

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ МІСЬКИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ШЛЯХОМ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ПЕРЕХОДУ НА ЕКОЛОГІЧНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ (ЕЛЕКТРОБУСИ)

Войтович О. А., к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, email: voitovych.olha@kntu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-0510-4362;

Луб'яний П. В., к.т.н., доцент, завідувач кафедри транспортних систем і технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, email: lubyany.pavlo@kntu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2668-5063;

Мартиник В. С., магістрантка Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, email: s6911024@kntu.edu.ua.

Робота належить до галузі транспортних технологій та міських пасажирських перевезень і присвячена підвищенню ефективності функціонування міського громадського транспорту шляхом обґрунтування доцільності переходу на екологічні види транспорту, зокрема електробуси. Актуальність дослідження зумовлена зростанням пасажиропотоків, високими експлуатаційними витратами, екологічними проблемами та необхідністю модернізації рухомого складу українських міст. У роботі застосовано комплекс методів: натурні спостереження, обробку даних пасажиропотоку, техніко-експлуатаційні розрахунки, порівняльний аналіз характеристик дизельних автобусів та електроавтобусів, оцінку економічної та екологічної ефективності, математичне моделювання графіків руху. Отримано такі основні результати: визначено нерівномірність пасажиропотоків на маршруті №51 у м. Львові, розраховано необхідну кількість рухомого складу та оптимізовано графік його роботи, обґрунтовано заміну автобусів БАЗ А079 на електроавтобуси SUNLONG SLK6121EV. Доведено можливість зменшення собівартості перевезень на 25–30%, повне усунення локальних викидів CO₂ та значне скорочення шумового забруднення. Значення отриманих результатів полягає у створенні науково обґрунтованої моделі переходу на екологічний транспорт, яку можуть використовувати перевізники та органи місцевого самоврядування при оновленні автопарку та плануванні сталого розвитку міської мобільності.

Ключові слова: електробуси; пасажиропотік; міські перевезення; техніко-експлуатаційні показники; екологічний транспорт; оптимізація маршруту.

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.187-198

Вступ. У сучасному світі, що характеризується стрімкою урбанізацією та зростанням щільності міського населення, питання ефективного використання обмеженого простору набуває особливої актуальності. У цьому контексті громадський транспорт є ключовою частиною забезпечення сталого та ефективного розвитку населених пунктів. Його значення виходить далеко за межі простого перевезення пасажирів, адже він відіграє вирішальну роль у вирішенні комплексу соціальних, економічних та екологічних проблем, з якими стикаються сучасні міста.

Основні переваги належної інфраструктури громадського транспорту охоплюють екологічність (зменшення забруднення довкілля), підвищення мобільності (суттєве зниження транспортних заторів), а також зростання соціальної доступності до робочих місць [1, 2], освіти, медичних та культурних закладів для всіх верств населення. Таким чином, громадський транспорт не лише сприяє мобільності мешканців, але й формує життєвий та економічний потенціал міста, активно впливаючи на його розвиток.

Хоча громадський транспорт є критично важливим, його впровадження та експлуатація пов'язані з певними викликами, зокрема високими витратами на будівництво та управління, а також потребою в забезпеченні комфорту, який має конкурувати з перевагами приватного автомобіля. Проте, правильне планування та організація системи громадського транспорту дозволяє перетворити його на життєво необхідну частину сучасного міста, сприяючи створенню більш екологічного, доступного та комфортного середовища для життя [3].

Аналіз публікацій. У другій половині 2010-х – початку 2020-х років у науковій літературі відзначається інтенсивне зростання кількості досліджень, присвячених електрифікації парків міського автобусного транспорту, оптимізації маршрутів та методикам прогнозування пасажиропотоків. Одна з ключових тем – порівняння загальної вартості володіння (Total Cost of Ownership – TCO) для батарейних електробусів і традиційних дизельних автобусів. Найновіші європейські дослідження свідчать, що шляхом зниження вартості батарей, зростання цін на паливо та економічних переваг експлуатації електробусів (нижчі експлуатаційні витрати, простіше технічне обслуговування) TCO електробусів у ряді країн вже сьогодні наближається або стає конкурентним до дизельних машин, проте остаточна оцінка залишається залежною від локальних умов (вартість електроенергії, політика субсидування, наявність зарядної інфраструктури) [4, 5]. Другим важливим напрямом є дослідження операційних задач, пов'язаних із плануванням графіків руху та заряджання електробусів. На відміну від дизельних автобусів, електричні одиниці вимагають інтегрованого підходу: розробка щоденних/нічних графіків, узгоджених із потребами зарядної інфраструктури (поточне/швидке заряджання), моделювання обмежень депо та управління енергоспоживанням. Останні публікації пропонують багатостадійні оптимізаційні підходи та математичні моделі для мінімізації сукупних витрат і забезпечення виконання маршрутів з допуском на зарядні вікна [6, 7]. Автори [8] враховують обмежену кількість зарядних пристроїв і максимальну сумарну потужність зарядної станції – тобто реальні ресурси, які часто в дослідженнях спрощують. Третій блок досліджень стосується оптимального планування складу парку (кількість і типи автобусів) та стратегій його поступової заміни. Класичні моделі (зокрема роботи DTU та ін.) розробляють алгоритми для визначення оптимального складу парку, що мінімізують сумарні витрати при дотриманні показників обслуговування пасажирів. Такі моделі є базовими інструментами при формуванні програм оновлення рухомого складу [9–11]. Четвертий напрям – аналіз і прогноз пасажиропотоків. Сучасні роботи поєднують класичні методи (натурні спостереження, епюри пасажиропотоку) з підходами машинного навчання (Bi-LSTM, SDAE та ін.) для побудови точніших прогнозів попиту, що, у свою чергу, дозволяє раціональніше розподіляти ресурси і підлаштовувати графіки під реальні потреби пасажирів [12–15]. Аналітичні матеріали з України відзначають потребу масштабної модернізації міського транспорту та показують, що успішна електрифікація вимагає значних капіталовкладень і координації на рівні міських влад і перевізників. Львів за останні роки здійснював кроки до модернізації (реформи тарифної політики, єдиний квиток, закупівлі сучасних автобусів), що створює сприятливе середовище для впровадження електробусів на прикладі окремих маршрутів. Однак бракує практичних кейсів, які поєднують натурні дослідження пасажиропотоку з економічною оцінкою повної заміни рухомого складу саме на рівні одного маршруту в українських містах [16, 17].

Постановка проблеми. Сучасна система міських пасажирських перевезень у більшості українських міст, зокрема у м. Львові, стикається з низкою проблем, пов'язаних із застарілим рухомим складом, нерівномірністю пасажиропотоків, недостатньою регулярністю руху та високим рівнем експлуатаційних витрат. Значна частина автобусів, що обслуговують міські маршрути, має підвищене енергоспоживання, високі показники шкідливих викидів у атмосферу, а також не забезпечує належного рівня комфорту для пасажирів. Зростання кількості приватного транспорту та інтенсивності дорожнього руху спричиняє затори, збільшення часу поїздки і зниження привабливості громадського транспорту. У таких умовах актуальним є пошук шляхів підвищення ефективності функціонування міських автобусних маршрутів шляхом впровадження сучасних організаційно-технологічних рішень, зокрема оптимізації графіків руху, оновлення рухомого складу та переходу на екологічні види транспорту. Для автобусного маршруту №51 м. Львова, який характеризується високим пасажиропотоком і складними умовами руху, особливо гостро постає необхідність розроблення та наукового обґрунтування комплексу заходів зі вдосконалення процесу пасажирських перевезень на цьому маршруті. Це забезпечить підвищення ефективності

транспортного обслуговування населення, зменшення витрат перевізника та покращення екологічних показників міського транспорту.

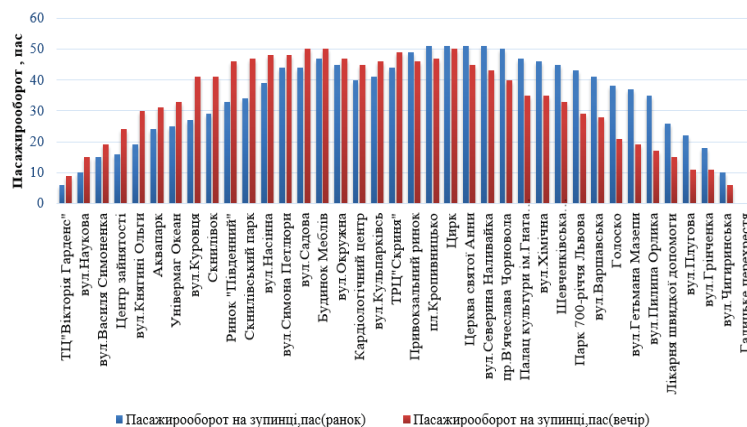
Метою роботи є наукове обґрунтування та розроблення заходів із вдосконалення процесу перевезення пасажирів на міському автобусному маршруті №51 у м. Львові шляхом аналізу наявних умов експлуатації, оцінки пасажиропотоків, техніко-економічного порівняння рухомого складу та обґрунтування доцільності переходу на екологічні види транспорту (електробуси).

Задачі роботи:

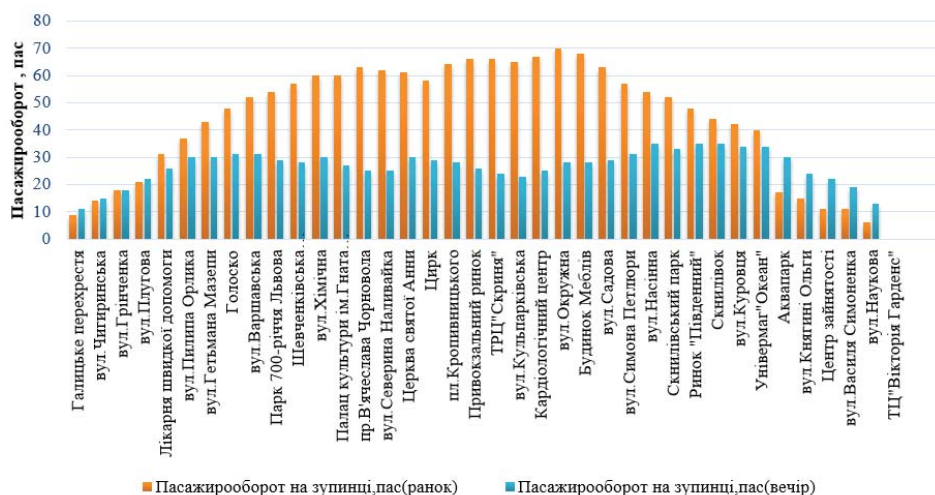
- проаналізувати сучасний стан пасажирських перевезень у м. Львові, зокрема організацію роботи маршруту №51, характеристику перевізника та діючого рухомого складу;
- визначити основні техніко-експлуатаційні показники роботи автобусів, що використовуються на маршруті, та оцінити їх відповідність сучасним вимогам до енергоефективності й екологічності;
- обґрунтувати доцільність заміни діючого рухомого складу (автобусів БАЗ А079) на сучасні електроавтобуси (наприклад, SUNLONG SLK6121EV), враховуючи технічні параметри, умови маршруту та інтенсивність перевезень;
- провести техніко-економічне порівняння варіантів експлуатації традиційного та електричного транспорту, визначити показники економічної ефективності модернізації;
- оцінити екологічний ефект переходу на електроавтобуси, визначити можливе скорочення обсягів викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище;
- сформулювати практичні рекомендації щодо підвищення ефективності організації перевезень пасажирів на міських автобусних маршрутах у контексті впровадження екологічного транспорту.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої мети дослідження було використано комплекс методів, що поєднують аналіз фактичних даних експлуатації міського маршруту, математичне моделювання, техніко-економічні розрахунки та порівняльну оцінку ефективності різних варіантів організації перевезень. Методологічну основу роботи становлять положення теорії транспортних процесів, організації пасажирських перевезень, транспортної логістики, енергетичної ефективності та екологічної безпеки міського транспорту. Дослідження спирається на державні стандарти, норми та методичні рекомендації [17–19].

На першому етапі дослідження проведено аналіз існуючої організації перевезень на маршруті №51 у м. Львові. Для цього використано методи натурних спостережень, анкетування пасажирів та аналізу облікових даних перевізника ТОВ «Успіх БМ». Натурні спостереження проводились протягом тижня у години пік і міжпікові періоди. Визначалися такі показники: інтервал руху, середня швидкість сполучення, заповнення салону, пасажиропотік на кожній зупинці. На основі результатів побудовано діаграму пасажирообороту (рис. 1), що дозволила визначити ділянки максимального навантаження та потенційні резерви оптимізації.



a



б

Рисунок 1 – Діаграма пасажирообороту у прямому (а) і зворотному (б) напрямку (ранок і вечір)

Підсумовуючи проведені натурні дослідження бачимо закономірність по періодах. Для ранкового періоду характерна більша кількість пасажирів, які використовують транспорт, через те, що більшість населення використовує громадський транспорт для добирання до місць праці, навчання і саме у цьому випадку дуже важливим фактором є час, тому вибір падає на перший маршрут, який курсує у потрібному напрямку. А щодо вечірнього періоду то час стає не таким важливим, і вибір стоїть за комфортом, або розташуванням зупинкових пунктів відносно дому. Проте, все одно кількість користувачів громадського транспорту не кардинально менша ніж у ранковий період. Також аналізуючи натурі дослідження маршруту №51 можна дійти висновку, що кількість пасажирів, які пересуваються у зворотному напрямку як у ранковий, так і у вечірній період більша ніж у прямому напрямку. Коефіцієнт наповненості на маршруті завжди більший ніж 0,5. Це означає, що автобус завжди заповнено більше ніж на половину від місткості, яка вказана у технічних характеристиках. Також у деякі моменти досягає 1 і більше, тобто автобус переповнено, а саме на зупинках палац ім. Г. Хоткевича, пр. В. Чорновола, церква Св. Анни, Цирк, ТРЦ «Скриня», пл. Кропивницького.

Для оцінки ефективності роботи діючого рухомого складу застосовано стандартні методики транспортної експлуатації (коефіцієнт використання пробігу, коефіцієнт використання пасажиромісткості, середня технічна та експлуатаційна швидкість, собівартість перевезення одного пасажирів). Показники обчислено на основі фактичних даних пробігу, тривалості рейсів, витрат пального та часу простоїв.

Сумарна потужність пасажиропотоку за рейс становитиме: для прямого напрямку $P_{пр}=1293$ пас.; для зворотного – $P_{зв}=1742$ пас. Виходячи з цих даних, для перевезення пасажирів на досліджуваному маршруті доцільно використовувати автобуси місткістю близько 70 пасажирів.

Результати використано для порівняння двох варіантів рухомого складу:

- наявні автобуси БАЗ А079, які є однією з найпопулярніших моделей автобусів у Львові;
- сучасні електроавтобуси SUNLONG SLK6121EV.

Для забезпечення досягнення мети проведено низку розрахункових і аналітичних процедур. Розрахунки проводилися за методиками [10, 11] для автобуса SUNLONG SLK6121EV, які показали, що при заміні на електроавтобус необхідна кількість засобів на маршруті зменшиться в порівнянні з автобусом меншої місткості.

Таблиця 1 – Результати розрахунку потрібної кількості автобусів на маршруті

Показник	SUNLONG SLK6121EV
Час на нульовий пробіг автобуса, год	0,19
Час роботи на маршруті, год	12,41
Час оборту, год	2,55
Кількість оборотів автобуса	4
Уточнення часу роботи автобуса на маршруті, год	12,41
Уточнення часу знаходження у наряді, год	12,6
Необхідна кількість автобусів	6
Інтервал руху автобусів, год	0,43
Інтенсивність руху автобусів од/год	2,3

Наведена нижче діаграма ілюструє фактичний графік руху однієї одиниці рухомого складу за один повний рейс (оборот), виконаний на маршруті. Графік побудовано в координатах «Час – Відстань» і дозволяє візуально оцінити технічну та експлуатаційну швидкість руху на окремих ділянках маршруту: помаранчева лінія відображає рух автобуса у прямому напрямку, чорна лінія відображає рух автобуса у зворотному напрямку (після виконання простою на кінцевому пункті).

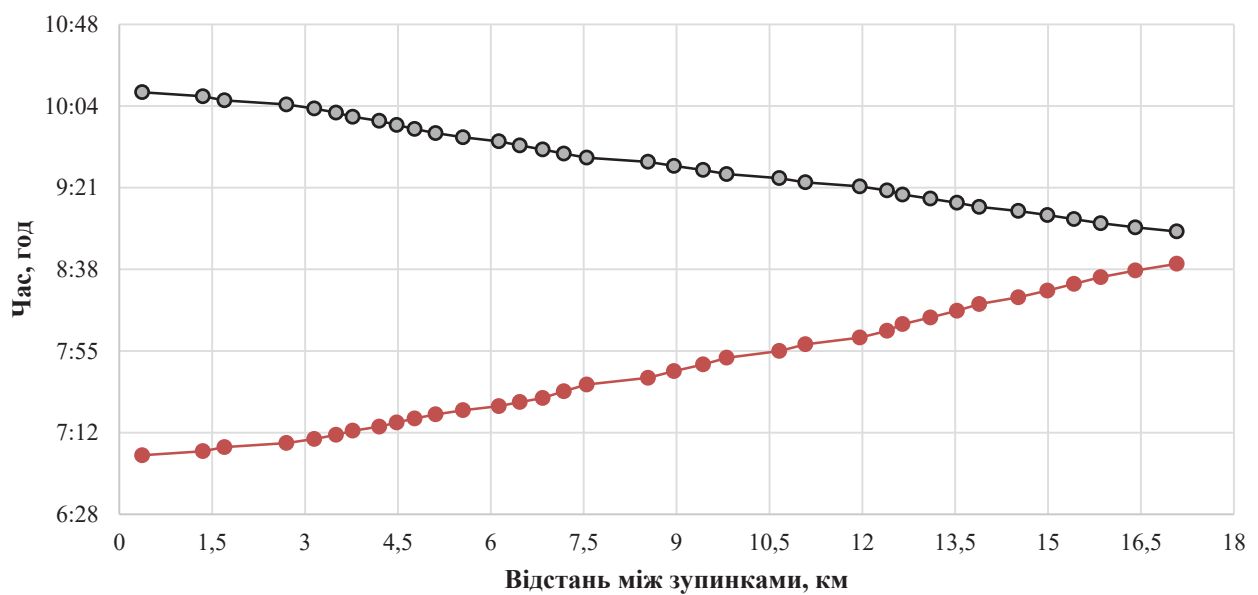


Рисунок 2 – Графік виконання одного обороту рухомого складу

Різноманітні фактори нерегулярності (рис. 3) постійно спричиняють відхилення від графіка. Ці відхилення призводять до порушення інтервалу руху, що викликає скупчення автобусів, збільшення часу очікування пасажирів на зупинках та, як наслідок, зниження рівня довіри до громадського транспорту.

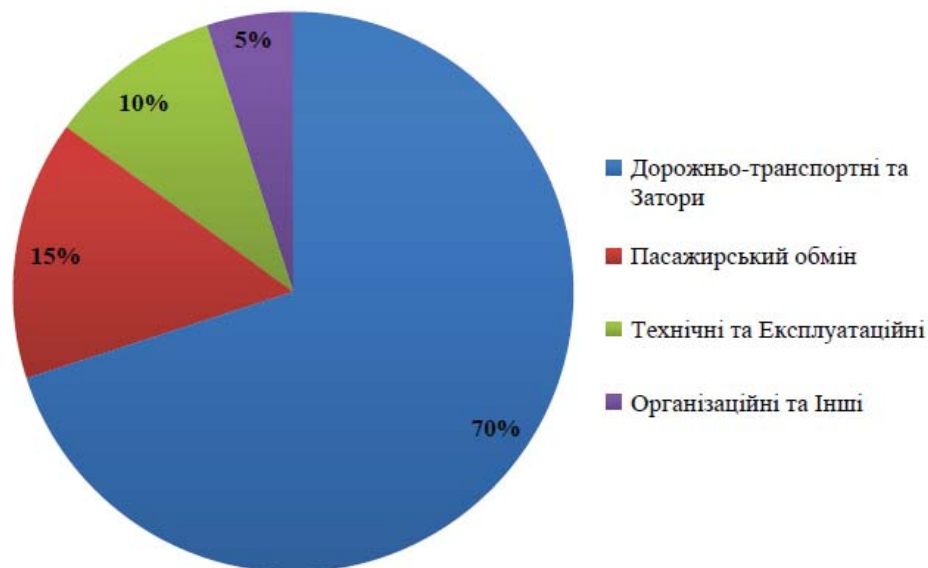


Рисунок 3 – Відсотковий розподіл причин нерегулярності руху

Для того щоб скласти розклад руху автобусів на маршруті потрібно розрахувати пасажиропотік по кожній годині доби за формулою:

$$F_i = F_{max} \cdot k_{нер}, \quad (1)$$

де F_i – пасажиропотік у і-му періоді часу, пас.;

F_{max} – максимальна транспортна робота, пас.·км ($F_{max} = 629,28$ пас.·км);

$k_{нер}$ – коефіцієнт нерівномірності пасажиропотоку.

Пасажиропотоки на досліджуваному маршруті, по кожній годині доби, зображені на рис. 4.

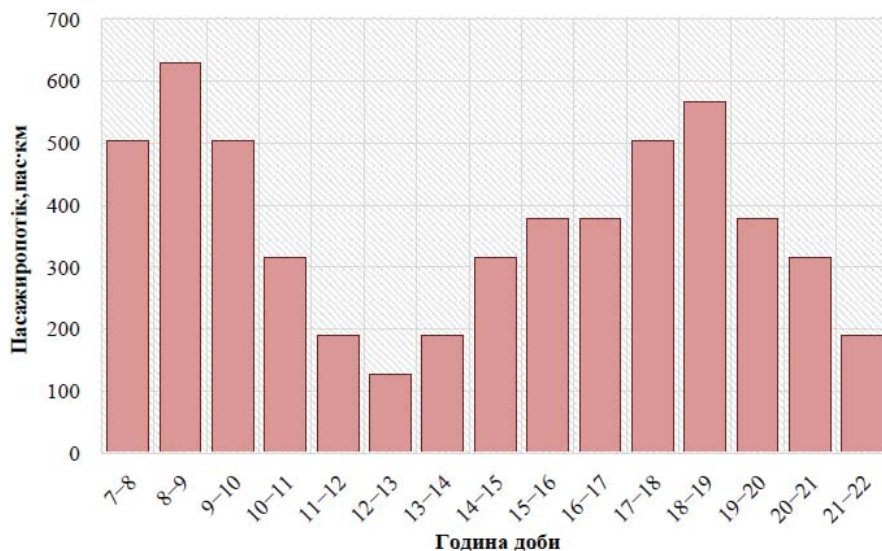


Рисунок 4 – Зміна пасажиропотоку по годинах доби

Розраховано кількість автобусів по кожній годині доби за формулою (2):

$$A_{i-j} = \frac{F_{об} \cdot t}{q_n \cdot \gamma_c}, \quad (2)$$

де A_{i-j} – кількість автобусів у і-му періоді, од.;

$t_{об}$ – час оберту, год. (2,55 год);

q_n – пасажиромісткість автобуса, пас.;

γ_c – статичний коефіцієнт використання пасажиромісткості автобуса (приймаємо $\gamma_c=0,77$).

Кількість автобусів по кожній годині доби зведено в табл. 2.

Максимальна кількість автобусів:

$$A_{\max} = 21 \cdot 0,88 = 18,5 \approx 19 \text{ од.}$$

Мінімальну кількість автобусів на маршруті:

$$A^{\min} = 2,55/0,55 \approx 4 \text{ од.}$$

Таблиця 2 – Кількість автобусів по кожній годині доби

Година доби	Значення
7–8	17
8–9	21
9–10	17
10–11	11
11–12	6
12–13	4
13–14	6
14–15	11
15–16	13
16–17	13
17–18	17
18–19	19
19–20	13
20–21	11
21–22	6

На маршруті протягом кожної години його роботи не може курсувати менше ніж 4 і більше ніж 19 автобусів (рис. 5).

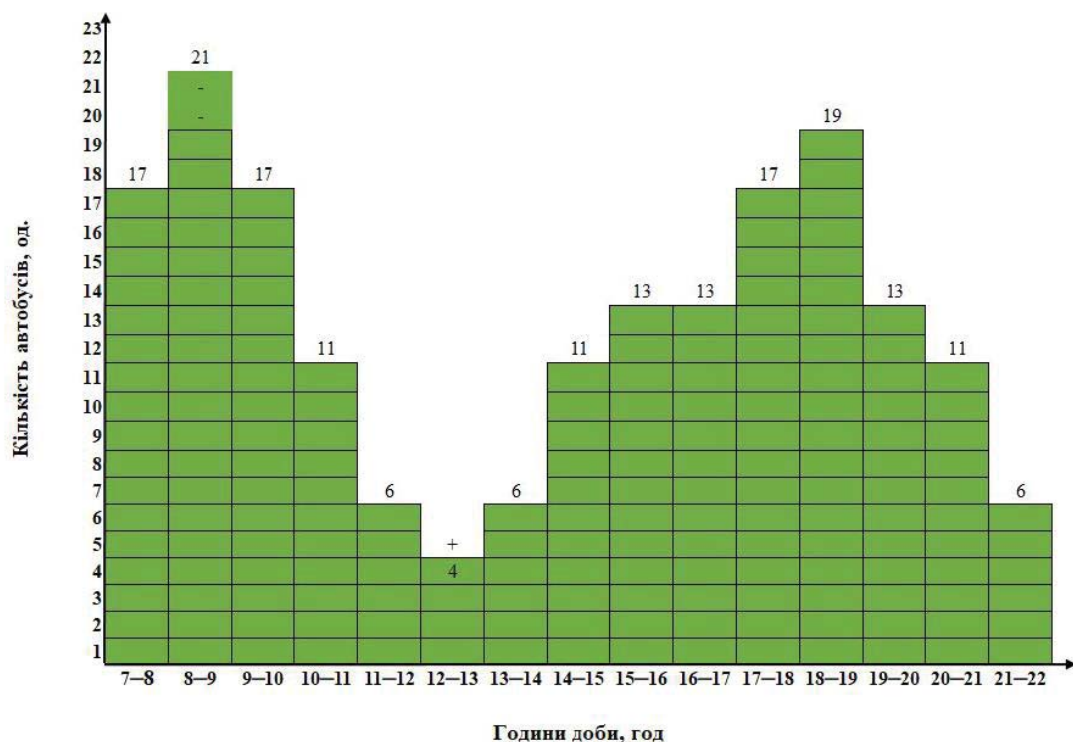


Рисунок 5 – Зміна кількості автобусів по годинах доби:

«+» – там, де потрібно збільшити кількість автобусів;

«-» – там, де потрібно зменшити кількість автобусів

Таблиця 3 – Результати розрахунків

Показник	Значення
Кількість годин за робочий день, авт·год	173
Кількість годин за вихідний день, авт·год	112
Кількість авто годин за рік, авт·год	59712
Кількість нульових пробігів	9340
Загальний нульовий пробіг, км	65380
Тривалість нульових пробігів, год	1873,35
Загальна к-сть авто годин за рік, авт·год	74883,35
Річний пробіг, км	123426
Загальний пробіг, км	1299647
Кількість автомобіле-днів, авт·дн	5670
Кількість автомобіле-днів на підприємстві, авт·дн	6670
Облікова кількість автобусів, од	18
Потрібний фонд робочого часу, год	63286
Фонд робочого часу одного водія, год	2000
Потрібна кількість водіїв	30

Розрахунок експлуатаційних витрат проводився за формулою (3):

$$C_{\text{експ}} = C_{\text{ен}} + C_{\text{зарп}} + C_{\text{рем}} + C_{\text{амор}} + C_{\text{ін}}, \quad (3)$$

де $C_{\text{ен}}$ – витрати на енергію (паливо/електроенергію);

$C_{\text{зарп}}$ – фонд заробітної плати водіїв;

$C_{\text{рем}}$ – технічне обслуговування;

$C_{\text{амор}}$ – амортизаційні відрахування;

$C_{\text{ін}}$ – інші витрати.

Розрахунок витрат з урахуванням вартості палива та технічного обслуговування без урахування заміни шин та заміни батареї раз на 6 років показав річну економію 27%.

Перехід міського автопарку з дизельних автобусів на електроавтобуси є не просто оновленням рухомого складу, а стратегічною трансформацією пасажирської транспортної галузі міста. Для успішного впровадження цієї зміни ключовим є технічне обґрунтування, яке має довести можливість безперебійної та ефективної інтеграції електробусів у наявну маршрутну мережу та операційну модель. Головним технічним викликом є забезпечення достатнього запасу ходу та оптимізація графіків зарядки. Обґрунтування вимагає моделювання, яке порівнює пробіг електробуса (наприклад, 250 км) з добовим пробігом за маршрутом (наприклад, 200–300 км) та визначає, чи необхідна проміжна дозарядка або достатньо лише нічної зарядки в депо.

Крім економії, є великі технічні плюси. Електричний двигун дуже простий: у ньому немає складних частин, які постійно потрібно змащувати, міняти фільтри чи ремонтувати. Немає коробки передач, немає складної системи вихлопу. Через це електроавтобуси рідше стоять у ремонті і частіше возять пасажирів. Вони також використовують "розумне" гальмування, коли енергія від уповільнення не втрачається дарма, а повертається назад у батарею. Це не тільки заощаджує електрику, але й допомагає довше служити гальмівним колодкам. Тож автобус не тільки менше ламається, але й потребує менше обслуговування.

Найбільшу користь від переходу отримують мешканці міста, адже це пряма турбота про наше здоров'я та комфорт. Дизельні автобуси викидають у повітря дим, кіптяву і багато шкідливих речовин. Електроавтобуси ж зовсім не мають вихлопу під час руху. Повітря стає чистішим, а дихати у місті – легше. Крім того, ці автобуси їдуть дуже тихо. Це означає

менше шуму на вулицях, особливо рано вранці та пізно ввечері, що робить життя біля доріг набагато комфортнішим.

Електроавтобуси є транспортом із нульовими місцевими викидами. Це означає, що під час руху вони не виділяють у повітря жодних шкідливих речовин: диму, сажі, оксидів азоту чи твердих частинок, які є основними забруднювачами, що спричиняють респіраторні та серцево-судинні захворювання у мешканців. На відміну від дизельних автобусів, які постійно забруднюють повітря в центрі міст і поблизу зупинок, електроавтобуси зберігають повітря чистим там, де живуть і працюють люди.

Іншим важливим екологічним фактором є зниження шумового забруднення. Дизельний автобус є основним джерелом шуму: його показники сягають 85–90 дБ при розгоні або русі на низькій швидкості, а також під час очікування на зупинці (близько 68 дБ), оскільки основний шум створює двигун внутрішнього згоряння, що працює. Натомість електроавтобус демонструє значно менші показники, генеруючи шум на рівні 55–60 дБ під час руху у потоці. Ця різниця, що становить 15–30 дБ, є критичною, оскільки зниження шуму на 10 дБ людським вухом сприймається як зменшення гучності вдвічі. Таким чином, перехід на електроавтобуси забезпечує значне покращення акустичного комфорту в міському середовищі, що є важливою соціальною та екологічною перевагою.

Таким чином, перехід на електроавтобуси дозволяє транспортному підприємству зробити прямий внесок у виконання екологічних цілей міста. Це не просто "зелена" ініціатива, а прагматичний крок для виведення забруднення з міських доріг. З огляду на те що на транспорт припадає помітна частка загальних викидів, модернізація автопарку електротягою стає однією з найефективніших інвестицій у стійкий розвиток та підвищення якості життя.

Економічний розрахунок показав різницю у витратах на закупівлю автобусів двох марок, яка становить 15676200 грн. Цю суму потрібно додатково інвестувати для впровадження нових ТЗ на транспортному підприємстві.

Варто зауважити, що потрібні додаткові кошти для створення власної інфраструктури, а саме власної зарядної станції для 3–4 автобусів. Вартість однієї одиниці становить 210439 грн. Зараз в Україні багато станцій у вільному доступі. Ціна на швидкі зарядки для електромобілів у Львові зазвичай становить 16...18 грн / (кВт·год).

Висновки. У результаті проведеного дослідження визначено фактичну нерівномірність пасажиропотоку на маршруті №51, розраховано техніко-експлуатаційні показники автобусів БАЗ А079 і електроавтобусів SUNLONG SLK6121EV, розроблено оптимальний графік руху електроавтобусів, який забезпечує повне перевезення пасажирів без зниження якості обслуговування, скорочено собівартість перевезення одного пасажиро-кілометра з 3,85 грн до 2,75 грн, доведено економічну доцільність переходу на електротранспорт шляхом зменшення експлуатаційних витрат приблизно на 25–30%, розраховано скорочення викидів шкідливих речовин на 100% для CO₂ і на понад 80% для оксидів азоту. Отримані результати підтверджують, що використання електроавтобусів забезпечує сталий розвиток міського транспорту й відповідає європейським тенденціям «зеленого переходу» в мобільності. Отримані результати можуть бути використані підприємством ТОВ «Успіх БМ» при плануванні оновлення рухомого складу та оптимізації маршрутної мережі. Запропоновані підходи можуть бути адаптовані для інших міських автобусних маршрутів Львова та інших міст України. Матеріали роботи можуть бути використані у навчальному процесі під час викладання дисциплін «Організація пасажирських перевезень» та «Транспортна логістика».

Напрямки подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію зарядної інфраструктури для електроавтобусів у міських умовах, розроблення моделей адаптивного розкладу руху із застосуванням систем GPS-моніторингу та штучного інтелекту, оцінку впливу впровадження електротранспорту на загальну транспортну екосистему міста.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Войтович О. А., Кузьменко І. О., Луб'яний П. В. Доступність пасажирського транспорту для населення з огляду формування тарифу / *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2023. № 1–2 (26–27). С. 107–120. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.107-118>.
2. Войтович О. А., Луб'яний П. В., Мосьпан В. М., Кузьменко І. О. Модель розрахунку вибору способу пересування за критерієм доступності / *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2024. № 2 (29). С. 178–186. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.2.29.178-186>.
3. Проценко В. О. Перспективи удосконалення пасажирського сполучення в місті Херсоні застосуванням тролейбусів з автономним ходом / В. О. Проценко // *Вісник Херсонського національного технічного університету*. Одеса: Видавничий дім «Гельветіка». 2025. С. 191–201. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.26
4. Ghotge R., van Rooij D., van Breukelen S. Total Cost of Ownership of Electric Buses in Europe. *World Electric Vehicle Journal*. 2025. Vol. 16, No. 8. Article 464. <https://doi.org/10.3390/wevj16080464>.
5. Ahmadi P., Raeesi M., Changizian S., Teimouri A., Khoshnevisan A. Lifecycle assessment of diesel, diesel-electric and hydrogen fuel cell transit buses with fuel cell degradation and battery aging using machine learning techniques. *Energy*. 2022. Vol. 259. Article 125003. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125003>.
6. Naeimian B., Mohseni G., Barzegari V., Nourinejad M., Park P. Y. Public transportation fleet electrification and charger schedule optimization using a decomposition heuristic. *Energy*. 2025. Vol. 333. Article 137135. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137135>.
7. Dabčević Z., Deur J. Interactive Optimization of Electric Bus Scheduling and Overnight Charging. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 16. Article 4440. <https://doi.org/10.3390/en18164440>.
8. Zhang M., Yang M., Li Y., Huang S. Optimization of Electric Bus Scheduling Considering Charging Station Resource Constraints. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2024. Режим доступу: <https://www.worldtransitresearch.info/research/10631/>.
9. Rogge M., van der Hurk E., Larsen A., Sauer D. U. Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure. *Applied Energy*. 2018. Vol. 211. P. 282–295. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.051>.
10. Tang C., Li X., Ceder A. (Avi), Wang X. Public Transport Fleet Replacement Optimization Using Multi-Type Battery-Powered Electric Buses. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2021. Vol. 2675(12). P. 1422–1431. <https://doi.org/10.1177/03611981211027157>.
11. Burdzik R., Chema W., Celiński I. A study on passenger flow model and simulation in aspect of COVID-19 spreading on public transport bus stops. *Journal of Public Transportation*. 2023. Vol. 25. Article 100063. <https://doi.org/10.1016/j.jpuptr.2023.100063>.
12. Xian L., Tian L. Passenger flow prediction and management method of urban public transport based on SDAE model and improved Bi-LSTM neural network. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology*. 2023. Vol. 45(6). P. 10563–10577. <https://doi.org/10.3233/JIFS-232979>.
13. Subbiah S. S., Paramasivan S. K., Arockiasamy K., Senthivel S., Thangavel M. Deep Learning for Wind Speed Forecasting Using Bi-LSTM with Selected Features. *Intelligent Automation & Soft Computing*. 2023. Vol. 35(3). P. 3829–3844. <https://doi.org/10.32604/iasc.2023.030480>.
14. Ritari A., Vepsäläinen J., Kivekäs K., Tammi K., Laitinen H. Energy Consumption and Lifecycle Cost Analysis of Electric City Buses with Multispeed Gearboxes. *Energies*. 2020. Vol. 13(8). Article 2117. <https://doi.org/10.3390/en13082117>.
15. Lytvyn V., Bublyk M., Vysotska V., Matseliukh Y. Visual simulation technology for passenger flows in the public transport field at smart city. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2022. No. 4. P. 106–121. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-4-10>.

16. Загорянський В. Г. Застосування статистичних методів наукових досліджень при обстеженні пасажиропотоків міського автомобільного транспорту. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. Вип. 6(37). Ч. 2. С. 82–89. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6\(37\).2.82-89](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).2.82-89).

17. Vision Zero Ukraine. Режим доступу: <https://visionzero.org.ua/>.

18. Закон України «Про автомобільний транспорт» // Відомості Верховної Ради України. 2001. № 22. Ст. 105.

19. Положення про робочий час і час відпочинку водіїв колісних транспортних засобів: затв. наказом Міністерства транспорту та зв'язку України від 07.06.2010 р. № 340 // Офіційний вісник України. 2010. № 48. С. 40.

REFERENCES

1. Voityovych, O. A., Kuzmenko, I. O., & Lubianyi, P. V. (2023). Dostupnist pasazhyrskoho transportu dlia naselennia z ohliadu formuvannia taryfu [Accessibility of passenger transport for the population in terms of tariff formation]. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*, (1–2/26–27), 107–120. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.107-118>.

2. Voityovych, O. A., Lubianyi, P. V., Mospan, V. M., & Kuzmenko, I. O. (2024). Model rozrakhunku vyboru sposobu peresuvannia za kryteriiem dostupnosti [Model for calculating the choice of mode of movement according to the criterion of accessibility]. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*, (2/29), 178–186. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.2.29.178-186>.

3. Protsenko, V. O. (2025). Perspektyvy udoskonalennia pasazhyrskoho spoluchennia v misti Khersoni zastosuvanniam troleibusiv z avtonomnym khodom [Prospects for improving passenger communication in the city of Kherson by using trolleybuses with autonomous running]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 191–201. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.26>.

4. Ghotge, R., van Rooij, D., & van Breukelen, S. (2025). Total cost of ownership of electric buses in Europe. *World Electric Vehicle Journal*, 16(8), Article 464. <https://doi.org/10.3390/wevj16080464>.

5. Ahmadi, P., Raesi, M., Changizian, S., Teimouri, A., & Khoshnevisan, A. (2022). Lifecycle assessment of diesel, diesel-electric and hydrogen fuel cell transit buses with fuel cell degradation and battery aging using machine learning techniques. *Energy*, 259, Article 125003. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125003>.

6. Naeimian, B., Mohseni, G., Barzegari, V., Nourinejad, M., & Park, P. Y. (2025). Public transportation fleet electrification and charger schedule optimization using a decomposition heuristic. *Energy*, 333, Article 137135. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137135>.

7. Dabčević, Z., & Deur, J. (2025). Interactive optimization of electric bus scheduling and overnight charging. *Energies*, 18(16), Article 4440. <https://doi.org/10.3390/en18164440>.

8. Zhang, M., Yang, M., Li, Y., & Huang, S. (2024). Optimization of electric bus scheduling considering charging station resource constraints. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. <https://www.worldtransitresearch.info/research/10631/>.

9. Rogge, M., van der Hurk, E., Larsen, A., & Sauer, D. U. (2018). Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure. *Applied Energy*, 211, 282–295. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.051>.

10. Tang, C., Li, X., Ceder, A. (Avi), & Wang, X. (2021). Public transport fleet replacement optimization using multi-type battery-powered electric buses. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2675(12), 1422–1431. <https://doi.org/10.1177/03611981211027157>.

11. Burdzik, R., Chema, W., & Celiński, I. (2023). A study on passenger flow model and simulation in aspect of COVID-19 spreading on public transport bus stops. *Journal of Public Transportation*, 25, Article 100063. <https://doi.org/10.1016/j.jpuptr.2023.100063>.

12. Xian, L., & Tian, L. (2023). Passenger flow prediction and management method of urban public transport based on SDAE model and improved Bi-LSTM neural network. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 45(6), 10563–10577. <https://doi.org/10.3233/JIFS-232979>.
13. Subbiah, S. S., Paramasivan, S. K., Arockiasamy, K., Senthivel, S., & Thangavel, M. (2023). Deep learning for wind speed forecasting using Bi-LSTM with selected features. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 35(3), 3829–3844. <https://doi.org/10.32604/iasc.2023.030480>.
14. Ritari, A., Vepsäläinen, J., Kivekäs, K., Tammi, K., & Laitinen, H. (2020). Energy consumption and lifecycle cost analysis of electric city buses with multispeed gearboxes. *Energies*, 13(8), Article 2117. <https://doi.org/10.3390/en13082117>.
15. Lytvyn, V., Bublyk, M., Vysotska, V., & Matseliukh, Y. (2022). Visual simulation technology for passenger flows in the public transport field at smart city. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (4), 106–121. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-4-10>.
16. Zahorianskyi, V. H. (2022). Zastosuvannia statystychnykh metodiv naukovykh doslidzhen pru obstezhenni pasazhyropotokiv miskoho avtomobilnoho transportu [Application of statistical methods of scientific research in the survey of passenger flows of urban road transport]. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 6(37), Part 2, 82–89. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6\(37\).2.82-89](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).2.82-89).
17. Vision Zero Ukraine. (n.d.). Retrieved November 17, 2025, from <https://visionzero.org.ua/>.
18. Zakon Ukrainy “Pro avtomobilnyi transport” [Law of Ukraine “On Road Transport”], Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy, № 22, st. 105 (2001).
19. Polozhennia pro robochyi chas i chas vidpochynku vodiiv kolisnykh transportnykh zasobiv [Regulation on working hours and rest time of drivers of wheeled vehicles], zatverdzhene nakazom Ministerstva transportu ta zviazku Ukrainy vid 07.06.2010 № 340, Ofitsiyni visnyk Ukrainy, № 48, st. 40 (2010).

Voitovych O. A., Lubyany P. V., Martynyk V. S. IMPROVING THE PROCESS OF URBAN PASSENGER TRANSPORTATION THROUGH JUSTIFYING THE TRANSITION TO ENVIRONMENTALLY FRIENDLY MODES OF TRANSPORT (ELECTRIC BUSES)

This article examines the improvement of urban passenger transportation efficiency through the justified transition to environmentally friendly modes of transport, with a particular focus on battery-electric buses. The research addresses key challenges faced by Ukrainian cities, including outdated and energy-inefficient bus fleets, fluctuating and growing passenger flows, rising fuel and maintenance costs, and the urgent need to reduce harmful emissions and modernize public transport systems in line with European sustainability directives. The methodological framework combines field observations, detailed analysis of hourly passenger flows, technical and operational performance assessment, modelling of route schedules, and economic comparison between conventional diesel buses and modern electric buses. Using Lviv's Route No. 51 as a case study, the research identifies significant irregularities in demand throughout the day, determines the optimal number of vehicles required in each time interval, and proposes an improved schedule specifically tailored to electric bus capabilities and charging requirements. The comparative analysis demonstrates that replacing BAZ A079 buses with SUNLONG SLK6121EV electric buses can reduce operating costs by 25–30%, fully eliminate local CO₂ emissions, and substantially decrease noise pollution in densely populated urban areas. Additionally, the study highlights long-term advantages such as simplified maintenance, regenerative braking efficiency, improved passenger comfort, and increased operational reliability. The proposed transition model offers a scientifically grounded decision-making tool for transport operators and municipal authorities, supporting strategic fleet renewal, infrastructure development, and broader sustainable mobility initiatives aimed at enhancing the overall quality of urban transport services.

Key words: electric buses; passenger flow; urban transport; operational performance; sustainable mobility; route optimization.

© Войтович О. А., Луб'яний П. В., Мартиник В. С.

Статтю прийнято до редакції 17.11.2025