмування, зупиночні простой, коливання пасажиронавантаження та зміна середньої експлуатаційної швидкості. У сучасних дослідженнях доведено, що саме кількість зупинок, характер міського циклу руху та параметри маршруту істотно впливають на витрати енергії автобуса, а отже мають враховуватися під час оцінювання раціонального запасу ходу. [17], [22], [48]

Для узагальнення основних характеристик обраного маршруту доцільно подати їх у вигляді табл. 2.2, схема маршруту наведена на рис. 2.1.

Таблиця 2.2 – Основні характеристики автобусного маршруту № 32

Показник	Характеристика
Номер маршруту	32
Найменування маршруту	Вересневе – с. Липини
Тип маршруту	міський автобусний, діаметральний
Основні зони проходження	периферійна житлова забудова – центральна частина міста – приміський напрям
Характер руху	змішані умови: магістральні вулиці, центральні ділянки, зони транспортних затримок
Режим роботи	упродовж усього дня

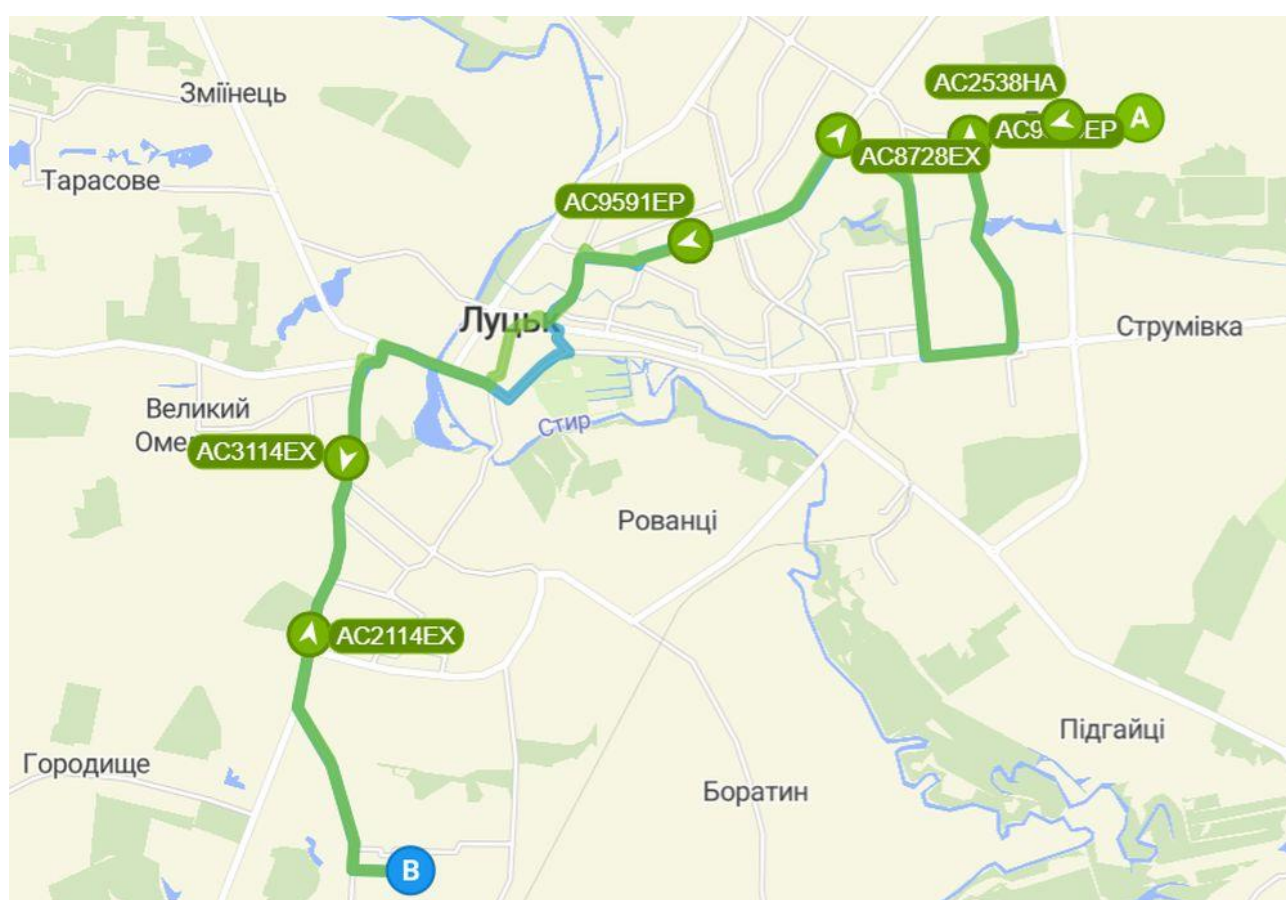


Рисунок 2.1 – Схема маршруту № 32, м. Луцьк

Отже, автобусний маршрут № 32 у місті Луцьку є типовим прикладом міського маршруту зі складними та неоднорідними умовами експлуатації. Його характеристиками є діаметральна схема руху, проходження через різні функціональні зони міста, тривалий добовий режим роботи та регулярне транспортне обслуговування. Сукупність цих ознак дає підстави розглядати

маршрут № 32 як репрезентативний об'єкт для подальшого аналізу дорожніх, транспортних та експлуатаційних умов роботи автобуса і для визначення необхідного запасу ходу транспортного засобу категорії МЗ в умовах міста Луцька. [39], [43], [44].

2.3 Умови роботи автобуса на маршруті

Дорожні, транспортні та експлуатаційні умови роботи автобуса на міському маршруті № 32 у місті Луцьку визначаються поєднанням різних за функціональним призначенням вуличних ділянок, нерівномірністю транспортного потоку впродовж доби та тривалим режимом роботи маршруту. Відповідно до чинної схеми руху, маршрут сполучає мікрорайон Вересневе із селом Липини та проходить через вулиці і проспекти, що належать як до периферійних, так і до магістральних і центральних міських напрямків. Така траєкторія руху формує неоднорідні умови експлуатації, за яких автобус послідовно працює на ділянках із відносно вільним рухом, у зонах підвищеної інтенсивності транспорту, а також у місцях імовірних затримок поблизу перехресть і зупиночних пунктів [43], [44].

З дорожньої точки зору маршрут № 32 включає кілька типових груп ділянок. Перша група — це периферійні відрізки в районах Вересневого та Липин, де автобус рухається в умовах меншої щільності транспортного потоку та відносно стабільнішого швидкісного режиму. Друга група — магістральні міські вулиці та проспекти, на яких інтенсивність руху є вищою, а режим руху ускладнюється світлофорним регулюванням, маневрами інших транспортних засобів та зупиночними процесами. Третя група — центральні та наближені до центру ділянки, де зростає вплив конфліктних точок, перетинів транспортних потоків і коротких інтервалів між зупинками. У наукових дослідженнях підтверджується, що саме тип вуличної ділянки, щільність перехресть і характер дорожнього середовища суттєво впливають на швидкість сполучення, затримки та енерговитрати міського автобуса [46], [49].

Транспортні умови на маршруті № 32 характеризуються добовою нерівномірністю. У години найбільшого попиту, особливо вранці та наприкінці робочого дня, автобус потрапляє в умови більшої завантаженості вуличної мережі, що знижує середню експлуатаційну швидкість і збільшує тривалість рейсу. Це особливо характерно для ділянок, які проходять через центральну частину міста та основні проспекти. Водночас у міжпікові періоди рух є стабільнішим, а часові витрати на виконання рейсу — меншими. У сучасних дослідженнях міських автобусних систем встановлено, що саме коливання швидкості руху та повторюваність затримок є одними з ключових чинників, які визначають якість транспортного обслуговування та фактичні умови експлуатації маршруту [13], [46], [50].

Істотне значення для роботи автобуса на маршруті має зупиночний режим. Маршрут № 32 охоплює значну кількість зупинок громадського транспорту, а отже в процесі рейсу автобус багаторазово переходить із режиму руху в режим зупинки та знову виконує розгін. Саме така циклічність є характерною ознакою міських автобусних перевезень. Кожна зупинка зумовлює не лише втрати часу на посадку та висадку пасажирів, а й додаткові енерговитрати, пов'язані з повторним набором швидкості. За результатами сучасних досліджень, тривалість зупиночного простою, частота зупинок і параметри маневрування на зупинках істотно впливають на регулярність руху та витрати енергії автобуса [10], [17], [21].

Експлуатаційні умови маршруту № 32 визначаються також режимом його роботи протягом доби. Згідно з офіційним розкладом, маршрут функціонує від ранкових до вечірніх годин, що дає підстави розглядати його як маршрут із тривалим періодом добової експлуатації [44]. Така особливість означає, що автобус протягом зміни працює в різних зовнішніх умовах: змінюється інтенсивність руху, пасажиронавантаження, температура повітря, тривалість простоїв та режим використання допоміжних систем. Для задачі визначення необхідного запасу ходу це має принципове значення, оскільки добова робота на

маршруті повинна оцінюватися не за окремим рейсом, а як сукупність експлуатаційних циклів у змінних умовах [19], [20], [44].

Важливим експлуатаційним чинником є сезонність. Для Луцька характерна виражена зміна температурних умов упродовж року, що зумовлює додаткові витрати енергії на опалення салону взимку та вентиляцію або кондиціювання у теплий період. У поєднанні з частими зупинками це підсилює коливання фактичного енергоспоживання автобуса на маршруті. Сучасні дослідження експлуатації електробусів підтверджують, що холодна погода, міський цикл руху та значна тривалість маршруту здатні істотно зменшувати фактичний запас ходу транспортного засобу, тому сезонний фактор обов'язково має враховуватися в подальших розрахунках [8], [20], [22].

З погляду експлуатації рухомого складу маршрут № 32 є складним через поєднання кількох видів навантаження на автобус: часті розгони й гальмування, змінне пасажиронавантаження, багаторазові відкривання дверей, тривалу роботу на лінії та рух у неоднорідному міському середовищі. Такі умови спричиняють підвищені вимоги до енергоефективності, надійності допоміжних систем і правильного вибору запасу ходу. У сучасних дослідженнях підкреслюється, що маршрути з вираженою зміною дорожніх умов, швидкісного режиму та пасажиронавантаження є найбільш показовими для обґрунтування реальної потреби в енергетичному ресурсі автобуса [17], [22], [48].

Для узагальнення дорожніх, транспортних та експлуатаційних умов роботи автобуса на маршруті № 32 доцільно подати їх у вигляді табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Характеристика умов роботи автобуса на маршруті № 32

Група умов	Характеристика	Вплив на роботу автобуса
Дорожні	поєднання периферійних, магістральних і центральних ділянок; наявність регульованих перехресть і зупинок	формують змінний швидкісний режим і нерівномірні витрати енергії
Транспортні	добова нерівномірність інтенсивності руху, затримки у центральній частині міста, коливання швидкості сполучення	збільшують тривалість рейсу та підвищують варіативність енергоспоживання

Група умов	Характеристика	Вплив на роботу автобуса
Зупиночні	значна кількість зупинок, повторювані цикли «зупинка – розгін»	підвищують витрати енергії та знижують стабільність графіка
Експлуатаційні	тривалий режим роботи протягом дня, змінне пасажиронавантаження, сезонна зміна умов	ускладнюють визначення потрібного запасу ходу за усередненими показниками
Кліматичні	вплив температури на роботу допоміжних систем і комфорт у салоні	збільшують добові витрати енергії в зимовий та літній періоди

Отже, дорожні, транспортні та експлуатаційні умови роботи автобуса на маршруті № 32 у місті Луцьку є неоднорідними та досить напруженими з точки зору енергетичних витрат. Маршрут поєднує периферійні й центральні ділянки, характеризується значною кількістю зупинок, добовою нерівномірністю інтенсивності руху, тривалим режимом експлуатації та впливом сезонних чинників. Саме тому цей маршрут є придатним для подальшого аналізу параметрів руху автобуса та розрахунку необхідного запасу ходу транспортного засобу категорії МЗ в умовах міської експлуатації [43], [44], [48], [50].

2.4 Формування вихідних даних для визначення необхідного запасу ходу

Формування вихідних даних для визначення необхідного запасу ходу автобуса є проміжною ланкою між аналітичним розглядом умов експлуатації маршруту та подальшими розрахунками. З урахуванням структури попередніх підпунктів розділу 2, зафіксованої в робочому тексті кваліфікаційної роботи, вихідні дані доцільно систематизувати за кількома групами: маршрутні, часові, транспортно-експлуатаційні, кліматичні та технічні. Такий підхід дає змогу перейти від загальної характеристики маршруту до кількісного обґрунтування необхідного запасу ходу автобуса категорії МЗ на маршруті № 32 .

Першу групу становлять маршрутні дані, які характеризують сам об'єкт дослідження. До них належать схема проходження маршруту, напрямки руху, перелік основних вулиць, характер трасування через периферійні, магістральні

та центральні ділянки міста, а також кількість зупиночних пунктів. Для маршруту № 32 офіційно підтверджено сполучення «Вересневе – с. Липини», а також проходження через вулиці Корольова, Полонківську, Львівську, Ковельську, Глушець, Волі, Перемоги, Соборності, В'ячеслава Чорновола, Відродження, Рівненську та Теремнівську, що свідчить про неоднорідність умов руху на маршруті. Саме маршрутні параметри є базою для подальшого визначення довжини рейсу, кількості зупинок, середньої відстані між ними та загального характеру циклу руху автобуса.

Друга група охоплює часові параметри роботи маршруту. До них належать час початку і завершення роботи на лінії, інтервали руху, тривалість транспортної роботи протягом доби, а також орієнтовна тривалість одного оборотного рейсу. За даними офіційного розкладу руху, маршрут № 32 обслуговується протягом більшої частини доби, що дає підстави використовувати його як маршрут із тривалим режимом експлуатації. Для задачі визначення необхідного запасу ходу це є принципово важливим, оскільки потреба в енергії повинна оцінюватися не лише на один рейс, а на весь інтервал роботи автобуса між послідовними циклами поповнення енергетичного ресурсу. Сучасні дослідження показують, що саме поєднання маршрутних і розкладних даних є необхідною основою для оцінювання сукупної потреби в енергії на обслуговування маршруту.

Третю групу становлять транспортно-експлуатаційні дані, які безпосередньо впливають на енергоспоживання автобуса. До них доцільно віднести середню експлуатаційну швидкість, кількість і тривалість зупинок, частоту розгонів і гальмувань, характер транспортних затримок, рівень пасажиронавантаження та поздовжній профіль маршруту. Саме ці параметри найчастіше використовуються в сучасних моделях оцінювання витрат енергії автобусів. За даними новітніх досліджень, найінформативнішими вхідними змінними для прогнозу енергоспоживання є температура, середня швидкість, кількість зупинок, ухили, розклад руху та середня кількість пасажирів. Крім того, модель, побудована на відкритих розкладних і маршрутних даних, підтвердила, що для розрахунку енергії на маршруті достатньо включити топологію маршруту,

густоту зупинок, середню швидкість руху, температуру та середнє пасажиронавантаження.

Четверту групу формують кліматичні та сезонні параметри. Для міського автобуса вони мають велике значення через відчутний вплив на роботу допоміжних систем і фактичний рівень витрат енергії. У розрахунках необхідного запасу ходу доцільно враховувати щонайменше температуру зовнішнього повітря та сезон експлуатації, а за можливості — також характер опадів і дорожніх умов. У сучасних дослідженнях показано, що за зимових умов енергоспоживання електробусів може зростати до 26 % порівняно з теплим періодом року внаслідок підвищеного навантаження на систему опалення та погіршення умов руху. Це означає, що під час формування вихідних даних необхідно передбачити не лише типовий, а й несприятливий сезонний сценарій експлуатації.

П'яту групу становлять технічні параметри автобуса, які приймаються для подальших розрахунків. До них належать споряджена та повна маса транспортного засобу, місткість, тип силової установки, корисна ємність накопичувача енергії або запас пального, а також питомі витрати енергії за різних режимів руху. Якщо дослідження орієнтоване на електробус категорії МЗ, необхідно також враховувати допустиму глибину використання батареї, частку енергії, доступну для руху, та експлуатаційний резерв. У сучасних підходах до моделювання енергоспоживання автобусів технічні характеристики транспортного засобу поєднуються з параметрами маршруту і розкладу, що дає змогу визначити не паспортний, а необхідний запас ходу для конкретних умов роботи.

Для подальшого розрахунку доцільно прийняти, що структура вихідних даних для маршруту № 32 повинна бути зведена в єдину систему, подану в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Основні вихідні дані для визначення необхідного запасу ходу автобуса на маршруті № 32

Група даних	Показники	Призначення у розрахунку
Маршрутні	схема маршруту, довжина рейсу, кількість зупинок, характер траси	формують основу розрахункового циклу руху
Часові	початок і завершення роботи, інтервали руху, тривалість оборотного рейсу	дають змогу визначити добовий обсяг транспортної роботи
Транспортно-експлуатаційні	середня швидкість, затримки, пасажиронавантаження, частота розгонів і гальмувань	визначають фактичне енергоспоживання на маршруті
Кліматичні	температура зовнішнього повітря, сезон експлуатації	враховують зміну витрат енергії на допоміжні системи
Технічні	маса автобуса, місткість, тип приводу, доступний енергетичний ресурс	задають енергетичні можливості транспортного засобу
Резервні	коефіцієнт експлуатаційного резерву	забезпечують надійність роботи в умовах невизначеності

Числові значення, наведені в табл. 2.5, формують основу для подальшого визначення необхідного запасу ходу автобуса на маршруті № 32. До розрахунку приймаються як офіційно встановлені параметри функціонування маршруту, так і розрахунково-прийняті величини, що характеризують режим роботи маршруту впродовж доби, сезонність експлуатації та необхідний експлуатаційний резерв. Такий підхід дає змогу перейти від загального опису умов роботи маршруту до побудови розрахункового циклу руху та оцінювання сукупної потреби автобуса в енергетичному ресурсі.

Таблиця 2.5 – Числові значення вихідних параметрів маршруту № 32 для визначення необхідного запасу ходу

Параметр	Значення
Номер маршруту	32
Назва маршруту	1 маршрут
Кількість автобусів на маршруті	10 од.
Кількість автобусів у вихідні та святкові дні	10 од.
Розрахунковий інтервал руху в години пік	12 хв

Параметр	Значення
Час першого відправлення від кінцевої зупинки	06:20
Час останнього відправлення від кінцевої зупинки	22:35
Тривалість роботи маршруту протягом доби	16 год 15 хв
Орієнтовний інтервал руху упродовж більшої частини дня	15–20 хв
Тип маршруту	діаметральний
Кількість основних вуличних ділянок у схемі руху	19
Кількість основних функціональних зон маршруту	3
Характер добової інтенсивності руху	3 періоди
Кількість сезонних сценаріїв для розрахунку	2
Коефіцієнт експлуатаційного резерву	1,15–1,25
Протяжність маршруту	21,1 км, оборотний – 42,2 км
Час руху оборотного рейсу	1,50 год
Середня експлуатаційна швидкість руху	28,1 км/год

Отже, формування вихідних даних для визначення необхідного запасу ходу автобуса на маршруті № 32 повинно спиратися на поєднання офіційних відомостей про маршрут і розклад руху з параметрами транспортного процесу, кліматичними умовами та технічними характеристиками рухомого складу. Найбільш обґрунтованим є підхід, за якого до розрахунку включаються не лише довжина маршруту і час роботи, а й середня швидкість, кількість зупинок, температура, пасажиронавантаження та резерв енергії на несприятливі умови. Саме така система вихідних даних забезпечує методичну основу для подальшого визначення необхідного запасу ходу автобуса категорії МЗ в умовах міського маршруту Луцька.

2.5 Обґрунтування розрахункового циклу роботи автобуса на маршруті

Розрахунковий цикл роботи автобуса на маршруті є методичною основою для подальшого визначення витрат енергії та необхідного запасу ходу транспортного засобу. Для міських перевезень такий цикл повинен відображати не лише формальну довжину маршруту, а й реальні умови його проходження: чергування ділянок руху та зупинок, зміну швидкісного режиму, транспортні затримки, часову структуру роботи маршруту та особливості пасажирообміну. У

сучасних дослідженнях підкреслюється, що для коректного оцінювання енергоспоживання автобусів найбільш придатним є маршрутно-орієнтований підхід, за якого розрахунковий цикл формується на основі реального міського маршруту, а не умовного стандартизованого режиму руху [16], [25], [31].

Для маршруту № 32 «Вересневе – с. Липини» розрахунковий цикл доцільно формувати на основі оборотного рейсу, тобто повного проходження автобуса у прямому і зворотному напрямках. Такий підхід є обґрунтованим з кількох причин. По-перше, саме оборотний рейс відображає завершений транспортно-експлуатаційний цикл роботи автобуса на маршруті, після якого можливе повторення аналогічної послідовності режимів руху. По-друге, при русі в обох напрямках автобус проходить різні за транспортним навантаженням та профілем ділянки, що дає змогу врахувати сумарний вплив міського середовища на витрати енергії. По-третє, організація роботи міських маршрутів і складання розкладу руху фактично базуються саме на тривалості оборотного рейсу та його повторюваності впродовж зміни [44], [47], [53].

З урахуванням оприлюдненої схеми маршруту № 32 можна стверджувати, що його розрахунковий цикл повинен включати кілька послідовних елементів: початковий розгін після відправлення з кінцевої зупинки, серію проміжних ділянок руху між зупинками, зупиночні простої для посадки і висадки пасажирів, ділянки зі зниженою швидкістю в центральній частині міста, проходження регульованих перехресть, рух у периферійних і приміських відрізках та кінцевий простій на розворотному пункті. У сучасних роботах, присвячених побудові реальних циклів руху автобусів, саме така структура вважається найбільш репрезентативною для оцінювання енергоспоживання на міських маршрутах, оскільки вона дозволяє відобразити чергування тягових і нетягових режимів роботи транспортного засобу [31], [55].

Обґрунтування оборотного рейсу як базового розрахункового циклу підтверджується також особливостями режиму роботи маршруту № 32. Згідно з офіційним розкладом руху, автобуси на маршруті працюють упродовж більшої частини доби, а відправлення повторюються з порівняно сталим інтервалом. Це

означає, що в межах зміни фактична робота автобуса складається з багаторазового повторення однотипних оборотних рейсів у змінних зовнішніх умовах. Отже, саме енерговитрати на один оборотний рейс є первинною величиною, від якої надалі можна перейти до розрахунку добової потреби в енергії та визначення потрібного запасу ходу [44], [53], [54].

Для подальших розрахунків доцільно прийняти, що розрахунковий цикл повинен враховувати не лише геометрію маршруту, а й типовий режим міської експлуатації. Це означає, що до складу циклу необхідно включати: рух у міжзупинкових інтервалах, фази розгону, уповільнення та гальмування, тривалість стоянки на зупинках, а також додаткові часові втрати на транспортні затримки. Дослідження сучасних систем міських автобусних перевезень свідчать, що саме повторюваність затримок, варіація середньої швидкості та структура зупиночних процесів істотно впливають на енергоспоживання автобуса і тому повинні бути включені до розрахункового циклу [13], [17], [46].

Особливістю маршруту № 32 є поєднання різних функціональних зон міста: периферійної, центральної та приміської. Через це розрахунковий цикл доцільно розглядати як комбінований, тобто такий, що охоплює декілька характерних режимів руху в межах одного маршруту. На периферійних ділянках автобус працює з меншою кількістю затримок і вищою стабільністю швидкості, тоді як у центральній частині зростають частота зупинок, імовірність уповільнення та нерівномірність руху. У сучасних роботах доведено, що використання локалізованих, прив'язаних до конкретного маршруту циклів дає змогу точніше оцінити енергоспоживання порівняно з універсальними типовими циклами, а різниця між реальними та умовними режимами може бути суттєвою [16], [31], [56].

З практичної точки зору розрахунковий цикл для маршруту № 32 доцільно приймати у двох рівнях. Перший рівень — один оборотний рейс, який використовується для визначення витрат енергії на завершений цикл маршруту. Другий рівень — добовий цикл роботи автобуса, який формується як сукупність повторюваних оборотних рейсів із урахуванням тривалості роботи на лінії та

експлуатаційних резервів. Така дворівнева схема є методично виправданою, оскільки дозволяє спочатку встановити витрати енергії на один базовий цикл, а потім перейти до визначення сумарної добової потреби в енергії і, відповідно, необхідного запасу ходу автобуса [19], [20], [51].

Для узагальнення прийнятого підходу структуру розрахункового циклу доцільно подати у вигляді табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Структура розрахункового циклу роботи автобуса на маршруті № 32

Елемент циклу	Зміст	Значення для розрахунку
Початковий виїзд	відправлення від кінцевої зупинки, початковий розгін	формує початкові тягові витрати енергії
Рух між зупинками	проходження міжзупинкових ділянок з різною швидкістю	визначає основну частину енерговитрат на маршруті
Зупиночні процеси	гальмування, стоянка, посадка і висадка пасажирів	впливають на тривалість рейсу та повторюваність розгонів
Ділянки транспортних затримок	регульовані перехрестя, щільний потік, уповільнення в центрі міста	збільшують час роботи та непрямі витрати енергії
Кінцевий простій	стоянка на кінцевій зупинці перед зворотним рейсом	впливає на часову структуру оборотного рейсу
Зворотний рейс	повторення циклу в протилежному напрямку	формує завершений оборотний цикл маршруту
Добове повторення	багаторазове виконання оборотних рейсів упродовж зміни	дає змогу визначити добову потребу в енергії

Отже, для маршруту № 32 розрахунковий цикл роботи автобуса доцільно приймати у вигляді оборотного рейсу з подальшим переходом до добового циклу експлуатації. Такий підхід найбільш повно враховує специфіку міського маршруту, реальну організацію руху, повторюваність транспортних процесів і змінність умов експлуатації. Саме він створює належну основу для наступного розрахунку витрат енергії, добової потреби в енергетичному ресурсі та визначення необхідного запасу ходу транспортного засобу категорії МЗ в умовах маршруту міста Луцька [16], [19], [44], [51], [56].

Висновки до розділу

У розділі 2 проаналізовано умови експлуатації автобуса на міському маршруті № 32 у місті Луцьку та встановлено, що обраний маршрут є репрезентативним об'єктом дослідження для визначення необхідного запасу ходу транспортного засобу категорії МЗ. Це зумовлено тим, що маршрут має діаметральний характер, поєднує периферійні, центральні та приміські ділянки міста, функціонує протягом більшої частини доби та характеризується змінними дорожніми й транспортними умовами. Така структура маршруту дає змогу врахувати широкий спектр чинників, що впливають на енергоспоживання автобуса в реальній міській експлуатації

Установлено, що маршрут № 32 проходить через різні функціональні зони міського простору, для яких характерні неоднакова інтенсивність руху, різна частота зупинок, відмінності у швидкісному режимі та рівні транспортних затримок. Це обумовлює неоднорідність умов роботи автобуса впродовж одного рейсу та підтверджує необхідність врахування не усереднених, а маршрутно-орієнтованих параметрів під час подальших розрахунків потрібного запасу ходу

У межах розділу сформовано систему вихідних даних для визначення необхідного запасу ходу, яка охоплює маршрутні, часові, транспортно-експлуатаційні, кліматичні, технічні та резервні параметри. Обґрунтовано, що для коректного розрахунку необхідно враховувати не лише довжину маршруту та тривалість роботи автобуса на лінії, а й середню експлуатаційну швидкість, кількість зупинок, характер транспортних затримок, сезонність експлуатації та коефіцієнт експлуатаційного резерву. Такий підхід створює належну інформаційну базу для подальших розрахунків енергоспоживання автобуса на маршруті № 32

На основі зібраних даних прийнято числові параметри маршруту, зокрема тривалість роботи протягом доби, інтервали руху, кількість автобусів на лінії, протяжність маршруту, час оборотного рейсу та середню експлуатаційну швидкість. Це дало змогу перейти від якісної характеристики маршруту до

кількісного опису умов його функціонування, необхідного для подальшого визначення витрат енергії й розрахунку потрібного запасу ходу транспортного засобу категорії МЗ

Обґрунтовано, що базовою одиницею розрахунку доцільно приймати оборотний рейс автобуса, оскільки саме він найбільш повно відображає завершений транспортно-експлуатаційний цикл роботи на маршруті. Разом із тим для оцінювання добової потреби в енергії необхідно розглядати сукупність повторюваних оборотних рейсів у межах повної зміни. Такий підхід забезпечує логічний перехід до розрахунку енергоспоживання на один цикл, а далі – до визначення добової потреби в енергетичному ресурсі та необхідного запасу ходу автобуса.

3 ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНОГО ЗАПАСУ ХОДУ АВТОБУСА

3.1 Вибір розрахункової моделі визначення запасу ходу

Вибір розрахункової моделі визначення запасу ходу автобуса категорії МЗ повинен забезпечувати достатню точність оцінювання енергоспоживання в реальних умовах міського маршруту та водночас бути придатним для практичного використання в межах магістерського дослідження. Аналіз сучасних наукових підходів показує, що для цієї задачі застосовують нормативно-усереднені, фізико-математичні, статистичні, маршрутно-циклові та комбіновані моделі. Однак для міських автобусів, що працюють у змінних умовах руху, найкращі результати дають саме моделі, побудовані на реальних параметрах маршруту та фактичному циклі руху, оскільки вони дають змогу врахувати швидкість, частоту зупинок, рельєф, пасажиронавантаження, кліматичні умови та транспортні затримки [16], [25], [51].

Нормативно-усереднені моделі є найпростішими, оскільки базуються на питомих витратах енергії на одиницю пробігу. Їх перевагою є простота та швидкість розрахунку, проте для міських маршрутів вони мають обмежену придатність через недостатнє врахування змінності умов руху. Фізико-математичні моделі є більш обґрунтованими, оскільки враховують сили опору руху, масу транспортного засобу, поздовжній профіль маршруту, інерційні складові та роботу систем рекуперації. Разом з тим такі моделі потребують великого обсягу вихідних даних і часто є надмірно деталізованими для прикладного маршрутного розрахунку [25], [29], [30].

Статистичні та інтелектуально-аналітичні моделі забезпечують високу точність прогнозування, особливо коли використовуються великі масиви експлуатаційних даних. У сучасних роботах доведено, що вони ефективно виявляють вплив середньої швидкості, температури, затримок, режимів розгону і гальмування, а також поведінки водія на енергоспоживання автобуса [17], [22], [23], [52]. Проте для застосування таких моделей потрібні великі масиви телематичних даних, спеціалізовані програмні засоби та окреме налаштування

моделі під конкретний парк автобусів. У межах цієї роботи такий підхід доцільно використовувати не як основний, а як методичне підґрунтя для вибору більш прозорої розрахункової схеми [23], [51], [57].

З урахуванням мети дослідження найбільш доцільною є комбінована маршрутно-циклова модель, яка поєднує елементи фізико-математичного підходу та маршрутно-орієнтованого опису руху автобуса. Її сутність полягає в тому, що запас ходу визначається не за умовним усередненим пробігом, а на основі енергоспоживання на одному оборотному рейсі конкретного маршруту з подальшим переходом до добового циклу експлуатації. У такій моделі враховуються довжина маршруту, середня експлуатаційна швидкість, кількість зупинок, транспортні затримки, сезонність, пасажиронавантаження та експлуатаційний резерв [16], [31], [55], [56]. Саме такий підхід сучасні дослідники розглядають як найбільш придатний для аналізу фіксованих автобусних маршрутів і оптимізації режимів енергозабезпечення [55], [58].

Перевага комбінованої маршрутно-циклової моделі для маршруту № 32 полягає в тому, що вона дозволяє врахувати реальні особливості експлуатації автобуса в Луцьку: діаметральний характер маршруту, проходження через периферійні, магістральні та центральні ділянки, значну кількість зупинок, добову нерівномірність транспортного потоку та тривалий режим роботи маршруту. Використання саме такої моделі дає змогу перейти від якісного опису умов експлуатації, виконаного в розділі 2, до кількісного визначення енергоспоживання на оборотний рейс і далі — до розрахунку необхідного запасу ходу автобуса [44], [51], [56], [58].

У загальному вигляді вибрана модель повинна включати три послідовні етапи. На першому етапі формується розрахунковий цикл руху автобуса на маршруті. На другому визначаються витрати енергії на один оборотний рейс з урахуванням основних експлуатаційних чинників. На третьому здійснюється перехід до добової потреби в енергії та визначається необхідний запас ходу з урахуванням резерву на несприятливі умови експлуатації. Така структура моделі узгоджується з сучасними підходами до аналізу автобусних маршрутів, де

енергоспоживання оцінюють як функцію параметрів маршруту, режиму руху та умов експлуатації, а не лише як паспортну характеристику транспортного засобу [16], [25], [52], [59].

Для узагальнення підходів доцільно подати їх порівняння у вигляді табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняння можливих моделей визначення запасу ходу автобуса

Модель	Основна ідея	Переваги	Обмеження	Доцільність для роботи
Нормативно-усереднена	використання середніх питомих витрат енергії	простота розрахунку	низька точність у міських умовах	обмежена
Фізико-математична	розрахунок за силами опору і параметрами руху	висока аналітичність	потребує великого обсягу даних	частково доцільна
Статистична	оцінка за емпіричними залежностями	врахування реальної варіативності	залежність від повноти вибірки	допоміжна
Інтелектуально-аналітична	прогнозування на основі великих масивів даних	висока точність	складність реалізації	допоміжна
Комбінована маршрутно-циклова	розрахунок енергоспоживання за реальним циклом маршруту з елементами аналітичної моделі	добра точність і практична придатність	потребує коректного формування циклу руху	основна

Отже, для визначення необхідного запасу ходу автобуса категорії МЗ на маршруті № 32 доцільно прийняти комбіновану маршрутно-циклову модель. Вона найбільш повно враховує особливості реальної міської експлуатації, забезпечує достатню точність розрахунку та є методично придатною для подальшого визначення енергоспоживання на оборотний рейс, добової потреби в енергії та необхідного запасу ходу автобуса в умовах міста Луцька [16], [31], [51], [55], [56], [58].

3.2 Розрахунок енергоспоживання автобуса на одному оборотному рейсі маршруту

Для практичного визначення необхідного запасу ходу на міському маршруті № 32 як базовий транспортний засіб у роботі приймається електробус Електрон Е19101, технічні характеристики якого наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики електробуса Електрон Е19101

Показник	Значення
Модель	Електрон Е19101
Тип транспортного засобу	міський низькопідлоговий електробус
Довжина, мм	12000
Ширина, мм	2550
Висота, мм	3330
Колісна база, мм	5900
Споряджена маса, т	13,56
Повна маса, т	19,0
Пасажиromісткість, осіб	до 100
Кількість місць для сидіння, осіб	36
Максимальна швидкість, км/год	70
Потужність тягового електроприводу, кВт	230
Паспортно-експлуатаційний запас ходу в міському режимі, км	близько 225

Вибір цієї моделі є доцільним з огляду на її належність до класу міських низькопідлогових електробусів великої місткості та наявність даних про експлуатацію в умовах міського маршруту. За відкритими даними щодо цієї моделі, для електробуса Е19101 декларується пробіг у міському режимі близько 225 км при повному завантаженні, що дає змогу використати його як базовий зразок для подальшого маршрутного розрахунку [60]. Для 12-метрових міських електробусів сучасні дослідження наводять середній діапазон питомого енергоспоживання приблизно 1,3–1,7 кВт·год/км, причому найбільший вплив мають режим руху, температура та робота допоміжних систем [17], [52], [59].

Відповідно до прийнятих у розділі 2 вихідних даних, протяжність маршруту № 32 в одному напрямку становить 21,1 км, а довжина оборотного

рейсу – 42,2 км; середня експлуатаційна швидкість прийнята на рівні 28,1 км/год, а тривалість оборотного рейсу – 1,50 год. За таких умов для розрахунку енергоспоживання на одному оборотному рейсі доцільно використати спрощену маршрутну-циклову залежність

$$W_{\text{обр}} = q_e \cdot L_{\text{обр}} \quad (3.1)$$

де $W_{\text{обр}}$ – витрати електричної енергії на один оборотний рейс, кВт·год;

q_e – питоме енергоспоживання електробуса на одиницю пробігу, кВт·год/км;

$L_{\text{обр}}$ – довжина оборотного рейсу, км.

Для базового розрахункового сценарію доцільно прийняти питоме енергоспоживання на рівні 1,45 кВт·год/км. Це значення відповідає середині діапазону, характерного для 12-метрових міських електробусів, і є обґрунтованим для маршруту з частими зупинками, змішаними дорожніми умовами та середньою експлуатаційною швидкістю близько 28 км/год [17], [52], [57], [59]. Тоді витрати електричної енергії на один оборотний рейс становитимуть:

$$W_{\text{обр}} = 1,45 \cdot 42,2 = 61,19 \text{ кВтгод}$$

Отже, для подальших розрахунків можна прийняти, що енергоспоживання електробуса Електрон Е19101 на одному оборотному рейсі маршруту № 32 становить 61,2 кВт·год. Відповідно, на один рейс в одному напрямку витрати енергії складатимуть:

$$W_{\text{обр}} = 1,45 \cdot 21,1 = 30,60 \text{ кВтгод}$$

Для перевірки отриманого результату доцільно зіставити його з заявленим міським пробігом електробуса Е19101. Якщо прийняти паспортно-експлуатаційний пробіг у міському режимі на рівні 225 км, то один оборотний рейс довжиною 42,2 км становить:

$$\frac{42,2}{225} \cdot 100 = 18,76\%$$

Таким чином, виконання одного оборотного рейсу потребує близько 18,8 % від загального міського запасу ходу електробуса. Це свідчить про те, що з позицій одного окремого циклу маршрут № 32 не є критичним для електробуса Електрон Е19101, однак для оцінювання його придатності в добовому режимі необхідно враховувати багаторазове повторення рейсів, сезонні коливання енергоспоживання та експлуатаційний резерв [20], [52], [60].

З урахуванням сучасних досліджень доцільно також враховувати, що в несприятливих умовах експлуатації – насамперед у холодний період року – питоме енергоспоживання може зростати на 20–25 % і більше через роботу систем опалення, погіршення умов руху та загальне збільшення навантаження на енергетичну систему автобуса [20], [22], [52]. У такому разі для маршруту № 32 розрахункові витрати енергії на один оборотний рейс можуть зрости до:

$$W_{\text{обр}}^{\text{зим}} = 61,19 \cdot 1,25 = 76,49 \text{ кВтгод}$$

Отже, для подальших розрахунків доцільно прийняти два орієнтовні рівні енергоспоживання на одному оборотному рейсі: базовий – 61,2 кВт·год та несприятливий сезонний (холодна пора року) – 76,5 кВт·год. Такий підхід дає змогу врахувати як типовий режим роботи маршруту, так і можливе підвищення витрат електроенергії в складніших умовах експлуатації.

Узагальнені результати розрахунків подані у вигляді табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Розрахунок енергоспоживання електробуса Електрон Е19101 на одному оборотному рейсі маршруту № 32

Показник	Позначення	Значення
Довжина маршруту в одному напрямку, км	$L_{\text{пр}}$	21,1
Довжина оборотного рейсу, км	$L_{\text{обр}}$	42,2
Прийняте базове питоме енергоспоживання, кВт·год/км	q_e	1,45
Енергоспоживання на один рейс в одному напрямку, кВт·год	$W_{\text{пр}}$	30,6
Енергоспоживання на один оборотний рейс, кВт·год	$W_{\text{обр}}$	61,2
Частка оборотного рейсу від паспортно-експлуатаційного міського запасу ходу, %	—	18,8
Енергоспоживання на один оборотний рейс у несприятливих сезонних умовах, кВт·год	$W_{\text{обр}}^{\text{зим}}$	76,5

Також здійснено розрахунок енергоспоживання автобуса, згідно методики наведеної у [61]. Ця методика розрахунку енергоспоживання автобуса розглядається як багатокритеріальна величина, що формується при одночасній зміні керованих, некерованих та умовно керованих чинників у певних межах, а результат визначається не однією точкою, а діапазоном можливих значень [61]. Саме цей підхід доцільно використати як додаткову перевірку вже отриманого вище значення енергоспоживання на одному оборотному рейсі маршруту № 32, яке для електробуса Електрон Е19101.

З урахуванням логіки зазначеної методики додатковий розрахунок доцільно виконати у вигляді варіантного багатofакторного оцінювання за залежністю

$$W_{\text{обр}}^* = W_{\text{обр}} \cdot k_{\text{п}} \cdot k_{\text{тр}} \cdot k_{\text{кл}}, \quad (3.2)$$

де $W_{\text{обр}}^*$ – уточнене енергоспоживання на одному оборотному рейсі, кВт·год;

$W_{\text{обр}}$ – базове енергоспоживання на одному оборотному рейсі, кВт·год;

$k_{\text{п}}$ – коефіцієнт впливу пасажиронавантаження;

$k_{\text{тр}}$ – коефіцієнт впливу транспортних умов і нерівномірності швидкісного режиму;

$k_{\text{кл}}$ – коефіцієнт впливу кліматичних умов і роботи допоміжних систем.

Такий запис відповідає сутності підходу, за яким фактичне енергоспоживання формується внаслідок одночасної дії кількох змінних чинників, а не визначається лише середньою питомою витратою енергії [61]. Для маршруту № 32 доцільно прийняти три розрахункові стани: сприятливий, типовий та несприятливий. Межі зміни коефіцієнтів обрано з урахуванням характеру міського маршруту, сезонності та сучасних досліджень впливу швидкості, пасажиронавантаження й температури на енергоспоживання електробусів [17], [20], [22], [52], [61], див. табл. 3.4 та рис. 3.1.

Таблиця 3.4 – Розрахунок енергоспоживання на одному оборотному рейсі за багатофакторною методикою [61]

Умови експлуатації	$k_{\text{п}}$	$k_{\text{тр}}$	$k_{\text{кл}}$	$W_{\text{обр}}^*$, кВт·год
Сприятливі	0,95	0,97	1,00	56,4
Типові	1,00	1,00	1,05	64,3
Несприятливі	1,08	1,08	1,12	79,9

Отримані результати свідчать, що за багатофакторного підходу енергоспоживання електробуса Електрон Е19101 на одному оборотному рейсі маршруту № 32 може змінюватися в межах 56,4–79,9 кВт·год, а найбільш імовірне значення для типових умов становить близько 64,3 кВт·год. Порівняння з базовим розрахунком, у якому було отримано 61,2 кВт·год, показує, що

попередні значення добре узгоджується з нижньою та середньою частиною розрахункового діапазону і може вважатися реалістичним для нормальних умов експлуатації маршруту.

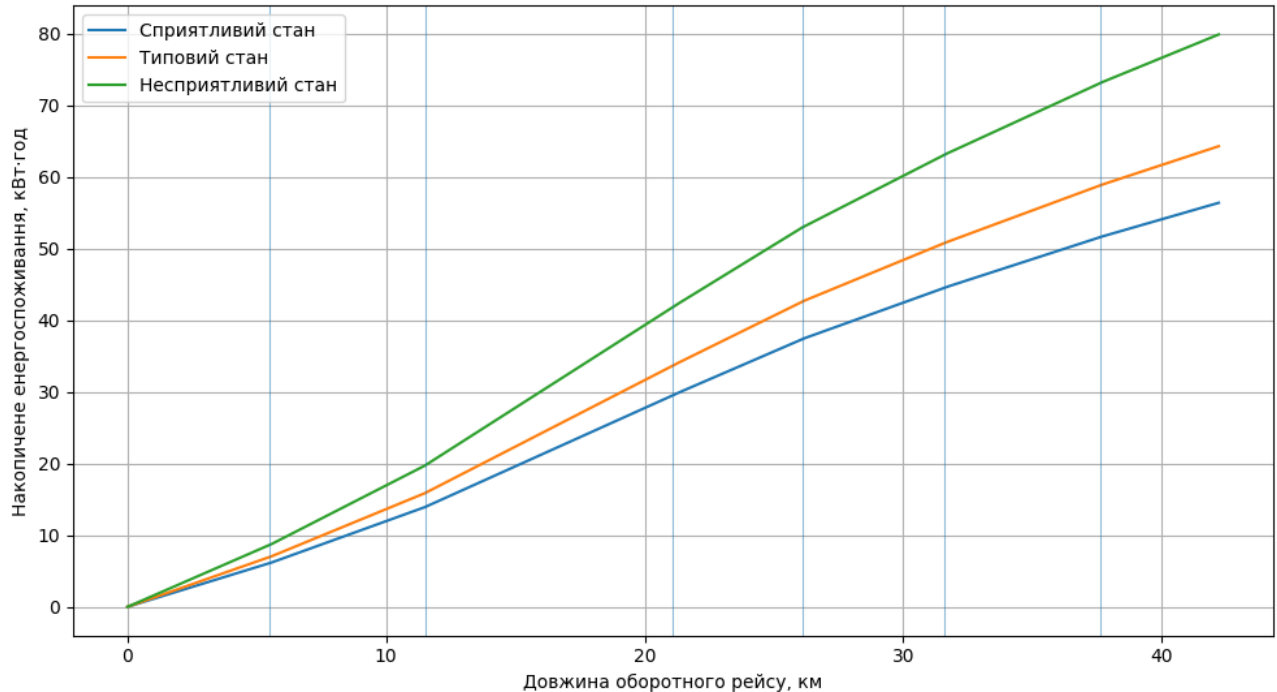


Рисунок 3.1 – Накопичувальний графік енергоспоживання електричної енергії на одному оборотному рейсі маршруту № 32 за різних умов експлуатації

Таким чином, додатковий розрахунок за багатofакторною методикою підтверджує правильність базового визначення енергоспоживання на одному оборотному рейсі та одночасно показує, що для подальшого визначення необхідного запасу ходу доцільно орієнтуватися не на одне фіксоване значення, а на розрахунковий діапазон, у межах якого верхня межа враховує несприятливі умови руху, підвищене пасажиронавантаження та сезонне зростання витрат енергії [20], [22], [52], [61].

3.3 Розрахунок добової потреби в енергії з урахуванням режиму роботи на маршруті

Добова потреба в енергії електробуса на маршруті визначається на основі енергоспоживання одного оборотного рейсу та фактичного режиму роботи автобуса протягом доби. Для маршруту № 32 у попередніх підпунктах прийнято такі вихідні дані: тривалість роботи маршруту становить 16 год 15 хв, тривалість одного оборотного рейсу – 1,50 год, довжина оборотного рейсу – 42,2 км, а базове енергоспоживання електробуса Електрон Е19101 на одному оборотному рейсі – 61,2 кВт·год. Для перевірного багатofакторного розрахунку було також одержано уточнене типове значення 64,3 кВт·год, а для несприятливого сезонного сценарію – 76,5 кВт·год [44], [52], [61].

Кількість оборотних рейсів, яку потенційно може виконати один автобус за добу роботи на маршруті, визначається за залежністю

$$n_{\text{обр}} = \frac{T_d}{t_{\text{обр}}} = \frac{16,25}{1,50} = 10,83 \quad (3.3)$$

де $n_{\text{обр}}$ – кількість оборотних рейсів за добу;

T_d – тривалість роботи автобуса на маршруті протягом доби, год;

$t_{\text{обр}}$ — тривалість одного оборотного рейсу, год.

Отже, в розрахунковому відношенні один автобус на маршруті № 32 виконує 10,83 оборотного рейсу за добу, тобто 10 повних рейсів.

Добова потреба в електричній енергії визначається як добуток енергоспоживання на одному оборотному рейсі на кількість таких рейсів протягом доби:

$$W_d = W_{\text{обр}} \cdot n_{\text{обр}} = 61,2 \cdot 10 = 612 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (3.4)$$

де W_d – добова потреба в енергії, кВт·год;

$W_{обр}$ – енергоспоживання на одному оборотному рейсі, кВт·год.

Для типового багатofакторного сценарію: $W_d^{тип} = 643,0$ кВт·год.

Для несприятливого сезонного сценарію: $W_d^{неспр} = 765,0$ кВт·год.

Таким чином, добова потреба в електроенергії для одного автобуса на маршруті № 32 перебуває в межах від 612,0 до 765,0 кВт·год, а найбільш імовірне значення для типових умов становить близько 643 кВт·год на добу.

Для додаткової інтерпретації результатів доцільно визначити добовий пробіг автобуса на маршруті. Він становить:

$$L_d = L_{обр} \cdot n_{обр} = 42,2 \cdot 10 = 422 \text{ км.}$$

Отже, за прийнятого режиму роботи автобус на маршруті № 32 має забезпечити орієнтовно 422 км добового пробігу. За сучасними дослідженнями реальна добова енергетична потреба електробуса визначається саме поєднанням пробігу, швидкісного режиму, температури, пасажиронавантаження і тривалості роботи допоміжних систем, тому отримані значення добової потреби в енергії є реалістичними для міського маршруту з тривалим режимом експлуатації [17], [22], [52], [59].

Одержані результати також свідчать, що для маршруту № 32 визначення необхідного запасу ходу не може обмежуватися лише енергією одного рейсу. Через тривалий режим роботи автобуса та багаторазове повторення оборотних рейсів упродовж дня необхідно оцінювати не тільки разове енергоспоживання, а й сумарну добову потребу в енергії. У сучасних роботах, присвячених експлуатації електробусів, саме такий підхід вважається найбільш придатним для вибору режиму заряджання, оцінки придатності рухомого складу до маршруту та подальшого визначення експлуатаційно необхідного запасу ходу [51], [58], [59].

Для узагальнення результатів розрахунку доцільно подати їх у вигляді табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Розрахунок добової потреби в енергії електробуса Електрон Е19101 на маршруті № 32

Показник	Позначення	Значення
Тривалість роботи на маршруті за добу, год	T_d	16,25
Тривалість одного оборотного рейсу, год	$t_{обр}$	1,50
Кількість оборотних рейсів за добу	$n_{обр}$	10,83
Довжина оборотного рейсу, км	$L_{обр}$	42,2
Добовий пробіг, км	L_d	422
Енергоспоживання на один оборотний рейс, базовий сценарій, кВт·год	$W_{обр}^{баз}$	61,2
Енергоспоживання на один оборотний рейс, типовий сценарій, кВт·год	$W_{обр}^{тип}$	64,3
Енергоспоживання на один оборотний рейс, несприятливий сценарій, кВт·год	$W_{обр}^{неспр}$	76,5
Добова потреба в енергії, базовий сценарій, кВт·год	$W_d^{баз}$	612,0
Добова потреба в енергії, типовий сценарій, кВт·год	$W_d^{тип}$	643,0
Добова потреба в енергії, несприятливий сценарій, кВт·год	$W_d^{неспр}$	765,0

Отже, розрахунок показав, що за прийнятого режиму роботи маршруту № 32 один електробус Електрон Е19101 потребуватиме протягом доби від 612,0 до 765,0 кВт·год електроенергії залежно від умов експлуатації, а для типового режиму доцільно приймати значення 643,0 кВт·год/добу. Отримані результати є безпосередньою основою для наступного визначення необхідного запасу ходу автобуса та обґрунтування вимог до режиму його енергозабезпечення на маршруті [51], [52], [58], [59].

3.4 Визначення необхідного запасу ходу автобуса з урахуванням резерву

Необхідний запас ходу автобуса доцільно визначати не як паспортно заявлену величину, а як мінімально достатній пробіг, що забезпечує виконання транспортної роботи за конкретних умов маршруту з урахуванням експлуатаційного резерву. Такий підхід відповідає сучасним уявленням про маршрутно-орієнтоване оцінювання електробусів, за яким фактична потреба в

запасі ходу має враховувати не лише довжину маршруту, а й енергоспоживання на рейсі, режим роботи на лінії, сезонні відхилення та ризик зростання витрат енергії в реальних умовах експлуатації [16], [20], [27], [34]. Скориговані значення, прийняті у поточній редакції роботи, становлять: добовий пробіг автобуса 422 км, базове енергоспоживання на одному оборотному рейсі 61,2 кВт·год, типове – 64,3 кВт·год, несприятливе – 76,5 кВт·год, а добова потреба в енергії відповідно 612,0; 643,0; 765,0 кВт·год

Для визначення необхідного запасу ходу з урахуванням резерву в роботі доцільно використати залежність

$$L_{\text{необх}} = L_p \cdot k_{\text{рез}}$$

де $L_{\text{необх}}$ – необхідний запас ходу автобуса, км;

L_p – розрахунковий пробіг, який автобус має забезпечити без порушення роботи на маршруті, км;

$k_{\text{рез}}$ – коефіцієнт експлуатаційного резерву.

Відповідно до прийнятих у розділі 2 вихідних даних, коефіцієнт експлуатаційного резерву доцільно приймати в межах 1,15–1,25, що дозволяє врахувати сезонні відхилення, транспортні затримки, зміну пасажиронавантаження та інші чинники невизначеності [20], [27], [51]. Для типового режиму роботи на маршруті № 32, коли добовий пробіг автобуса становить 422 км, необхідний запас ходу з урахуванням резерву становитиме:

$$L_{\text{необх}}^{\text{min}} = 485,3 \text{ км}$$

$$L_{\text{необх}}^{\text{max}} = 527,5 \text{ км}$$

Отже, для забезпечення повного добового циклу роботи автобуса на маршруті № 32 без проміжного поповнення енергії потрібний запас ходу має

становити приблизно 485–528 км. Це значення істотно перевищує паспортно-експлуатаційний міський запас ходу електробуса Електрон Е19101, який становить близько 225 км [60]. Таким чином, експлуатація одного автобуса на маршруті протягом усього дня без проміжного заряджання є неможливою.

Для додаткової перевірки доцільно виконати оцінювання за енергетичним підходом. Якщо для електробуса Електрон Е19101 прийняти паспортно-експлуатаційний пробіг 225 км та базове енергоспоживання 61,2 кВт·год на оборотний рейс довжиною 42,2 км, то еквівалентний питомий рівень енергоспоживання становить 1,45 кВт·год.

Тоді необхідний енергетичний ресурс для забезпечення типового добового пробігу з резервом становитиме:

$$W_{\text{необх}}^{\text{min}} = 703,7 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

$$W_{\text{необх}}^{\text{max}} = 764,9 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Отримані значення добре узгоджуються зі скоригованим діапазоном добової потреби в енергії 612,0–765,0 кВт·год, наведеним у документі, та підтверджують, що верхня межа необхідного запасу ходу відповідає несприятливому сценарію роботи на маршруті. Це означає, що під час організації експлуатації слід орієнтуватися не на разовий паспортний пробіг, а на поєднання робочого пробігу з обов'язковим енергетичним резервом [20], [52], [61].

З практичної точки зору результати розрахунку дають змогу оцінити мінімально необхідну кількість циклів поповнення енергії протягом доби. Якщо орієнтуватися на запас ходу 225 км, то для забезпечення добового пробігу 422 км автобус повинен мати щонайменше два інтервали роботи між заряджаннями. Якщо ж врахувати резерв, необхідний пробіг 485–528 км фактично вимагає організації роботи автобуса за схемою нічне заряджання в депо плюс щонайменше одне проміжне поповнення енергії на маршруті або в міжрейсовому режимі [16], [28], [51]. Саме такий висновок узгоджується із сучасними

підходами до планування експлуатації електробусів на маршрутах із тривалим добовим режимом роботи [51], [58].

Для узагальнення результатів розрахунку доцільно подати їх у вигляді табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Визначення необхідного запасу ходу автобуса на маршруті № 32 з урахуванням резерву

Показник	Позначення	Значення
Добовий пробіг автобуса, км	L_p	422,0
Мінімальний коефіцієнт резерву	$k_{рез}^{min}$	1,15
Максимальний коефіцієнт резерву	$k_{рез}^{max}$	1,25
Необхідний запас ходу за мінімального резерву, км	$L_{необх}^{min}$	485,3
Необхідний запас ходу за максимального резерву, км	$L_{необх}^{max}$	527,5
Паспортно-експлуатаційний запас ходу Електрон Е19101, км	$L_{пас}$	225
Співвідношення необхідного і паспортного запасу ходу, рази	$\frac{L_{необх}}{L_{пас}}$	2,16–2,34
Необхідний енергетичний ресурс за мінімального резерву, кВт·год	$W_{необх}^{min}$	703,7
Необхідний енергетичний ресурс за максимального резерву, кВт·год	$W_{необх}^{max}$	764,9

Отже, розрахунок показав, що для маршруту № 32 необхідний запас ходу автобуса категорії МЗ з урахуванням експлуатаційного резерву повинен становити 485–528 км. Для електробуса Електрон Е19101 із паспортно-експлуатаційним міським пробігом близько 225 км це означає, що забезпечити повний добовий цикл роботи без проміжного заряджання неможливо. Відповідно, практична експлуатація такого автобуса на маршруті № 32 потребує організації проміжного поповнення енергії або перегляду режиму роботи на маршруті. Саме цей висновок є базовим для подальшого аналізу впливу експлуатаційних чинників на величину потрібного запасу ходу [16], [20], [28], [51], [60].

Висновки до розділу

У розділі 3 обґрунтовано вибір комбінованої маршрутно-циклової моделі визначення необхідного запасу ходу автобуса категорії МЗ, яка найбільш повно враховує реальні умови міської експлуатації на маршруті № 32. Показано, що саме такий підхід є найбільш доцільним для дослідження, оскільки він дозволяє поєднати параметри маршруту, режим руху, сезонні умови та експлуатаційний резерв у єдиній розрахунковій схемі. Це забезпечує достатню точність оцінювання енергоспоживання та придатність результатів до практичного використання під час обґрунтування режиму роботи електробуса на міському маршруті.

У якості базового транспортного засобу для розрахунків прийнято електробус Електрон Е19101, для якого на підставі прийнятого питомого енергоспоживання $1,45 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{км}$ визначено витрати електричної енергії на одному оборотному рейсі маршруту № 32. Встановлено, що за базового сценарію енергоспоживання становить $61,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}$, а за несприятливих сезонних умов може зростати до $76,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. Додатковий перевіірочний розрахунок за багатофакторною методикою підтвердив, що фактичне енергоспоживання на одному оборотному рейсі може змінюватися в межах $56,4\text{--}79,9 \text{ кВт} \cdot \text{год}$, а найбільш імовірне значення для типових умов становить близько $64,3 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. Це підтверджує коректність базового розрахунку та доцільність використання діапазонного підходу в подальших оцінках.

На основі енергоспоживання одного оборотного рейсу та режиму роботи маршруту визначено добову потребу автобуса в електричній енергії. За прийнятих у роботі вихідних даних один автобус на маршруті № 32 забезпечує добовий пробіг 422 км , а добова потреба в електроенергії становить $612,0 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ за базового сценарію, $643,0 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ за типових умов та $765,0 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ за несприятливого сценарію. Одержані результати показують, що для міського маршруту з тривалим режимом роботи оцінювання потрібного запасу ходу

повинно спиратися не лише на параметри одного рейсу, а й на сумарну добову транспортну роботу автобуса.

У результаті розрахунку необхідного запасу ходу з урахуванням експлуатаційного резерву встановлено, що для маршруту № 32 його значення повинно становити 485,3–527,5 км. Це у 2,16–2,34 рази перевищує паспортно-експлуатаційний міський запас ходу електробуса Електрон Е19101, який становить близько 225 км. Таким чином, забезпечення повного добового циклу роботи на цьому маршруті без проміжного поповнення енергії є неможливим, а практична експлуатація електробуса вимагає організації щонайменше одного проміжного заряджання або зміни режиму його роботи на маршруті.

4 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИЙНЯТИХ РІШЕНЬ

4.1 Вплив вибраного запасу ходу на організацію роботи маршруту та потребу в заряджанні/обслуговуванні

Результати розрахунків, виконаних у розділі 3, показали, що для маршруту № 32 добовий пробіг одного автобуса становить 422 км, добова потреба в електроенергії – 612,0–765,0 кВт·год, а необхідний запас ходу з урахуванням резерву має перебувати в межах 485,3–527,5 км. Водночас для електробуса Електрон Е19101 прийнято паспортно-експлуатаційний міський запас ходу близько 225 км. Це означає, що обраний запас ходу є недостатнім для забезпечення повного добового циклу роботи на маршруті без проміжного поповнення енергії, а отже безпосередньо впливає на організацію випуску автобусів на лінію, графік їх роботи та схему заряджання

За сучасними підходами до експлуатації електробусів, обмежений запас ходу вимагає узгодження графіка руху з графіком заряджання, а також врахування тривалості зарядних операцій, черговості обслуговування автобусів і доступності зарядної інфраструктури. У наукових роботах наголошується, що планування роботи електробусного маршруту має здійснюватися спільно з плануванням заряджання, оскільки саме взаємозв'язок між запасом ходу, розкладом руху і доступними зарядними потужностями визначає надійність перевезень та експлуатаційні витрати. Крім того, післярейсове або проміжне заряджання доцільно організовувати в часових вікнах між рейсами або на кінцевих пунктах, де воно найменше впливає на якість обслуговування пасажирів.

Для маршруту № 32 це означає, що за наявного запасу ходу електробус Електрон Е19101 не може працювати лише за схемою нічного заряджання в депо. Якщо орієнтуватися на запас ходу близько 225 км, то він покриває лише близько половини добового пробігу маршруту, тоді як розрахунковий необхідний запас ходу перевищує паспортне значення у 2,16–2,34 рази. Практично це вимагає або організації щонайменше одного проміжного заряджання протягом доби, або

зміни режиму експлуатації автобуса, наприклад скорочення його роботи на маршруті чи перерозподілу рейсів між кількома машинами

Вибраний запас ходу впливає також на кількість рухомого складу, потрібного для підтримання заданого інтервалу руху. У сучасних оглядових і прикладних дослідженнях показано, що обмеження за запасом ходу та часом заряджання можуть збільшувати потребу в резервних автобусах або в додаткових зарядних точках, якщо заряджання інтегрується в діючий розклад без його коригування. Також доведено, що розміщення зарядних пристроїв на кінцевих зупинках або в депо повинно визначатися з урахуванням не лише енергетичної потреби, а й ризику виникнення затримок, черг на заряджання та похідного впливу на регулярність руху.

Окремим наслідком обмеженого запасу ходу є підвищення вимог до технічного та організаційного обслуговування. За наявності проміжного заряджання автобус повинен працювати в більш жорсткому часовому режимі, де будь-яке відхилення – затримка рейсу, збільшення тривалості стоянки, погіршення погодних умов або підвищене пасажиронавантаження – безпосередньо впливає на доступний залишок енергії. У сучасних роботах підкреслюється, що для таких маршрутів необхідно забезпечувати не лише планове заряджання, а й підвищений контроль технічного стану батареї, силового електрообладнання, систем охолодження та допоміжних споживачів, оскільки саме їхня надійність визначає можливість стабільного виконання графіка. Показано також, що підвищення надійності електробусів сприяє зменшенню відмов і експлуатаційних втрат у міських перевезеннях.

Для узагальнення практичних наслідків прийнятого запасу ходу доцільно подати їх у вигляді табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Вплив вибраного запасу ходу на організацію роботи маршруту № 32

Параметр впливу	Прояв для маршруту № 32	Практичний наслідок
Добовий пробіг перевищує паспортний запас ходу	422 км проти близько 225 км	неможливість роботи лише на нічному заряджанні
Необхідний запас ходу перевищує наявний	485,3–527,5 км проти 225 км	потреба в проміжному заряджанні або зміні режиму випуску
Залежність від зарядної інфраструктури	заряджання має бути інтегроване в розклад	необхідність вибору місця та режиму проміжного заряджання
Вплив на регулярність руху	можливі затримки через зарядні операції	потреба в резерві часу та координації графіка
Вплив на обслуговування	зростає значення контролю стану батареї та силового обладнання	посилення вимог до технічного обслуговування і моніторингу

Отже, вибраний запас ходу електробуса Електрон Е19101 істотно впливає на організацію роботи маршруту № 32, оскільки не забезпечує повного добового циклу експлуатації без проміжного поповнення енергії. Це зумовлює потребу в інтеграції заряджання в розклад руху, коригуванні організації випуску автобусів на лінію, резервуванні часу на зарядні операції та посиленні контролю технічного стану енергетичної системи автобуса. У практичному вимірі це підтверджує, що ефективність використання електробуса на цьому маршруті визначається не лише його паспортним пробігом, а насамперед узгодженістю запасу ходу з режимом роботи маршруту та можливостями зарядної інфраструктури.

4.2 Організація роботи електробусів на маршруті

Організація роботи електробусів на маршруті № 32 повинна базуватися на узгодженні трьох взаємопов'язаних складових: розкладу руху, режиму заряджання та технічного обслуговування. Виконані у розділі 3 розрахунки показали, що для одного електробуса Електрон Е19101 добовий пробіг на маршруті становить 422 км, тоді як паспортно-експлуатаційний міський запас

ходу становить близько 225 км. Отже, організація роботи такого рухомого складу на маршруті № 32 не може ґрунтуватися лише на нічному заряджанні в депо й потребує побудови комбінованої схеми експлуатації з проміжним поповненням енергії або ротацією автобусів на лінії.

У сучасних дослідженнях електробусних систем підкреслюється, що маршрут слід розглядати як базову операційну одиницю, у межах якої графік руху та графік заряджання мають плануватися спільно. Для маршрутів із обмеженим запасом ходу та значним добовим пробігом найбільш поширеними є дві організаційні схеми: заряджання переважно в депо з частковим виведенням автобуса з лінії та заряджання на кінцевих або проміжних пунктах маршруту в інтервалах між рейсами. Дослідники зазначають, що саме координація між рейсами, доступними часовими вікнами та зарядною потужністю визначає стійкість роботи маршруту й експлуатаційні витрати.

Для маршруту № 32 найбільш доцільною є організація роботи за схемою нічне заряджання в депо + проміжне заряджання протягом дня. Такий висновок випливає з того, що навіть за базового сценарію один автобус витрачає за добу понад 600 кВт·год електроенергії, а необхідний запас ходу з урахуванням резерву перевищує 485 км. Отже, без проміжного заряджання або без заміни автобуса на маршруті забезпечити виконання повного добового циклу неможливо. У дослідженнях з оперативного планування електробусів показано, що часткове заряджання в міжрейсових інтервалах є ефективним способом підвищення маршрутної придатності електробусів без надмірного збільшення ємності батареї.

З організаційної точки зору для маршруту доцільно передбачити два рівні роботи електробусів. Перший рівень — основна лінійна робота, коли автобус виконує послідовність оборотних рейсів у межах встановленого інтервалу руху. Другий рівень — планові перерви для заряджання, які повинні бути синхронізовані з графіком таким чином, щоб не порушувати регулярність руху. Для цього можуть застосовуватися або короткі сеанси поповнення енергії на кінцевих зупинках, або заміна автобуса резервною машиною на час заряджання.

Сучасні праці показують, що для маршрутів із несталим енергоспоживанням та високим ризиком відхилень саме наявність резервного рухомого складу або гнучкої заміни автобуса підвищує надійність системи.

Важливою умовою організації роботи електробусів на маршруті є правильне визначення місця заряджання. Для маршруту № 32 такими місцями доцільно розглядати кінцеві пункти або зони, де існує можливість організувати стоянку автобуса без погіршення пропускної здатності вуличної мережі. У сучасних дослідженнях з розміщення зарядної інфраструктури доведено, що зарядні пункти найбільш ефективно працюють саме на кінцевих зупинках або у вузлових точках мережі, де автобус має технологічний простій, а підключення до мережі не створює додаткових затримок для пасажирських перевезень.

Поряд із заряджанням, організація роботи електробусів на маршруті повинна включати й особливості технічного обслуговування. На відміну від автобусів із двигунами внутрішнього згоряння, у випадку електробусів зростає значення контролю стану тягової батареї, високовольтного обладнання, систем охолодження та допоміжних електроспоживачів. Крім того, режим часткових заряджань і інтенсивна маршрутна робота вимагають постійного моніторингу залишкового енергетичного ресурсу та температурного режиму батареї. У сучасних дослідженнях експлуатаційної надійності електробусів зазначено, що саме превентивне обслуговування силових електричних систем і батареї має вирішальне значення для зниження ризику позапланових відмов та збереження стабільності роботи маршруту.

Для узагальнення запропонованого підходу доцільно подати основні організаційні рішення у вигляді табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Основні положення організації роботи електробусів на маршруті № 32

Елемент організації	Запропоноване рішення	Очікуваний результат
Базова схема роботи	нічне заряджання в депо + проміжне заряджання на маршруті	забезпечення добового пробігу без зриву графіка

Елемент організації	Запропоноване рішення	Очікуваний результат
Операційна одиниця планування	оборотний рейс	можливість узгодження графіка руху і графіка заряджання
Місце заряджання	кінцеві пункти маршруту або вузлові точки з технологічним простоям	зменшення впливу заряджання на регулярність руху
Резервування рухомого складу	наявність резервного автобуса або можливість ротації	підвищення надійності роботи маршруту
Технічне обслуговування	посилений контроль батареї, високовольного обладнання та систем охолодження	зниження ризику відмов і стабілізація експлуатації

Отже, організація роботи електробусів на маршруті № 32 повинна будуватися на поєднанні маршрутного планування, проміжного заряджання та посиленого технічного обслуговування. Для електробуса Електрон Е19101 найдоцільнішою є схема, за якої нічне заряджання в депо доповнюється хоча б одним проміжним поповненням енергії або ротацією автобусів на лінії. Такий підхід дає змогу узгодити обмежений запас ходу з фактичними вимогами маршруту, забезпечити стабільність перевезень і зменшити ризик зриву графіка руху.

4.3 Техніко-економічна оцінка отриманих результатів

Техніко-економічну оцінку отриманих результатів доцільно виконати шляхом порівняння прямих енергетичних витрат на виконання одного рейсу маршруту електробусом та автобусом з дизельним двигуном. Для маршруту № 32 у роботі прийнято довжину рейсу в одному напрямку 21,1 км, а для електробуса Електрон Е19101 розраховане енергоспоживання на один рейс становить 30,6 кВт·год за базового сценарію та 32,15 кВт·год за типовими умовами експлуатації, оскільки енергоспоживання на один оборотний рейс дорівнює 61,2–64,3 кВт·год

Для дизельного автобуса великого класу в умовах міста з чисельністю населення близько 200 тис. осіб сучасні дослідження наводять середню витрату палива 41–43 л на 100 км. Для подальшого порівняння доцільно прийняти середнє значення 42 л на 100 км, що є обґрунтованим для міського маршруту з частими зупинками та змішаним режимом руху. Вартість дизельного палива, відповідно до прийнятого у роботі припущення, становить 75 грн/л. Для електробуса як оціночне значення прийнято оприлюднену ціну універсальної послуги для малих непобутових споживачів другого класу напруги 13 182,88 грн/МВт·год, тобто 13,18 грн/кВт·год без податку на додану вартість. Це значення використовується саме як розрахункова база для порівняння; фактична договірна ціна для перевізника у Волинській області може відрізнятися.

Витрати палива дизельного автобуса на один рейс визначаються за залежністю

$$Q_{\text{диз}} = \frac{q_{\text{диз}} \cdot L_p}{100} \quad (4.1)$$

де $Q_{\text{диз}}$ – витрати дизельного палива на один рейс, л;

$q_{\text{диз}}$ – витрата дизельного палива, л/100 км;

L_p – довжина рейсу, км.

Підставляючи вихідні дані, одержимо $Q_{\text{диз}} = 8,86$ л.

Вартість дизельного палива на один рейс становитиме:

$$C_{\text{диз}} = 8,86 \cdot 75 = 664,65 \text{ грн.} \quad (4.2)$$

Для електробуса вартість електроенергії на один рейс визначається за залежністю

$$C_{\text{ел}} = W_p \cdot c_{\text{ел}} \quad (4.3)$$

де $C_{\text{ел}}$ – витрати на електроенергію на один рейс, грн;

W_p – енергоспоживання електробуса на один рейс, кВт·год;

$c_{\text{ел}}$ – ціна 1 кВт·год електроенергії, грн.

Для базового сценарію $C_{\text{ел}} = 403,31$ грн.

Для типового сценарію $C_{\text{ел}} = 423,74$ грн.

Для несприятливого сценарію, якщо прийняти енергоспоживання на один рейс як половину від 76,5 кВт·год на оборотний рейс, тобто 38,25 кВт·год, отримаємо $C_{\text{ел}} = 504,25$.

Для більш наочного порівняння доцільно подати результати в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Порівняння витрат на енергоносії на один рейс маршруту №

32

Показник	Електробус, базовий сценарій	Електробус, типовий сценарій	Електробус, несприятливий сценарій	Дизельний автобус
Довжина рейсу, км	21,1	21,1	21,1	21,1
Витрати енергії / палива на рейс	30,6 кВт·год	32,15 кВт·год	38,25 кВт·год	8,86 л
Вартість одиниці енергоносія	13,18 грн/кВт·год	13,18 грн/кВт·год	13,18 грн/кВт·год	75 грн/л
Витрати на рейс, грн	403,31	423,74	504,25	664,65
Різниця відносно дизельного автобуса, грн	-261,34	-240,91	-160,40	—

Розрахунки свідчать, що навіть за несприятливих умов експлуатації прямі витрати на енергоносії для електробуса залишаються нижчими, ніж для автобуса з дизельним двигуном. У базовому сценарії економія на одному рейсі становить 261,34 грн, у типовому – 240,91 грн, а в несприятливому – 160,40 грн. Якщо врахувати, що добова робота автобуса на маршруті включає кілька рейсів, то сумарний економічний ефект від використання електробуса може бути відчутним навіть за умови організації проміжного заряджання.

Разом з тим слід враховувати, що наведене порівняння стосується лише прямих витрат на енергоносії. Повна техніко-економічна оцінка повинна також

охоплювати капітальні вкладення у зарядну інфраструктуру, витрати на її обслуговування, організаційні витрати, пов'язані з проміжним заряджанням, а також можливу потребу в резервному рухомому складі. Проте навіть у такому спрощеному порівнянні видно, що з позиції поточних витрат на один рейс електробус має перевагу над дизельним автобусом, а отже впровадження електричного рухомого складу на маршруті № 32 може бути економічно виправданим за умови належної організації заряджання та режиму роботи на лінії.

Висновки до розділу

У розділі 4 виконано оцінку практичної доцільності та ефективності прийнятих рішень щодо використання електробуса на маршруті № 32. Встановлено, що визначений у попередніх розділах необхідний запас ходу, який становить 485,3–527,5 км, істотно перевищує паспортно-експлуатаційний міський запас ходу електробуса Електрон Е19101 на рівні близько 225 км. Це свідчить про неможливість забезпечення повного добового циклу роботи маршруту без додаткових організаційних заходів, насамперед без проміжного поповнення енергії або коригування режиму експлуатації рухомого складу.

Установлено, що вибраний запас ходу безпосередньо впливає на організацію роботи маршруту, оскільки вимагає узгодження графіка руху з графіком заряджання, резервування часу на зарядні операції та посиленого контролю технічного стану енергетичної системи автобуса. Для маршруту № 32 найбільш доцільною є схема експлуатації, за якої нічне заряджання в депо поєднується щонайменше з одним проміжним поповненням енергії протягом дня. Такий підхід дозволяє забезпечити виконання маршрутної роботи без зриву графіка та створює передумови для стабільної експлуатації електробуса в реальних міських умовах.

Обґрунтовано, що організація роботи електробусів на маршруті повинна базуватися на поєднанні трьох складових: розкладу руху, режиму заряджання та

технічного обслуговування. При цьому базовою організаційною одиницею планування доцільно приймати оборотний рейс, що дає змогу узгодити транспортну роботу автобуса з часовими вікнами для поповнення енергії. Показано, що для маршруту № 32 оптимальним рішенням є використання комбінованої схеми роботи з проміжним заряджанням на кінцевих пунктах або з ротацією автобусів, а також із підвищеними вимогами до технічного моніторингу тягової батареї, високовольтного обладнання та систем охолодження.

У межах техніко-економічної оцінки виконано порівняння прямих витрат на енергоносії для електробуса та автобуса з дизельним двигуном на одному рейсі маршруту. Визначено, що для рейсу довжиною 21,1 км витрати на електроенергію для електробуса становлять 403,31 грн за базового сценарію, 423,74 грн за типового сценарію та 504,25 грн за несприятливого сценарію, тоді як витрати на дизельне паливо для автобуса складають 664,65 грн на рейс. Це означає, що економія витрат на енергоносії при використанні електробуса становить від 160,40 до 261,34 грн на один рейс залежно від умов експлуатації.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що визначення необхідного запасу ходу транспортних засобів категорії МЗ для міських маршрутів повинно здійснюватися не за паспортними характеристиками автобуса, а на основі маршрутно-орієнтованого підходу, який враховує реальні умови руху, пасажиронавантаження, сезонні зміни, транспортні затримки та експлуатаційний резерв. Це дало змогу сформулювати методичну основу для коректного оцінювання придатності електробуса до роботи на конкретному міському маршруті.

2. За результатами аналізу маршрутної мережі міста Луцька обґрунтовано вибір автобусного маршруту № 32 «Вересневе – с. Липини» як об'єкта дослідження. Встановлено, що цей маршрут є репрезентативним для оцінювання запасу ходу, оскільки має діаметральний характер, поєднує периферійні, центральні та приміські ділянки, характеризується значною довжиною, тривалим режимом роботи та неоднорідними дорожніми й транспортними умовами.

3. Обґрунтовано доцільність використання комбінованої маршрутно-циклової моделі визначення запасу ходу автобуса, яка поєднує аналіз реального циклу руху маршруту з розрахунком енергоспоживання за основними експлуатаційними чинниками. Застосування цієї моделі дало змогу перейти від загального опису умов експлуатації до кількісного визначення енергетичних потреб автобуса на одному оборотному рейсі та протягом доби.

4. Для електробуса Електрон Е19101 визначено, що енергоспоживання на одному оборотному рейсі маршруту № 32 становить 61,2 кВт·год за базового сценарію, 64,3 кВт·год за типових умов та може зростати до 76,5–79,9 кВт·год за несприятливих умов експлуатації. Це підтвердило, що енергоспоживання міського автобуса є багатофакторною величиною, яка істотно залежить від швидкісного режиму, транспортних затримок, пасажиронавантаження та кліматичних умов.

5. Визначено, що за прийнятого режиму роботи маршруту № 32 один електробус повинен забезпечувати добовий пробіг 422 км, а його добова потреба

в електроенергії становить 612,0 кВт·год за базового сценарію, 643,0 кВт·год за типових умов та до 765,0 кВт·год за несприятливого сценарію. На цій основі встановлено, що необхідний запас ходу автобуса з урахуванням резерву має становити 485,3–527,5 км, що у 2,16–2,34 раза перевищує паспортно-експлуатаційний міський запас ходу електробуса Електрон Е19101.

6. Доведено, що експлуатація електробуса Електрон Е19101 на маршруті № 32 без проміжного поповнення енергії є неможливою. Для забезпечення повного добового циклу роботи на маршруті необхідно застосовувати комбіновану схему організації перевезень, яка включає нічне заряджання в депо та щонайменше одне проміжне заряджання протягом дня або ротацію рухомого складу на лінії. Це підтвердило визначальний вплив запасу ходу на організацію роботи маршруту та вимоги до зарядної інфраструктури.

7. У межах техніко-економічної оцінки встановлено, що один цикл використання енергетичного ресурсу електробуса покриває лише 53,3 % добового пробігу маршруту, а дефіцит пробігу становить 197 км. Водночас порівняння прямих витрат на енергоносії показало, що витрати електробуса на один рейс складають 403,31–504,25 грн залежно від умов експлуатації, тоді як для дизельного автобуса вони становлять 664,65 грн. Це свідчить, що економія на одному рейсі може становити від 160,40 до 261,34 грн на користь електробуса.

8. Загалом результати роботи підтвердили, що впровадження електробусів на міських маршрутах є технічно можливим і потенційно економічно доцільним, але лише за умови узгодження трьох ключових складових: реального необхідного запасу ходу, режиму роботи маршруту та системи зарядної інфраструктури. Практичне значення роботи полягає в тому, що запропонований підхід може бути використаний для обґрунтування вибору рухомого складу, планування експлуатації електробусів і прийняття рішень щодо модернізації міських пасажирських перевезень у Луцьку та інших містах із подібними умовами роботи маршрутів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Regulation (EU) 2018/858 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 on the approval and market surveillance of motor vehicles and their trailers, and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles. Consolidated text as of 01.07.2024. Official Journal of the European Union. URL: [ресурс ЄС](#).

2. Войтків С. В. Аналіз і розроблення критеріїв експлуатаційної ефективності міських електробусів. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. 2024. Вип. 25. С. 13–22. DOI: 10.30977/VEIT.2024.25.0.2.

3. Aamodt A., Corrigan T., Eureka K. Electrifying Transit: A Guidebook for Implementing Battery Electric Buses. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2021. 71 p. NREL/TP-5400-76932.

4. Jin L., Delgado O., Gadpalli R., Minjares R. Strategies for Deploying Zero-Emission Bus Fleets: Development of Real-World Drive Cycles to Simulate Zero-Emission Technologies Along Existing Bus Routes. Washington, DC: International Council on Clean Transportation, 2020.

5. Zhang Z., Ye B., Wang S., Ma Y. Analysis and estimation of energy consumption of electric buses using real-world data. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2024. Vol. 126. Article 104017. DOI: DOI: 10.1016/j.treng.2023.100223 10.1016/j.trd.2023.104017.

6. Perugu H., Collier S., Tan Y., Yoon S., Herner J. Characterization of battery electric transit bus energy consumption by temporal and speed variation. Energy. 2023. Vol. 263. Article 125914. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125914.

7. Doulgeris S., Zafeiriadis A., Athanasopoulos N., Tzivelou N., Michali M. E., Papagianni S., Samaras Z. Evaluation of energy consumption and electric range of battery electric busses for application to public transportation. Transportation Engineering. 2024. Vol. 15. Article 100223..

8. NREL. Cold Weather Impacts on Battery-Electric Transit Buses. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2024. 2 p. NREL/FS-5400-89888.

9. UITP. Bus networks free from congestion can help regions thrive: Action points. Brussels : UITP, 2025. 20 p. URL: [pecypc UITP](#).
10. Wang T., Ma W., Jin S., Zhou J. Bus dwell time estimation and overtaking maneuvers in a near-side curbside bus stop considering mixed traffic conditions. *Journal of Transport Geography*. 2024. Vol. 118. Article 103911. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2024.103911.
11. Sun W., Cats O., van Oort N., Hoogendoorn S. Estimating the route-level passenger demand profile from dwell times. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2021. Vol. 129. Article 103232. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103232.
12. Angadi V. S., Rao K. R., Verma A. Spatiotemporal capacity estimation of bus rapid transit stations using dwell time and failure rate measures. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2024. Vol. 11, No. 1. P. 197–211. DOI: 10.1016/j.jtte.2023.05.002.
13. Вдовиченко В. О., Куш Є. І., Халтурін М. В. Assessment of impact of priority movement for urban public passenger transport on travel time and passenger transportation quality. *Автомобільний транспорт*. 2023. № 53. С. 49–57. DOI: 10.30977/AT.2219-8342.2023.53.0.49.
14. Zhou Y., Wang S., Tang J., Wang Y. Robust optimization for integrated planning of electric-bus systems with fast-charging strategy. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2022. Vol. 109. Article 103394. DOI: 10.1016/j.trd.2022.103394.
15. Zeng Z., Liu P., Xu X., Chen C. En-route charge scheduling for an electric bus network with uncertain charging accessibility and energy consumption. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2024. Vol. 185. Article 103488. DOI: 10.1016/j.tre.2024.103488.
16. Jin L., Delgado O., Gadpalli R., Minjares R. Strategies for Deploying Zero-Emission Bus Fleets: Development of Real-World Drive Cycles to Simulate Zero-Emission Technologies Along Existing Bus Routes. Washington, DC: International Council on Clean Transportation, 2020.

17. Zhang Z., Ye B., Wang S., Ma Y. Analysis and estimation of energy consumption of electric buses using real-world data. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2024. Vol. 126. Article 104017. DOI: 10.1016/j.trd.2023.104017.
18. Perugu H., Collier S., Tan Y., Yoon S., Herner J. Characterization of battery electric transit bus energy consumption by temporal and speed variation. *Energy*. 2023. Vol. 263. Article 125914. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125914.
19. Aamodt A., Corrigan T., Eureka K. *Electrifying Transit: A Guidebook for Implementing Battery Electric Buses*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2021. 71 p.
20. Mahmud K., Motapon S., Narula C. K. et al. Cold Weather Impacts on Battery-Electric Transit Buses. National Renewable Energy Laboratory Fact Sheet. 2024. NREL/FS-5400-89888.
21. Wang T., Ma W., Jin S., Zhou J. Bus dwell time estimation and overtaking maneuvers in a near-side curbside bus stop considering mixed traffic conditions. *Journal of Transport Geography*. 2024. Vol. 118. Article 103911. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2024.103911.
22. Klaproth T., Faller S., Lienkamp M. Empirical Energy Consumption Estimation and Battery Operation Analysis from Long-Term Monitoring of an Urban Electric Bus Fleet. *World Electric Vehicle Journal*. 2025. Vol. 16, No. 8. Article 419. DOI: 10.3390/wevj16080419.
23. Liu R., Cai J., Hu L., Lou B., Tang J. Electric Bus Battery Energy Consumption Estimation and Influencing Features Analysis Using a Two-Layer Stacking Framework with SHAP-Based Interpretation. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, No. 15. Article 7105. DOI: 10.3390/su17157105.
24. Rosero F., Fonseca N., López J.-M., Casanova J. Effects of passenger load, road grade, and congestion level on real-world fuel consumption and emissions from compressed natural gas and diesel urban buses. *Applied Energy*. 2021. Vol. 282. Article 116195. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116195.

25. Al-Ogaili A. S., Alkhafaji Y. M., Kamil M., et al. Review of the estimation methods of energy consumption for battery electric buses. *Energies*. 2021. Vol. 14, No. 22. Article 7578. DOI: 10.3390/en14227578.
26. Aamodt A., Corrigan T., Eureka K. *Electrifying Transit: A Guidebook for Implementing Battery Electric Buses*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2021. 71 p. NREL/TP-5400-76932.
27. Khaustov O., Artemiev M. Optimization of energy storage parameters of electric buses based on route conditions. *Transport Systems and Technologies*. 2025. No. 1. URL: ресурс видання.
28. Triatmojo A., Satrio H., Minjares R. *Planning the adoption of battery electric buses in Transjakarta*. Washington, DC: International Council on Clean Transportation, 2024.
29. Wang P., Li H., Zhang Y., et al. Energy consumption estimation method of battery electric buses based on real-world driving data. *World Electric Vehicle Journal*. 2024. Vol. 15, No. 7. Article 314. DOI: 10.3390/wevj15070314.
30. Beshta O. S., Balaka E. I., Davydov O. V. Electric vehicle energy consumption taking into account the impact of route profile and energy recovery. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2024. No. 2. P. 104–110.
31. Development of electric bus real-time driving cycle based on local operating conditions. *International Journal of Engineering Sciences*. 2025. Published 31 Jan 2025.
32. Dong C., et al. A real-time prediction framework for energy consumption of electric buses. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2025. Vol. 194. Article 103724.
33. Zhu G., et al. Energy consumption prediction model for electric buses considering actual operation data. *Advances in Transportation Studies*. 2024. Article ID 3058575.
34. Jin L., Delgado O., Gadpalli R., Minjares R. *Strategies for Deploying Zero-Emission Bus Fleets: Development of Real-World Drive Cycles to Simulate Zero-*

Emission Technologies Along Existing Bus Routes. Washington, DC: International Council on Clean Transportation, 2020.

35. Bartłomiejczyk M. The role of bus traffic prioritization in optimizing battery size and reducing the costs of electric buses. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 22. Article 6066. DOI: 10.3390/en18226066.

36. Othman K., Shalaby A., Abdulhai B. Route selection guidelines and prioritization tools for efficient electrification of bus fleets. *npj Sustainable Mobility and Transport*. 2025. Vol. 2. Article 30. DOI: 10.1038/s44333-025-00048-2.

37. Hendriks J. N., Sturmberg B. C. P. An integrated model of electric bus energy consumption and optimised depot charging. *npj Sustainable Mobility and Transport*. 2024. Vol. 1. Article 10. DOI: 10.1038/s44333-024-00008-2.

38. Хітров І. О. Застосування електричних автобусів для пасажирських перевезень. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Т. 35 (74), № 6, ч. 2. С. 293–298. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.6.2/42.

39. Розклад руху. Транспорт Луцька : офіційний портал. 2026. URL: ресурс офіційного транспортного порталу Луцької міської ради.

40. Транспорт. Офіційний сайт Луцької міської ради. 2026. URL: ресурс Луцької міської ради.

41. Використання екологічних і розумних технологій у системі громадського транспорту міста Луцька. Транспорт Луцька : офіційний портал. 2026. URL: ресурс офіційного транспортного порталу Луцької міської ради.

42. Звіт про роботу відділу транспорту за 2024 рік. Луцька міська рада. 2025. URL: ресурс Луцької міської ради.

43. Автобусний маршрут № 32 відтепер курсуватиме за маршрутом «Вересневе – с. Липини». Офіційний сайт Луцької міської ради. 22.08.2019. Актуальне функціонування маршруту підтверджено в чинному розкладі 2026 року.

44. Маршрут і розклад А32. Транспорт Луцька : офіційний портал. 2026. URL: ресурс офіційного транспортного порталу Луцької міської ради.

45. Bartłomiejczyk M. The role of bus traffic prioritization in optimizing battery size and reducing the costs of electric buses. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 22. Article 6066. DOI: 10.3390/en18226066.
46. Zhuk M., Riabokon O., Kunanets N. Possibilities of forecasting bus average speed on city route. *MATEC Web of Conferences*. 2024. Vol. 402. Article 01008. DOI: 10.1051/mateconf/202440201008.
47. Pitka P., Gkiotsalitis K., Cats O. Planning-level optimisation of headway regularity. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 13. Article 5706. DOI: 10.3390/app14135706.
48. Литвин В. В., Артеменко Я. О. Вплив параметрів маршруту на паливну економічність автобуса в умовах міста. *Транспортні системи і технології*. 2025. № 1. С. 68–76. DOI: 10.32703/2617-9040-2025-46-7.
49. Sun B., Wang X., Li Y., et al. Sustainable impact of urban road class on smart green signal control under heterogeneous traffic environments. *Sustainable Futures*. 2025. Vol. 8. Article 100666. DOI: 10.1016/j.sftr.2025.100666.
50. Acharya S., Bansal P., Juri N. R. Insights into the impact of urban congestion on accessibility. *Transport Policy*. 2025. Vol. 161. P. 120–131. DOI: 10.1016/j.tranpol.2024.10.023.
51. Hendriks J. N., Sturmberg B. C. P. An integrated model of electric bus energy consumption and optimised depot charging. *npj Sustainable Mobility and Transport*. 2024. Vol. 1. Article 10. DOI: 10.1038/s44333-024-00008-2.
52. Tian X., Ouenniche J., Dessureault P.-L., El Geneidy A. Unraveling energy demand in battery electric bus operations through an explainable machine learning approach using real-world cold-climate data. *Energy*. 2025. Vol. 330. Article 136280.
53. Розклад руху маршруту № 32. Транспорт Луцька : офіційний портал Луцької міської ради. 2026.
55. Skarlis S., Gkoumas K., Gonzalez V. N., Bimpas M., Tsakalidis A. Mathematical modeling using real driving data for decision making in charging infrastructure optimization of battery electric bus fleets. *Case Studies on Transport Policy*. 2025. Vol. 19. Article 101561. DOI: 10.1016/j.cstp.2025.101561.

56. Shrestha S., Marahatta B., Chalise S., et al. Construction of real-world driving cycle for urban electric bus using large-scale operational data. *Results in Engineering*. 2026. Vol. 24. Article 103932. DOI: 10.1016/j.rineng.2026.103932.

57. Abdelaty H., Mohamed M. Machine learning prediction models for battery-electric bus energy consumption in transit. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2021. Vol. 93. Article 102773. DOI: 10.1016/j.trd.2021.102773.

58. Skarlis S., Gkoumas K., Gonzalez V. N., Bimpas M., Tsakalidis A. Mathematical modeling using real driving data for decision making in charging infrastructure optimization of battery electric bus fleets. *Case Studies on Transport Policy*. 2025. Vol. 19. Article 101561. DOI: 10.1016/j.cstp.2025.101561.

59. Blades L. A. W., Potter S., Hosking J., et al. Predicting energy consumption of zero emission buses to support public transport decarbonisation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2024. Vol. 130. Article 104143. DOI: 10.1016/j.trd.2024.104143.

60. AUTO-Consulting. Як в Україні намагалися впроваджувати електробуси. 2023. <https://autoconsulting.ua/article.php?sid=53790>

61. Dembitskyi V., Grabovets V. Modeling of a power consumption by bus in the real operating conditions. *Transportation Engineering*. 2023. Vol. 14. Article 100216. DOI: 10.1016/j.treng.2023.100216.

62. Zhou Y., Zhang J., Shen S., et al. Electric bus charging scheduling on a bus network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2024. Vol. 165. Article 104693. DOI: 10.1016/j.trc.2024.104693.

63. Lacombe R., Chu C., Jena S. D., et al. Integrated charging scheduling and operational control for a network of electric buses with limited opportunity charging capacity. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2024. Vol. 188. Article 103575. DOI: 10.1016/j.tre.2024.103575.

64. Liu Y., Zhang Y., et al. Enhancing electric bus charging scheduling: An energy-aware post-route charging approach. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 8. Article 3334. DOI: 10.3390/su16083334.

65. Behnia F., Cats O., et al. A comprehensive review of electric bus scheduling. *Sustainable Futures*. 2024. Vol. 7. Article 100324. DOI: 10.1016/j.sftr.2024.100324.
66. Zhang L., et al. Optimal charger deployment for electric buses. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2025. Vol. 141. Article 104624. DOI: 10.1016/j.trd.2025.104624.
67. McCabe D., et al. Minimum-delay opportunity charging scheduling for battery electric transit buses. *Communications in Transportation Research*. 2025. Vol. 5. Article 100206. DOI: 10.1016/j.commtr.2025.100206.
68. Niewczas A., et al. Reliability study of electric buses in the urban public transport system. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 14. Article 3863. DOI: 10.3390/en18143863.
69. Manzolli J. A., et al. Electric bus fleet charging management: A robust optimisation model. *Applied Energy*. 2025. Vol. 383. Article 125954. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.125954.
70. Zhou Y., Zhang J., Shen S., et al. Electric bus charging scheduling on a bus network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2024. Vol. 165. Article 104693. DOI: 10.1016/j.trc.2024.104693.
71. Lacombe R., Chu C., Jena S. D., et al. Integrated charging scheduling and operational control for a network of electric buses with limited opportunity charging capacity. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2024. Vol. 188. Article 103575. DOI: 10.1016/j.tre.2024.103575.
72. Liu Y., Zhang Y., et al. Enhancing electric bus charging scheduling: An energy-aware post-route charging approach. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 8. Article 3334. DOI: 10.3390/su16083334.
73. Behnia F., Cats O., et al. A comprehensive review of electric bus scheduling. *Sustainable Futures*. 2024. Vol. 7. Article 100324. DOI: 10.1016/j.sftr.2024.100324.
74. Zhang L., et al. Optimal charger deployment for electric buses. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2025. Vol. 141. Article 104624. DOI: 10.1016/j.trd.2025.104624.

75. McCabe D., et al. Minimum-delay opportunity charging scheduling for battery electric transit buses. *Communications in Transportation Research*. 2025. Vol. 5. Article 100206. DOI: 10.1016/j.commtr.2025.100206.

76. Niewczas A., et al. Reliability study of electric buses in the urban public transport system. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 14. Article 3863. DOI: 10.3390/en18143863.

77. Manzolli J. A., et al. Electric bus fleet charging management: A robust optimisation model. *Applied Energy*. 2025. Vol. 383. Article 125954. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.125954.

78. 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.

79. Кваліфікаційна робота магістра [Текст]: методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти освітньо-наукової програми «Інжиніринг автомобільного транспорту» галузі знань 27 Транспорт (J Транспорт та послуги), спеціальності 274 Автомобільний транспорт (J8 Автомобільний транспорт) денної та заочної форм навчання / укладачі: В.ДЕМБІЦЬКИЙ, В.САМОСТЯН, В.ПРИДЮК— Луцьк: ЛНТУ, 2025.— 60 с.