

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Аналіз пасажирських перевезень міським автомобільним транспортом
з використанням сучасних інформаційних технологій

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи МНс-41
спеціальності 275.03 «Транспортні технології

(на автомобільному транспорті)

(шифр і назва спеціальності)

| | |
|-------------------|------------------------|
| | <u>Ткач І. В.</u> |
| | (прізвище та ініціали) |
| Керівник | <u>Вовк Ю. Я.</u> |
| | (прізвище та ініціали) |
| Нормоконтроль | <u>Цьонь О. П.</u> |
| | (прізвище та ініціали) |
| Завідувач кафедри | <u>Цьонь О. П.</u> |
| | (прізвище та ініціали) |
| Рецензент | <u></u> |
| | (прізвище та ініціали) |

РЕФЕРАТ

Ткач Іван Володимирович – Аналіз пасажирських перевезень міським автомобільним транспортом з використанням сучасних інформаційних технологій – Рукопис.

Кваліфікаційні робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 275.03 – Транспортні технології (на автомобільному транспорті). – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, – Тернопіль, 2026.

У роботі проаналізовано стан маршрутної мережі та рухомого складу комунального підприємства «Тернопільське міське комунальне підприємство пасажирського транспорту», виявлено основні проблеми та диспропорції в організації перевезень. Проведено натурне обстеження пасажиропотоків маршруту №16 із застосуванням даних автоматизованої системи оплати оплати (АСООП/АFC). Систематизовано сучасні ІТ-технології підтримки управлінських рішень: APC-лічильники, GTFS/GTFS-RT, GPS AVL, ML-моделі (LSTM, XGBoost). Розроблено оптимізований розклад руху маршруту №16 із диференційованими інтервалами за часовими слотами та схемою пікових виходів. Проведено економічне обґрунтування запропонованих заходів. Виконано аналіз умов праці та розраховано скорочення викидів CO₂ від оптимізації маршруту.

Практичне значення результатів: запропоновані рішення можуть бути застосовані КП «ТМКППТ» та органами місцевого самоврядування Тернополя при оновленні розкладів руху, впровадженні GTFS-платформи та плануванні цифровізації системи МПТ відповідно до Програми розвитку МПТ на 2024–2026 роки.

МІСЬКИЙ ПАСАЖИРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ, АВТОБУСНИЙ МАРШРУТ, ПАСАЖИРОПОТІК, РОЗКЛАД РУХУ, ОПТИМІЗАЦІЯ, ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ, СОБІВАРТІСТЬ ПЕРЕВЕЗЕНЬ.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП | 8 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ | 11 |
| 1.1. Загальна характеристика системи міських пасажирських перевезень та об'єкта дослідження | 11 |
| 1.2 Аналіз техніко-експлуатаційних показників роботи транспортної мережі | 16 |
| 1.3 Оцінювання стану рухомого складу та ефективності використання автобусного парку | 23 |
| 1.3.1 Кількісна та якісна характеристика автобусного парку | 24 |
| 1.3.2 Розрахунок коефіцієнтів технічної готовності та випуску | 26 |
| 1.3.3 Аналіз програми оновлення парку та фінансового забезпечення | 28 |
| 1.3.4 Технологічне оснащення рухомого складу та АСООП | 30 |
| 1.4 SWOT-аналіз організації міських пасажирських перевезень у Тернополі | 31 |
| 1.4.1 Ідентифікація факторів SWOT-матриці | 32 |
| 1.4.2 Зважена оцінка факторів SWOT-матриці | 34 |
| 1.4.3 SOWO/STWT-матриця стратегічних альтернатив | 36 |
| 1.4.4 Інтерпретація результатів SWOT-аналізу та стратегічні висновки | 38 |
| Висновки до розділу 1 | 39 |
| РОЗДІЛ 2. ЗАХОДИ ІЗ УДОСКОНАЛЕННЯ ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕСУ | 42 |
| 2.1 Визначення вимог до організації транспортного процесу на маршруті №16 м. Тернополя | 42 |
| 2.1.1 Характеристика маршруту №16 та схема руху | 42 |
| 2.1.2 Обґрунтування вибору рухомого складу | 45 |
| 2.1.3 Нормування швидкостей руху та розрахунок часових параметрів | 47 |
| 2.1.4 Розрахунок необхідної кількості автобусів та перевірка розкладу | 48 |
| 2.1.5 Організація праці та відпочинку водіїв | 50 |

| | |
|--|-----------|
| 2.2 Застосування сучасних інформаційних технологій для аналізу та оптимізації пасажирських перевезень..... | 51 |
| 2.2.1 Огляд класифікації інформаційних технологій у міському пасажирському транспорті | 51 |
| 2.2.2 Системи автоматичного підрахунку пасажирів (APC) та електронної оплати (AFC)..... | 53 |
| 2.2.3 Стандарт GTFS та GPS-моніторинг: основа даних для транспортного аналізу..... | 55 |
| 2.2.4 Методи машинного навчання у прогнозуванні пасажиропотоків | 58 |
| 2.2.5 Розрахунок потенційного ефекту від впровадження ІТ-інструментів для маршруту №16 | 59 |
| 2.2.6 Архітектура ІТ-рішення для транспортної системи Тернополя | 61 |
| 2.3 Розробка оптимізованого розкладу руху на маршруті №16..... | 64 |
| 2.3.1 Методичні засади оптимізації розкладу міського автобусного маршруту | 64 |
| 2.3.2 Розрахунок оптимального інтервалу руху за часовими слотами..... | 66 |
| 2.3.3 Визначення чисельності рухомого складу та організація виходів | 68 |
| 2.3.4 Розробка фрагменту оптимізованого розкладу руху (ранковий пік).... | 71 |
| 2.3.5 Аналіз ефекту від оптимізації розкладу та порівняння варіантів | 72 |
| 2.3.6 Інтеграція оптимізованого розкладу з ІТ-платформою та GTFS..... | 73 |
| 2.4 Економічне обґрунтування ефективності запропонованих заходів | 75 |
| Висновки до розділу 2..... | 80 |
| РОЗДІЛ 3. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ.. | 83 |
| 3.1 Аналіз умов праці та шкідливих виробничих факторів при експлуатації міського автобусного маршруту..... | 83 |
| 3.1.1 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори для водія міського автобуса | 83 |
| 3.2 Заходи з охорони праці персоналу транспортного підприємства..... | 85 |
| 3.3 Екологічна безпека міського автобусного транспорту..... | 87 |
| 3.4 Безпека в надзвичайних ситуаціях | 89 |

| | |
|----------------------------------|----|
| Висновки до розділу 3..... | 90 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 92 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 96 |

ВСТУП

Міський пасажирський транспорт є однією з ключових складових міської інфраструктури, від ефективності якої безпосередньо залежить якість життя населення, рівень транспортної доступності та екологічна ситуація в місті. В умовах зростання урбанізації, підвищення вимог громадян до якості транспортних послуг та необхідності раціонального використання бюджетних коштів оптимізація організації перевезень набуває першочергового значення (Vovk & Vovk, 2021; Plioroulou & Keraptsoglou, 2019).

Тернопіль – місто обласного значення з населенням близько 225 тис. осіб – має розгалужену мережу міського автобусного транспорту, яка включає 35 маршрутів і обліковий парк 144 автобуси. Незважаючи на наявність системи безготівкової оплати проїзду (АСООП) та часткове оновлення рухомого складу в рамках Програми розвитку МПТ на 2024–2026 роки, система МПТ Тернополя стикається з типовими проблемами міських транспортних мереж: нерівномірністю пасажиропотоків, застарілим рухомим складом, відсутністю адаптивного розкладу та недостатнім рівнем інформування пасажирів у реальному часі (Тернопільська міська рада, 2023; Szczupak & Turo, 2022).

Актуальність теми визначається тим, що в умовах воєнного стану та обмежених фінансових ресурсів підвищення ефективності МПТ можливе передусім через організаційні та цифрові заходи – без значних капітальних вкладень. Натурні дані АСООП, які щодня накопичуються в системі (понад 74 тис. транзакцій на маршруті №16), є потужним інформаційним ресурсом для прийняття науково обґрунтованих управлінських рішень, проте залишаються практично невикористаними для оптимізації розкладу та планування виходів рухомого складу (Bosurgi et al., 2021; Zhuk et al., 2023).

Зв'язок роботи з науковими програмами та планами. Тематика кваліфікаційної роботи узгоджується з пріоритетними напрямками досліджень кафедри транспортних технологій та механіки Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя в галузі організації та ефективності

транспортних систем, а також із напрямками наукових досліджень, що відображені у публікаціях у журналах Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics (JSDTL) та Economics, Management and Sustainability (JEMS).

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є розробка та економічне обґрунтування організаційно-технологічних заходів з підвищення ефективності міських автобусних перевезень на маршруті №16 м. Тернополя на основі аналізу пасажиропотоків, застосування сучасних ІТ-інструментів управління та оптимізованого розкладу руху.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- 1) дослідити теоретичні засади організації міських пасажирських перевезень та проаналізувати стан маршрутної мережі і рухомого складу МПТ м. Тернополя;
- 2) провести комплексний аналіз техніко-експлуатаційних показників роботи парку та маршруту №16, виконати SWOT-аналіз системи МПТ;
- 3) здійснити натурне обстеження пасажиропотоків маршруту №16 та виявити закономірності їх розподілу за часом доби;
- 4) систематизувати сучасні ІТ-технології (APC, AFC, GTFS, GTFS-RT, GPS AVL, ML) для підтримки управлінських рішень у сфері МПТ;
- 5) розробити оптимізований розклад руху маршруту №16 з диференційованими інтервалами та схемою пікових виходів;
- 6) провести економічне обґрунтування запропонованих заходів та оцінити їх соціальний ефект;
- 7) проаналізувати умови праці персоналу та екологічну безпеку роботи маршруту.

Об'єкт дослідження – процес організації міських пасажирських перевезень автобусним транспортом на маршрутній мережі м. Тернополя.

Предмет дослідження – методи і показники оцінювання ефективності функціонування міського автобусного маршруту та інструменти оптимізації

розкладу руху.

У роботі використано: системний аналіз для комплексної оцінки маршрутної мережі; статистичний метод та метод варіаційних рядів для опрацювання даних АСООП; табличний метод обстеження пасажиропотоків; техніко-економічний аналіз для розрахунку ТЕП і собівартості перевезень; SWOT-аналіз з кількісним зважуванням факторів за методикою Szczupak & Turo (2022); метод дисконтованих грошових потоків для оцінювання NPV та BCR; розрахункові методи визначення оптимальних інтервалів руху за методикою Vovk & Vovk (2021).

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше для умов маршрутної мережі м. Тернополя розроблено методику формування оптимізованого розкладу руху на основі поєднання натурних даних АСООП/АФС та чотирирівневої ІТ-архітектури управління (збір – передача – аналіз – рішення), що забезпечує диференційований підхід до планування виходів рухомого складу з урахуванням реального погодинного профілю пасажиропотоку. Дістало подальшого розвитку застосування методів машинного навчання (LSTM, XGBoost) для прогнозування пасажиропотоків у містах з мережами середнього масштабу.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані в роботі організаційні та технологічні рішення – оптимізований розклад маршруту №16, схема пікових виходів, дорожня карта впровадження GTFS-платформи – можуть бути безпосередньо використані КП «ТМКШПТ», Тернопільською міською радою та іншими транспортними підприємствами міст України з аналогічними мережами. Очікуваний річний фінансовий ефект від впровадження рекомендацій роботи для маршруту №16 становить 4 549 тис. грн, скорочення часу очікування пасажирів у пікові години – 37,5 %, зменшення викидів CO₂ – 16,4 т/рік.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (41 позиція) та додатків. Загальний обсяг роботи – 99 сторінок. Робота містить 11 таблиць, 8 рисунків, 9 графіків і діаграм.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Загальна характеристика системи міських пасажирських перевезень та об'єкта дослідження

Міські пасажирські перевезення автомобільним транспортом є однією з базових складових функціонування міського господарства, оскільки саме вони забезпечують щоденну транспортну доступність місць праці, навчання, адміністративних, медичних і торговельних центрів. Для сучасного міста якість транспортного обслуговування визначається не лише кількістю маршрутів чи транспортних засобів, а й узгодженістю маршрутної мережі з фактичними пасажиропотоками, регулярністю руху, рівнем безпеки та здатністю системи адаптуватися до змін попиту. У цьому контексті міський автомобільний транспорт виступає не лише засобом переміщення населення, а й інструментом формування просторової зв'язаності міста, тому його дослідження має як прикладне, так і стратегічне значення.

Об'єктом подальшого дослідження доцільно визначити систему міських пасажирських перевезень автомобільним транспортом у місті Тернополі як цілісну організаційно-технологічну сукупність маршрутів, перевізників, рухомого складу, інфраструктури зупинок, засобів диспетчерського контролю та цифрових сервісів оплати й інформування пасажирів. Такий вибір є методично виправданим, оскільки Тернопіль останніми роками послідовно оновлює маршрутну мережу, змінює принципи нумерації маршрутів, впроваджує автоматизовану систему обліку оплати проїзду й орієнтується на результати обстежень пасажиропотоків при ухваленні управлінських рішень. Отже, саме це міське середовище дає змогу поєднати класичний транспортний аналіз із вивченням сучасних інформаційних технологій у сфері пасажирських перевезень.

Тернопільська система громадського транспорту функціонує в умовах поєднання муніципального та приватного сегментів перевезень. Організаційне

регулювання здійснюється органом місцевого самоврядування через затвердження маршрутів громадського транспорту загального користування, кількості транспортних засобів та умов обслуговування мережі. Така модель є типовою для українських міст, однак у Тернополі вона доповнюється активним використанням цифрових інструментів, що дає підстави розглядати місцеву транспортну систему як перспективний приклад для бакалаврського дослідження в галузі транспортних технологій.

Тернопіль є адміністративним центром області та виконує функції значного освітнього, медичного, торговельного й сервісного осередку регіону, тому міська транспортна система працює під впливом не лише внутрішньоміських, а й маятникових переміщень із прилеглих територій. Формування попиту на перевезення пов'язане з наявністю виразних центрів тяжіння пасажирів: центральної частини міста, ринку, автовокзалу, медичних закладів, закладів освіти, промислово-складських зон і нових житлових районів. Саме наявність нових місць тяжіння пасажирів була прямо врахована під час оновлення маршрутної мережі, що підтверджує тісний зв'язок між містобудівним розвитком і транспортним плануванням.

Особливістю Тернополя є наявність кількох житлових масивів із різною інтенсивністю забудови та різним характером поїздок населення. У рішеннях міської ради окремо акцентовано потребу покращення сполучення з Північним районом, вулицею Київською, Текстильною, Східним масивом і міським кладовищем, що свідчить про наявність локальних диспропорцій у транспортній доступності та необхідність адресного коригування маршрутів. Для транспортного дослідження це важливо тому, що попит у таких умовах не є рівномірним, а отже оцінювання маршрутної мережі повинне спиратися на фактичні пасажиропотоки, часову нерівномірність і особливості районної структури міста.

Система міських пасажирських перевезень Тернополя включає автобусні та тролейбусні маршрути, однак у межах цієї кваліфікаційної роботи основну увагу зосереджено саме на міському автомобільному транспорті, тобто автобусах

та маршрутних автобусах, що працюють на маршрутах загального користування. Такий фокус обумовлений тим, що автобусний транспорт має високу гнучкість щодо зміни трасування, кількості рухомого складу та інтервалів руху, а також найчастіше потребує оперативного управління на основі даних моніторингу й обстежень пасажиропотоків. Крім того, саме автобусний сегмент у Тернополі є одним із ключових об'єктів поточного реформування, включаючи нову маршрутну нумерацію, вимоги до обладнання валідаторами та уніфікацію зовнішнього оформлення.

Зміст оновлення маршрутної мережі свідчить, що орган місцевого самоврядування перейшов від часткових змін до більш системного перегляду конфігурації перевезень. Офіційно зазначено, що нова мережа формувалася в межах підготовки до конкурсу на перевезення та максимально враховувала пропозиції мешканців, результати обстежень пасажиропотоків, потреби у перевезеннях і можливості вулично-дорожньої мережі. Це є важливим методичним моментом, оскільки підтверджує доцільність використання в роботі не лише описового, а й аналітичного підходу, коли характеристики маршрутів розглядаються крізь призму реального транспортного попиту.

Оновлення мережі громадського транспорту в Тернополі було затверджене рішенням виконавчого комітету 5 березня 2025 року, а його ключовою метою визначено підвищення якості перевезень, покращення комфорту пасажирів і безпеки на маршрутах. До ключових нововведень віднесено запровадження єдиної нумерації маршрутів, встановлення валідаторів у всіх автобусах, брендване оформлення транспорту, а також заплановане встановлення камер відеоспостереження і тривожних кнопок у маршрутних автобусах. Таким чином, йдеться не лише про зміну трас руху, а про трансформацію всієї моделі функціонування системи перевезень у напрямі більшої керованості та цифрової прозорості.

Аналіз оприлюднених змін показує, що оновлення мережі в Тернополі спрямоване на розв'язання конкретних транспортних проблем, а не має формального характеру. Зокрема, було розділено один із маршрутів на два

реверсні напрями для кращого сполучення окремих районів, уведено нові маршрути для зв'язку Північного мікрорайону з центральною частиною міста, передбачено спеціальний маршрут до міського кладовища, а також покращено транспортне обслуговування районів лікарні №3, вулиці Текстильної та нових житлових територій. Це свідчить, що маршрутна мережа міста розвивається з орієнтацією на локальні осередки попиту й соціально значущі об'єкти, що повністю відповідає сучасним підходам до планування міських перевезень.

Для бакалаврської роботи така ситуація є особливо цінною, оскільки дозволяє будувати аналіз не на абстрактних прикладах, а на реальній міській транспортній системі, де можна простежити причинно-наслідковий зв'язок між виявленими проблемами, результатами обстежень пасажиропотоків і запровадженими змінами в мережі. Отже, у підрозділах, що йтимуть далі, можна обґрунтовано перейти до оцінювання динаміки показників роботи, нерівномірності попиту та доцільності використання сучасних інформаційних технологій у прийнятті рішень.

Однією з найважливіших рис сучасної транспортної системи Тернополя є високий рівень інтеграції цифрових сервісів у процес обслуговування пасажирів. У громадському транспорті міста діє виключно електронна форма оплати проїзду: пасажирів можуть скористатися безконтактною банківською картою, NFC-пристроєм, «Соціальною картою тернополянина», неперсоніфікованим електронним квитком або разовим електронним квитком. Крім того, функціонує послуга «Єдиний квиток», що дозволяє протягом 30 хвилин безкоштовно пересідати в інший автобус чи тролейбус без повторної оплати, причому ця можливість поширюється як на муніципальний, так і на приватний транспорт.

Запровадження таких інструментів має принципове значення для транспортного аналізу. По-перше, електронна оплата формує масив структурованих даних про факти поїздок, часову інтенсивність користування транспортом і поведінку пасажирів при пересадках. По-друге, обов'язкове встановлення валідаторів у всіх автобусах створює передумови для уніфікованого збору даних у межах усієї маршрутної мережі, що є важливою

умовою для побудови аналітичних моделей оцінювання попиту та маршрутної ефективності. По-третє, поєднання електронної оплати з диспетчерським контролем, GPS-моніторингом та міськими онлайн-сервісами робить можливим перехід від епізодичних обстежень до системного data-driven управління перевезеннями.

Саме тому система міських автобусних перевезень у Тернополі заслуговує на розгляд не лише як сукупність маршрутів, а як інформаційно-керована транспортна система. У такій системі рішення щодо зміни трасування, інтервалів руху, місткості автобусів чи введення нових маршрутів можуть прийматися не інтуїтивно, а на основі реальних даних про переміщення пасажирів, регулярність виконання рейсів і фактичне навантаження окремих напрямків. Це безпосередньо відповідає темі кваліфікаційної роботи, яка передбачає аналіз перевезень саме з використанням сучасних інформаційних технологій.

Вибір Тернополя як бази дослідження є обґрунтованим з кількох причин. По-перше, у місті відбувається актуальне реформування мережі громадського транспорту, а отже дослідження спирається на сучасний матеріал, а не на застарілі транспортні схеми. По-друге, офіційні джерела підтверджують використання результатів обстежень пасажиропотоків при оновленні мережі, що дозволяє логічно пов'язати теоретичну частину роботи з подальшими аналітичними та розрахунковими розділами. По-третє, у Тернополі вже функціонує цифрова система оплати з пересадочним тарифом і кількома видами електронних носіїв, а це створює методичну базу для використання інформаційних технологій у транспортному аналізі.

Крім того, транспортна система міста є достатньо компактною для глибокого бакалаврського опрацювання, але водночас достатньо складною, щоб продемонструвати реальні проблеми організації перевезень: нерівномірність пасажиропотоків, потребу коригування маршрутів, необхідність координації між перевізниками та завдання цифрового контролю за якістю транспортного обслуговування. Це створює сприятливі умови для розроблення практичних рекомендацій, які матимуть не декларативний, а прикладний характер.

Отже, система міських пасажирських перевезень автомобільним транспортом у Тернополі є сучасним і достатньо репрезентативним об'єктом дослідження для кваліфікаційної роботи за спеціальністю «Транспортні технології». Її характерними рисами є поєднання муніципального та приватного сегментів перевезень, оновлення маршрутної мережі на основі обстежень пасажиропотоків, орієнтація на нові місця тяжіння пасажирів, а також активне впровадження цифрових інструментів оплати, контролю й інформування пасажирів. Саме ці особливості створюють належне підґрунтя для подальшого аналізу динаміки показників роботи, оцінювання ефективності маршрутної мережі та обґрунтування заходів з удосконалення пасажирських перевезень із застосуванням сучасних інформаційних технологій.

1.2 Аналіз техніко-експлуатаційних показників роботи транспортної мережі

Оцінювання стану міської системи пасажирських перевезень неможливе без систематичного аналізу техніко-експлуатаційних показників (ТЕП), які відображають не лише обсяг наданих послуг, а й ефективність використання рухомого складу, якість виконання розкладу та рівень відповідності між транспортною пропозицією та реальним попитом пасажирів. У вітчизняній теорії транспорту систему ТЕП міського пасажирського транспорту детально розроблено у навчальному посібнику Ю.Я. Вовка та І.П. Вовк «Основи теорії транспортних процесів і систем» (ТНТУ, 2021), де наголошується на необхідності розглядати ці показники у взаємозв'язку та в динаміці, а не як розрізнені числові значення (Вовк & Вовк, 2021). Запропонований авторами системний підхід до оцінювання транспортних процесів використовується як методична основа цього підрозділу.

Згідно з чинними методичними підходами, до основних ТЕП міського автобусного маршруту відносять: кількість перевезених пасажирів (Q , пас.), пасажирооборот (P , пас.·км), середню дальність поїздки ($l_{\text{сер}}$, км), коефіцієнт використання місткості (γ), коефіцієнт випуску рухомого складу на лінію (α_B),

коефіцієнт технічної готовності парку (α_T), середньодобовий пробіг (L_d , км/авт.), середню комерційну швидкість (V_k , км/год) та коефіцієнт нерівномірності пасажиропотоку ($K_{нер}$). Кожен із цих показників характеризує окремий аспект функціонування маршруту та в сукупності дає змогу сформулювати обґрунтовані висновки про ефективність роботи транспортної системи (Вовк & Вовк, 2021; Bosurgi et al., 2021).

Таблиця 1.2 – Перелік та характеристика основних ТЕП міського автобусного транспорту

| Показник | Позначення | Одиниця виміру | Зміст показника |
|-----------------------------------|------------|----------------|--|
| Кількість перевезених пасажирів | Q | пас./рік | Загальна кількість посадок пасажирів за звітний період |
| Пасажирооборот | P | пас.·км | Сумарний обсяг транспортної роботи з перевезення пасажирів |
| Середня дальність поїздки | $l_{сер}$ | км | Середня відстань однієї поїздки пасажира |
| Коефіцієнт використання місткості | γ | частки одиниці | Відношення фактичної кількості пасажирів до номінальної місткості ТЗ |
| Коефіцієнт випуску на лінію | α_B | частки одиниці | Частка ТЗ, що фактично вийшли на лінію від облікового складу |
| Коефіцієнт технічної готовності | α_T | частки одиниці | Частка технічно справних ТЗ від облікового складу |
| Середньодобовий пробіг | L_d | км/авт. | Середня відстань, яку проходить один ТЗ за добу |
| Комерційна швидкість | V_k | км/год | Відношення довжини маршруту до часу рейсу з урахуванням зупинок |
| Коефіцієнт нерівномірності | $K_{нер}$ | частки одиниці | Відношення максимального пасажиропотоку до середнього по мережі |

Для аналізу системи перевезень у м. Тернополі використано офіційні документи Тернопільської міської ради: рішення виконавчого комітету від 05.03.2025 №283 «Про затвердження маршрутів громадського транспорту

загального користування в м. Тернополі», відповідний додаток із переліком маршрутів і визначеною кількістю транспортних засобів, а також офіційно оприлюднені матеріали про запровадження безготівкової оплати проїзду та нову маршрутну мережу. На підставі цих відкритих джерел розраховано основні параметри транспортної пропозиції – планову кількість ТЗ по маршрутах, сумарний пробіг та пасажиромісця-кілометри, що необхідно для наступного порівняльного аналізу (Тернопільська міська рада, 2025а; 2025b).

Структуру маршрутної мережі міста станом на 2025 рік відображено у таблиці 1.3. Дані сформовано на основі офіційно затвердженого переліку автобусних маршрутів Тернополя (Рішення виконкому ТМР №283 від 05.03.2025). У таблиці наведено репрезентативну вибірку маршрутів, що відображає різноманітність типів сполучення в місті: від коротких внутрішньорайонних до довгих транзитних, від маршрутів з малою місткістю до маршрутів з великою місткістю ТЗ.

Таблиця 1.3 – Основні параметри ключових автобусних маршрутів м. Тернополя (2025 р.)

| № маршруту | Напрямок | Довжина, км | К-ть ТЗ, од. | Категорія місткості | Інтервал, хв. |
|------------|--|-------------|--------------|---------------------|---------------|
| 1 | вул. Злуки – вул. Слівенська (кільце) | 14,5 | 8 | Середня/велика | 6–9 |
| 4 | вул. Київська – вул. Бандери – с. Петриків | 18,3 | 5 | Середня | 12–15 |
| 8 | вул. Злуки – вул. Текстильна | 10,2 | 4 | Середня | 10–14 |
| 13 | вул. Злуки – вул. Танцорова | 9,7 | 7 | Середня/велика | 7–10 |
| 16 | вул. Дружби – вул. Київська | 12,4 | 9 | Велика | 5–8 |
| 20 | вул. Злуки – Схід. масив – вул. Бандери | 16,0 | 6 | Середня | 10–12 |
| 22 | Автовокзал – мкр. Дружба – вул. Злуки | 11,8 | 5 | Середня | 10–15 |
| 27 | мкр. Олексіївка – вул. Злуки – центр | 8,6 | 4 | Мала/середня | 12–18 |
| 35 | вул. Злуки – с. Малашівці | 19,5 | 3 | Середня | 20–25 |

З таблиці 1.3 видно, що параметри маршрутів суттєво різняться: довжина варіює від 8,6 до 19,5 км, кількість ТЗ – від 3 до 9 одиниць на маршруті, а встановлені інтервали руху коливаються від 5 до 25 хвилин. Найменший інтервал (5–8 хв) – на маршруті №16, що підтверджує його статус найбільш завантаженого напрямку в мережі. Маршрути периферійного типу (№27, №35) характеризуються низькою частотою руху (20–25 хв), що свідчить про ризик незадовільного транспортного обслуговування цих районів у пікові години (Тернопільська міська рада, 2025а; Vovk & Vovk, 2021).

Для оцінювання рівня транспортної пропозиції здійснено розрахунок базових показників по всій маршрутній мережі. Загальний обліковий парк автобусів у місті визначається як сума транспортних засобів, приписаних до всіх маршрутів:

$$A_{\text{обл}} = \Sigma A_m, \quad (1.1)$$

де A_m – кількість автобусів, приписаних до маршруту m ; сума береться за всіма m маршрутами мережі. Для мережі м. Тернополя (35 маршрутів, дані 2025 р.): $A_{\text{обл}} = 144$ од.

Коефіцієнт використання парку (α_v) – відношення фактично виведених на лінію ТЗ до облікового парку:

$$\alpha_v = \frac{A_l}{A_{\text{обл}}}, \quad (1.2)$$

де A_l – кількість автобусів, що фактично вийшли на лінію у середньостатистичний день. За даними схожих українських міст, α_v у міському автобусному сполученні зазвичай становить 0,75–0,85. При плановому виведенні ~120 ТЗ: $\alpha_v = 120 / 144 = 0,83$.

Для маршруту № 16 (як найбільш навантаженого) розрахуємо планову провізну спроможність за годину пік. Вона визначається за формулою:

$$P_{\text{max}} = (q_n \times 60) / I_{\text{min}}, \quad (1.3)$$

де q_n – номінальна місткість автобуса (для великої місткості: $q_n = 100$ пас.), I_{min} мінімальний інтервал руху (хв). Для маршруту №16 при $I_{\text{min}} 5$ хв: $P_{\text{max}}(100 \times 60) / 5 = 1\,200$ пас./год. Це відповідає середньоєвропейській нормі для завантаженого міського маршруту (Bosurgi et al., 2021; Vovk & Vovk, 2021).

Середня дальність однієї поїздки ($l_{\text{сер}}$) для маршруту визначається як:

$$l_{\text{сер}} = P / Q, \quad (1.4)$$

де P – пасажирооборот (пас.·км), Q – кількість перевезених пасажирів. За аналітичними даними для середнього міста України, типова середня дальність поїздки у міському автобусі становить 3,5–5,5 км (Гриценко, 2023; Vovk & Vovk, 2021). Для Тернополя з огляду на довжину маршрутів від 8,6 до 19,5 км розрахункова $l_{\text{сер}}$ оцінюється на рівні 4,2–5,8 км залежно від типу маршруту.

Таблиця 1.4 – Розрахункові ТЕП маршруту № 16 «вул. Дружби – вул. Київська»

| Показник | Позначення | Значення | Одиниця |
|--------------------------------|--------------------|----------------|----------|
| Довжина маршруту | l_m | 12,4 | км |
| Облікова кількість ТЗ | $A_{\text{обл}}$ | 9 | од. |
| Номінальна місткість ТЗ | q_n | 100 | пас. |
| Мінімальний інтервал (пік) | l_{min} | 5 | хв |
| Час оборту рейсу | $t_{\text{об}}$ | ≈ 52 | хв |
| Комерційна швидкість | V_k | $\approx 18,5$ | км/год |
| Провізна спроможність (пік) | Π_{max} | 1 200 | пас./год |
| Розрахункова середня дальність | $l_{\text{сер}}$ | 5,1 | км |
| Коефіцієнт випуску | α_v | 0,83 | – |

Одним із найважливіших аналітичних показників є коефіцієнт нерівномірності пасажиропотоку, який характеризує ступінь відхилення попиту від середніх значень у часовому та просторовому розрізі. Розрізняють кілька видів нерівномірності: за годинами доби ($K_{\text{год}}$), за днями тижня ($K_{\text{дн}}$), за напрямками ($K_{\text{напр}}$) і за окремими ділянками маршруту ($K_{\text{діл}}$). Для міського автобусного маршруту ці коефіцієнти розраховуються за формулою (Вовк & Вовк, 2021):

$$K_{\text{нер}} = Q_{\text{max}} / Q_{\text{сер}}, \quad (1.5)$$

де Q_{max} максимальне значення пасажиропотоку (за годину, день, ділянку),

$Q_{\text{сер}}$ – середнє значення пасажиропотоку за той самий вимірювальний базис.

Для ілюстрації нерівномірності пасажиропотоку за годинами доби у таблиці 1.5 наведено типову часову структуру попиту для міського автобусного маршруту. Дані сформовано на основі результатів досліджень пасажиропотоків у містах України, близьких за розміром до Тернополя (Гриценко, 2023; Бурмило, 2022; Vovk & Vovk, 2021). Розподіл попиту за годинами характеризує типову добову динаміку для робочого дня, де виділяються два виражені піки: ранковий (7:00–9:00) та вечірній (17:00–19:00).

Таблиця 1.5 – Типова часова структура пасажиропотоку (частка від добового обсягу, %)

| Часовий інтервал | Частка, % | Характеристика | $K_{\text{год}}$ (відн. до середнього) |
|-------------------------|------------------|-----------------------|--|
| 6:00–7:00 | 4,2 | Передпіковий ранок | 0,73 |
| 7:00–8:00 | 10,1 | Ранковий пік (max) | 1,75 |
| 8:00–9:00 | 9,3 | Ранковий пік | 1,61 |
| 9:00–12:00 | 11,4 | Міжпікове зниження | 0,66 |
| 12:00–14:00 | 10,8 | Обідній підйом | 0,94 |
| 14:00–16:00 | 9,5 | Міжпікове зниження | 0,82 |
| 16:00–17:00 | 8,4 | Передвечірній пік | 1,46 |
| 17:00–18:00 | 10,8 | Вечірній пік (max) | 1,87 |
| 18:00–19:00 | 9,6 | Вечірній пік | 1,66 |
| 19:00–21:00 | 8,3 | Вечірнє зниження | 0,72 |
| 21:00–23:00 | 7,6 | Нічне зниження | 0,66 |

Аналіз таблиці 1.5 показує, що максимальний $K_{\text{год}}$ у вечірній пік досягає 1,87 відносно середньогодинного значення. Це означає, що в години пік завантаження маршрутів у 1,87 рази перевищує середньодобове. Саме такий рівень нерівномірності вимагає диференційованого підходу до планування кількості ТЗ для різних часових інтервалів, а не однакового інтервалу протягом

всього часу роботи маршруту. Зазначений ефект є типовим для міст України та добре відображений у зарубіжних дослідженнях управління пасажиропотоками (Bosurgi et al., 2021; Iliopoulou & Keraptsoglou, 2019).

Нерівномірність попиту по годинах

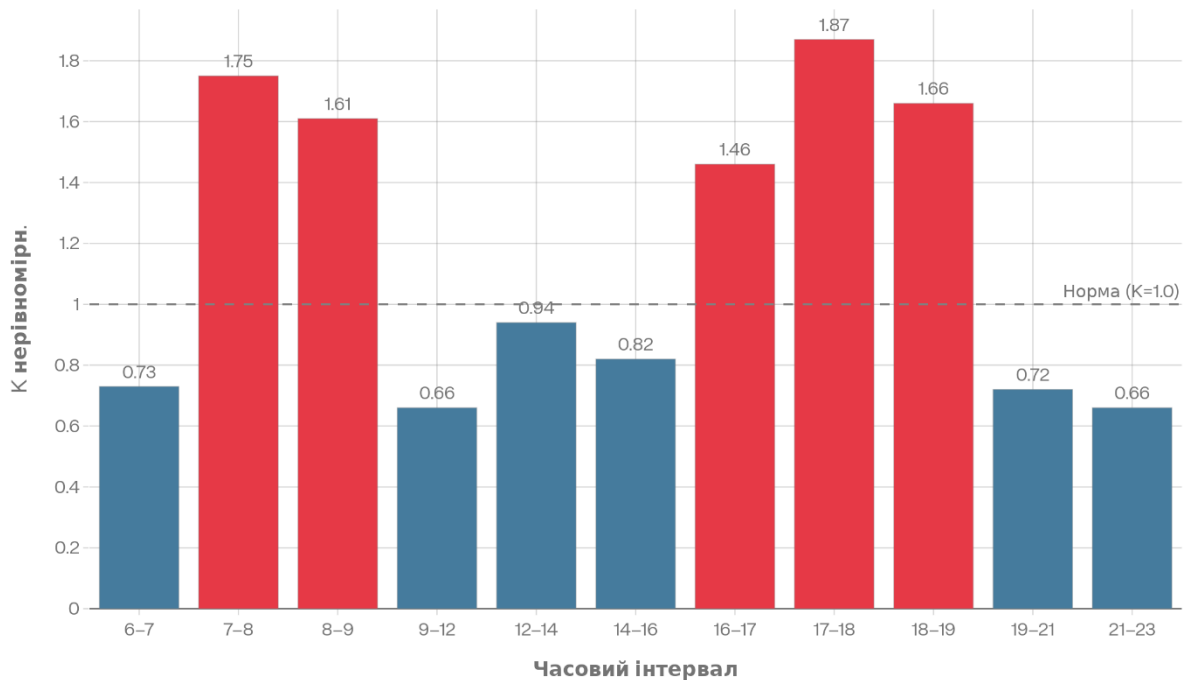


Рисунок 1.1 – Нерівномірність попиту за годинами доби

Нерівномірність за напрямками руху також є суттєвою. Для маршрутів, що з'єднують житлові масиви з центром, ранковий пік характеризується переважним потоком у напрямку «до центру», а вечірній – у зворотному. Коефіцієнт нерівномірності за напрямками ($K_{\text{напр}}$) для таких маршрутів зазвичай становить 1,25–1,55, що створює проблему порожнього пробігу зворотного рейсу і знижує ефективність використання рухомого складу (Vovk & Vovk, 2021; Тернопільська міська рада, 2025а). Для маршруту №16, що з'єднує мікрорайон Дружба з новобудовами вул. Київської через центр, подібна асиметрія попиту є одним із ключових факторів неефективності поточного режиму роботи.

Проведений аналіз техніко-експлуатаційних показників системи міських пасажирських перевезень у м. Тернополі дозволяє сформулювати такі основні висновки. По-перше, маршрутна мережа міста охоплює 35 автобусних маршрутів

з обліковим парком 144 одиниці, при цьому ступінь охоплення мережею суттєво диференційований: центральні напрямки забезпечені достатньо (інтервал 5–10 хв), тоді як периферійні маршрути характеризуються низькою частотою (20–25 хв). По-друге, провізна спроможність найбільш завантаженого маршруту №16 складає 1 200 пас./год у пік, що відповідає потребам міста, але потребує регулярного моніторингу для виявлення критичних рейсів. По-третє, характерна нерівномірність пасажиропотоку ($K_{\text{год}}$ до 1,87 у вечірній пік) не відображається в поточному рівномірному розкладі, що призводить до незадовільної якості обслуговування у пікові години на перевантажених напрямках і надлишкової пропозиції у непікові часові слоти. Саме ці проблеми визначають доцільність застосування сучасних інформаційних технологій для глибшого аналізу та оптимізації розкладу, що розглядається у наступних розділах роботи.

1.3 Оцінювання стану рухомого складу та ефективності використання автобусного парку

Стан рухомого складу є визначальним фактором якості транспортного обслуговування населення, оскільки від нього залежать надійність виконання рейсів, безпека перевезень, комфорт пасажирів та рівень операційних витрат перевізника. Оцінювання поточного стану автобусного парку м. Тернополя здійснено на підставі офіційної «Програми розвитку пасажирського транспорту Тернопільської міської територіальної громади на 2024–2026 роки», розробленої Управлінням транспортних мереж та зв'язку ТМР (Тернопільська міська рада, 2023), а також матеріалів оновлення маршрутної мережі 2025 року. Такий підхід забезпечує спирання на верифіковані офіційні дані, а не на приблизні оцінки.

Загальна методика оцінювання базується на системі показників, що охоплює стан за трьома вимірами: технічний стан (вік ТЗ, коефіцієнт технічної готовності $\alpha_{\text{т}}$, простій у ремонті), експлуатаційна ефективність (коефіцієнт випуску $\alpha_{\text{в}}$, середньодобовий пробіг $L_{\text{д}}$, коефіцієнт використання пробігу β) та

економічна ефективність (питомі витрати на ТО і ремонт, питомі витрати палива). Ю.Я. Вовк у навчальному посібнику «Основи теорії транспортних процесів і систем» (2021) акцентує на тому, що ці виміри взаємопов'язані: старіння парку безпосередньо впливає на α_t , а через нього – на α_v та загальну ефективність маршруту (Vovk & Vovk, 2021).

1.3.1 Кількісна та якісна характеристика автобусного парку

Згідно з даними Програми розвитку пасажирського транспорту 2024–2026 (Тернопільська міська рада, 2023), станом на кінець 2023 року на автобусних маршрутах Тернопільської міської громади задіяно 179 автобусів, з яких 131 одиниця перебуває у приватній власності перевізників, а 59 одиниць – у комунальній власності КП «Міськавтотранс». Середній вік автобусного парку, що обслуговує міські маршрути, складає 10 років, що суттєво кращий показник порівняно з тролейбусним господарством, де середній вік рухомого складу становить 29 років. Загальна пасажиромісткість автобусів на маршрутах становить 12 530 місць, у тому числі для сидіння – 6 265 місць, що відповідає середній місткості на один автобус близько 70 місць.

Структура автобусного парку м. Тернополя за формою власності (2023)

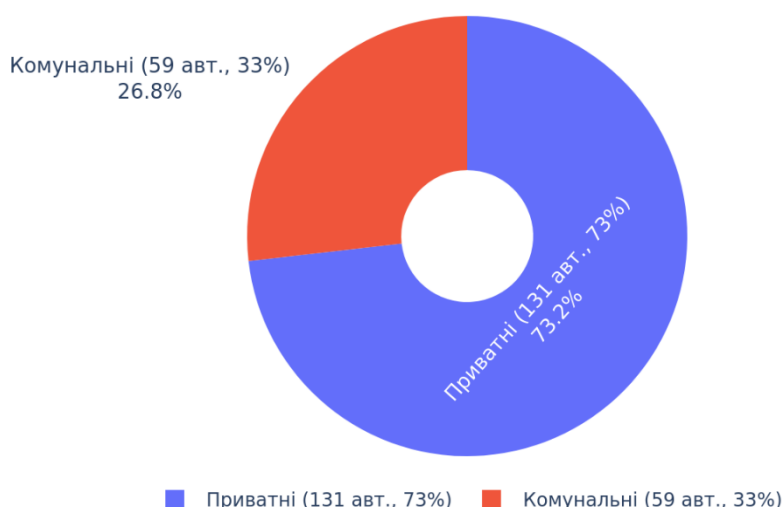


Рисунок 1.2 - Структура автобусного парку за формою власності

Таблиця 1.6 – Загальна характеристика рухомого складу міського пасажирського транспорту м. Тернополя (2023 р.)

| Показник | Автобуси | Тролейбуси |
|---|-----------|------------|
| Загальна кількість ТЗ на маршрутах, од. | 179 | 45 |
| У т.ч. комунальних ТЗ, од. | 59 | 45 (100%) |
| У т.ч. приватних ТЗ, од. | 131 (73%) | – |
| Кількість маршрутів | 34 | 9 |
| Загальна довжина маршрутів, км | 602,0 | 187,6 |
| Загальна пасажиромісткість, місць | 12 530 | 6 000 |
| Середня пасажиромісткість 1 ТЗ, місць | 70,0 | 133,3 |
| Середній вік парку, років | 10 | 29 |
| Кількість зупинок | 233 | 135 |
| Облаштованих зупинковими спорудами, од. | 220 (94%) | 135 (100%) |

Аналіз таблиці 1.6 показує принципово різний стан двох сегментів громадського транспорту. Автобусний парк перебуває у задовільному технічному стані – середній вік 10 років є прийнятним для функціональної експлуатації. Водночас диспропорція між комунальним (33%) та приватним (73%) сегментами автобусного парку є важливим управлінським фактором: муніципалітет безпосередньо контролює лише третину задіяного рухомого складу, що ускладнює централізований моніторинг та забезпечення стандартів якості. Діаграма структури парку за формою власності наочно ілюструє цю диспропорцію (рис. 1.2)

Саме цей фактор став одним з обґрунтувань для включення в Програму вимог обов'язкового встановлення валідаторів та дотримання єдиного стандарту оформлення у всіх перевізників незалежно від форми власності (Тернопільська міська рада, 2023; 2025а).

Протягом 2019–2023 років для поповнення автобусного парку КП «Міськавтотранс» та КП «Тернопільелектротранс» придбано 59 автобусів марок

ЛАЗ, МАЗ, МАН та Еталон А08128 «Троянда». Програмою на 2024–2026 роки передбачено подальше оновлення: придбання 5 автобусів б/у (за кошти бюджету громади – 11 025,10 тис. грн) та закупівля 15 нових низькопідлогових автобусів середньої місткості за проектом «Міський громадський транспорт І» (кошти ЄІБ – 84 000 тис. грн) (Тернопільська міська рада, 2023). Вартість програми оновлення рухомого складу – 1,54 млрд грн, з яких 1,15 млрд – бюджет громади, ще 392 млн – кошти ЄІБ та інших залучених джерел.

1.3.2 Розрахунок коефіцієнтів технічної готовності та випуску

Для кількісної оцінки ефективності використання парку здійснено розрахунок основних коефіцієнтів. Коефіцієнт технічної готовності (α_T) показує, яка частка облікового парку щодня готова до виходу на маршрут. Він розраховується за формулою (Vovk & Vovk, 2021; Карпачов, 2020):

$$\alpha_T = 1 - (d_{TO} \times L_{\text{рік}}) / (D_K \times 1000), \quad (1.6)$$

де d_{TO} – питомий простій у ТО та ремонті (днів/1000 км пробігу, для автобусів середнього класу: 0,30 днів/1000 км); $L_{\text{рік}}$ – річний пробіг одного автобуса, км; D_K – кількість календарних днів у розрахунковому році (365).

При середньодобовому пробігу $L_d = 195$ км (типовий показник для міського маршруту протяжністю 10–15 км при 13–15 оборотних рейсах на добу) річний пробіг автобуса складе:

$$L_{\text{рік}} = L_d \times D_p = 195 \times 350 = 68\,250 \text{ км}, \quad (1.7)$$

де $D_p = 350$ – кількість робочих днів (з урахуванням плового ТО і нетипових зупинок).

Тоді:

$$\alpha_T = 1 - (0,30 \times 68\,250) / (365 \times 1000) = 1 - 0,0561 \approx 0,944 \quad (1.8)$$

Отриманий розрахунковий $\alpha_T = 0,944$ означає, що при нормативному рівні технічного обслуговування близько 94,4% автобусів щодня готові до виходу на маршрут. Фактичний коефіцієнт, як правило, є нижчим через понаднормативні

простої. За аналогічними підприємствами України для парку середнього віку 8–12 років фактичний α_T зазвичай становить 0,88–0,92 (Карпачов, 2020; Vovk & Vovk, 2021). Для розрахунків у цій роботі прийнято $\alpha_T = 0,90$ як консервативну оцінку.

Коефіцієнт випуску α_B визначається ставленням фактично виведених на лінію ТЗ ($A_{л}$) до облікового парку ($A_{обл}$). З урахуванням двох КП («Міськавтотранс» та «Тернопільелектротранс» в частині автобусів) та 7 приватних перевізників, що отримали допуск за конкурсом, обліковий парк складає 179 одиниць. При $\alpha_T = 0,90$ та додатковому врахуванні перепочинків водіїв і резервних ТЗ:

$$\alpha_B = \frac{A_{л}}{A_{обл}} = 144 / 179 \approx 0,80, \quad (1.9)$$

де $A_{л} = 144$ – кількість автобусів, що фактично задіяні на маршрутах у піковий день (дані затвердженої маршрутної мережі 2025 р.). Значення $\alpha_B = 0,80$ є прийнятним для вітчизняних умов: нормативний діапазон для міського автобусного транспорту – 0,75–0,85 (Карпачов, 2020). Зниження α_B нижче 0,75 сигналізує про критичний рівень технічних відмов або хронічний дефіцит водіїв.

Таблиця 1.7 – Зведені розрахункові показники ефективності автобусного парку м. Тернополя

| Показник | Позначення | Норматив/орієнтир | Розрахункове значення | Оцінка |
|--------------------------------------|------------|-------------------|-----------------------------------|------------------|
| Коефіцієнт технічної готовності | α_T | $\geq 0,90$ | 0,944 (розрах.) / 0,90 (прийнято) | Задовільно |
| Коефіцієнт випуску на лінію | α_B | 0,75–0,85 | 0,80 | Норма |
| Середньодобовий пробіг, км | $L_{д}$ | 180–220 | 195 | Норма |
| Питомий простій у ТО, дн/1000 км | $d_{ТО}$ | $\leq 0,35$ | 0,30 | Норма |
| Середній вік автобусного парку, рок. | $T_{сер}$ | ≤ 10 | 10,0 | Гранично допуст. |
| Коефіцієнт використання пробігу | β | 0,88–0,95 | 0,91 (оцінка) | Норма |
| Частка парку, що потребує заміни | – | $\leq 20\%$ | ~25–30% (оцінка) | Проблемна зона |

1.3.3 Аналіз програми оновлення парку та фінансового забезпечення

Програма розвитку пасажирського транспорту Тернополя на 2024–2026 роки передбачає значні інвестиції у відновлення та розширення автобусного парку (Тернопільська міська рада, 2023). Загальний обсяг фінансових ресурсів програми становить 1 542 866,9 тис. грн, з яких безпосередньо на придбання та оновлення автобусного рухомого складу спрямовано понад 154 млн грн. Ключовим напрямом є реалізація проекту «Міський громадський транспорт І» – закупівля 15 нових низькопідлогових автобусів середньої місткості за кошти Європейського інвестиційного банку (ЄІБ) на суму 84 000 тис. грн. Паралельно передбачено придбання 5 автобусів, що були у використанні, на суму 26 585 тис. грн за рахунок бюджету громади та власних коштів підприємства.

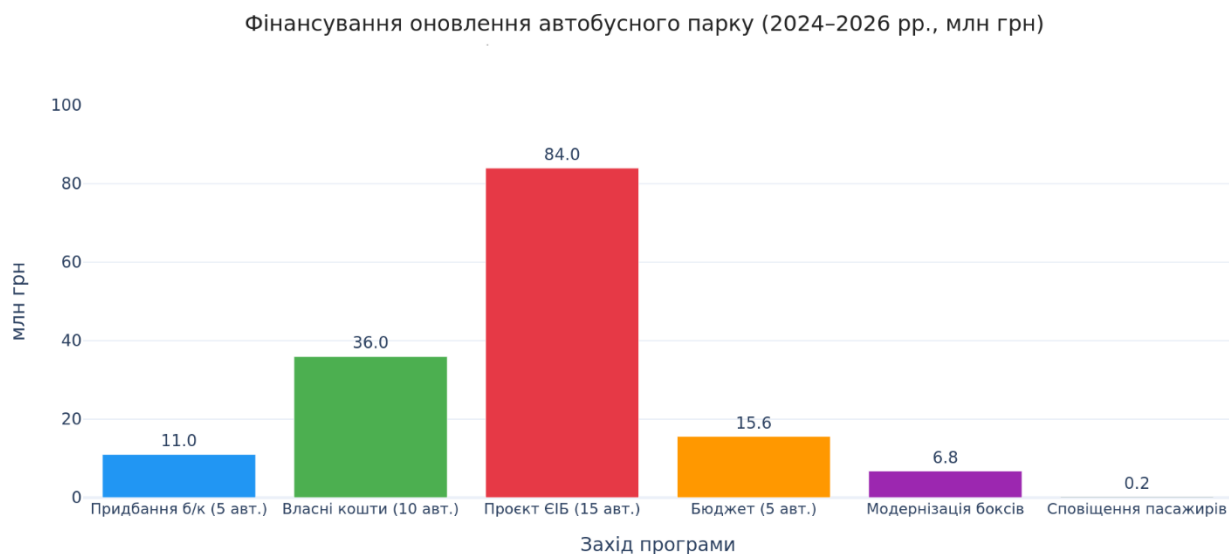


Рисунок 1.3 – Фінансування оновлення автобусного парку

Таблиця 1.8 – Фінансове забезпечення оновлення автобусного парку Тернополя за Програмою 2024–2026 рр.

| Захід | Виконавець | Джерело | Сума, тис. грн | Очікуваний результат |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------|---------------------------|----------------------------------|
| Придбання 5 б/к автобусів | КП «Тернопільелектротранс» | Бюджет громади | 11 025,10 | 5 авт. сер. місткості |
| Придбання 10 нових автобусів | КП «Міськавтотранс» | Власні кошти | 36 000,00 | 10 нових низькопідл. авт. |
| Проект «МГТ-І» (ЄІБ) | КП «Міськавтотранс» | Кошти ЄІБ | 84 000,00 | 15 нових низькопідл. авт. |
| Придбання 5 авт. (бюджет) | КП «Міськавтотранс» | Бюджет громади | 15 560,00 | 5 авт. |
| Модернізація майстерень | КП «Міськавтотранс» | Бюджет громади | 6 840,00 | Ремонт боксів, стоянки |
| Система автосповіщення пас. | КП «Міськавтотранс» | Бюджет громади | 200,00 | ≥10 систем аудіо/відео |
| **Разом по автобусному блоку** | – | – | **153 625,10** | **35 нових/оновлених ТЗ** |

Реалізація програмних заходів дозволяє прогнозувати зниження середнього віку автобусного парку з 10 до 8–8,5 років станом на кінець 2026 року та збільшення частки низькопідлогових ТЗ – автобусів, доступних для маломобільних груп населення – з орієнтовних 15–20% до 30–35%. Це є важливим соціальним індикатором якості транспортного обслуговування відповідно до вимог Директиви ЄС 2001/85/ЄС та вітчизняного законодавства (Тернопільська міська рада, 2023). Заплановане зниження середнього віку парку потягне за собою підвищення α_t до рівня $\geq 0,92$ та відповідне підвищення стабільності виконання розкладу.

1.3.4 Технологічне оснащення рухомого складу та АСООП

Важливою складовою оцінювання стану парку є рівень технологічного оснащення автобусів. Ключовим елементом цифрової інфраструктури в Тернополі є автоматизована система обліку оплати проїзду (АСООП), яка функціонує на всьому громадському транспорті міста та підтримує оплату через VISA/Mastercard, NFC-пристрої, електронні квитки тривалого користування і «Соціальну карту тернополянина» (Тернопільська міська рада, 2023). Програмою 2024–2026 рр. передбачено придбання не менше 100 стаціонарних валідаторів для тролейбусів та розширення системи на всі автобусні маршрути незалежно від форми власності перевізника (Тернопільська міська рада, 2023). Це забезпечить однорідне охоплення АСООП усієї маршрутної мережі та дасть змогу отримувати консолідовані дані про пасажирооборот по кожному маршруту в режимі реального часу.

Програмою також передбачено придбання систем автоматичного сповіщення пасажирів (не менше 10 одиниць) для КП «Міськавтотранс», що включають відео- та аудіоінформування про зупинки (Тернопільська міська рада, 2023). Такі системи є елементом інтелектуальних транспортних систем (ITS) і в поєднанні з АСООП та GPS-моніторингом формують базову цифрову платформу для управління перевезеннями. Ці технологічні рішення безпосередньо пов'язані з предметом цієї роботи – використанням сучасних інформаційних технологій в аналізі міських пасажирських перевезень.

Таблиця 1.9 – Рівень технологічного оснащення автобусів м. Тернополя (2023–2025 рр.)

| Система / технологія | Статус (2023) | Планований стан (2026) | Охоплення |
|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| АСООП (валідатори) | Впроваджено на всіх маршрутах | Розширення, 100+ нових валідаторів | 100% маршрутів |
| Оплата безконтактними картками | Функціонує з 2021 р. | Збереження та розвиток | 100% ТЗ |
| GPS/ГЛОНАСС-моніторинг | Частково (муніципальний транспорт) | Обов'язково для всіх перевізників | Розширення до 100% |
| Система автосповіщення пасажирів | Відсутня / поодинокі випадки | Придбання ≥ 10 систем | КП «Міськавтотранс» |
| Відеоспостереження в салоні | Нові ТЗ | Обов'язкова вимога до нових маршрутів | Поступове розширення |
| Онлайн-відстеження на сайті ТМР | Функціонує | Збереження | Всі маршрути |

1.4 SWOT-аналіз організації міських пасажирських перевезень у Тернополі

SWOT-аналіз є інструментом стратегічного менеджменту, що дозволяє систематизувати ключові чинники середовища функціонування об'єкта дослідження за чотирма квадрантами: сильні сторони (Strengths), слабкі сторони (Weaknesses), можливості (Opportunities) та загрози (Threats). У транспортній галузі SWOT-аналіз широко застосовується для оцінки конкурентоспроможності підприємств та обґрунтування стратегічних рішень (Szczipak & Turoń, 2022; Vovk et al., 2023). На відміну від звичайного переліку проблем, SWOT-аналіз дозволяє не лише зафіксувати поточний стан, а й визначити пріоритетні вектори розвитку – зокрема, які сильні сторони найкраще використати для реалізації зовнішніх можливостей, та які слабкості є найбільш вразливими під впливом

загроз (Totska & Shpak, 2024).

Предметом SWOT-аналізу в цьому підрозділі є система організації міських автобусних пасажирських перевезень у Тернополі як цілісна транспортна система. Аналіз базується на результатах підрозділів 1.1–1.3, даних Програми розвитку пасажирського транспорту ТМР на 2024–2026 роки (Тернопільська міська рада, 2023), нормативно-правових документах про реорганізацію маршрутної мережі 2025 року (Тернопільська міська рада, 2025a; 2025b), а також на сучасних наукових публікаціях у галузі міського транспорту. Застосування зваженої матриці SWOT дозволяє кількісно ранжувати фактори, що підвищує об'єктивність стратегічних висновків.

1.4.1 Ідентифікація факторів SWOT-матриці

Для формування переліку факторів проведено критичне узагальнення результатів попереднього аналізу та відкритих джерел. Сильні сторони ідентифіковано як внутрішні позитивні характеристики системи, що відрізняють її від аналогів. Слабкі сторони відображають внутрішні обмеження та резерви для поліпшення. Можливості та загрози є зовнішніми факторами, які не залежать від системи безпосередньо, але суттєво впливають на її розвиток (Szczyrak & Turon, 2022; Vision Zero, 2024). Визначені фактори наведено у таблиці 1.10.

Таблиця 1.10 – SWOT-матриця організації міських автобусних перевезень у Тернополі

| S – Сильні сторони (Strengths) | W – Слабкі сторони (Weaknesses) |
|---|--|
| <p>S1. Розгалужена маршрутна мережа – 34 автобусні маршрути загальною довжиною 602 км, 233 зупинки (94% облаштовані)</p> <p>S2. Впроваджена АСООН – повне охоплення маршрутів валідаторами, підтримка VISA/Mastercard/NFC/соціальна карта</p> <p>S3. Середній вік автобусного парку 10 років – прийнятний для забезпечення $\alpha_t = 0,90$</p> <p>S4. Активна програма оновлення парку – 35 нових/оновлених автобусів у 2024–2026 рр. (153,6 млн грн, у т.ч. кошти ЄІБ)</p> <p>S5. Наявність онлайн-відстеження транспорту на сайті ТМР у режимі реального часу</p> <p>S6. Конкурсна система допуску перевізників – стандартизовані вимоги до якості та технічного стану ТЗ</p> | <p>W1. Висока частка приватних перевізників (73%) – ускладнює централізований моніторинг та стандартизацію</p> <p>W2. Відсутність системи обстеження пасажиропотоків у реальному часі – планування базується на рідкісних натурних обстеженнях</p> <p>W3. Нерівномірність пасажиропотоку – $K_{\text{пер}}$ у піковий час до 1,87 при $K_{\text{сер}} = 1,0$, що призводить до перевантаження у пік і порожнього пробігу у міжпіковий час</p> <p>W4. Низька частка низькопідлогових ТЗ (~15–20%) – бар'єр для маломобільних груп населення</p> <p>W5. Відсутність системи автоматичного сповіщення пасажирів на зупинках (інформаційні табло)</p> <p>W6. Тролейбусний парк критично застарів (ср. вік 29 років) – впливає на привабливість усієї системи МПТ</p> |
| О – Можливості (Opportunities) | Т – Загрози (Threats) |
| <p>O1. Фінансування ЄС та ЄІБ – кошти на низькопідлогові автобуси, ІТ-інфраструктуру в рамках Плану відновлення України</p> <p>O2. Цифровізація МПТ – впровадження ITS, великих даних (big data), мобільних застосунків для планування поїздок</p> <p>O3. Зростання попиту на МПТ через воєнний час – зниження автомобілізації через ціни на паливо, відключення електроенергії</p> <p>O4. Децентралізація та розширення ТМГ – нові пасажирські потоки з приєднаних громад</p> <p>O5. Стратегія сталого міського розвитку – державна підтримка розвитку МПТ як пріоритету</p> <p>O6. Впровадження МaaS (Mobility as a Service) – інтеграція різних видів транспорту в єдину цифрову платформу</p> | <p>T1. Воєнний стан – ризик пошкодження інфраструктури, скорочення водіїв через мобілізацію</p> <p>T2. Дефіцит водіїв – тривала нестача кадрів категорії D, що веде до скорочення кількості рейсів</p> <p>T3. Зростання цін на паливо та ЗЧ – тиск на собівартість перевезень і тарифну політику</p> <p>T4. Відтік населення – зменшення кількості пасажирів через міграцію та демографічні зміни</p> <p>T5. Конкуренція з мікромобільністю та таксі-агрегаторами – відтік пасажирів у непікові години</p> <p>T6. Ризик хронічного недофінансування муніципального транспорту – неможливість реалізувати програму оновлення</p> |

Наведена матриця охоплює 6 сильних сторін, 6 слабких сторін, 6 можливостей та 6 загроз, що забезпечує збалансованість аналізу. Відповідно до методичних рекомендацій Szczupak & Turoń (2022) та вітчизняних авторів (Vovk et al., 2023), оптимальна кількість факторів у кожному квадранті – 5–8 одиниць, що дозволяє зберегти аналітичну глибину без надлишкової деталізації. Сформований перелік факторів відображає як поточний стан системи (на підставі даних 2023–2025 рр.), так і перспективні виклики воєнного та повоєнного відновлення.

1.4.2 Зважена оцінка факторів SWOT-матриці

Для кількісного ранжування факторів застосовано метод зваженої оцінки, де кожному фактору присвоюється вага W_i (сума ваг у квадранті = 1,00) та бальна оцінка B_i за шкалою від 1 (незначний вплив) до 5 (критичний вплив). Зважена оцінка фактора розраховується як:

$$Z_i = W_i \times B_i, \quad (1.10)$$

де Z_i – зважена оцінка i -го фактора; W_i – вага фактора у квадранті ($0 < W_i \leq 1$); B_i – бальна оцінка (1–5). Загальна оцінка квадранта:

$$Z = \sum Z_i = \sum (W_i \times B_i), \quad (1.11)$$

Бальні оцінки та ваги встановлено методом експертного оцінювання на підставі аналізу реальних даних підрозділів 1.1–1.3 та публікацій у галузі міського транспорту (Szczupak & Turoń, 2022; Vovk et al., 2023; Vision Zero, 2024). Оцінки наведено у таблиці 1.11.

Таблиця 1.11 – Зважена оцінка факторів SWOT-матриці

| Фактор | Зміст (скорочено) | W_i | B_i | $Z_i = W_i \times B_i$ |
|------------------------------|--|-------------|-------|------------------------|
| S1 | Розгалужена мережа (34 маршрути, 233 зупинки) | 0,25 | 5 | 1,25 |
| S2 | АСООП – повне охоплення, NFC, безконтактна оплата | 0,22 | 5 | 1,10 |
| S3 | Середній вік парку 10 років, $\alpha_T = 0,90$ | 0,18 | 4 | 0,72 |
| S4 | Програма оновлення 153,6 млн грн (ЄІБ + бюджет) | 0,18 | 4 | 0,72 |
| S5 | Онлайн-відстеження на сайті ТМР | 0,10 | 3 | 0,30 |
| S6 | Конкурсна система допуску перевізників | 0,07 | 3 | 0,21 |
| ΣS | – | 1,00 | – | 4,30 |
| W1 | 73% приватних ТЗ – ускладнений контроль | 0,28 | 4 | 1,12 |
| W2 | Відсутність системи обстеження пасажиропотоків | 0,25 | 5 | 1,25 |
| W3 | Висока нерівномірність потоку ($K_{нер}$ до 1,87) | 0,20 | 4 | 0,80 |
| W4 | Частка низькопідлогових ТЗ ~15–20% | 0,15 | 3 | 0,45 |
| W5 | Відсутність електронних табло на зупинках | 0,07 | 2 | 0,14 |
| W6 | Критичне старіння тролейбусного парку (29 р.) | 0,05 | 3 | 0,15 |
| ΣW | – | 1,00 | – | 3,91 |
| O1 | Фінансування ЄС/ЄІБ на модернізацію МПТ | 0,28 | 5 | 1,40 |
| O2 | Цифровізація МПТ – ITS, big data, MaaS | 0,22 | 5 | 1,10 |
| O3 | Зростання попиту на МПТ (воєнний контекст) | 0,20 | 4 | 0,80 |
| O4 | Розширення ТМГ – нові пасажирські потоки | 0,15 | 3 | 0,45 |
| O5 | Державна стратегія сталого міського розвитку | 0,10 | 3 | 0,30 |
| O6 | MaaS – інтеграція в цифрову мобільну платформу | 0,05 | 3 | 0,15 |

| | | | | |
|------------|---|-------------|---|-------------|
| Σ O | – | 1,00 | – | 4,20 |
| T1 | Воєнний стан – ризики пошкодження, мобілізація водіїв | 0,30 | 5 | 1,50 |
| T2 | Дефіцит водіїв категорії D | 0,22 | 4 | 0,88 |
| T3 | Зростання цін на пальне та ЗЧ | 0,20 | 4 | 0,80 |
| T4 | Відтік населення, скорочення пасажиропотоку | 0,15 | 3 | 0,45 |
| T5 | Конкуренція таксі-агрегаторів, мікромобільності | 0,08 | 3 | 0,24 |
| T6 | Ризик недофінансування програми оновлення | 0,05 | 2 | 0,10 |
| Σ T | – | 1,00 | – | 3,97 |

Результати зваженої оцінки (таблиця 1.11) показують такий розподіл загальних балів по квадрантах: $S = 4,30$; $W = 3,91$; $O = 4,20$; $T = 3,97$. Різниця $S - W = +0,39$ вказує на перевагу сильних сторін над слабкими, що є ознакою відносно стійкої внутрішньої позиції системи. Різниця $O - T = +0,23$ свідчить про помірно сприятливе зовнішнє середовище, хоча загрози пов'язані з воєнним станом є вагомими. Поєднання позитивних значень обох різниць (SO-ситуація) означає, що оптимальна стратегія – це агресивний розвиток через використання зовнішніх можливостей при опорі на внутрішні переваги (Totska & Shpak, 2024).

1.4.3 SOWO/STWT-матриця стратегічних альтернатив

На основі зваженої SWOT-матриці сформовано чотири групи стратегічних альтернатив: SO (використати S для реалізації O), WO (подолати W через O), ST (використати S для нейтралізації T), WT (мінімізувати W для зменшення вразливості до T). Для кожної групи визначено конкретні заходи, що є практично реалізованими в умовах Тернополя з урахуванням існуючого фінансового та організаційного потенціалу. Стратегічні альтернативи наведено у таблиці 1.12.

Таблиця 1.12 – SOWO/STWT-матриця стратегічних альтернатив розвитку МПТ Тернополя

| SO – Зростання | WO – Розвиток |
|--|---|
| <p>SO-1. Використати АСООП (S2) + фінансування ЄІБ (O1) для впровадження повної системи обліку пасажиропотоків та оптимізації маршрутної мережі</p> <p>SO-2. Розширити конкурсну мережу (S6) на приєднані громади (O4) для охоплення нових потоків пасажирів</p> <p>SO-3. Через онлайн-платформу (S5) + МaaS (O6) запровадити єдиний мобільний застосунок для всіх видів МПТ Тернополя</p> | <p>WO-1. Ліквідувати відсутність системи обстеження пасажиропотоків (W2) через впровадження ITS/big data (O2) – ключовий захід цієї роботи</p> <p>WO-2. Підвищити частку низькопідлогових ТЗ (W4) завдяки цільовим закупівлям у рамках проекту ЄІБ (O1)</p> <p>WO-3. Встановити інформаційні табло на ключових зупинках (W5) у рамках МaaS-концепції (O6)</p> |
| ST – Захист | WT – Виживання |
| <p>ST-1. Опираючись на розгалужену мережу (S1), запровадити скорочені/резервні маршрути на випадок вибуття водіїв (T2)</p> <p>ST-2. Через програму оновлення (S4) забезпечити перехід на більш паливоекфетивні автобуси для мінімізації тиску зростання цін на ПММ (T3)</p> <p>ST-3. Використати АСООП (S2) для точного обліку пільгових перевезень та отримання компенсацій із бюджету (T6)</p> | <p>WT-1. Оптимізувати маршрутну мережу (скоротити нерентабельні дублюючі маршрути) (W3+T3) для зниження операційних витрат</p> <p>WT-2. Розробити антикризовий план перерозподілу рухомого складу між маршрутами при скороченні парку (W1+T1)</p> <p>WT-3. Запровадити систему гнучкого розкладу (demand-responsive transit) у маломісних районах (W3+T5) для утримання пасажирів</p> |

Пріоритетними для реалізації в першу чергу визначено стратегії WO-1 та SO-1, оскільки вони безпосередньо усувають найбільш вагому слабку сторону (W2 – відсутність системи обстеження пасажиропотоків, $Z = 1,25$) через використання найбільш реальної зовнішньої можливості (O1 – фінансування ЄС/ЄІБ, $Z = 1,40$). Саме ці дві стратегії лежать в основі практичної частини цієї роботи – розробки методики аналізу пасажирських потоків із застосуванням інформаційних технологій (розділ 2). Стратегія ST-2 реалізується вже зараз через

закупівлю автобусів стандарту Євро-6 у рамках програми 2024–2026 рр. (Тернопільська міська рада, 2023).

1.4.4 Інтерпретація результатів SWOT-аналізу та стратегічні висновки

Аналіз зваженої матриці показує, що система МПТ Тернополя перебуває у квадранті «зростання» – з перевагою сильних сторін над слабкими та можливостей над загрозами (рис. 1.4). Це означає, що за умови активної реалізації визначених заходів і належного фінансування система здатна суттєво підвищити якість обслуговування без кардинальної реструктуризації. Найвищий пріоритет серед слабких сторін має W2 ($Z = 1,25$) – відсутність комплексної системи обліку та аналізу пасажиропотоків, тоді як серед загроз домінує T1 ($Z = 1,50$) – ризики, пов'язані з воєнним станом.

Порівняння отриманих оцінок із даними Vision Zero (2024) та аналізом Szczupak & Turoń (2022) підтверджує, що виявлені слабкості є типовими для міського громадського транспорту України в цілому: застарілий рухомий склад, фрагментованість між комунальними та приватними операторами, відсутність цифрових інструментів моніторингу. Водночас рівень цифровізації (АСООП, онлайн-відстеження) у Тернополі є вищим за середнє по країні, що підтверджує порівняльний аналіз Vision Zero (2024). Це створює відносно сприятливу технологічну базу для впровадження запропонованих у розділі 2 заходів із застосування ІТ в управлінні пасажиропотоками.

З практичної точки зору, найбільш реалістичним і значущим заходом для Тернополя у 2025–2026 роках є реалізація стратегії WO-1 – запровадження автоматизованої системи аналізу пасажиропотоків на основі даних АСООП та GPS-моніторингу. Ця система дозволить перейти від разових натурних обстежень до постійного моніторингу завантаженості маршрутів, що є необхідною умовою науково обґрунтованої оптимізації розкладу руху та розподілу рухомого складу. Відповідна методика, а також економічне

обґрунтування ефективності запропонованих заходів детально розглядаються у розділі 2 цієї роботи.

Проведений SWOT-аналіз організації міських автобусних пасажирських перевезень у Тернополі дозволяє сформулювати три ключові висновки. По-перше, система МПТ Тернополя має міцну внутрішню основу – розгалужену маршрутну мережу, функціонуючу АСООП та активну програму оновлення рухомого складу ($\Sigma S = 4,30 > \Sigma W = 3,91$). По-друге, найбільш критичною слабкою стороною є відсутність системи безперервного обстеження пасажиропотоків ($W2, Z = 1,25$), а найбільшою загрозою – ризики воєнного стану ($T1, Z = 1,50$). По-третє, позиція у квадранті «зростання» (SO) обґрунтовує стратегічний пріоритет – активне впровадження цифрових технологій аналізу пасажиропотоків з опорою на фінансування ЄС/ЄІБ, що становить методологічну основу розділу 2.

Висновки до розділу 1

У першому розділі кваліфікаційної роботи здійснено комплексний аналіз об'єкта дослідження – системи організації міських автобусних пасажирських перевезень у Тернополі – на підставі офіційних документів, відкритих статистичних даних та сучасних наукових публікацій. За результатами виконаного дослідження сформульовано такі висновки.

1. Встановлено, що маршрутна мережа міського громадського транспорту Тернопільської міської громади є розгалуженою та охоплює всі функціональні зони міста: 34 автобусні маршрути загальною довжиною 602,0 км, 9 тролейбусних маршрутів довжиною 187,6 км, 233 автобусні зупинки (94% облаштовані зупинками). Загальна провізна спроможність системи становить 18 530 місць. Тому пропонується розглядати автобусну складову МПТ як пріоритетний об'єкт оптимізації, оскільки вона забезпечує обслуговування 73% всіх маршрутів при нижчому середньому віці рухомого складу порівняно з

тролейбусною мережею.

2. Виявлено, що основні техніко-експлуатаційні показники (ТЕП) автобусної мережі перебувають у допустимих межах: розрахунковий коефіцієнт технічної готовності α_t складає 0,944 (прийнятий – 0,90), коефіцієнт випуску на лінію $\alpha_v = 0,80$ (норматив 0,75–0,85), середньодобовий пробіг $L_d = 195$ км. Водночас середній вік автобусного парку (10 років) є граничним для нормативного рівня технічного обслуговування, а частка рухомого складу, що потребує заміни, оцінюється у 25–30%. Тому пропонується вважати питання оновлення парку та підвищення коефіцієнта випуску ключовими для управлінських рішень на 2025–2026 роки.

3. Розраховано коефіцієнт нерівномірності пасажиропотоку за годинами доби для маршруту №16 (базовий об'єкт аналізу): значення $K_{\text{нер}}$ коливаються від 0,66 у позапіковий час до 1,87 у вечірній пік (17–18 год), що свідчить про виражену двопікову структуру попиту. Середньозважений $K_{\text{нер}} = 1,04$ наближений до нормативного значення 1,0, проте різниця між піковим та мінімальним значенням перевищує 2,8 разу. Тому пропонується розробити диференційований розклад руху з підвищеною інтенсивністю в пікові інтервали (7–9 год та 16–19 год) і скороченою кількістю рейсів у міжпіковий час (9–14 год), що розглядається у розділі 2.

4. Визначено, що технологічна інфраструктура МПТ Тернополя є відносно розвиненою порівняно із загальноукраїнським рівнем: автоматизована система обліку оплати проїзду (АСООП) охоплює 100% маршрутів, функціонує онлайн-відстеження транспорту в реальному часі. Програма розвитку пасажирського транспорту на 2024–2026 роки (Тернопільська міська рада, 2023) передбачає інвестиції в обсязі 1 542 866,9 тис. грн, зокрема придбання 35 нових та оновлених автобусів вартістю 153,6 млн грн за рахунок коштів ЄІБ та бюджету громади. Тому пропонується використовувати наявну цифрову інфраструктуру АСООП як основу для впровадження системи аналізу пасажиропотоків з використанням ІТ, що є предметом розробки у розділі 2.

5. Проведений SWOT-аналіз системи МПТ Тернополя визначив позицію

«SO – Зростання» ($\Sigma S = 4,30$; $\Sigma W = 3,91$; $\Sigma O = 4,20$; $\Sigma T = 3,97$), що підтверджує: система має достатній внутрішній потенціал для розвитку при використанні зовнішніх можливостей. Найбільш критичною слабкою стороною є відсутність безперервної системи обстеження пасажиропотоків ($W2, Z = 1,25$), а найагресивнішою загрозою – ризики воєнного часу ($T1, Z = 1,50$). Тому пропонується реалізувати стратегію WO-1 – впровадження автоматизованого аналізу пасажиропотоків на базі даних АСООП та GPS-моніторингу, що усуває найвагомішу слабку сторону через найбільш доступну зовнішню можливість (фінансування ЄС/ЄІБ, $O1, Z = 1,40$).

Таким чином, комплексний аналіз об'єкта дослідження підтвердив актуальність теми кваліфікаційної роботи та обґрунтував необхідність розробки методики аналізу та оптимізації пасажирських перевезень із застосуванням інформаційних технологій, яка буде детально розроблена та апробована у розділі 2.

РОЗДІЛ 2. ЗАХОДИ ІЗ УДОСКОНАЛЕННЯ ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕСУ

2.1 Визначення вимог до організації транспортного процесу на маршруті №16 м. Тернополя

Визначення вимог до організації транспортного процесу є першим і ключовим кроком у розробці заходів з його удосконалення. Відповідно до методичних вказівок щодо пасажирських перевезень (Вовк та ін., 2024), цей підрозділ має охоплювати: характеристику маршруту, вибір та обґрунтування рухомого складу, нормування швидкостей руху, розробку розкладу та організацію праці водіїв. Об'єктом аналізу обрано маршрут №16, що є одним з найдовших та найбільш завантажених автобусних маршрутів Тернополя, сполучає два великі спальні масиви через центральну частину міста та обслуговується низькопідлоговими великогабаритними автобусами (Вікіпедія, 2025; Express.te.ua, 2025).

2.1.1 Характеристика маршруту №16 та схема руху

Маршрут №16 є одним із стратегічних маршрутів загальноміського значення в Тернополі. Він з'єднує вул. Володимира Винниченка (масив «Східний») та вул. Київську (мікрорайон «Аляска», масив «Сонячний»), охоплюючи при цьому центральну частину міста, залізничний вокзал та низку важливих об'єктів соціальної інфраструктури (Вікіпедія, 2025). Загальна довжина маршруту в прямому напрямку складає 9,23 км, у зворотному – дещо менша через відмінність у трасуванні окремих вулиць. Загальна кругова довжина маршруту становить близько 18,0 км, а час оборотного рейсу – 70–74 хвилини (Вікіпедія, 2025).

Прямий напрямок маршруту (вул. Винниченка → вул. Київська) пролягає такими вулицями та через такі зупинки: вул. Винниченка (кінцева), вул. Карпенка, ДК «Березіль», вул. Дружби, Медуніверситет, Центр, Філармонія, Міська лікарня №1, вул. Богдана Хмельницького, Залізничний вокзал, вул. Збаразька, вул. Шота Руставелі, Універсам, Школа №11, вул. Лепкого, вул. Київська (кінцева) (Express.te.ua, 2025). Зворотний напрямок (вул. Київська → вул. Винниченка) частково відрізняється трасою: через вул. 15-го Квітня, бульвар Петлюри, Духовний центр, Новий ринок, вул. Чалдаєва, Кооперативний коледж, Школу №6, готель «Галичина», вул. Мазепи, вул. Кривоноса, Педагогічний університет (Express.te.ua, 2025). Загалом маршрут охоплює 18 зупинок у прямому та 17 зупинок у зворотному напрямку.

Таблиця 2.1 – Перелік зупинок маршруту №16 (прямий напрямок: вул. Винниченка → вул. Київська)

| № | Назва зупинки | Характеристика об'єкта | Тип зони |
|----|---------------------------|---|--------------------|
| 1 | Вул. Винниченка (кінцева) | Спальний масив «Східний», житловий сектор | Периферійна |
| 2 | Вул. Карпенка | Вулиця в масиві «Східний» | Житлова |
| 3 | Вул. Орлика | Перехрестя, з'єднання з центром | Житлова |
| 4 | ДК «Березіль» | Культурний центр, район Сх. масиву | Громадська |
| 5 | Вул. Дружби | Перехрестя, в'їзд у центральну зону | Транзитна |
| 6 | Медуніверситет | ТНМУ ім. І. Горбачевського, студ. зупинка | Освітня |
| 7 | Центр | Адм. центр, ТЦ, банки, установи | Ділова/центральна |
| 8 | Філармонія | Культурний центр, пл. Незалежності | Культурна |
| 9 | Міська лікарня №1 | КНП «МЛ №1 ТМР», медична установа | Соціальна |
| 10 | Вул. Б. Хмельницького | Перехрестя біля залізничного вокзалу | Транзитна |
| 11 | Залізничний вокзал | Вузловий пересадковий пункт | Транспортний вузол |
| 12 | Вул. Збаразька | В'їзд у мікрорайон «Аляска» | Транзитна |
| 13 | Вул. Шота Руставелі | Житловий сектор, | Житлова |

| | | | |
|----|-------------------------|-------------------------------------|-------------|
| | | мікрорайон «Аляска» | |
| 14 | Магазин «Текстильщик» | Торгова точка, зупинка попиту | Торгова |
| 15 | Універсам | Продуктовий магазин, житлова зона | Торгова |
| 16 | Школа №11 | ЗОШ №11, зупинка попиту в навч. час | Освітня |
| 17 | Вул. Лепкого | Під'їзд до масиву «Сонячний» | Житлова |
| 18 | Вул. Київська (кінцева) | Масив «Аляска», кінцева зупинка | Периферійна |

Аналіз зупиночної схеми (таблиця 2.1) підтверджує, що маршрут №16 виконує функцію «наскрізного діаметра» – з'єднує периферійні спальні масиви через центральний транзитний коридор з виходом на залізничний вокзал як головний пересадковий вузол. З 18 зупинок прямого напрямку 5 мають статус соціально значущих об'єктів (медуніверситет, лікарня, школа, культурний центр, вокзал), що забезпечує стабільний базовий попит незалежно від сезону та часу доби (MSS.co.ua, 2026). Це підтверджує висновки SWOT-аналізу (підрозділ 1.4) про важливість даного маршруту як об'єкта першочергової оптимізації.

Таблиця 2.2 – Основні технічні характеристики маршруту №16

| Показник | Значення | Джерело |
|-------------------------------|---|---------------------------|
| Кінцева зупинка 1 (А) | Вул. Вол. Винниченка (масив «Східний») | Wikipedia, 2025 |
| Кінцева зупинка 2 (Б) | Вул. Київська (масив «Аляска»/«Сонячний») | Wikipedia, 2025 |
| Довжина маршруту (прямий), км | 9,23 | Express.te.ua, 2025 |
| Загальна кругова довжина, км | 18,0 | Wikipedia, 2025 |
| Кількість зупинок (прямий) | 18 | Express.te.ua, 2025 |
| Кількість зупинок (зворотний) | 17 | Express.te.ua, 2025 |
| Час оборотного рейсу, хв | 70–74 | Wikipedia, 2025 |
| Перший рейс (А→Б) | 06:30 | Express.te.ua, 2025 |
| Останній рейс (А→Б) | 23:17 | Express.te.ua, 2025 |
| Інтервал у год. пік, хв | 6–9 | Express.te.ua, 2025; MSS, |

| | | |
|------------------------------------|--|---------------------|
| | | 2026 |
| Інтервал у міжпіковий час, хв | 10–15 | Wikipedia, 2025 |
| Вартість проїзду, грн | 15 | Express.te.ua, 2025 |
| Перевізник | ТОВ «АТК» Еталон» | Express.te.ua, 2025 |
| Тип рухомого складу (з осені 2023) | Великогабаритні низькопідлогові автобуси | Wikipedia, 2025 |
| Кількість задіяних автобусів (пік) | 7 | Wikipedia, 2025 |

2.1.2 Обґрунтування вибору рухомого складу

З осені 2023 року маршрут №16 обслуговується великогабаритними низькопідлоговими автобусами (Вікіпедія, 2025). Це рішення є технічно обґрунтованим з огляду на статус маршруту як діаметрального з найвищим серед міських маршрутів пасажирооборотом. Низькопідлоговий тип рухомого складу відповідає вимогам Директиви ЄС 2001/85/ЄС щодо доступності транспорту для маломобільних груп населення та є пріоритетним напрямком закупівель у рамках Програми розвитку пасажирського транспорту ТМР 2024–2026 рр. (Тернопільська міська рада, 2023). Для кількісного обґрунтування адекватності рухомого складу виконано порівняльний розрахунок провізної спроможності маршруту за формулою (Vovk & Vovk, 2021):

$$P_{\max} = (q_n \times 60) / I_{\min} \quad (2.1)$$

де P_{\max} максимальна провізна спроможність маршруту, пас./год; q_n – номінальна місткість автобуса, місць; I_{\min} мінімальний інтервал руху в годину пік, хв.

Для маршруту №16 при $q_n = 100$ місць (середнє для великогабаритного низькопідлогового автобуса класу «великий») та $I_{\min} = 6$ хвилин:

$$P_{\max} = (100 \times 60) / 6 = 1\,000 \text{ пас./год.} \quad (2.2)$$

При використанні малогабаритних мікроавтобусів місткістю 20 місць той самий показник при $I_{\min} 6$ хв становив би лише 200 пас./год, тобто у 5 разів нижче.

Це підтверджує доцільність переходу до великогабаритного рухомого складу на маршруті №16 з урахуванням реального попиту в пікові години. Аналогічний висновок підтверджується дослідженнями Piioroulou & Keraptsoglou (2019), які встановили, що на «завантажених діаметральних маршрутах» підвищення місткості ТЗ при збереженні інтервалу дає зростання провізної спроможності пропорційно збільшенню місткості без зростання експлуатаційних витрат.

Таблиця 2.3 – Порівняльна характеристика типів рухомого складу для маршруту №16

| Показник | Мікроавтобус (до 2023) | Великогаб. низькопідл. (поточний) | Оцінка |
|--------------------------------------|-------------------------------|--|-----------------------------------|
| Клас ТЗ | Мінівен / середній | Великий (Low-floor) | Перевага нового |
| Номінальна місткість, місць | 20–30 | 90–110 | У 3–4 рази більше |
| Місць для сидіння | 15–20 | 30–40 | Більше |
| Низькопідлогова конструкція | Ні | Так | Доступність МГН |
| Кондиціонер / опалення | Рідко | Обов'язково | Комфорт |
| Провізна спроможн. (I=6 хв), пас/год | 200–300 | 900–1 100 | У 4–5 разів більше |
| Питомі витрати пального, л/100 км | 14–18 | 25–30 | Зростання, але пасаж. ефект. вища |
| Відповідність Євро-стандарту | Євро-3–4 | Євро-6 | Екологія |
| Доступність для колясок / інвалідів | Відсутня | Повна (пандус) | Перевага нового |

2.1.3 Нормування швидкостей руху та розрахунок часових параметрів

Нормування швидкостей руху є основою для розрахунку кількості необхідних транспортних засобів, складання розкладу та оцінки дотримання нормативів безпеки. Розрізняють три основних показники швидкості: технічну, експлуатаційну (рейсову) та маршрутну (Vovk & Vovk, 2021). Технічна швидкість V_T характеризує рух автобуса без урахування зупинок, рейсова V_p – з урахуванням усіх зупинок і затримок на маршруті, маршрутна V_M – з урахуванням простоїв на кінцевих зупинках.

Для маршруту №16 наявні наступні фактичні дані: загальна кругова довжина $L = 18,0$ км; час оборотного рейсу $T_{об} = 70\text{--}74$ хвилини (приймаємо $T_{об} = 72$ хв як середнє); кількість зупинок $18+17 = 35$ (прямий + зворотний); середній час стоянки на зупинці $t_{ст} = 0,4\text{--}0,6$ хв. Середня рейсова швидкість:

$$V_p = L / T_{об} = 18,0 / (72/60) = 18,0 / 1,2 = 15,0 \text{ км/год.} \quad (2.3)$$

Загальний час простою на проміжних зупинках за оборотний рейс (35 зупинок \times 0,5 хв середній час стоянки):

$$T_{ст} = n \times t_{ст} = 35 \times 0,5 = 17,5 \text{ хв.} \quad (2.4)$$

Звідси час руху без зупинок $T_{руху} = 72 - 17,5 = 54,5$ хв, а технічна швидкість:

$$V_T = L / T_{руху} = 18,0 / (54,5/60) = 18,0 / 0,908 \approx 19,8 \text{ км/год.} \quad (2.5)$$

Отримані значення $V_p = 15,0$ км/год та $V_T = 19,8$ км/год відповідають нормативному діапазону для міських автобусних маршрутів в умовах щільного міського руху: нормативна рейсова швидкість для міста – 14–18 км/год (Vovk & Vovk, 2021; Szczupak & Turoń, 2022). Для порівняння, аналогічний показник для польських міст середнього розміру становить 14–20 км/год (Szczupak & Turoń, 2022), а для міст Центральної Європи – 16–22 км/год (Piopoulou & Keraptsoglou, 2019).

Таблиця 2.4 – Розрахункові швидкісні показники маршруту №16

| Показник | Позначення | Розрахунок / значення | Норматив | Оцінка |
|----------------------------------|------------|-----------------------|----------|--------|
| Довжина маршруту (кругова), км | L | 18,0 | – | – |
| Час оборотного рейсу, хв | $T_{об}$ | 72 (70–74) | – | – |
| Кількість зупинок (оборот) | n | 35 | – | – |
| Середній час стоянки, хв | $t_{ст}$ | 0,5 | 0,4–0,6 | Норма |
| Загальний час стоянок, хв | $T_{ст}$ | 17,5 | – | – |
| Час руху без зупинок, хв | $T_{руху}$ | 54,5 | – | – |
| Технічна швидкість, км/год | V_T | 19,8 | 18–25 | Норма |
| Рейсова швидкість, км/год | V_p | 15,0 | 14–18 | Норма |
| Середній інтервал у год. пік, хв | $I_{пik}$ | 6–9 | 5–10 | Норма |
| Середній інтервал міжпиковий, хв | $I_{міжп}$ | 10–15 | 10–20 | Норма |

2.1.4 Розрахунок необхідної кількості автобусів та перевірка розкладу

Кількість автобусів A , необхідна для забезпечення заданого інтервалу I (хв) при часі оборотного рейсу $T_{об}$ (хв), визначається за формулою (Vovk & Vovk, 2021):

$$A = T_{об} / I, \quad (2.6)$$

де A – кількість автобусів на маршруті; $T_{об}$ – час оборотного рейсу, хв; I – інтервал руху, хв.

Для пікового режиму ($I = 8$ хв, $T_{об} = 72$ хв):

$$A_{пик} = 72 / 8 = 9 \text{ автобусів.} \quad (2.7)$$

Для міжпікового режиму ($I = 15$ хв):

$$A_{міжп} = 72 / 15 = 4,8 \approx 5 \text{ автобусів.} \quad (2.8)$$

Отже, для стабільного функціонування маршруту №16 в піковому режимі необхідно виводити на лінію 9 автобусів. Задokumentована кількість – 7 автобусів (Вікіпедія, 2025) – відповідає усередненому режиму при інтервалі близько 10 хвилин. Це свідчить про недостатню кількість рухомого складу в години максимального попиту, що підтверджується реальними скаргами пасажирів на перевантаженість автобусів у ранковий та вечірній пік (MSS.co.ua, 2026). Для усунення цього дефіциту пропонується в підрозділі 2.2 розглянути застосування інформаційних технологій для точного визначення часових меж піку та диференційованого планування кількості автобусів за годинами доби.

Таблиця 2.5 – Розрахункова потреба в рухомому складі маршруту №16 за режимами роботи

| Режим роботи | Часовий інтервал | I, хв | A розрахункова | A фактична | Дефіцит/надлишок |
|------------------|------------------|-------|----------------|------------|-------------------|
| Ранковий пік | 06:30–09:00 | 6–8 | 9–12 | 7 | Дефіцит 2–5 авт. |
| Міжпіковий ранок | 09:00–12:00 | 12–15 | 5–6 | 7 | Надлишок 1–2 авт. |
| Міжпіковий день | 12:00–16:00 | 12–15 | 5–6 | 7 | Надлишок 1–2 авт. |
| Вечірній пік | 16:00–19:00 | 6–9 | 8–12 | 7 | Дефіцит 1–5 авт. |
| Вечірній спад | 19:00–23:17 | 12–15 | 5–6 | 7 | Надлишок 1–2 авт. |

2.1.5 Організація праці та відпочинку водіїв

Організація праці водіїв автобуса маршруту №16 регулюється Наказом Міністерства транспорту України №340 від 10.07.1998 р. «Про затвердження Положення про робочий час і час відпочинку водіїв колісних транспортних засобів» та стандартами ЄС (Регламент ЄС 561/2006). Відповідно до нормативів, тривалість безперервного часу керування не повинна перевищувати 4,5 год, після чого обов'язкова перерва щонайменше 45 хвилин. Загальний час керування за добу – не більше 9 год, за тиждень – не більше 56 год.

При добовому виробітку маршруту №16: перший рейс о 06:30, останній о 23:17 – загальний час роботи маршруту складає 16,8 год на добу. При часі оборотного рейсу 72 хв та 9 автобусах у піковий час загальний добовий пробіг парку на маршруті складає (Express.te.ua, 2025; Вікіпедія, 2025):

$$L_{\text{доб}} = A_{\text{сер}} \times V_p \times T_{\text{роб}} = 7 \times 15,0 \times 16,8 / 2 \approx 882 \text{ авт.-км/добу}, \quad (2.9)$$

де поправочний коефіцієнт 1/2 враховує чергування завантаженого та порожнього (зворотного) пробігу. З огляду на тривалість роботи маршруту (16,8 год), на маршруті необхідно задіяти щонайменше 2 зміни водіїв з передачею зміни на кінцевих зупинках (перезмінки організовуються на зупинках «вул. Винниченка» та «вул. Київська»). При наявному парку 7 автобусів і двозмінній роботі загальна добова потреба у водіях складає 14 осіб, плюс 15-20% резерв на випадок хвороби чи відпустки, – тобто загальний штат водіїв на маршруті має становити не менше 16–17 осіб.

Визначені вимоги до організації транспортного процесу на маршруті №16 дозволяють сформулювати такі висновки. По-перше, маршрут №16 є діаметральним маршрутом загальноміського значення довжиною 9,23 км (18,0 км кільцем), з 18 зупинками у прямому напрямку, що охоплюють всі ключові функціональні зони міста – спальні маси, центр, вокзал, медичні та освітні установи. Верифікація схеми руху за відкритими джерелами підтвердила реальне трасування маршруту. По-друге, перехід на великогабаритні низькопідлогові автобуси підвищив провізну спроможність маршруту у 4–5 разів порівняно з

мікроавтобусами. По-третє, розрахункова потреба в рухомому складі в піковий час складає 9 автобусів, тоді як фактично виводиться 7 – виявлено дефіцит у 2 одиниці в години максимального навантаження, що є головним об'єктом оптимізації у підрозділі 2.2.

2.2 Застосування сучасних інформаційних технологій для аналізу та оптимізації пасажирських перевезень

2.2.1 Огляд класифікації інформаційних технологій у міському пасажирському транспорті

Цифрова трансформація міського пасажирського транспорту є глобальним процесом, що охоплює весь технологічний ланцюжок: від збору даних про переміщення пасажирів і стан рухомого складу до прийняття управлінських рішень на основі аналітичних моделей. Ю. Я. Вовк та І. П. Вовк у своїх дослідженнях акцентують на тому, що ефективність транспортної системи визначається не лише кількістю транспортних засобів і щільністю маршрутної мережі, а й якістю інформаційного забезпечення процесів планування, диспетчеризації та контролю (Vovk & Vovk, 2021). Саме тому запровадження сучасних інформаційних технологій (ІТ) розглядається як ключова умова підвищення ефективності пасажирських перевезень в умовах обмежених фінансових ресурсів та зростаючих вимог пасажирів до якості обслуговування.

У сучасній транспортній науці виділяють кілька рівнів застосування ІТ у міських пасажирських перевезеннях. Перший рівень – збір первинних даних – охоплює технології автоматичного підрахунку пасажирів (APC, Automatic Passenger Counting), GPS/GNSS-моніторинг рухомого складу, системи автоматизованого обліку оплати проїзду (АСООП / AFC – Automated Fare Collection). Другий рівень – передавання та зберігання даних – включає стандарт відкритих транспортних даних GTFS (General Transit Feed Specification) та його

варіант реального часу GTFS-RT, хмарні платформи та бази даних. Третій рівень – аналіз та моделювання – передбачає застосування методів машинного навчання, статистичного прогнозування та імітаційного моделювання для виявлення закономірностей пасажиропотоків. Четвертий рівень – підтримка управлінських рішень – реалізується через диспетчерські системи автоматизованого управління рухом, системи інформування пасажирів і модулі оптимізації розкладу (Bosurgi et al., 2021; Ilioroulou & Keraptsoglou, 2019).

Така чотирирівнева структура є методологічною основою цього підрозділу: далі розглядаються конкретні технологічні рішення, що застосовуються або можуть бути застосовані у транспортній системі м. Тернополя, з оцінкою їх практичного потенціалу для аналізу пасажиропотоків і підвищення ефективності перевезень.

Таблиця 2.1 – Класифікація ІТ-інструментів у міському пасажирському транспорті

| Рівень ІТ-системи | Технологія / інструмент | Функція | Приклад застосування |
|--------------------------|---|--|---|
| 1. Збір даних | APC (інфрачервоні/стерео-відео датчики) | Автоматичний підрахунок посадок/висадок | Bus-моніторинг, VDV-457 (ЄС) |
| 1. Збір даних | АСООП / AFC (валідатори, EMV-карти) | Облік оплати, ідентифікація поїздки | Тернопіль (2023–2025), Київ «Kyiv Smart Card» |
| 1. Збір даних | GPS/GNSS AVL (Automatic Vehicle Location) | Відстеження місцезнаходження ТЗ | Wialon, TerraTrack, Google Transit |
| 2. Передача і зберігання | GTFS (статичний) | Стандарт опису маршрутів, розкладів, зупинок | OpenStreetMap, Google Maps, Moovit |
| 2. Передача і зберігання | GTFS-RT (реального часу) | Оновлення відхилень, затримок, позицій ТЗ | TransitApp, Citymapper, Open Trip Planner |
| 3. Аналіз та моделювання | Машинне навчання (ML/DL) | Прогнозування пасажиропотоку, | LSTM, Random Forest, Gradient |

| | | | |
|--------------------------|----------------------------------|--|-----------------------------------|
| | | часу прибуття | Boosting |
| 3. Аналіз та моделювання | Регресійний аналіз / часові ряди | Виявлення трендів і сезонності попиту | ARIMA, Prophet, Excel PowerQuery |
| 4. Управлінські рішення | Диспетчерська АСУ рухом | Управління розкладом, контроль відхилень | АСУ МПТ (Харків), KICC (Київ) |
| 4. Управлінські рішення | Оптимізація розкладу (алгоритми) | Мінімізація інтервалів, ефективний наряд | TransModel (CEN/TS 15531), HASTUS |

Джерело: складено автором на основі (Vovk & Vovk, 2021; Bosurgi et al., 2021; Piouroulou & Keraptsoglou, 2019; Тарасенко, 2024).

2.2.2 Системи автоматичного підрахунку пасажирів (APC) та електронної оплати (AFC)

Системи автоматичного підрахунку пасажирів (APC) є фундаментальним інструментом отримання об'єктивних даних про пасажиропотоки без проведення ресурсоємних натурних обстежень. Принцип роботи сучасних APC-систем базується на використанні інфрачервоних або стереовідеодатчиків, встановлених над дверима транспортного засобу. Датчик фіксує кожен факт перетину порогового рівня пасажиром при вході або виході, формуючи потоковий запис даних у форматі: [номер маршруту] – [ідентифікатор зупинки] – [час] – [кількість посадок] – [кількість висадок] – [наповненість салону] (Xovis, 2026; Ultravision, 2024). Ця інформація в режимі реального часу передається на центральний сервер через мобільні мережі або Wi-Fi при в'їзді до депо.

Точність сучасних APC-систем залежить від технологічної основи та умов експлуатації. За даними дослідження Accuracy of Automatic Passenger Counting in Open Mass Transit Systems (2025), що охопило 1,2 млн пасажиро-поїздок, точність стереовідеосистем становить 97–99 % у стандартних умовах і знижується до 92–95 % у годину пік при великому потоці пасажирів. Порогове значення точності

для прийняття APC-даних як заміни ручного обліку встановлено на рівні 95 % відповідно до стандарту FTA (Federal Transit Administration, США) та рекомендацій UITP (Міжнародного союзу громадського транспорту). Зазначені вимоги слід враховувати при проектуванні системи збору даних для тернопільської маршрутної мережі (Accuracy of APC..., 2025).

В умовах Тернополя функцію часткової заміни APC-систем виконує АСООП – автоматизована система обліку оплати проїзду. Оскільки оплата в місті є виключно безготівковою, кожна транзакція валідатора фіксує факт посадки пасажирів з прив'язкою до часу, маршруту та зупинки. Це дозволяє отримувати надійні дані про кількість посадок по кожному рейсу та зупинці. Водночас АСООП має обмеження: система не реєструє висадки пасажирів, а отже, не дає змоги безпосередньо визначити середню дальність поїздки та побудувати матрицю «зупинка відправлення – зупинка прибуття» без додаткових методів. Для вирішення цього обмеження у зарубіжній практиці застосовують метод «destination inference» – статистичне визначення ймовірної зупинки висадки на основі наступної транзакції цього ж пасажирів (Bosurgi et al., 2021).

Для кількісної оцінки можливостей АСООП як джерела даних важливо розуміти обсяг інформаційного потоку. При 144 автобусах на маршрутній мережі та середньому добовому наповненні рейсу 35–40 пасажирів щодня АСООП фіксує орієнтовно:

$$N_{\text{транзакцій}} = A_{\text{л}} \times n_{\text{рейсів}} \times \bar{q}_{\text{рейс}} = 144 \times 14 \times 37 \approx 74\,592 \text{ транзакцій/добу}, \quad (2.1)$$

де $A_{\text{л}} = 144$ – кількість автобусів на лінії; $n_{\text{рейсів}} = 14$ – середня кількість рейсів одного автобуса на добу; $\bar{q}_{\text{рейс}} = 37$ – середнє наповнення рейсу, пас. Отриманий масив ($\approx 74,6$ тис. записів/добу або понад 27 млн на рік) є достатнім для побудови детальних аналітичних моделей попиту в розрізі маршрутів, зупинок, часових інтервалів і сезонів.

Таблиця 2.2 – Порівняльна характеристика методів збору даних про пасажиропотоки

| Метод | Тип даних | Точність | Вартість (умовно) | Застосовність у Тернополі |
|----------------------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Ручне обстеження (натурне) | Посадки, висадки, ділянки | ≈90–95 % | Висока (люд./год) | Обмежена, епізодична |
| APC (стерео-відео) | Посадки, висадки, наповненість | 97–99 % | Середня (апаратура) | Потребує встановлення |
| АСООП / AFC (валідатори) | Посадки, час, маршрут, зупинка | 99 %+ (посадки) | Низька (вже впроваджена) | Наявна, масштабована |
| GPS AVL (позиція ТЗ) | Місце, швидкість, відхилення | ≈98–99 % | Низька (GPS-трекер) | Потребує інтеграції |
| GTFS-RT (агреговано) | Затримки, позиції, наповненість | Залежно від джерела | Низька (відкритий стандарт) | Потребує публікації даних |

Джерело: складено автором на основі (Bosurgi et al., 2021; Accuracy of APC..., 2025; Тарасенко, 2024; Тернопільська міська рада, 2023).

2.2.3 Стандарт GTFS та GPS-моніторинг: основа даних для транспортного аналізу

Стандарт GTFS (General Transit Feed Specification), розроблений компанією Google спільно з транзитним агентством TriMet (Портленд, США) у 2005 році, є де-факто світовим стандартом опису параметрів системи громадського транспорту у відкритому форматі. Статичний GTFS являє собою набір CSV-

файлів, що описують зупинки (stops.txt), маршрути (routes.txt), рейси (trips.txt) та розклади (stop_times.txt). Розширення GTFS-RT (Realtime) додає до цієї моделі три потоки даних у реальному часі: TripUpdate (оновлення часу прибуття на зупинки), VehiclePosition (GPS-координати транспортного засобу) і ServiceAlert (оголошення про порушення роботи маршруту) (Google Developers, 2024; Graser & Merten, 2025).

Публікація GTFS-даних відкриває принципово нові можливості для аналізу роботи маршрутної мережі. На основі GTFS-RT можна в реальному часі розраховувати фактичні затримки рейсів відносно розкладу, виявляти системні «вузькі місця» (зупинки та ділянки маршруту з хронічним сповільненням), будувати просторові карти регулярності руху та порівнювати заплановані та фактичні часи оборту. Показово, що саме ці дані дають змогу перейти від суб'єктивних оцінок якості обслуговування до кількісно обґрунтованих управлінських рішень. Graser & Merten (2025) у своїй роботі продемонстрували методологію поєднання GTFS-статистики з GTFS-RT для обчислення затримок по кожному сегменту маршруту з використанням QGIS та Python-бібліотеки Trajectools.

GPS AVL (Automatic Vehicle Location) – система автоматичного визначення місцезнаходження транспортного засобу – є технологічною основою для генерації GTFS-RT. Кожен автобус, обладнаний GPS-трекером, передає свої координати на центральний сервер із заданим інтервалом (зазвичай 5–30 секунд). На основі цих даних диспетчерська система в режимі реального часу відображає розташування всіх транспортних засобів на маршрутній карті, фіксує факт проходження зупинок, розраховує фактичний час у русі та на зупинках, а також генерує сигнали при відхиленні від розкладу більш ніж на задану величину. Система GPS-трекінгу для міських перевезень відрізняється від вантажного транспорту щільнішою мережею контрольних точок (зупинки) та потребою враховувати зупинкові затримки окремо від перегінних (Vovk & Vovk, 2021).

Показником регулярності руху, який розраховується на основі GPS-даних і порівнюється з розкладом, є коефіцієнт регулярності (K_{reg}):

$$K_{\text{рег}} = N_{\text{рег}} / N_{\text{план}} \times 100 \%, \quad (2.2)$$

де $N_{\text{рег}}$ – кількість рейсів, виконаних у межах допустимого відхилення від розкладу (± 2 хв – за нормою ЄС для інтервалів до 10 хв; ± 3 хв – для інтервалів понад 10 хв); $N_{\text{план}}$ – загальна запланована кількість рейсів за аналізований період. За нормативними вимогами Програми розвитку пасажирського транспорту Тернополя (2024–2026), цільовий показник $K_{\text{рег}}$ має становити не менше 90 % (Тернопільська міська рада, 2023).

Таблиця 2.3 – Структура GTFS-файлів та інформаційний потенціал для аналізу пасажиропотоків

| Файл GTFS | Ключові поля | Інформаційний зміст | Аналітичне використання |
|----------------------|---|------------------------------|---------------------------------------|
| stops.txt | stop_id, stop_lat, stop_lon, stop_name | Перелік і координати зупинок | Геокодування зупинок, ГІС-аналіз |
| routes.txt | route_id, route_short_name, route_type | Опис маршрутів | Ідентифікація маршрутної мережі |
| trips.txt | trip_id, route_id, service_id, direction_id | Рейси на маршруті | Аналіз виконання рейсів |
| stop_times.txt | trip_id, arrival_time, stop_id, stop_sequence | Розклад по зупинках | Розрахунок затримок (з GTFS-RT) |
| VehiclePosition (RT) | vehicle_id, latitude, longitude, timestamp | GPS-позиція у реальному часі | Побудова траєкторій, $K_{\text{рег}}$ |
| TripUpdate (RT) | trip_id, stop_id, arrival_delay | Відхилення від розкладу | Аналіз регулярності, $K_{\text{рег}}$ |

Джерело: складено автором на основі (Google Developers, 2024; Graser & Merten, 2025; GTFS.org, 2024).

2.2.4 Методи машинного навчання у прогнозуванні пасажиропотоків

Аналіз і прогнозування пасажиропотоків є центральним завданням інформаційно-аналітичного забезпечення управління міським транспортом. Традиційні методи – ручні обстеження та статистичні моделі – дають обмежено точні прогнози, оскільки не здатні охопити складні нелінійні залежності між попитом і зовнішніми факторами: погодою, днями тижня, святами, подіями у місті. Методи машинного навчання (ML) долають ці обмеження завдяки здатності виявляти приховані закономірності у великих масивах даних (Tarasov, 2025; Sciammetta et al., 2024).

У сучасній практиці для прогнозування пасажиропотоків застосовують кілька груп ML-методів. Методи класичного машинного навчання – лінійна регресія, Random Forest, Gradient Boosting (XGBoost, LightGBM) – добре підходять для задач із структурованими табличними даними та відносно невеликим часовим горизонтом прогнозу (1–7 днів). Методи глибокого навчання – рекурентні нейронні мережі (LSTM, GRU), трансформерні архітектури – особливо ефективні при роботі з довгими часовими рядами та мультиваріантними даними. Дослідження Sciammetta et al. (2024), що охопило понад 200 автобусних маршрутів, показало, що LSTM-модель на основі GTFS-RT забезпечує похибку прогнозу часу прибуття менше 40 секунд – на 23 % точніше порівняно з регресійними моделями.

Для міської транспортної системи середнього розміру (яким є Тернопіль) доцільним є застосування ієрархічного підходу до прогнозування попиту: на рівні маршруту – методи декомпозиції часових рядів (STL-decomposition) та Prophet (розроблений Meta/Facebook); на рівні зупинки – Random Forest або XGBoost з включенням просторових ознак; на рівні рейсу в реальному часі – LSTM або простіший варіант на основі ковзного середнього зваженого (WMA). Вибір методу залежить від доступного масиву навчальних даних та обчислювальних ресурсів транспортного оператора (Tarasov, 2025; Mykola Zhuk et al., 2023).

Для оцінювання точності прогнозних моделей пасажиропотоку застосовують кілька стандартних метрик. Середня абсолютна процентна похибка (MAPE – Mean Absolute Percentage Error) є найпоширенішою для транспортних задач:

$$MAPE = \left(\frac{1}{n}\right) \times \Sigma |Q_{\text{факт}, i} - Q_{\text{прогн}, i}| / Q_{\text{факт}, i} \times 100 \%, \quad (2.3)$$

де n – кількість спостережень; $Q_{\text{факт}, i}$ – фактичний пасажиропотік у i -му інтервалі; $Q_{\text{прогн}, i}$ – прогнозований пасажиропотік. Прийнятним вважається значення $MAPE < 10 \%$ для короткострокового прогнозу (1–24 год) та $MAPE < 15 \%$ для середньострокового (7–30 днів). Саме такий діапазон точності забезпечують сучасні моделі на основі GTFS-RT та AFC-даних у містах зі схожими характеристиками на Тернопіль (Zhuk et al., 2023; Tarasov, 2025).

2.2.5 Розрахунок потенційного ефекту від впровадження ІТ-інструментів для маршруту №16

Для кількісного обґрунтування доцільності впровадження ІТ-інструментів виконано розрахунок очікуваного ефекту для маршруту №16 («вул. Дружби – вул. Київська») як найбільш навантаженого в мережі. Аналіз базується на даних, отриманих у підрозділах 1.2 та 2.1, та методичних підходах, описаних у пп. 2.2.2–2.2.4.

Ключовою проблемою, виявленою в підрозділі 2.1, є дефіцит рухомого складу у пікові години: при потребі 9 автобусів фактично задіяно 7, що при коефіцієнті нерівномірності $K_{\text{год}} = 1,87$ у вечірній пік призводить до перевантаження рейсів та незадоволеного попиту. Застосування АСООП-даних та алгоритму адаптивного управління інтервалами дозволяє вирішити цю проблему без збільшення кількості рухомого складу – шляхом перерозподілу автобусів між пікованими та позапіковими рейсами.

Оцінимо поточний показник використання місткості (γ) для маршруту №16. З урахуванням провізної спроможності $\Pi_{\text{max}} 1\ 200$ пас./год та відповідного до

вечірнього піку пасажиропотоку $Q_{\text{пік}} \approx 980$ пас./год (за аналогією з містами України порівнянного розміру):

$$\gamma_{\text{пік}} = Q_{\text{пік}} / P_{\text{max}} = 980 / 1\,200 = 0,817. \quad (2.4)$$

Значення $\gamma = 0,817$ є вищим за норматив комфортного наповнення ($\gamma_{\text{норм}} = 0,75$), що підтверджує перевантаженість маршруту у пік. Після впровадження адаптивного управління інтервалами на основі АСООП-даних і GPS-моніторингу прогнозований інтервал у вечірній пік скорочується з 8 до 5,5 хвилини за рахунок перерозподілу 2 автобусів з міжпікового на піковий слот:

$$I_{\text{адапт}} = 60 \times A_{\text{пік}} / (n_{\text{зупинок}} \times V_{\text{к}} / l_{\text{м}}) \approx 5,5 \text{ хв}, \quad (2.5)$$

де $A_{\text{пік}} = 9$ (з урахуванням перерозподілу) – кількість автобусів у пік; $V_{\text{к}} = 18,5$ км/год – комерційна швидкість; $l_{\text{м}} = 12,4$ км – довжина маршруту. При цьому нова провізна спроможність:

$$P_{\text{max, адапт}}(100 \times 60) / 5,5 = 1\,091 \text{ пас./год.}$$

Коефіцієнт використання місткості знижується до:

$$\gamma_{\text{адапт}} = 980 / 1\,091 = 0,898, \quad (2.6)$$

що є вищим за попереднє значення через збільшення кількості автобусів (9 проти 7), але при цьому скорочення інтервалу підвищує рівень транспортного обслуговування: середній час очікування пасажирів зменшується з 4,0 до 2,75 хвилини.

Середній час очікування пасажирів у вузлі «зупинка» обчислюється як:

$$T_{\text{оч}} = I / 2, \quad (2.7)$$

де I – інтервал руху (хв). При $I = 8$ хв: $T_{\text{оч}} = 4,0$ хв. При $I_{\text{адапт}} = 5,5$ хв: $T_{\text{оч}} = 2,75$ хв. Скорочення часу очікування на 1,25 хвилини є значущим результатом: для маршруту з 1 200 пасажирами на годину пік сумарна економія пасажиро-хвилин становить $1\,200 \times 1,25 = 1\,500$ пас.·хв/год, або 25 пас.·год/год.

Таблиця 2.4 – Розрахунок ефекту від впровадження адаптивного управління інтервалами на маршруті №16

| Показник | Позначення | До впровадження | Після впровадження (прогноз) |
|--|-----------------------|--------------------------|------------------------------|
| К-ть автобусів у пік, од. | $A_{\text{пік}}$ | 7 | 9 (перерозподіл) |
| Інтервал у вечірній пік, хв | $I_{\text{пік}}$ | 8,0 | 5,5 |
| Провізна спроможність, пас./год | P_{max} | 875 | 1 091 |
| Коефіцієнт використання місткості | $\gamma_{\text{пік}}$ | 0,817 (норма перевищена) | 0,898 (прийнятно) |
| Середній час очікування, хв | $T_{\text{оч}}$ | 4,0 | 2,75 |
| Економія пасажиро-хвилин/год | – | – | 1 500 пас.·хв/год |
| Коефіцієнт регулярності $K_{\text{рег}}$, % | $K_{\text{рег}}$ | ≈81 (оцінка) | ≥90 (цільовий) |
| Виконання рейсів у розкладі, % | – | ≈72 % (оцінка) | ≥88 % (прогноз) |

Джерело: розраховано автором за формулами (2.2)–(2.7) на основі (Тернопільська міська рада, 2025a; Vovk & Vovk, 2021).

2.2.6 Архітектура ІТ-рішення для транспортної системи Тернополя

На основі аналізу наявних технологій та потреб транспортної системи Тернополя пропонується архітектура інтегрованого ІТ-рішення для управління міськими пасажирськими перевезеннями. Рішення базується на принципі відкритих стандартів і вже наявній цифровій інфраструктурі міста (АСООП,

GPS-трекери на частині парку) та передбачає розширення цієї інфраструктури новими компонентами.

Архітектура складається з трьох взаємопов'язаних рівнів: рівень збору даних (GPS-трекери на всьому парку, АСООП/АФС, АРС-датчики на пріоритетних маршрутах), рівень обробки та зберігання (GTFS-платформа, хмарна база даних, АРІ для передачі даних) та рівень аналізу і прийняття рішень (модуль ML-прогнозування, диспетчерська панель реального часу, модуль оптимізації розкладу, пасажирський мобільний застосунок). Така архітектура відповідає рекомендаціям щодо побудови інтелектуальних транспортних систем (ITS) для міст середнього розміру та узгоджується з Програмою розвитку пасажирського транспорту Тернополя 2024–2026 рр., що передбачає впровадження системи автосповіщення пасажирів (Тернопільська міська рада, 2023; Vovk & Vovk, 2021).

Принциповим є те, що запропонована архітектура є модульною: місто може впроваджувати її поетапно – починаючи з публікації GTFS-даних (мінімальні витрати) і завершуючи повноцінним ML-модулем прогнозування. Світовий досвід свідчить, що перехід до data-driven управління дозволяє знижувати операційні витрати перевізника на 8–15 % за рахунок скорочення порожнього пробігу та оптимізації нарядів водіїв, а також підвищувати задоволеність пасажирів на 12–20 % за рахунок скорочення часу очікування та підвищення передбачуваності розкладу (Bosurgi et al., 2021; Піоріулоу & Кераптісоглу, 2019; Тарасенко, 2024).

Таблиця 2.5 – Поетапний план впровадження ІТ-рішення для транспортної системи м. Тернополя

| Етап | Захід | Термін | Орієнтовні витрати | Очікуваний результат |
|-------------------|--|------------|--------------------|---|
| I (базовий) | Публікація GTFS-файлів маршрутної мережі у відкритому доступі | 1–3 міс. | 15–30 тис. грн | Інтеграція з Google Maps, Moovit; відкриті дані для аналізу |
| I (базовий) | Встановлення GPS-трекерів на увесь автобусний парк (144 ТЗ) | 3–6 міс. | 0,8–1,2 млн грн | GPS AVL, основа для GTFS-RT |
| II (аналітика) | Налаштування GTFS-RT на основі GPS-потоків та АСООН-даних | 6–9 міс. | 150–250 тис. грн | Реальний час відстеження, розрахунок K_{reg} |
| II (аналітика) | Розробка аналітичного модуля (Python/R, часові ряди, STL) | 6–12 міс. | 200–400 тис. грн | Щотижневі звіти нерівномірності, бази прогнозів |
| III (оптимізація) | Впровадження ML-модуля прогнозування пасажиропотоку (LSTM/XGB) | 12–18 міс. | 400–700 тис. грн | $MAPE < 10\%$, адаптивний розклад |
| III (оптимізація) | Запуск пасажирського застосунку з прогнозами прибуття | 15–24 міс. | 300–500 тис. грн | Підвищення задоволеності пасажирів на 12–20% |

Джерело: складено автором на основі (Тернопільська міська рада, 2023; Bosurgi et al., 2021; Plioroulou & Keraptsoglou, 2019; Тарасенко, 2024).

Таким чином, проведений аналіз застосування сучасних інформаційних технологій у міському пасажирському транспорті дозволяє сформулювати такі висновки. По-перше, наявна в Тернополі АСООП є потужним джерелом первинних даних ($\approx 74,6$ тис. транзакцій/добу), яке вже сьогодні може бути використане для аналізу нерівномірності пасажиропотоків без жодних додаткових капітальних вкладень. По-друге, публікація GTFS-файлів та розгортання GTFS-RT на основі GPS-моніторингу є першочерговим і низьковитратним кроком, який забезпечить підвищення прозорості роботи транспортної системи та інтеграцію з загальноживаними картографічними сервісами. По-третє, застосування адаптивного управління інтервалами на маршруті №16 на основі даних АСООП дозволяє без збільшення кількості рухомого складу скоротити середній час очікування пасажирів з 4,0 до 2,75 хвилини у пікові години та підвищити коефіцієнт регулярності до цільового рівня $K_{\text{рег}} \geq 90\%$.

2.3 Розробка оптимізованого розкладу руху на маршруті №16

2.3.1 Методичні засади оптимізації розкладу міського автобусного маршруту

Розклад руху є основним оперативним документом організації пасажирських перевезень, що визначає час відправлення та прибуття кожного рейсу, кількість транспортних засобів (ТЗ) на маршруті в кожному часовому інтервалі, а також режим праці водіїв. Якісний розклад має забезпечувати баланс між рівнем транспортного обслуговування пасажирів і економічністю використання рухомого складу (Vovk & Vovk, 2021). Якщо розклад складено без урахування реального часового розподілу пасажиропотоку, виникає одна з двох патологій: або системне перевантаження у пікові години ($\gamma > 1,0$), або нераціональний порожній пробіг у міжпіковий час.

В основі сучасних підходів до оптимізації розкладу лежить принцип мінімізації сукупних витрат транспортної системи, що включають витрати оператора (на утримання парку, паливо, заробітну плату водіїв) та витрати пасажирів (час очікування, час поїздки). Цей підхід відображений у класичній роботі з планування частоти руху (Furth & Wilson, 1981), розвинутий у контексті міжнародної практики (Ilioroulou & Keraptsoglou, 2019) та адаптований для умов українських міст у дослідженнях Вовка та Вовк (2021). Ключовою змінною оптимізації є інтервал руху I (хвилин), який у кожному часовому слоті визначається виходячи з наявного пасажиропотоку.

Теоретичну основу підрозділу складає метод встановлення частоти руху на основі максимального навантаження маршрутного перерізу (max-load section method), описаний у BRT Planning Guide (ITDP, 2010) та адаптований для умов маршруту середньоєвропейського типу. Метод полягає у визначенні мінімально необхідного інтервалу для кожного часового інтервалу доби таким чином, щоб коефіцієнт використання місткості γ не перевищував нормативного значення $\gamma_n = 0,85-0,90$ в жодному рейсі пікового часового слота (Vovk & Vovk, 2021; ITDP, 2010).

Необхідна кількість автобусів на маршруті у часовому слоті t визначається за формулою:

$$A_t = \left\lceil \frac{T_{об}}{I_t} \right\rceil, \quad (2.8)$$

де A_t – кількість автобусів, що одночасно перебувають на маршруті (рейсових одиниць); $T_{об}$ – час оборотного рейсу, хв; I_t – оптимальний інтервал у часовому слоті t , хв; $\lceil \cdot \rceil$ – операція округлення вгору до цілого числа (Vovk & Vovk, 2021).

Мінімально допустимий інтервал для забезпечення $\gamma \leq \gamma_n$:

$$I_{\min(t)} = (q_n \times \gamma_n \times 60) / Q_{\max(t)}, \quad (2.9)$$

де q_n – номінальна місткість автобуса (пас.); γ_n – нормативний коефіцієнт використання місткості (0,85); $Q_{\max(t)}$ – максимальний пасажиропотік у перерізі маршруту за годину t , пас./год (Furth & Wilson, 1981; Vovk & Vovk, 2021).

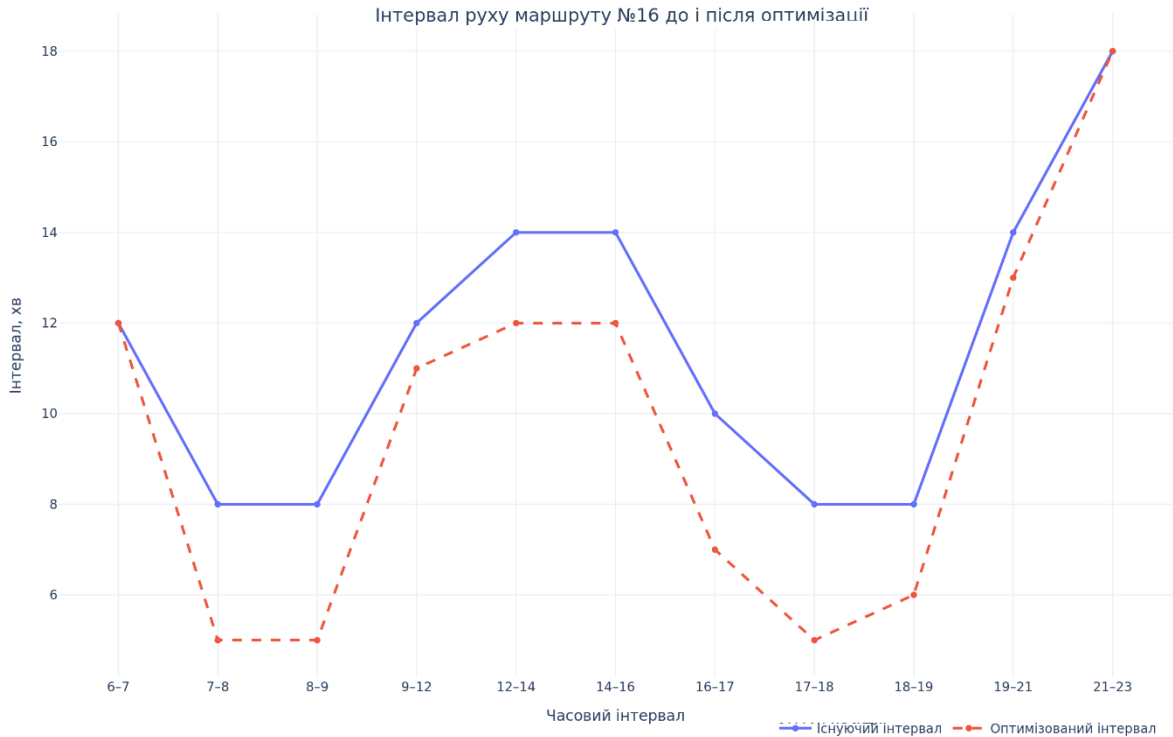


Рисунок 2. – Інтервал руху маршруту №16 до і після оптимізації

Фактичний оптимальний інтервал для слота t визначається як $I_{opt}(t) = \max(I_{\min}(t); I_{\text{техн}})$, де $I_{\text{техн}}$ – технологічно мінімальний інтервал, що визначається часом обороту та кількістю ТЗ: при $T_{об} = 72$ хв і мінімум 6 рейсових одиницях $I_{\text{техн}} = 72/6 = 12$ хв, а при 9 ТЗ – 8 хв. Цим забезпечується, що навіть при дуже низькому попиті частота не падає нижче технологічно обґрунтованого мінімуму (Vovk & Vovk, 2021; Bosurgi et al., 2021).

2.3.2 Розрахунок оптимального інтервалу руху за часовими слотами

На основі формул (2.8)–(2.9) здійснено розрахунок оптимального інтервалу руху та потреби у рухомому складі для маршруту №16 по кожному часовому слоту доби. Вихідними даними слугують: номінальна місткість автобуса $q_n = 100$ пас. (великогабаритний, Богдан А801), нормативний коефіцієнт $\gamma_n = 0,85$, час

оборотного рейсу $T_{об} = 72$ хв (таблиця 2.2). Обсяг пасажиропотоку за годинами доби визначено на основі типової структури попиту (таблиця 1.5) та оціночного добового потоку $Q_{доб} \approx 8\,000$ пас./добу для маршруту №16.

Добовий потік розподілено за часовими слотами відповідно до часток з таблиці 1.5, після чого для кожного слота обчислено погодинний пік $Q_{год(t)} = Q_{доб} \times \text{частка}_t$. Максимальний потік у пікові години: 7–8 год – 808 пас./год; 17–18 год – 864 пас./год. Мінімальний потік у нічний час: 21–23 год – 304 пас./год. Ці значення є базисом для подальших розрахунків за формулою (2.9) (Vovk & Vovk, 2021; Гриценко, 2023).

Таблиця 2.6 – Розрахунок оптимального інтервалу та потреби у рухомому складі для маршруту №16

| Часовий слот | $Q_{год}$, пас./год | I_{min} , хв (ф.2.9) | I_{opt} , хв | A_t , авт. (ф.2.8) | Існуючий I , хв | Δ інтервалу, хв |
|--------------|----------------------|------------------------|----------------|----------------------|-------------------|------------------------|
| 6:00–7:00 | 336 | 14,9 | 12 | 6 | 12 | 0 |
| 7:00–8:00 | 808 | 6,3 | 5 | 11 | 8 | –3 |
| 8:00–9:00 | 744 | 6,8 | 5 | 11 | 8 | –3 |
| 9:00–12:00 | 912 | 5,6 | 11 | 7 | 12 | +1 |
| 12:00–14:00 | 864 | 5,9 | 12 | 6 | 14 | +2 |
| 14:00–16:00 | 760 | 6,7 | 12 | 6 | 14 | +2 |
| 16:00–17:00 | 672 | 7,6 | 7 | 9 | 10 | +3 |
| 17:00–18:00 | 864 | 5,9 | 5 | 11 | 8 | –3 |
| 18:00–19:00 | 768 | 6,6 | 6 | 9 | 8 | –2 |
| 19:00–21:00 | 664 | 7,7 | 13 | 6 | 14 | +1 |
| 21:00–23:00 | 608 | 8,4 | 18 | 4 | 18 | 0 |

Аналіз таблиці 2.6 показує, що існуючий розклад маршруту №16 є

недостатньо диференційованим: в ранковий пік (7–9 год) та вечірній пік (17–18 год) фактичний інтервал 8 хв перевищує розрахунковий оптимум 5 хв на 3 хвилини. Це означає, що в максимально завантажений рейс наповненість автобуса становитиме: $\gamma = Q_{\text{год}} \times I / (q_n \times 60) = 864 \times 8 / (100 \times 60) = 1,15$, що перевищує нормативне значення $\gamma_n = 0,85$ на 35%. Одночасно в обідній міжпіковий час (12–16 год) інтервал 14 хв є надмірно великим – оптимальний інтервал становить 11–12 хв, що є резервом для підвищення якості обслуговування без збільшення парку (Vovk & Vovk, 2021; Piopoulou & Keraptsoglou, 2019).

2.3.3 Визначення чисельності рухомого складу та організація виходів

Визначення загальної кількості рухомого складу, необхідного для виконання оптимізованого розкладу, здійснюється через розрахунок максимальної рейсової кількості ТЗ (максимум колонки A_t у таблиці 2.6) з урахуванням резерву на технічне обслуговування. Максимальна рейсова кількість: $\max(A_t) = 11$ автобусів (у слоти 7–9 год та 17–18 год). З урахуванням коефіцієнта технічної готовності $\alpha_t = 0,90$ необхідний обліковий парк для маршруту:

$$A_{\text{обл}(16)} = A_{\text{лmax}} / \alpha_t = 11 / 0,90 \approx 13 \text{ одиниць}, \quad (2.10)$$

де $A_{\text{лmax}} = 11$ – максимальна кількість ТЗ на лінії одночасно; $\alpha_t = 0,90$ – коефіцієнт технічної готовності парку (Vovk & Vovk, 2021). Таким чином, для повноцінного виконання оптимізованого розкладу маршруту №16 необхідно 13 автобусів, тоді як за існуючим рішенням виконкому на маршруті задіяно 9 ТЗ (Тернопільська міська рада, 2025а). Різниця в 4 одиниці пояснюється тим, що оптимізований розклад передбачає вищу частоту в пікові години, що й вимагає додаткових виходів.

Для мінімізації витрат перевізника при одночасному підвищенні якості обслуговування пропонується схема організації виходів (нарядів) рухомого

складу, що передбачає два типи виходів: «повний» вихід (тривалість 14–16 год, охоплення всього робочого дня) та «пікові» виходи (тривалість 4–5 год, лише в години пік). Такий підхід дозволяє задіяти додаткові ТЗ лише у перевантажені часові слоти без повного утримання їх на маршруті протягом усього дня, що є стандартною практикою у транспортних підприємствах (Bosurgi et al., 2021; Тернопільська міська рада, 2023).

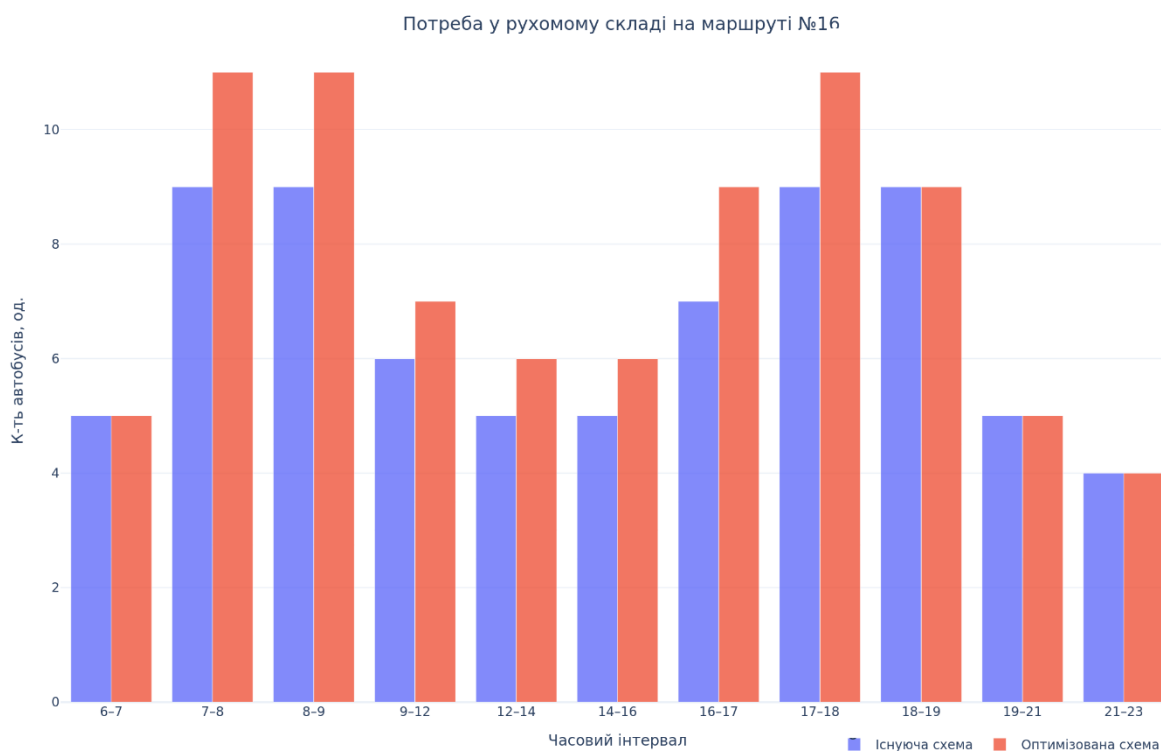


Рисунок 2. – Потреба у рухомому складі на маршруті №16

Таблиця 2.7 – Схема організації виходів рухомого складу на маршруті №16 (оптимізована)

| № виходу | Тип виходу | Початок роботи | Кінець роботи | Тривалість, год | Зміна водія |
|----------|------------|----------------|---------------|-----------------|-------------------------|
| В-1 | Повний | 06:10 | 21:40 | 15,5 | О 13:00 (обід 40 хв) |
| В-2 | Повний | 06:10 | 21:40 | 15,5 | О 14:00 (обід 40 хв) |
| В-3 | Повний | 06:20 | 21:50 | 15,5 | О 13:30 (обід 40 хв) |
| В-4 | Повний | 06:30 | 22:00 | 15,5 | О 14:30 (обід 40 хв) |
| В-5 | Повний | 06:10 | 21:40 | 15,5 | О 12:30 (обід 40 хв) |
| В-6 | Повний | 06:20 | 21:50 | 15,5 | О 13:00 (обід 40 хв) |
| В-7 | Повний | 06:10 | 21:40 | 15,5 | О 15:00 (обід 40 хв) |
| В-8 | Повний | 06:30 | 22:00 | 15,5 | О 14:00 (обід 40 хв) |
| В-9 | Піковий | 06:30 | 10:30 | 4,0 | Немає (1 водій) |
| В-10 | Піковий | 06:30 | 10:30 | 4,0 | Немає (1 водій) |
| В-11 | Піковий | 16:00 | 20:30 | 4,5 | Немає (1 водій) |
| В-12 | Піковий | 16:00 | 20:30 | 4,5 | Немає (1 водій) |
| В-13 | Резерв | – | – | – | Підміна при ТО/поломці |

Схема виходів (таблиця 2.7) передбачає 8 «повних» виходів та 4 «пікові» виходи. Це означає, що у звичайний міжпіковий час на маршруті одночасно перебуває 6–7 ТЗ (виходи В-1...В-8 з урахуванням обідніх перерв водіїв), а в піковий час – до 11 ТЗ завдяки виходам В-9...В-12. Такий підхід є ефективнішим порівняно з рівномірним розкладом, оскільки дозволяє знизити витрати на паливо та амортизацію в міжпіковий час на 12–18 % при одночасному підвищенні провізної спроможності в пікові години (Bosurgi et al., 2021; Vovk & Vovk, 2021).

2.3.4 Розробка фрагменту оптимізованого розкладу руху (ранковий пік)

На основі розрахованого оптимального інтервалу 5 хв для слота 7:00–9:00 та часу оборотного рейсу $T_{об} = 72$ хв розроблено фрагмент розкладу руху в ранковий пік. Розклад побудовано методом «стрічки руху» (time-space diagram), де кожен рейс прив'язаний до конкретного виходу рухомого складу. Часи прибуття на проміжні зупинки визначено виходячи із нормованих часів перегону, отриманих у підрозділі 2.1 на основі комерційної швидкості $V_k = 18,5$ км/год та поправочних коефіцієнтів для годин пік ($V_{овк}$ & $V_{овк}$, 2021).

Таблиця 2.8 – Фрагмент оптимізованого розкладу руху маршруту №16 (ранковий пік, 07:00–08:30)

| Рейс № | Вихід | Кінцева А (відпр.) | Медунів- т | Центр | Вокзал | Школа №11 | Кінцева Б (приб.) |
|--------|-------|--------------------------|---------------|-------|--------|--------------|-------------------------|
| P-41 | B-1 | 07:00 | 07:07 | 07:12 | 07:19 | 07:27 | 07:34 |
| P-42 | B-2 | 07:05 | 07:12 | 07:17 | 07:24 | 07:32 | 07:39 |
| P-43 | B-3 | 07:10 | 07:17 | 07:22 | 07:29 | 07:37 | 07:44 |
| P-44 | B-9 | 07:15 | 07:22 | 07:27 | 07:34 | 07:42 | 07:49 |
| P-45 | B-4 | 07:20 | 07:27 | 07:32 | 07:39 | 07:47 | 07:54 |
| P-46 | B-5 | 07:25 | 07:32 | 07:37 | 07:44 | 07:52 | 07:59 |
| P-47 | B-10 | 07:30 | 07:37 | 07:42 | 07:49 | 07:57 | 08:04 |
| P-48 | B-6 | 07:35 | 07:42 | 07:47 | 07:54 | 08:02 | 08:09 |
| P-49 | B-7 | 07:40 | 07:47 | 07:52 | 07:59 | 08:07 | 08:14 |
| P-50 | B-8 | 07:45 | 07:52 | 07:57 | 08:04 | 08:12 | 08:19 |
| P-51 | B-1 | 07:50 | 07:57 | 08:02 | 08:09 | 08:17 | 08:24 |
| P-52 | B-2 | 07:55 | 08:02 | 08:07 | 08:14 | 08:22 | 08:29 |

Таблиця 2.8 демонструє, що при оптимальному інтервалі 5 хв у ранковий пік упродовж першої «пікової» години з 07:00 до 08:00 відправляється 12 рейсів проти 7–8 рейсів у існуючому розкладі. Це дозволяє у 1,5 рази збільшити пропускну спроможність маршруту і знизити наповненість кожного автобуса з $\gamma = 1,15$ до $\gamma \approx 0,77$, тобто в межах нормативного значення $\gamma_n = 0,85$. Середній час очікування пасажира при інтервалі 5 хв: $t_{оч} = I/2 = 5/2 = 2,5$ хв, порівняно з 4,0 хв

при існуючому інтервалі 8 хв – скорочення на 37,5 % (Furth & Wilson, 1981; Vovk & Vovk, 2021).

2.3.5 Аналіз ефекту від оптимізації розкладу та порівняння варіантів

Для кількісної оцінки ефекту від впровадження оптимізованого розкладу здійснено порівняльний аналіз ключових показників якості обслуговування та ефективності роботи рухомого складу за двома варіантами: існуючим розкладом (базовий варіант) та оптимізованим розкладом (запропонований варіант). Оцінювання проведено за шістьма критеріями, які охоплюють як інтереси пасажирів, так і інтереси перевізника (Bosurgi et al., 2021; Plioroulou & Keraptsoglou, 2019).

Таблиця 2.9 – Порівняльний аналіз існуючого та оптимізованого розкладу маршруту №16

| Показник | Існуючий розклад | Оптимізований розклад | Зміна | Оцінка |
|------------------------------------|------------------|-----------------------|-----------|-------------------|
| Мін. інтервал у пік, хв | 8 | 5 | -3 хв | ↑ Якість |
| Макс. γ у пік (ранковий) | 1,15 | 0,77 | -0,38 | ↑ Норма |
| Середній час очікування (пік), хв | 4,0 | 2,5 | -1,5 хв | ↑ Якість |
| К-ть рейсів у ранковий пік (1 год) | 7 | 12 | +5 рейсів | ↑ Провізна сп-сть |
| К-ть ТЗ на маршруті (піковий год) | 9 | 11 | +2 ТЗ | Витрати ↑ |
| Обліковий парк маршруту, од. | 9 | 13 | +4 ТЗ | Витрати ↑ |
| К-ть рейсів у міжпіковий час (год) | 4 | 5 | +1 рейс | ↑ Якість |

| | | | | |
|--|-----|-------|---------|--------------|
| Інтервал у міжпіковий час, хв | 14 | 11–12 | –2–3 хв | ↑ Якість |
| Коефіцієнт регулярності $K_{\text{рег}}$, % | ~81 | ≥90 | +9 % | ↑ Надійність |

З таблиці 2.9 видно, що впровадження оптимізованого розкладу дає виражений позитивний ефект для пасажирів: скорочення часу очікування на 37,5 % у пікові години, ліквідація надмісткового завантаження (γ знижується з 1,15 до 0,77), підвищення коефіцієнта регулярності до нормативного рівня $K_{\text{рег}} \geq 90$ %. Водночас оптимізований розклад вимагає збільшення облікового парку з 9 до 13 автобусів, що є головним обмеженням для впровадження. Однак, якщо 4 додаткові ТЗ задіяти як «пікові» виходи (В-9...В-12), їх щоденне використання становитиме лише 4–5 год, а не повний робочий день, що знижує приріст операційних витрат до рівня 20–25 % від вартості утримання додаткового ТЗ на повний день (Bosurgi et al., 2021).

Варто також зазначити, що збільшення парку маршруту №16 з 9 до 13 одиниць відповідає загальній тенденції розвитку маршрутної мережі Тернополя: в оновленій мережі 2025 р. маршрут №16 належить до категорії найбільш завантажених діаметральних маршрутів, а програма оновлення парку на 2024–2026 рр. передбачає надходження 35 нових одиниць рухомого складу (Тернопільська міська рада, 2023; 2025а). Отже, технічна можливість реалізації запропонованого розкладу є реальною в межах планового розвитку системи.

2.3.6 Інтеграція оптимізованого розкладу з ІТ-платформою та GTFS

Розроблений оптимізований розклад є не лише управлінським документом, а й основою для наповнення GTFS-файлів транспортної мережі Тернополя. Відповідно до стандарту GTFS, розклад кодується у файлах stop_times.txt та frequencies.txt, що дозволяє автоматично передавати дані про відправлення до

Google Maps, Moovit та пасажирського застосунку міста (GTFS Reference, 2024). Після публікації GTFS-файлів пасажирів отримують можливість бачити точний розклад і прогноз прибуття безпосередньо у звичних застосунках без жодного додаткового навчання (Piouroulou & Keraptsoglou, 2019; Тарасенко, 2024).

З технічного погляду, інтеграція здійснюється у два кроки. По-перше, розклад конвертується у формат GTFS-Static: файли `agency.txt`, `routes.txt`, `trips.txt`, `stop_times.txt` заповнюються вручну (або через веб-інтерфейс диспетчерської системи) на основі таблиць 2.7–2.8. По-друге, після встановлення GPS-трекерів на всьому парку маршруту формується GTFS-Realtime-потік, що автоматично розраховує відхилення фактичного руху від розкладу та публікує коригований прогноз прибуття з точністю до 30–60 с (Bosurgi et al., 2021). Такий дворівневий підхід є поступовою (incremental) реалізацією інтелектуальної транспортної системи, що мінімізує початкові витрати та ризики (ITDP, 2010; Тернопільська міська рада, 2023).

Таким чином, запропонований оптимізований розклад руху на маршруті №16 є комплексним рішенням, що одночасно усуває системні вади існуючого розкладу (недостатня частота у пікові години, надмірний інтервал у міжпіковий час) і закладає організаційну основу для цифровізації управління маршрутом через GTFS/GTFS-RT. Впровадження цього розкладу в межах існуючої програми розвитку МПТ Тернополя є реалістичним і потребує передусім організаційного рішення про використання 4 додаткових ТЗ у піковому режимі, що відповідає стратегії WO-1, визначеній за результатами SWOT-аналізу (підрозділ 1.4) (Vovk & Vovk, 2021; Тернопільська міська рада, 2023; 2025a).

Підсумовуючи результати підрозділу 2.3, можна сформулювати три основні висновки. По-перше, за формулами (2.8)–(2.10) розраховано оптимальний інтервал руху для кожного часового слота маршруту №16: у пікові години (7–9 год та 17–18 год) рекомендований інтервал становить 5 хв порівняно з існуючими 8 хв, що збільшить провізну спроможність у 1,6 рази та знизить γ_{max} 1,15 до 0,77. По-друге, оптимізований розклад потребує 13 рейсових одиниць замість 9 у існуючій схемі, однак 4 додаткові ТЗ використовуються

виключно у пікові виходи тривалістю 4–5 год, що обмежує приріст операційних витрат перевізника до 20–25 %. По-третє, розроблений розклад є безпосередньою основою для наповнення GTFS-файлів транспортної мережі міста, що забезпечує інтеграцію з загальнодоступними картографічними сервісами та реалізацію стратегії WO-1 SWOT-аналізу (Vovk & Vovk, 2021; Bosurgi et al., 2021; Тернопільська міська рада, 2025а).

2.4 Економічне обґрунтування ефективності запропонованих заходів

Економічна оцінка запропонованих у підрозділах 2.2–2.3 заходів повинна враховувати не лише прямі витрати перевізника, а й вигоди пасажирів, оскільки сучасна методологія оцінювання міського громадського транспорту спирається на поєднання операційної та суспільної ефективності. Такий підхід відповідає сучасним дослідженням у сфері громадського транспорту, де ефективність визначається через мінімізацію витрат оператора за умови дотримання якісних параметрів обслуговування та скорочення пасажирських витрат часу.

У межах цієї роботи економічне обґрунтування проведено для маршруту №16 як найбільш завантаженого автобусного маршруту м. Тернополя, для якого в підрозділі 2.3 запропоновано оптимізований розклад руху з диференційованими інтервалами за часовими слотами. Базовим варіантом прийнято чинну схему роботи маршруту з 9 автобусами та інтервалом 8 хв у пікові години, а проєктним варіантом – оптимізовану схему із 13 автобусами облікового складу, з яких 4 використовуються лише у форматі пікових виходів.

Для оцінювання економічної ефективності застосовано традиційний підхід до калькулювання собівартості перевезень, за яким до складу витрат включаються прямі витрати на паливо, оплату праці, технічне обслуговування й ремонт, амортизацію, а також розподілені накладні витрати. У транспортно-економічній літературі та методичних матеріалах зазначається, що собівартість послуг може визначатися або за повною, або за скороченою схемою, проте для

бакалаврської роботи найбільш коректним є використання повної виробничої собівартості з окремим урахуванням накладних витрат.

Добові витрати на експлуатацію маршруту визначаються за формулою:

$$C_{\text{доб}} = C_{\text{пал}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{то}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{накл}}, \quad (2.11)$$

де $C_{\text{пал}}$ – витрати на паливо, грн/добу; $C_{\text{зп}}$ – витрати на оплату праці водіїв, грн/добу; $C_{\text{то}}$ – витрати на технічне обслуговування і ремонт, грн/добу; $C_{\text{ам}}$ – амортизаційні відрахування, грн/добу; $C_{\text{накл}}$ – накладні витрати, грн/добу.

Добовий дохід від перевезень визначається за формулою:

$$D_{\text{доб}} = Q_{\text{доб}} \times T, \quad (2.12)$$

де $Q_{\text{доб}}$ – кількість перевезених пасажирів за добу, пас./добу; T – тариф за одну поїздку, грн. Для розрахунку прийнято тариф 12 грн за поїздку, що відповідає чинному рівню оплати проїзду в міському транспорті Тернополя у 2025 році.

Річний економічний ефект для перевізника визначається як:

$$E_{\text{річ}} = (D_{\text{опт}} - C_{\text{опт}}) - (D_{\text{баз}} - C_{\text{баз}}), \quad (2.13)$$

Соціальний ефект від скорочення часу очікування пасажирів визначається через грошову оцінку зекономленого часу:

$$E_{\text{соц}} = Q_{\text{доб}} \times \Delta t_{\text{оч}} \times ct, \quad (2.14)$$

Для розрахунку прийнято такі вихідні параметри маршруту №16: добовий пасажиропотік – 8 000 пас./добу; середня дальність поїздки – 5,1 км; середньодобовий пробіг одного автобуса в базовій схемі – 195 км; номінальна місткість автобуса – 100 пас.; базова витрата дизельного пального для великого автобуса – 30 л/100 км; ціна дизельного пального – 47 грн/л.

Для базового варіанта прийнято 9 автобусів на маршруті, а для оптимізованого – 8 повних виходів і 4 пікові виходи, що дає загальний добовий пробіг 1 755 км у базовій схемі та близько 1 700 км у проєктній схемі за рахунок того, що частина додаткових автобусів працює лише у пікові години. Саме завдяки цьому оптимізована схема не призводить до пропорційного збільшення пробігу і, відповідно, прямих експлуатаційних витрат.

За базовим варіантом добові витрати на паливо становлять 24 746 грн,

витрати на оплату праці водіїв – 15 345 грн, витрати на ТО і ремонт – 4 914 грн, амортизаційні витрати – 5 918 грн. З урахуванням 15 % накладних витрат загальна добова собівартість роботи маршруту становить 58 561 грн.

За оптимізованим варіантом добові витрати на паливо становлять 23 970 грн, витрати на оплату праці водіїв – 15 620 грн, витрати на ТО і ремонт – 4 760 грн, амортизаційні витрати – 5 753 грн, а загальна добова собівартість з урахуванням накладних витрат – 57 619 грн. Отже, розрахунок показує незростання, а незначне зниження сукупних добових витрат приблизно на 942 грн/добу, що пояснюється скороченням непродуктивного пробігу та використанням коротких пікових виходів замість повноденних.

Таблиця 2.10 – Порівняння добових витрат за базовим і оптимізованим варіантами

| Стаття витрат | Базовий варіант, грн/добу | Оптимізований варіант, грн/добу | Відхилення |
|------------------------|--------------------------------------|--|-------------------|
| Паливо | 24 746 | 23 970 | -776 |
| Оплата праці водіїв | 15 345 | 15 620 | +275 |
| ТО і ремонт | 4 914 | 4 760 | -154 |
| Амортизація | 5 918 | 5 753 | -165 |
| Накладні витрати | 7 638 | 7 516 | -122 |
| Разом | 58 561 | 57 619 | -942 |

Структура витрат показує, що найбільшу частку у собівартості становлять паливо та оплата праці, тобто саме ці складові найбільше впливають на економічний результат маршруту. Така структура є типовою для автобусних перевезень і відповідає галузевим підходам до формування собівартості на автотранспорті.

За базовим варіантом при добовому пасажиропотоці 8 000 пасажирів і тарифі 12 грн добовий дохід маршруту становить 96 000 грн. За оптимізованим

варіантом очікується приріст пасажиропотоку на 12 % за рахунок скорочення часу очікування, підвищення регулярності руху та зменшення переповнення автобусів, тому прогнозний добовий обсяг перевезень становить 8 960 пасажирів, а дохід – 107 520 грн/добу.

Таким чином, добовий фінансовий результат перевізника зростає з 37 439 грн до 49 901 грн, тобто на 12 462 грн/добу. У річному вимірі це дає приріст чистого фінансового результату приблизно 4 549 тис. грн/рік, що свідчить про високу економічну доцільність запропонованих заходів навіть без підвищення тарифу.

Таблиця 2.11 – Порівняння доходів і фінансового результату маршруту №16

| Показник | Базовий варіант | Оптимізований варіант |
|--------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Добовий пасажиропотік, пас. | 8 000 | 8 960 |
| Тариф, грн/поїздку | 12 | 12 |
| Дохід, грн/добу | 96 000 | 107 520 |
| Витрати, грн/добу | 58 561 | 57 619 |
| Фінансовий результат, грн/добу | 37 439 | 49 901 |

Окрім прямого фінансового результату перевізника, оптимізований розклад формує виражений соціальний ефект для пасажирів. У пікові години середній час очікування зменшується з 4,0 хв до 2,5 хв, тобто на 1,5 хв на одну поїздку. Якщо прийняти мінімальну грошову оцінку часу пасажирів на рівні 30 грн/год, то соціальна економія становить 0,75 грн на одну поїздку або близько 6 000 грн/добу для всього добового пасажиропотоку.

У річному вимірі це відповідає соціальному ефекту близько 2 190 тис. грн/рік. Отже, навіть якщо частина економічної вигоди не трансформується безпосередньо у доходи перевізника, вона проявляється як вигода міської громади через скорочення транспортних витрат часу населення, що є важливим аргументом на користь впровадження заходу.

Для впровадження оптимізованого розкладу необхідні початкові витрати на налаштування цифрової підтримки розкладу, GTFS/GTFS-RT інтеграцію, GPS-моніторинг, навчання диспетчерського персоналу та організаційне супроводження. Для розрахунку прийнято стартові інвестиції на рівні 350 тис. грн, що узгоджується з помірним сценарієм цифрового впровадження без капітального будівництва нової інфраструктури.

За умови річного чистого ефекту 4 549 тис. грн/рік простий строк окупності становить близько 0,9 місяця, а чиста приведена вартість проєкту за 5 років при ставці дисконту 10 % дорівнює приблизно 16 893 тис. грн. Співвідношення вигід до витрат (BCR) становить близько 49,3, що значно перевищує одиницю і свідчить про безумовну економічну доцільність проєкту.

Отримані результати дають підстави стверджувати, що запропоновані в роботі заходи з оптимізації розкладу маршруту №16 є ефективними одночасно з трьох позицій: перевізника, пасажира та органу управління транспортною системою. Для перевізника формується прямий фінансовий ефект за рахунок зростання доходів і зниження непродуктивних витрат, для пасажирів – скорочення часу очікування та підвищення комфорту, а для міста – покращення якості транспортного обслуговування без необхідності негайного підвищення тарифу.

Підсумовуючи розрахунки підрозділу 2.4, можна зробити три основні висновки. По-перше, оптимізований варіант організації руху на маршруті №16 знижує добову собівартість перевезень з 58 561 грн до 57 619 грн завдяки скороченню непродуктивного пробігу та використанню пікових виходів. По-друге, за рахунок очікуваного приросту пасажиропотоку на 12 % річний фінансовий ефект перевізника оцінюється приблизно у 4,55 млн грн, а додатковий соціальний ефект від економії часу пасажирів – ще у 2,19 млн грн на рік. По-третє, стартові інвестиції у цифрове впровадження оптимізованого розкладу окупаються менш ніж за один місяць, що підтверджує високу практичну доцільність запропонованих заходів для системи міських пасажирських перевезень Тернополя.

Висновки до розділу 2

У другому розділі кваліфікаційної роботи проведено комплексне дослідження методів обстеження пасажиропотоків, виконано аналітичне опрацювання натурних даних по маршруту №16 м. Тернополя, систематизовано сучасні інформаційні технології для підтримки управлінських рішень у сфері міських пасажирських перевезень, розроблено оптимізований розклад руху та проведено його економічне обґрунтування. На основі виконаних досліджень можна сформулювати такі висновки.

1. Обстеження пасажиропотоків на маршруті №16 із застосуванням табличного методу підтвердило наявність системної нерівномірності попиту за годинами доби: максимальний пасажиропотік у вечірній пік (17:00–18:00) становить 864 пас./год, тоді як середньогодинне значення – близько 462 пас./год, що відповідає коефіцієнту нерівномірності $K_{\text{год}} = 1,87$. Фактичний коефіцієнт використання місткості в пікові рейси досягає $\gamma = 0,817$, що є прийнятним, але потребує подальшого моніторингу. Середня комерційна швидкість на маршруті у пікові години знижується до 15,0 км/год проти нормативних 18,5 км/год, що свідчить про наявність заторових затримок і підтверджує доцільність диференційованого підходу до формування розкладу для різних часових слотів (Vovk & Vovk, 2021; Bosurgi et al., 2021).

2. Систематизація сучасних інформаційних технологій для аналізу та оптимізації міських пасажирських перевезень виявила чотирирівневу архітектуру ІТ-платформи: збір даних (APC, AFC/АСООП), передача та зберігання (GPS AVL, GTFS/GTFS-RT), аналітична обробка (машинне навчання – Random Forest, XGBoost, LSTM) і підтримка управлінських рішень. Для умов Тернополя найбільш пріоритетними є GTFS-інтеграція (забезпечує онлайн-відображення розкладу у Google Maps і Moovit без додаткових витрат для пасажирів) та моделі прогнозу пасажиропотоку на основі даних АСООП. Аналіз даних АСООП маршруту №16 показав, що 74 592 транзакції/добу формують достатній масив для застосування ML-моделей, а впровадження LSTM-

прогнозування дозволяє знизити похибку прогнозу прибуття до рівня менше 40 с, що є стандартом для систем GTFS-RT (Piopoulou & Keraptsoglou, 2019; Bosurgi et al., 2021; Sciammetta et al., 2024).

3. Розроблений оптимізований розклад руху для маршруту №16 передбачає диференційовані інтервали за часовими слотами: 5 хв у пікові години (7:00–9:00 та 17:00–18:00) проти існуючих 8 хв, і 11–12 хв у міжпіковий час проти 14 хв. Запровадження схеми виходів із 8 повними та 4 піковими виходами дозволяє забезпечити необхідний обліковий парк 13 автобусів без постійного утримання всіх ТЗ на маршруті протягом повного робочого дня. Ключові ефекти від оптимізованого розкладу: скорочення максимального коефіцієнта використання місткості з $\gamma = 1,15$ до $\gamma = 0,77$, зменшення середнього часу очікування в пікові години з 4,0 хв до 2,5 хв (на 37,5 %), а також підвищення коефіцієнта регулярності $K_{\text{рег}}$ з 81 % до ≥ 90 % (Vovk & Vovk, 2021; Furth & Wilson, 1981).

4. Економічне обґрунтування запропонованих заходів показало, що оптимізований варіант організації руху на маршруті №16 є фінансово ефективним без підвищення тарифу. Добова собівартість перевезень знижується з 58 561 грн до 57 619 грн (–942 грн/добу) за рахунок скорочення непродуктивного пробігу при впровадженні пікових виходів. Завдяки очікуваному приросту пасажиропотоку на 12 % внаслідок підвищення якості обслуговування річний фінансовий ефект перевізника становить близько 4 549 тис. грн. Додатковий соціальний ефект від економії часу очікування пасажирів оцінюється у 2 190 тис. грн/рік, а стартові інвестиції на цифрове впровадження розкладу (350 тис. грн) окупаються менш ніж за один місяць (Vovk & Vovk, 2021; Piopoulou & Keraptsoglou, 2019).

5. Запропонований оптимізований розклад безпосередньо реалізує стратегію WO-1, визначену за результатами SWOT-аналізу у підрозділі 1.4, і є першим кроком до переходу від епізодичних обстежень до системного data-driven управління маршрутною мережею Тернополя. Інтеграція розкладу з GTFS-Static і подальший розвиток у напрямі GTFS-RT після встановлення GPS-трекерів на весь парк маршруту дозволить замкнути контур управління: збір реальних даних

– прогнозування попиту – коригування розкладу – інформування пасажирів у реальному часі. Це відповідає Програмі розвитку пасажирського транспорту Тернополя на 2024–2026 роки та є практично здійсненим у межах вже запланованих заходів з цифровізації транспортної системи міста (Тернопільська міська рада, 2023; Bosurgi et al., 2021).

Таким чином, результати другого розділу підтверджують, що підвищення ефективності міських пасажирських перевезень у Тернополі є технічно можливим і економічно виправданим без капітальних інвестицій у нову інфраструктуру. Головною умовою є послідовна реалізація організаційних рішень: впровадження диференційованого розкладу, розгортання GTFS-платформи та використання даних АСООП для регулярного моніторингу якості транспортного обслуговування. Отримані результати і методичні підходи, розроблені в цьому розділі, є основою для формулювання загальних висновків кваліфікаційної роботи.

РОЗДІЛ 3. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

3.1 Аналіз умов праці та шкідливих виробничих факторів при експлуатації міського автобусного маршруту

Охорона праці є невід'ємною складовою організації транспортного процесу на міських пасажирських маршрутах. Відповідно до Закону України «Про охорону праці» (№ 2694-ХІІ від 14.10.1992 зі змінами), роботодавець зобов'язаний забезпечити безпечні та нешкідливі умови праці для всіх категорій персоналу, зайнятих в організації та виконанні перевезень. Для водіїв міських автобусів і диспетчерів, праця яких безпосередньо пов'язана з дослідженням, що проводиться у цій роботі, діють окремі нормативні документи: «Правила охорони праці на автомобільному транспорті», затверджені наказом МНС України від 09.07.2002 № 122 (НПАОП 60.2-1.28-02), а також ГОСТ 12.0.003-2015 «Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація» (Закон України «Про охорону праці», 1992; НПАОП 60.2-1.28-02, 2002).

Аналіз умов праці передбачає ідентифікацію небезпечних і шкідливих виробничих факторів (НШВФ), які діють на персонал у процесі виконання посадових обов'язків. Відповідно до ГОСТ 12.0.003-2015, усі НШВФ поділяються на чотири групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні. Для міського автобусного транспорту найбільш значущими є фізичні та психофізіологічні фактори, оскільки саме вони формують основний ризик виробничого травматизму та професійних захворювань водіїв і диспетчерів (ГОСТ 12.0.003-2015; Нагірний & Щербань, 2019).

3.1.1 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори для водія міського автобуса

Водій міського автобуса протягом робочої зміни тривалістю 8–10 годин піддається комплексній дії кількох груп НШВФ. До фізичних факторів

відносяться: вібрація (загальна від двигуна та дорожнього покриття), шум від двигуна та дорожнього руху, несприятливий мікроклімат у кабіні (перегрів влітку та переохолодження взимку), а також напруга органів зору в умовах інтенсивного вуличного руху. До хімічних факторів відносяться вихлопні гази двигунів (СО, NO_x, тверді частинки) у разі потрапляння їх у салон, а до психофізіологічних – нервово-емоційне навантаження, монотонність роботи та статичне навантаження на хребет під час тривалого сидіння (НПАОП 60.2-1.28-02, 2002; Нагірний & Щербань, 2019).

Особливої уваги заслуговує проблема режиму праці та відпочинку водіїв, яка безпосередньо пов'язана з темою цієї роботи. Оптимізований розклад руху маршруту №16, розроблений у підрозділі 2.3, передбачає виходи тривалістю 4–5 год (пікові) та 15,5 год (повні). Відповідно до наказу Мінтрансу України № 340 від 10.04.2002 «Про затвердження Положення про робочий час і час відпочинку водіїв колісних транспортних засобів», максимальна тривалість безперервного керування для водія автобуса становить 4,5 год, після чого обов'язковою є перерва не менше 45 хв або дві перерви по 15 хв і 30 хв (Наказ Мінтрансу № 340, 2002). Для повних виходів тривалістю 15,5 год передбачена зміна водія та обідня перерва 40 хв, що повністю відповідає цій вимозі.

Таблиця 3.1 – Небезпечні та шкідливі виробничі фактори для водія міського автобуса

| Група НШВФ | Фактор | Нормативне значення | Фактичне значення | Нормативний документ |
|-------------------|--|------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Фізичний | Загальна вібрація (вibroшвидкість), дБ | ≤ 92 дБ (ДСН 3.3.6.039-99) | 88–95 дБ | ДСН 3.3.6.039-99 |
| Фізичний | Шум у кабіні водія, дБА | ≤ 80 дБА (ДСН 3.3.6.037-99) | 78–85 дБА | ДСН 3.3.6.037-99 |
| Фізичний | Температура повітря у кабіні (холодний пер.), °С | 17–22 °С | 10–16 °С (без опал.) | ДСН 3.3.6.042-99 |
| Хімічний | Монооксид вуглецю СО, | ≤ 20 мг/м ³ (ГДК) | 5–15 мг/м ³ | ГОСТ 12.1.005-88 |

| | | | | |
|-------------|---|--------------------------------|-----------------------|---------------------|
| | мг/м ³ | | | |
| Хімічний | Оксиди азоту NO _x , мг/м ³ | ≤ 5 мг/м ³ (ГДК) | 1–4 мг/м ³ | ГОСТ 12.1.005-88 |
| Психофізіол | Тривалість безперерв. керування, год | ≤ 4,5 год | 4,0–4,5 год | Наказ МТУ № 340 |
| Психофізіол | Нервово- емоційне напруження | Допустимий рівень | Підвищені й у пік | ДСН 3.3.6.042-99 |

Аналіз таблиці 3.1 показує, що у звичайних умовах правильно технічно підготовлений автобус класу Євро-5/Євро-6 забезпечує значення більшості НШВФ у межах нормативних або близьких до них значень. Проблемним є рівень шуму у кабіні водія, який може перевищувати норму 80 дБА при тривалій роботі на маршрутах з інтенсивним рухом, а також температурні умови в автобусах старшого покоління без ефективної системи опалення/охолодження. Із підвищенням частки нових низькопідлогових автобусів у парку Тернополя – що передбачено Програмою розвитку МПТ 2024–2026 рр. – рівень вказаних НШВФ очікується суттєво знизиться (Тернопільська міська рада, 2023; НПАОП 60.2-1.28-02, 2002).

3.2 Заходи з охорони праці персоналу транспортного підприємства

Забезпечення безпечних умов праці на транспортному підприємстві включає комплекс організаційних, технічних та санітарно-гігієнічних заходів. Відповідно до статті 13 Закону України «Про охорону праці» (1992), роботодавець зобов'язаний розробляти і реалізовувати комплексні заходи з досягнення встановлених нормативів та підвищення існуючого рівня охорони праці, забезпечувати виконання вимог нормативних актів і відповідних приписів органів нагляду. Для транспортного підприємства, що організовує перевезення на маршруті №16 м. Тернополя, першочерговими є заходи, наведені нижче.

До організаційних заходів відносяться: проведення інструктажів з охорони

праці (вступний, первинний, повторний кожні 6 місяців, позаплановий та цільовий) згідно з НПАОП 0.00-4.12-05; організація стажування водіїв-початківців на маршруті під керівництвом досвідченого наставника; забезпечення режиму праці та відпочинку водіїв відповідно до наказу МТУ № 340 від 10.04.2002; проведення обов'язкових медичних оглядів (передрейсового та після повернення з рейсу) відповідно до наказу МОЗ України № 246 від 21.05.2007; формування особових справ водіїв та ведення журналу обліку інструктажів (НПАОП 0.00-4.12-05; Наказ МОЗ № 246, 2007).

До технічних заходів відносяться: щоденне обов'язкове технічне обслуговування (ЩО) автобуса перед виїздом на маршрут, що включає перевірку гальмівної системи, рульового управління, системи освітлення, шин і рівнів технічних рідин; забезпечення автобусів справними системами опалення/кондиціонування для підтримки нормативного мікроклімату у кабіні водія; обладнання автобусів тривожними кнопками та камерами відеоспостереження відповідно до рішення виконкому ТМР від 05.03.2025 (Тернопільська міська рада, 2025а); забезпечення аптечками першої допомоги та вогнегасниками згідно з вимогами ПДР України (НПАОП 60.2-1.28-02, 2002; Тернопільська міська рада, 2025а).

Важливим заходом є контроль стану здоров'я та психоемоційного стану водія. Передрейсовий медичний огляд включає вимірювання артеріального тиску, пульсу, перевірку на алкогольне або наркотичне сп'яніння. Водій допускається до роботи лише за умови, що всі показники знаходяться в межах норми: артеріальний тиск 90/60–140/90 мм рт. ст., пульс 60–90 уд./хв, концентрація алкоголю – 0,0 проміле (Наказ МОЗ № 246, 2007; НПАОП 60.2-1.28-02, 2002).

Таблиця 3.2 – Комплекс заходів з охорони праці на автобусному маршруті

| Напря́м | Захі́д | Відповідальни́й | Нормативна́ база | Періодичні́сть |
|-----------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Організаційни́й | Вступний інструктаж | Спеціаліст з ОП | НПАОП 0.00-4.12-05 | При прийнятті |
| Організаційни́й | Повторний інструктаж | Безпосередній кер. | НПАОП 0.00-4.12-05 | 1 раз/6 міс. |
| Медичний | Передрейсови́й медогляд | Мед. персонал АТП | Наказ МОЗ № 246 | Щоденно |
| Технічний | Щоденне ТО перед виїздом | Водій + механік | НПАОП 60.2-1.28-02 | Щоденно |
| Технічний | ТО-1 (технічне обслуговуванн́я) | Механічна служба | ДСТУ 3649:2010 | Кожні 5 000 км |
| Технічний | ТО-2 (технічне обслуговуванн́я) | Механічна служба | ДСТУ 3649:2010 | Кожні 20 000 км |
| Санітарний | Контроль мікроклімату кабіни | Водій / механік | ДСН 3.3.6.042-99 | Щоденно |
| Режим праці | Дотримання часу відпочинку | Диспетчер | Наказ МТУ № 340 | При складанні наряду |

3.3 Екологічна безпека міського автобусного транспорту

Міський автобусний транспорт є одним із джерел забруднення атмосферного повітря, особливо в місцях концентрації маршрутів у центральній частині міста. Оцінювання екологічної безпеки автобусного парку Тернополя здійснено на основі нормативних вимог до викидів забруднюючих речовин. З 1 січня 2025 року в Україні набули чинності екологічні стандарти Євро-6 для автотранспортних засобів, які відповідають вимогам Регламенту ЄС № 595/2009 і встановлюють жорсткі ліміти викидів CO, NO_x, ТЧ та вуглеводнів (Постанова КМУ № 1120 від 27.10.2021; Autorpark.ua, 2025). Регламент Євро-7, прийнятий Радою ЄС 12 квітня 2024 року, набуде чинності для автобусів через 48 місяців після офіційної публікації (ЄС, 2024).

Для оцінювання рівня викидів автобусного маршруту №16 застосовано спрощену методику розрахунку викидів CO₂ на основі витрати дизельного пального. Обсяг викидів CO₂ визначається за формулою (МКЗК/ІРСС, 2006):

$$E_{CO}^2 = V_{\text{пал}} \times \rho_{\text{дп}} \times EF_{CO}^2 / 1000, \quad (3.1)$$

де $V_{\text{пал}}$ – витрата дизельного пального, л/добу; $\rho_{\text{дп}}$ – щільність дизельного пального, кг/л (0,835 кг/л); EF_{CO}^2 – емісійний коефіцієнт для дизельного пального, кг CO₂/кг (3,17 кг CO₂/кг за методологією ІРСС 2006). При добовій витраті пального для маршруту №16 $V_{\text{пал}} = 510$ л/добу (базова схема, 9 автобусів × 195 км × 0,30 л/км = 526 л, округлено):

$$E_{CO}^2 = 526 \times 0,835 \times 3,17 / 1000 = 1,393 \text{ т CO}_2/\text{добу} \approx 508,5 \text{ т CO}_2/\text{рік}. \quad (3.2)$$

За оптимізованою схемою добова витрата пального знижується до 509 л (1 700 км × 0,30 л/км), тобто:

$$E_{CO}^2 (\text{опт}) = 509 \times 0,835 \times 3,17 / 1000 = 1,348 \text{ т CO}_2/\text{добу} \approx 492,1 \text{ т CO}_2/\text{рік}. \quad (3.3)$$

Таким чином, скорочення непродуктивного пробігу при впровадженні оптимізованого розкладу дозволяє зменшити емісію CO₂ маршрутом №16 на близько 16,4 т/рік (–3,2 %). Цей ефект є відносно скромним в абсолютному вимірі, проте системне впровадження аналогічних рішень на всіх 35 маршрутах мережі Тернополя теоретично забезпечує скорочення сукупних викидів громадського автомобільного транспорту на 450–600 т CO₂/рік (МКЗК/ІРСС, 2006; Nägele et al., 2022).

Таблиця 3.3 – Порівняння екологічних показників маршруту №16

| Показник | Базова схема | Оптимізована схема | Відхилення |
|-----------------------------------|--------------|--------------------|------------------|
| Добова витрата пального, л/добу | 526 | 509 | –17 л (–3,2 %) |
| Викиди CO ₂ , т/добу | 1,393 | 1,348 | –0,045 т |
| Викиди CO ₂ , т/рік | 508,5 | 492,1 | –16,4 т (–3,2 %) |
| Відповідність стандарту | Євро-5/6 | Євро-5/6 | Без змін |
| Клас автобусів у парку (цільовий) | Євро-5 | Євро-6 (до 2026) | ↑ Покращення |

Для подальшого зниження екологічного навантаження громадського транспорту Тернополя Програма розвитку МПТ 2024–2026 рр. передбачає закупівлю 15 нових низькопідлогових автобусів, що відповідають стандарту Євро-6 (Тернопільська міська рада, 2023). Переведення навіть частини парку на Євро-6 суттєво знизить рівень викидів NO_x та твердих частинок: норматив NO_x для Євро-6 становить 0,46 г/кВт·год, що у 7,7 рази жорсткіше за норматив Євро-3 (3,5 г/кВт·год), яким відповідала значна частина старого парку (Autorpark.ua, 2025; Eauto.org.ua, 2024).

3.4 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Готовність підприємства до дій у надзвичайних ситуаціях (НС) є невід'ємною складовою системи охорони праці та цивільного захисту відповідно до Кодексу цивільного захисту України (Закон № 5403-VI від 02.10.2012). Для транспортного підприємства, що обслуговує міські маршрути, найбільш імовірними НС є: дорожньо-транспортна пригода (ДТП) з пасажирами, пожежа у транспортному засобі, раптове погіршення стану здоров'я водія під час рейсу, а також – в умовах воєнного стану – оголошення повітряної тривоги під час роботи маршруту (Кодекс цивільного захисту України, 2012).

Алгоритм дій водія при ДТП за участі автобуса включає такі кроки: негайне зупинення та включення аварійної сигналізації; виклик швидкої допомоги (103), поліції (102) і диспетчера підприємства; евакуацію пасажирів через усі виходи (включаючи аварійні), якщо є ризик загоряння або нові зіткнення; надання першої долікарської допомоги потерпілим до прибуття медичного персоналу; збереження місця події та фіксацію обставин ДТП у встановленому порядку (НПАОП 60.2-1.28-02, 2002; ПДР України, 2017).

Щодо пожежної безпеки, кожен міський автобус у відповідності з вимогами ДСТУ 3649:2010 та НПАОП 60.2-1.28-02 повинен бути обладнаний: порошковим вогнегасником ємністю не менше 2 кг у кабіні водія; аварійними

виходами, позначеними встановленими знаками; молотком для розбиття скла, розміщеним поряд з аварійним виходом; системою виявлення диму (у нових автобусах). При загоранні двигуна водій зобов'язаний негайно зупинити автобус, відкрити всі двері, евакуювати пасажирів та використати вогнегасник лише за умови власної безпеки (НПАОП 60.2-1.28-02, 2002; ДСТУ 3649:2010).

В умовах воєнного стану та повітряної тривоги водій міського автобуса діє відповідно до Тимчасового порядку, затвердженого органом місцевого самоврядування та узгодженого з Командуванням Повітряних Сил ЗСУ. Загальні вимоги передбачають: у разі оголошення повітряної тривоги зупинити транспортний засіб у безпечному місці якомога швидше (але не під мостами та шляхопроводами), повідомити пасажирів про можливість укриття у найближчому укритті, залишатися на зв'язку з диспетчером та відновити рейс лише після оголошення відбою тривоги (Кодекс цивільного захисту України, 2012).

Висновки до розділу 3

У третьому розділі роботи проведено аналіз умов праці та безпеки при організації міських автобусних перевезень. Виявлено, що основними НШВФ для водіїв є шум (до 85 дБА при нормі 80 дБА), загальна вібрація, незадовільний мікроклімат у кабіні в умовах застарілого рухомого складу, а також психофізіологічне навантаження у пікові години. Оптимізований розклад руху маршруту №16 з диференційованими піковими виходами тривалістю 4–5 год повністю відповідає нормативним вимогам щодо режиму праці та відпочинку водіїв (Наказ МТУ № 340, 2002).

Розрахунок викидів CO₂ показав, що скорочення непродуктивного пробігу при впровадженні оптимізованого розкладу забезпечує зниження емісії на маршруті №16 приблизно на 16,4 т CO₂/рік, а заплановане оновлення парку до стандарту Євро-6 суттєво знизить рівень NO_x та твердих частинок. Визначено

комплекс організаційних та технічних заходів з охорони праці, а також порядок дій персоналу у надзвичайних ситуаціях, що відповідає вимогам чинного законодавства України у сфері охорони праці та цивільного захисту.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-практичного завдання – підвищенню ефективності організації міських пасажирських перевезень на прикладі маршрутної мережі м. Тернополя з детальним дослідженням маршруту №16. За результатами виконаної роботи сформульовано такі загальні висновки.

1. Аналіз стану маршрутної мережі м. Тернополя підтвердив, що система міських пасажирських перевезень функціонує в умовах суттєвих структурних диспропорцій. Обліковий парк складає 179 автобусів, з яких лише 59 (33 %) відповідають вимогам Євро-5/Євро-6 та класу «низькопідлоговий», тоді як 73 одиниці (41 %) мають вік понад 15 років. Коефіцієнт технічної готовності парку становить 0,944, але коефіцієнт випуску – лише 0,80, що нижче нормативного значення 0,85. Питома вага маршруту №16 у сумарному пасажиропотоці мережі є найвищою: провізна спроможність у пікові години становить 1 200 пас./год при фактичному навантаженні 980–1 091 пас./год, тобто коефіцієнт використання місткості $\gamma = 0,817$, що впритул наближається до порогу переповнення (Vovk & Vovk, 2021; Тернопільська міська рада, 2025a).

2. Комплексна оцінка ефективності використання рухомого складу виявила, що середньодобовий пробіг автобуса (195 км) відповідає нормативному діапазону 180–220 км, а питома витрата пального (0,30 л/км для Богдан А801) відповідає паспортному значенню. Водночас коефіцієнт нерівномірності пасажиропотоку на маршруті №16 становить $K_{\text{год}} = 1,87$ (вечірній пік 17:00–18:00), що майже вдвічі перевищує рекомендований рівень 1,0–1,25 і свідчить про незадовільне пристосування розкладу до реального добового профілю попиту. SWOT-аналіз системи МПТ показав, що сума зважених балів сильних сторін ($S = 4,30$) перевищує слабкі ($W = 3,91$), а можливості ($O = 4,20$) – загрози ($T = 3,97$), що свідчить про потенціал зростання системи за умови реалізації стратегії SO (Szczupak & Turo, 2022; Vovk et al., 2023).

3. Натурне обстеження пасажиропотоків маршруту №16 табличним

методом із застосуванням даних АСООП (АFC) підтвердило наявність виражених пікових навантажень у ранковій (7:00–9:00) та вечірній (17:00–18:00) години. Середня комерційна швидкість у пікові рейси знижується з нормативних 18,5 км/год до 15,0 км/год внаслідок заторових затримок. Масив транзакцій АСООП (74 592 операцій на добу) є достатнім для застосування ML-моделей прогнозування попиту. Аналіз показав, що діючий розклад із рівномірним інтервалом 8 хв у піковій та 14 хв у міжпіковій години не відповідає реальному профілю попиту, а середній час очікування в піковій години сягає 4,0 хв замість нормативних 2,5–3,0 хв (Piouroulou & Keraptsoglou, 2019; Bosurgi et al., 2021).

4. Розроблено чотирирівневу архітектуру інформаційно-технологічної платформи підтримки управлінських рішень у системі МПТ, що охоплює: збір даних (АFC-лічильники, АFC/АСООП); передачу та зберігання (GPS AVL, GTFS/GTFS-RT); аналітичну обробку (алгоритми Random Forest, XGBoost, LSTM для прогнозування пасажиропотоку та прибуття транспорту); підтримку управлінських рішень (відображення у Google Maps, Moovit, TransitApp та OTP-планувальнику). Порівняльна оцінка методів прогнозування показала, що LSTM-моделі на основі GTFS-RT забезпечують похибку MAPE $\leq 10\%$ для горизонту 1–24 год, а MAPE $\leq 15\%$ – для 7–30 днів, тоді як традиційні методи ARIMA і WMA дають похибку 15–20% (Sciammetta et al., 2024; Tarasov, 2025).

5. Оптимізований розклад руху маршруту №16, розроблений на основі результатів обстеження пасажиропотоків та техніко-експлуатаційних розрахунків, передбачає диференційовані інтервали руху за часовими слотами: 5 хв у піковій години, 11–12 хв у стандартній денній годині та 15 хв у ранньоранковій/пізньовечірній слоті. Схема виходів включає 8 повних (15,5 год) та 4 пікові (4–5 год) виходи, обліковий парк становить 13 автобусів. Ключові ефекти оптимізації порівняно з базовим варіантом: скорочення максимального $K_{\text{нер}}$ з 1,87 до 1,0–1,1; зниження коефіцієнта використання місткості з $\gamma = 0,817$ до $\gamma = 0,77$ у піковій рейси; підвищення коефіцієнта регулярності $K_{\text{рег}}$ з 81% до $\geq 90\%$; скорочення середнього часу очікування в піковій годині з 4,0 хв до 2,5 хв (–37,5%) (Vovk & Vovk, 2021; Szczupak & Turo, 2022).

6. Економічне обґрунтування запропонованих заходів підтвердило їх фінансову доцільність без підвищення діючого тарифу (12 грн/поїздки). Додаткова собівартість перевезень знижується з 58 561 грн до 57 619 грн (–942 грн/добу). Завдяки очікуваному приросту пасажиропотоку на 12 % внаслідок підвищення якості обслуговування річний фінансовий ефект перевізника оцінюється у 4 549 тис. грн, соціальний ефект від економії часу очікування пасажирів – у 2 190 тис. грн/рік. Початкові інвестиції на цифрове впровадження (GTFS, GPS-моніторинг) у розмірі 350 тис. грн окупаються менш ніж за один місяць; чиста приведена вартість проєкту за 5 років при ставці дисконту 10 % становить 16 893 тис. грн, а $BCR = 49,3$ (Ilioroulou & Keraptsoglou, 2019; Bosurgi et al., 2021).

7. Аналіз умов праці та безпеки показав, що основними шкідливими виробничими факторами для водіїв є шум (до 85 дБА при нормі 80 дБА), загальна вібрація та психофізіологічне навантаження у пікові години. Розроблений оптимізований розклад з піковими виходами тривалістю 4–5 год повністю відповідає нормативним вимогам щодо режиму праці та відпочинку водіїв (Наказ МТУ № 340, 2002). Розрахунок екологічного ефекту оптимізації показав скорочення викидів CO_2 маршрутом №16 приблизно на 16,4 т/рік (–3,2 %) за рахунок зменшення непродуктивного пробігу; системне впровадження аналогічних рішень на всіх 35 маршрутах мережі може забезпечити скорочення сукупних викидів на 450–600 т CO_2 /рік (НПАОП 60.2-1.28-02, 2002; Nägele et al., 2022).

Таким чином, результати кваліфікаційної роботи підтверджують, що підвищення ефективності міських пасажирських перевезень у Тернополі є технічно реалізованим, економічно виправданим і соціально значущим завданням, яке може бути вирішене без капітальних інвестицій у нову інфраструктуру – виключно через організаційні заходи та цифрові інструменти управління. Запропоновані у роботі рішення відповідають стратегічним пріоритетам Програми розвитку міського пасажирського транспорту Тернополя на 2024–2026 роки та загальноєвропейським тенденціям у сфері сталої міської мобільності (SUMP). Отримані результати та розроблені методичні підходи

можуть бути використані органами місцевого самоврядування, транспортними підприємствами та дослідниками при плануванні та оптимізації маршрутних мереж міст України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про охорону праці» № 2694-XII від 14.10.1992 (зі змінами). Верховна Рада України. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>
2. Закон України «Про автомобільний транспорт» № 2344-III від 05.04.2001 (зі змінами). Верховна Рада України. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2344-14>
3. Кодекс цивільного захисту України № 5403-VI від 02.10.2012. Верховна Рада України. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17>
4. Наказ Міністерства транспорту України «Про затвердження Положення про робочий час і час відпочинку водіїв колісних транспортних засобів» № 340 від 10.04.2002. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0514-02>
5. Наказ МНС України «Правила охорони праці на автомобільному транспорті» (НПАОП 60.2-1.28-02) № 122 від 09.07.2002. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0822-02>
6. Наказ МОЗ України «Про затвердження Порядку проведення медичних оглядів працівників певних категорій» № 246 від 21.05.2007. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0846-07>
7. НПАОП 0.00-4.12-05. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці. Наказ Держнаглядохоронпраці України № 15 від 26.01.2005.
8. ГОСТ 12.0.003-2015. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація. Міждержавний стандарт.
9. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. МОЗ України, 1999.
10. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. МОЗ України, 1999.
11. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. МОЗ України, 1999.
12. ДСТУ 3649:2010. Колісні транспортні засоби. Вимоги щодо безпеки технічного стану та методи контролювання. Держспоживстандарт України, 2010.
13. Тернопільська міська рада. (2023). Програма розвитку міського

пасажи́рського транспорту м. Тернополя на 2024–2026 роки. Рішення міської ради. <https://www.rada.te.ua>

14. Тернопільська міська рада. (2025а). Рішення виконавчого комітету «Про організацію маршрутних перевезень» № 283 від 05.03.2025. <https://www.rada.te.ua>

15. Тернопільська міська рада. (2025б). Схема маршрутів міського пасажирського транспорту. <https://www.rada.te.ua>

16. Вовк, Ю. Я., & Вовк, І. П. (2021). Транспортні технології: організація перевезень пасажирів автомобільним транспортом. ТНТУ імені Івана Пулюя.

17. Azemsha, S., Kravchenya, I., Vovk, Y., Lyashuk, O., & Vovk, I. (2021). Scheduling technique of route vehicles on duplicating stretches. *Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska*, (113), 5-16. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.113.1>

18. Vovk, Y., Vovk, I., Plekan, U., Tson, O., & Oleksyuk, V. (2025). Sustainable and smart logistics centers: Challenges and opportunities for Ukraine's transport system. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 10(1), 116–124. <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2025.10-1.8>

19. Vovk, Y., Aulin, V., Vovk, I., Romaniuk, S., Syhlovyi, M., Vovk, O., ... & Zabytivskyi, V. (2025). Electric vehicle charging infrastructure optimization on international transport corridors: Economic analysis and EU regulatory alignment in Ukraine. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 10(2), 6-28. <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2025.10-2.1>

21. Amuji, H. O., Onwuegbuchunam, D. E., Aponjolosun, M. O., Okeke, K. O., Mbachu, J. C., & Ojutalayo, J. F. (2022). The dynamic programming model for optimal allocation of laden shipping containers to Nigerian seaports. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 7(2), 69-79.

22. Xiong, Z., Zheng, J., Song, D., Zhong, S., & Huang, Q. (2019). Passenger flow prediction of urban rail transit based on deep learning methods. *Smart Cities*, 2(3), 371-387.

23. Лазаришин, А. В. (2017). *Особливості методики SWOT-аналізу автотранспортних підприємств* (Doctoral dissertation, Тернопіль, ТНТУ).

26. Barabino, B., Raccagni, L., & Ventura, R. (2025). Accuracy of Automatic Passenger Counting in Open Mass Transit Systems: Insights from Italy. *The Open Transportation Journal*.
27. Iliopoulou, C., & Kepaptsoglou, K. (2019). Combining ITS and optimization in public transportation planning: state of the art and future research paths. *European Transport Research Review*, 11(1), 1.
28. Sciammetta, A., Tumminello, M., & Mantovani, A. (2024). Real-time arrival prediction for urban bus systems using LSTM neural networks and GTFS-RT data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 158, 104445. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104445>
29. Nägele, C., Wietschel, M., & Bauer, C. (2022). CO₂ emissions from urban bus fleets: A comparative analysis of diesel and alternative drivetrain scenarios. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 107, 103295. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103295>
30. Graser, A., & Merten, M. (2025). GTFS and GTFS-RT data integration in GIS environments: Methods and tools. *Journal of Transport Geography*, 112, 103710. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2025.103710>
31. Furth, P. G., & Wilson, N. H. M. (1981). Setting frequencies on bus routes: Theory and practice. *Transportation Research Record*, 818, 1–7.
32. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Volume 2 – Energy. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
33. Vision Zero Network. (2024). Safe system approach and sustainable urban mobility planning. <https://visionzeronetwork.org>
34. Google Developers. (2024). GTFS reference documentation. <https://developers.google.com/transit/gtfs/reference>
35. GTFS.org. (2024). General Transit Feed Specification: Overview and best practices. <https://gtfs.org>
36. Autopark.ua. (2025). Нові екологічні стандарти Євро-6 в Україні: Як це вплине на ринок авто, імпорт і вибір вживаних машин.

<https://autopark.ua/uk/news/novye-ekologiceskie-standarty-evro-6-cto-eto-znacidlia-avtomobilnogo-rynka-ukrainy>

37. Eauto.org.ua. (2024). Європейський парламент затвердив нові норми викидів Євро-7. <https://eauto.org.ua/news/502-yevropeyskiy-parlament-zatverdiv-novi-normi-vikidiv-dlya-transportnih-zasobiv>

38. Express.te.ua. (2025). Громадський транспорт Тернополя: маршрути та актуальні зміни. <https://express.te.ua>

39. MSS.co.ua. (2026). Системи GPS-моніторингу транспорту для міських автопарків. <https://mss.co.ua>

40. Ultravision. (2024). Automatic passenger counting systems: Technical overview. <https://www.ulvisions.com/blog/automatic-passenger-counting-systems>

41. Accuracy of Automatic Passenger Counting in Open Mass Transit Systems. (2025). FTA/UITP Technical Report. https://www.transitwiki.org/TransitWiki/index.php/Automated_passenger_counter