

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій,
мехатроніки і робототехніки
Кафедра механічної інженерії та автомобільного транспорту**

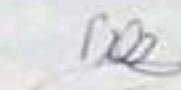
ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
освітнього ступеня
магістр

Галузь знань 27 – «Транспорт»
Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт»

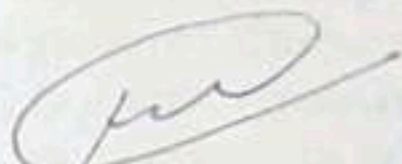
на тему: «Підвищення ефективності технічної експлуатації міських автобусів
шляхом удосконалення системи моніторингу»

Виконав: студент групи ААГ-22м



Олексій БАРДАЧЕВСЬКИЙ

Керівник:



Володимир ШУМЛЯКІВСЬКИЙ

В.о. завідувача кафедри:



Олександр МЕЛЬНИК

Рецензент:



Дмитро БЕГЕРСЬКИЙ

Житомир – 2025 р.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Факультет: комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки

Кафедра: механічної інженерії та автомобільного транспорту

Освітній ступінь: «магістр»

Галузь знань: 27 «Транспорт»

Спеціальність: 274 – Автомобільний транспорт»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри МІ та АТ
Олександр МЕЛЬНИК

« 06 » 10 2025р.

ЗАВДАННЯ

до кваліфікаційної роботи освітнього ступеня магістр
Бардачевський Олексій Олександрович

1.Тема роботи: «Підвищення ефективності технічної експлуатації міських автобусів шляхом удосконалення системи моніторингу» затверджена наказом вищого навчального закладу від «06» жовтня 2025 року № 569-С

Керівник роботи: доцент, Володимир ШУМЛЯКІВСЬКИЙ

2. Строк подання студентом завершеної роботи 17.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Статистичні масиви даних автоматизованої системи оплати проїзду «City Card» (транзакції, пасажиропотік) за листопад 2025 року; технічні паспорти та регламенти обслуговування автобусів Ataman A092H6 та Volvo; звітність про технічний стан парку та відмови ТОВ «САВ-ТРАНС»; програмне середовище MATLAB.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Аналітичний огляд стану технічної експлуатації автобусів на міських маршрутах та виробничої бази ТОВ «САВ-ТРАНС». 2. Теоретичне обґрунтування методики моніторингу технічного стану з використанням KPI та розробка алгоритму розрахунку ресурсу в середовищі MATLAB. 3. Експериментальні дослідження умов експлуатації, аналіз впливу пасажиропотоку на надійність та розробка рекомендацій щодо оптимізації системи ТО (диференційовані інтервали, ротація). Оцінка економічної ефективності запропонованих заходів. Загальні висновки. Список використаних джерел.

5. Пояснювально - роздавальний матеріал (презентація) – 15-20 слайдів.

Дата видачі завдання « 12 » вересня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

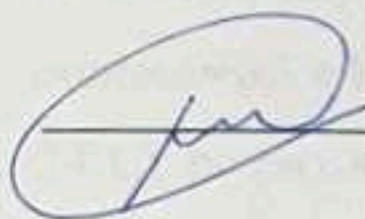
№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Аналіз літературних джерел та сучасних методів моніторингу на транспорті. Вивчення виробничої бази ТОВ «САВ-ТРАНС».	28.09.2025	виконано
2.	Обґрунтування системи показників (KPI) та вибір математичної моделі розподілу відмов (Вейбулла-Гнеденка).	02.10.2025	виконано
3.	Розробка алгоритму розрахунку еквівалентного пробігу та програмного скрипта в середовищі MATLAB.	15.10.2025	виконано
4.	Збір та обробка експериментальних даних із системи «City Card» (аналіз пасажиропотоків, пікових навантажень).	27.11.2025	виконано
5.	Оцінка економічної ефективності та формулювання загальних висновків.	29.11.2025	виконано
6.	Оформлення пояснювальної записки	16.12.2025	
7.	Рецензування	17.12.2025	
8.	Попередній захист	18.12.2025	
9.	Захист	08.12- 31.12.2025	

Студент



Олексій БАРДАЧЕВСЬКИЙ

Керівник роботи



Володимир ШУМЛЯКІВСЬКИЙ

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОБУСІВ НА МІСЬКИХ МАРШРУТАХ	9
1.1. Аналіз сучасного стану пасажирських перевезень у м. Житомир .	9
1.2. Характеристика виробничо-технічної бази та рухомого складу ТОВ «САВ-ТРАНС»	13
1.3. Аналіз існуючих методів та засобів моніторингу технічного стану транспортних засобів	18
1.4. Вплив експлуатаційних факторів та пасажиропотоків на показники надійності автобусів	20
1.5. Обґрунтування мети та задач дослідження	23
1.6. Світовий досвід впровадження інтелектуальних транспортних систем (ITS) та стратегій Industry 4.0 в технічну експлуатацію	45
1.6.1. Еволюція стратегій технічного обслуговування: від планового до прогнозованого	24
1.6.2. Роль «Великих даних» (Big Data) та Інтернету речей (IoT)	25
1.6.3. Концепція «Цифрового двійника» (Digital Twin)	26
1.6.4. Економічні аспекти: аналіз повної вартості володіння (TCO)	27
Висновок до розділу	1
.....	28

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ	
МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВТОБУСІВ	29
2.1. Вибір та обґрунтування системи показників (KPI) ефективності	
технічної експлуатації для умов ТОВ «САВ-ТРАНС»	29
2.1.1. Показники безвідмовності	29
2.1.2. Комплексні показники ефективності парку	
.....	32
2.2. Математичне моделювання впливу умов експлуатації на	
інтенсивність відмов автобусів	
.....	34
2.2.1. Обґрунтування вибору закону розподілу відмов	
.....	35
2.2.2. Модель корегування ресурсу за коефіцієнтом	
пасажиропотоку	37
2.2.3. Методика визначення параметрів закону розподілу	
відмов за експериментальними даними	
.....	38
2.2.4. Економіко-математична модель оптимізації	
періодичності технічного обслуговування	
.....	40
2.3. Розробка алгоритму розрахунку показників безвідмовності в	
середовищі MATLAB	
.....	42
2.3.1. Структура вхідних даних	42
2.3.2. Логіка роботи алгоритму	
.....	42
2.3.3. Схема потоків алгоритму	
.....	44
2.4. Методика збору та обробки статистичних даних з	
	46

використанням	інформаційних	систем	
.....			
2.4.1.	Джерела	інформації	
.....			47
2.4.2.	Синхронізація даних		47
2.5.	Концептуалізація «Цифрового двійника» (Digital Twin) автобуса		
в	інформаційній	системі	підприємства
.....			48
2.5.1.	Архітектура цифрового двійника		48
2.5.2.	Логіка взаємодії фізичного та віртуального об'єктів		
.....			49
2.5.3.	Візуалізація стану парку (Dashboard)		
.....			50
Висновки до розділу 2			50
РОЗДІЛ 3	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА		
ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОНІТОРИНГУ			51
3.1.	Аналіз умов експлуатації на досліджуваних маршрутах (на основі даних системи «City Card»)		
.....			51
3.2.	Результати розрахунку показників технічної експлуатації та моделювання ресурсу		54
3.3.	Аналітичне дослідження впливу пасажиромісткості рухомого складу на показники експлуатаційної надійності		58
3.4.	Розробка рекомендацій щодо вдосконалення системи моніторингу та обслуговування		
.....			63
3.5.	Стратегічне планування оновлення парку на основі аналізу життєвого циклу (LCC)		63
3.5.1.	Методика розрахунку LCC		63

3.5.2. Порівняльний аналіз сценаріїв експлуатації	63
3.6. Аналіз ризиків та надійності впровадження системи моніторингу	65
3.6.1. Оцінка надійності інформаційної системи (FMEA-аналіз)	66
3.7. Оцінка економічної ефективності	67
Висновки до розділу 3	68
ВИСНОВКИ	ДО
РОБОТИ	
.....	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	72
ДОДАТОК А	79

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку світової економіки характеризується глобальною цифровізацією та переходом до концепції «Індустрія 4.0», що суттєво змінює підходи до управління транспортними системами. В Україні сфера міських пасажирських перевезень перебуває у стані трансформації: зростають вимоги пасажирів до якості, безпеки та регулярності сполучення, водночас автотранспортні підприємства стикаються з критичним зростанням експлуатаційних витрат.

Для таких підприємств, як ТОВ «САВ-ТРАНС», що оперують сучасним рухомим складом (автобуси стандартів Євро-5/6), забезпечення рентабельності стає неможливим без ефективної системи технічної експлуатації. Традиційна планово-попереджувальна система (ППР), яка базується на фіксованих міжсервісних інтервалах (за пробігом), демонструє свою неефективність в умовах стохастичних навантажень міського циклу. Вона не враховує реальних умов роботи конкретного автобуса — його завантаженість, профіль маршруту та динаміку руху, що призводить або до «недообслуговування» (і, як наслідок, аварійних відмов), або до економічно невиправданого «переобслуговування».

Ключовою проблемою залишається висока вартість запасних частин та паливно-мастильних матеріалів, частка яких у структурі повної вартості володіння (ТСО — Total Cost of Ownership) сягає 70–80%. Це вимагає переходу до стратегії обслуговування за фактичним станом (CBM — Condition Based Maintenance) та впровадження елементів прогнозованого обслуговування (Predictive Maintenance).

Особливої актуальності в цьому контексті набуває використання «Великих даних» (Big Data). У місті Житомир успішно функціонує автоматизована система оплати проїзду (АСОП) «City Card», яка генерує масиви даних про пасажиропотік. Однак, цей інформаційний ресурс наразі використовується лише для фінансового обліку. Інтеграція даних про пасажиропотік (як фактора навантаження) з телематичними даними автобуса дозволяє створити «цифровий двійник» процесу експлуатації. Це відкриває можливість розрахунку

«еквівалентного пробігу», що об'єктивно відображає ступінь зносу агрегатів, дозволяючи оптимізувати графіки ТО та підвищити експлуатаційну надійність парку.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська кваліфікаційна робота виконується відповідно до пріоритетних напрямків розвитку транспортної галузі України щодо цифровізації інфраструктури, а також згідно з планом науково-дослідних робіт кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка». Тематика дослідження узгоджена зі стратегією розвитку ТОВ «САВ-ТРАНС» на 2025–2027 роки в частині впровадження інтелектуальних транспортних систем (ITS).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності технічної експлуатації міських автобусів шляхом удосконалення системи моніторингу показників надійності та впровадження адаптивних регламентів обслуговування на основі даних автоматизованого обліку пасажирів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Проаналізувати сучасний стан системи технічної експлуатації автобусів на міських маршрутах, дослідити світовий досвід впровадження стратегій Predictive Maintenance та визначити фактори, що впливають на інтенсивність зносу агрегатів.

2. Обґрунтувати вибір ключових показників ефективності (KPI) та розробити концептуальну модель «цифрового двійника» автобуса, що враховує динаміку пасажиропотоку.

3. Розробити математичну модель та програмний алгоритм у середовищі MATLAB для автоматизованого розрахунку еквівалентного пробігу та прогнозування залишкового ресурсу на основі даних системи «City Card».

4. Провести експериментальні дослідження на маршрутах ТОВ «САВ-ТРАНС» (№4, №10, №19), виявити закономірності розподілу навантажень та розрахувати коефіцієнти прискорення зносу для різних типів рухомого складу.

5. Розробити практичні рекомендації щодо впровадження диференційованих інтервалів технічного обслуговування, карт додаткових технологічних операцій та графіків ротації автобусів.

6. Здійснити оцінку економічної ефективності запропонованих заходів на основі аналізу вартості життєвого циклу (LCC) та оцінити ризики впровадження системи.

Об’єкт дослідження – процес зміни технічного стану та надійності міських автобусів під впливом експлуатаційних навантажень.

Предмет дослідження – методи, моделі та засоби моніторингу технічної експлуатації автобусів з використанням інформаційних технологій та аналізу даних пасажиропотоку.

Методи дослідження. Методологічну основу роботи складають:

- *методи системного аналізу* — для дослідження структури транспортного процесу та взаємозв’язків у системі «Водій – Автомобіль – Дорога – Середовище (Пасажири)»;

- *методи теорії надійності та ймовірності* — для вибору закону розподілу відмов (Вейбулла-Гнеденка) та моделювання процесів зносу;

- *методи математичної статистики* — для обробки масивів даних транзакцій «City Card» та визначення кореляційних зв’язків;

- *методи імітаційного моделювання* — реалізовані у середовищі MATLAB для розрахунку сценаріїв експлуатації;

- *методи економічного аналізу* — зокрема методика LCC (Life Cycle Cost) для оцінки повної вартості володіння та ефективності інвестицій.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. *Вперше запропоновано* методику розрахунку еквівалентного пробігу міського автобуса, яка, на відміну від існуючих, базується на інтеграції телематичних даних та даних АСОП про динамічне завантаження салону, що дозволяє підвищити точність прогнозування залишкового ресурсу.

2. *Удосконалено* математичну модель планування технічного обслуговування шляхом введення змінного коефіцієнта інтенсивності експлуатації, що дозволяє перейти до адаптивних інтервалів ТО.

3. *Дістало подальший розвиток* наукове обґрунтування стратегії ротації рухомого складу між маршрутами різної категорії складності як методу вирівнювання ресурсного стану парку.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено та протестовано програмний скрипт у середовищі MATLAB, який дозволяє автоматизувати обробку звітів «City Card» та виявляти транспортні засоби, що працюють у критичних режимах.

2. Сформовано диференційовані карти технологічних операцій ТО-2 для маршрутів з підвищеним навантаженням (№10, №19), впровадження яких дозволяє попередити до 30% аварійних відмов.

3. Розроблено графік ротації автобусів, що забезпечує продовження терміну ефективної експлуатації техніки на 15–20%.

4. Розрахований річний економічний ефект від впровадження розробленої системи для досліджуваної групи автобусів становить 235 000 грн.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОБУСІВ НА МІСЬКИХ МАРШРУТАХ

1.1. Аналіз сучасного стану пасажирських перевезень у м. Житомир

Транспортна галузь є однією з найважливіших складових інфраструктури сучасного міста, що забезпечує життєдіяльність суспільства та виробничі зв'язки. Відповідно до статті 1 Закону України «Про транспорт», єдина транспортна система України є однією з найважливіших галузей суспільного виробництва і покликана задовольняти потреби населення та суспільного виробництва у перевезеннях [15]. В умовах урбанізації та зростання мобільності населення, питання організації ефективних та безпечних пасажирських перевезень набуває першочергового значення.

На сучасному етапі розвиток транспортної системи м. Житомира спрямований на оптимізацію маршрутної мережі та підвищення якості обслуговування пасажирів у суворій відповідності до вимог чинного законодавства. Зокрема, Закон України «Про автомобільний транспорт» визначає засади організації та діяльності автомобільного транспорту, де пріоритетом є забезпечення безпеки перевезень, екологічної безпеки та прав споживачів транспортних послуг [12].

Згідно з стратегією розвитку міста та звітними матеріалами Управління транспорту і зв'язку Житомирської міської ради, пріоритетним напрямком є поступовий перехід від хаотичного руху маршрутних таксі малої місткості до чітко структурованої мережі, що базується на автобусах середнього та великого класу [6]. Це відповідає загальносвітовим тенденціям підвищення енергоефективності транспорту. Як зазначається у звітах Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА), громадський транспорт має значний потенціал скорочення глобального попиту на енергію порівняно з індивідуальними перевезеннями, що є критично важливим в умовах необхідності скорочення викидів CO₂ [26].

Аналіз поточної схеми автобусної мережі міста Житомира, затвердженої міською радою [17], свідчить, що вона побудована за радіально-кільцевим принципом. Така конфігурація забезпечує транспортне сполучення між ключовими спальними районами (Крошня, Богунія, Корбутівка, Польова) та адміністративно-діловим центром міста. Перевезення здійснюються як комунальним підприємством (електротранспорт та комунальні автобуси), так і приватними операторами. Серед приватних перевізників провідні позиції на ринку займає ТОВ «САВ-ТРАНС», діяльність якого регламентується ліцензійними умовами та договорами з міською владою.



Рис. 1.1. Схема діючого маршруту №4 в м. Житомира станом на 2025 рік.

Втім, функціонування транспортної системи міста супроводжується низкою системних проблем, які потребують вирішення:

1. Дублювання маршрутів та нераціональне використання провізної здатності. Значна частина автобусних маршрутів (зокрема досліджувані маршрути

№4, №10) на окремих ділянках (вул. Київська, вул. Велика Бердичівська) дублюють схеми руху міського електротранспорту. Це створює надмірне навантаження на дорожню мережу, призводить до заторів та зниження експлуатаційної швидкості. Згідно з дослідженнями Хабутдінова Р.А., зниження швидкості сполучення в міському циклі призводить до експоненційного зростання витрат палива та енергії, що негативно впливає на економічні показники перевізників [18].

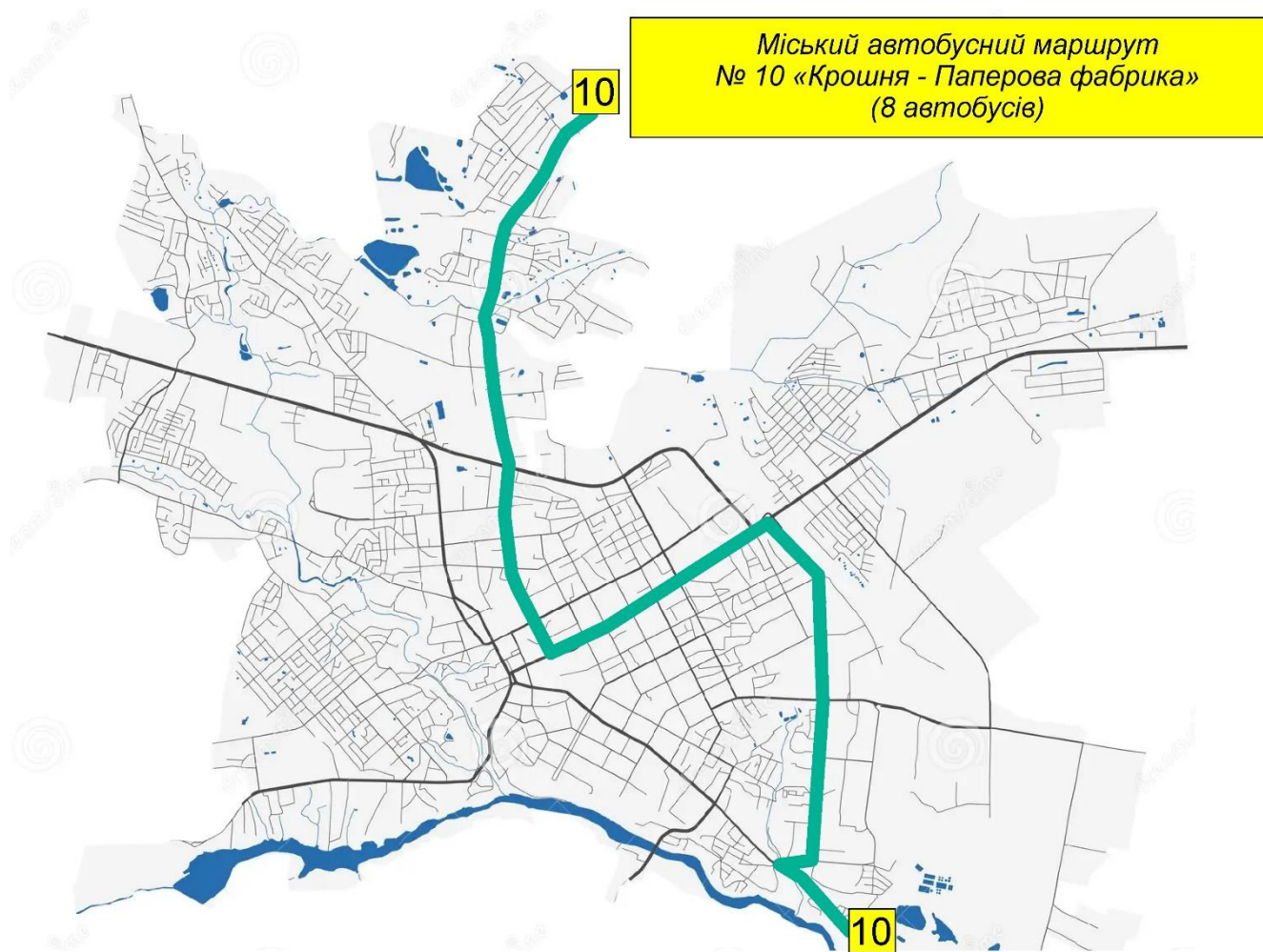
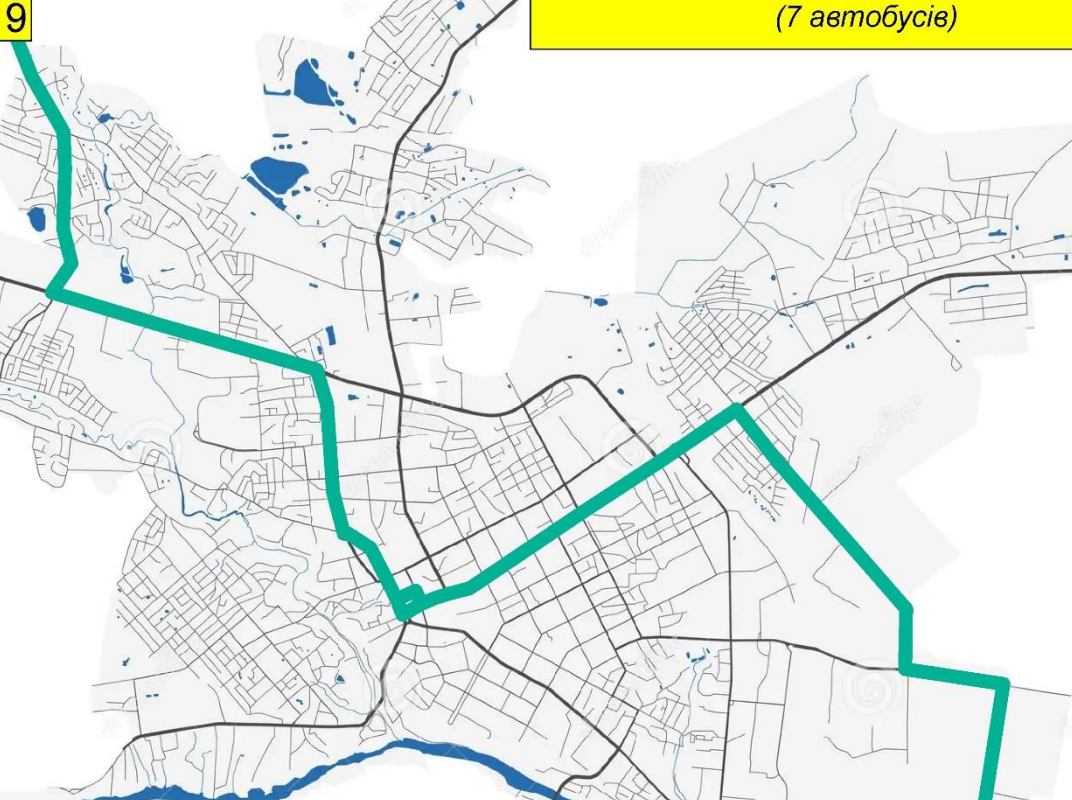


Рис. 1.2. Схема діючого маршруту №10 в м. Житомира станом на 2025 рік.

2. Висока нерівномірність навантаження у часі та просторі. Характерною рисою міських перевезень є наявність яскраво виражених пікових навантажень («години пік»: 07:30–09:30 та 17:00–19:00). У цей час спостерігається критичне переповнення рухомого складу, особливо на магістральних напрямках, таких як маршрут №19, що обслуговує промислову зону міста. Водночас, у міжпіковий період коефіцієнт використання

Міський автобусний маршрут
№ 19 «с. Лісове - Біомедскло»
(7 автобусів)



3. Фізичне та моральне старіння парку. Попри активне оновлення рухомого складу, яке проводить ТОВ «САВ-ТРАНС» (закупівля автобусів Volvo, MAN, Ataman), значна частина перевезень у місті все ще виконується автобусами малого класу (типу «Рута», БАЗ). Відповідно до «Правил перевезення пасажирів», затверджених Наказом №1196, транспортні засоби повинні відповідати жорстким вимогам безпеки, охорони праці та екології, а також бути пристосованими для перевезення осіб з інвалідністю [14], що є технічно складним для застарілого парку.

13

Card». Це відповідає концепції «Smart City» та дозволяє перейти від експертних оцінок пасажиропотоку до аналізу реальних великих даних (Big Data). Проте, на даний момент масиви даних про транзакції використовуються переважно для фінансового моніторингу та компенсації пільгових перевезень. Потенціал цієї системи для технічної експлуатації – зокрема, для корегування планів технічного обслуговування (ТО) залежно від фактичного навантаження на автобус – залишається нереалізованим, що підкреслюється в роботах Шевелькова С.А. [20].



Рис. 1.4. Структура пасажиропотоку міського електротранспорту м. Житомира за категоріями оплати.

1.2. Характеристика виробничо-технічної бази та рухомого складу ТОВ «САВ-ТРАНС»

ТОВ «САВ-ТРАНС» є одним із ключових суб'єктів господарювання на ринку пасажирських перевезень у м. Житомирі. Підприємство забезпечує виконання

вимог Закону України «Про автомобільний транспорт» щодо надання послуг з перевезення пасажирів автобусами на міських та приміських маршрутах [12].

Виробнича база підприємства розташована за адресою: м. Житомир, вул. Східна, 88/2. Матеріально-технічна база включає комплекс будівель та споруд, необхідних для забезпечення повного циклу експлуатації та зберігання рухомого складу:

- зони для відкритого та закритого зберігання автобусів, що забезпечує збереження техніки в зимовий період;
- контрольно-технічний пункт (КТП) для перевірки технічного стану транспортних засобів перед виїздом на лінію та після повернення, що є обов'язковою вимогою згідно з «Положенням про технічне обслуговування...» [11];
- ділянки для проведення щоденного обслуговування (ЩО), технічного обслуговування (ТО-1, ТО-2) та поточного ремонту (ПР);
- медичний пункт для проведення передрейсового та післярейсового огляду водіїв.

Для проведення дослідження в рамках магістерської роботи, за погодженням з керівництвом підприємства, було обрано три базові міські маршрути: №4, №10 та №19. Вибір обумовлений тим, що ці маршрути мають різні характеристики протяжності, пасажиропотоку та умов руху, що дозволяє провести репрезентативний порівняльний аналіз. Характеристики маршрутів наведено в таблиці 1.1 згідно з офіційними паспортами маршрутів [10].

Схема руху маршруту № 4



Рис. 1.5. Схема руху автобусного маршруту № 4 «Крошня — Обласна дитяча лікарня» (основні зупиночні пункти).

Таблиця 1.1

Характеристика досліджуваних автобусних маршрутів ТОВ «САВ-ТРАНС» (станом на 2025 рік)

№ Маршруту	Назва маршруту	Довжина оборотного рейсу, км	Протяжність (в один бік), км	Характеристика траси
№ 4	Крошня — Обласна дитяча лікарня	22,4	11,2	З'єднує північний житловий масив Крошня з медичними закладами в с. Станишівка. Маршрут проходить через центральну частину міста, має високу змінність пасажирів. ¹
№ 10	Крошня — майдан Станишівський	28,6	14,3	Має спільну кінцеву з маршрутом №4, але проходить через промислово-складську зону (вул. Вокзальна, Вітрука), забезпечуючи підвіз працівників підприємств. ²
№ 19	с. Лісове — Біомедскло	37,2	18,6	Найдовший маршрут у вибірці. Забезпечує безпересадкове сполучення приміської зони (с. Лісове) з промисловим вузлом (Біомедскло) через все місто. Характеризується найвищим коефіцієнтом використання пробігу. ³

Схема руху маршруту № 10



Рис. 1.6. Схема руху автобусного маршруту № 10 «Крошня — Паперова фабрика» (через Залізничний вокзал).

Схема руху маршруту № 19



Рис. 1.7. Схема руху автобусного маршруту № 19 «с. Лісове — Біомедскло» (через Промислову зону).

Аналіз інвентарного переліку рухомого складу ТОВ «САВ-ТРАНС» станом на 2025 рік [7] свідчить про наявність різнопланового парку автобусів, що дозволяє гнучко реагувати на зміни попиту. Основу парку на досліджуваних маршрутах складають:



Рис. 1.8. Автобус середнього класу Ataman A092H6

1. Автобуси середнього класу (Ataman A092H6). Ці автобуси широко використовуються на маршрутах №4 та №10. Модель A092H6 побудована на шасі японської компанії ISUZU, що забезпечує високу надійність силової лінії. Згідно з керівництвом з експлуатації [1], автобус оснащений дизельним двигуном ISUZU 4HK1 (Євро-5) потужністю 114 кВт. Важливою особливістю є низький рівень підлоги на задньому майданчику, що забезпечує доступність для маломобільних груп населення відповідно до європейських норм та вимог ДСТУ 3649:2010 [5]. Ресурс двигуна до капітального ремонту заявлений виробником на рівні 1 млн км, проте в умовах міського циклу цей показник суттєво залежить від якості обслуговування.

2. Автобуси великого класу (Volvo 8700LE, Volvo 7900 Hybrid). Закріплені за маршрутами з максимальною інтенсивністю руху, зокрема №19. Автобус Volvo 8700LE є моделлю Low Entry (низький вхід), що прискорює посадку-висадку пасажирів [25]. Особливої уваги заслуговують гібридні автобуси Volvo 7900 Hybrid. Згідно з технічною специфікацією виробника [24], вони оснащені паралельною гібридною системою I-SAM, яка дозволяє використовувати електродвигун для розгону автобуса до швидкості 20-25 км/год. Це дозволяє

знизити витрати палива на 30-39% та зменшити викиди шкідливих речовин, що є вкрай актуальним для центральної частини Житомира.



Рис. 1.9. Автобус великого класу Volvo 8700LE

Ефективність використання такого сучасного рухомого складу напряду залежить від якості системи моніторингу його технічного стану. На підприємстві впроваджено систему GPS-моніторингу, яка дозволяє диспетчерам контролювати дотримання графіків руху. Однак, інтеграція даних про технічний стан (через CAN-шину) з даними про пасажиропотік (через АСОП «City Card») наразі не реалізована, що ускладнює перехід до предиктивного обслуговування.

1.3. Аналіз існуючих методів та засобів моніторингу технічного стану транспортних засобів

Забезпечення надійності транспортних засобів є фундаментальною задачею технічної експлуатації. Згідно з ДСТУ 3649:2010 «Колісні транспортні засоби. Вимоги щодо безпечності технічного стану...», технічний стан визначається як сукупність властивостей транспортного засобу, що змінюються в процесі експлуатації і визначають можливість його використання за призначенням [5].

У науковій літературі, зокрема у фундаментальних працях Канарчука В.Є. [8] та Лудченка О.А. [9], детально розглянуто теоретичні основи зміни технічного стану. Процес втрати працездатності автомобіля є випадковим процесом, на який впливає велика кількість факторів: конструктивні особливості, якість паливно-мастильних матеріалів, кваліфікація водія, дорожні умови та навантажувальні режими.

Традиційна система технічного обслуговування та ремонту (ТОР), яка регламентується «Положенням про технічне обслуговування і ремонт дорожніх транспортних засобів...» [11], базується на планово-попереджувальному принципі (ППР). Суть цієї системи полягає у примусовому проведенні профілактичних робіт (ТО-1, ТО-2) через визначені інтервали пробігу. Наприклад, для міських автобусів періодичність ТО-1 зазвичай встановлюється в межах 5000 км, а ТО-2 – 20000-25000 км.

Однак, як зазначають дослідники Аулін В.В. та Голуб Д.В. [2], використання пробігу як єдиного діагностичного параметру є недосконалим. В умовах міських заторів, коли автобус може годину рухатися зі швидкістю 5-10 км/год, двигун напрацьовує значну кількість мотогодин, хоча пробіг залишається мінімальним. Це призводить до того, що реальний знос деталей випереджає нормативний пробіг, що створює ризик раптових відмов.



Рис. 1.10. Схема організації контролю технічного стану автобусів за традиційним методом

Сучасні методи моніторингу технічного стану, що застосовуються в Україні та світі, можна класифікувати на три основні групи:

1. Суб'єктивні (органолептичні) методи. Базуються на відчуттях водія або механіка (шум, вібрація, колір вихлопу). Незважаючи на низьку точність, ці методи залишаються основними для щоденного контролю перед виїздом на лінію, що передбачено регламентом підприємства.
2. Стендова (інструментальна) діагностика. Передбачає використання спеціалізованого обладнання (гальмівні стенди, люфт-детектори, димоміри) в умовах стаціонарних постів. Такі перевірки є періодичними і не дозволяють відслідковувати динаміку змін у режимі реального часу.

3. Бортова діагностика та телематика. Сучасні автобуси (зокрема Volvo та Ataman, що експлуатуються ТОВ «САВ-ТРАНС») оснащені електронними блоками управління (ECU), які постійно опитують датчики систем двигуна, трансмісії, гальм (ABS/EBS). Через інтерфейси OBD або FMS (Fleet Management System) ці дані можуть передаватися на сервер підприємства [19].

Проте, як підкреслюється в роботах Шевелькова С.А. [20] та Назаренка В.М. [16], більшість існуючих систем моніторингу фокусуються на внутрішніх параметрах автомобіля, ігноруючи зовнішні фактори експлуатації, зокрема динаміку завантаження салону. Автобус розглядається як ізольована система, хоча його надійність критично залежить від того, скільки пасажирів він перевозить. Відсутність кореляції між даними про відмови та даними про пасажиропотік є суттєвим недоліком існуючих підходів.

1.4. Вплив експлуатаційних факторів та пасажиропотоків на показники надійності автобусів

Експлуатаційна надійність міського автобуса не є константою; вона є функцією від умов його роботи. Згідно з Законом України «Про автомобільні дороги», стан дорожнього покриття є важливим фактором, проте для міського циклу визначальним є саме режим руху та навантаження [13].

У логістичних системах, як зазначає Громова Є.В., ефективність взаємодії транспорту залежить від параметрів вхідного матеріального потоку [4]. Для пасажирського транспорту таким потоком є люди. Традиційні методи обстеження пасажиропотоків (табличний метод, візуальний підрахунок) дають лише миттєвий зріз ситуації і є трудомісткими. Впровадження системи «City Card» у Житомирі надало можливість аналізувати «великі дані» (Big Data) про кожну поїздку.

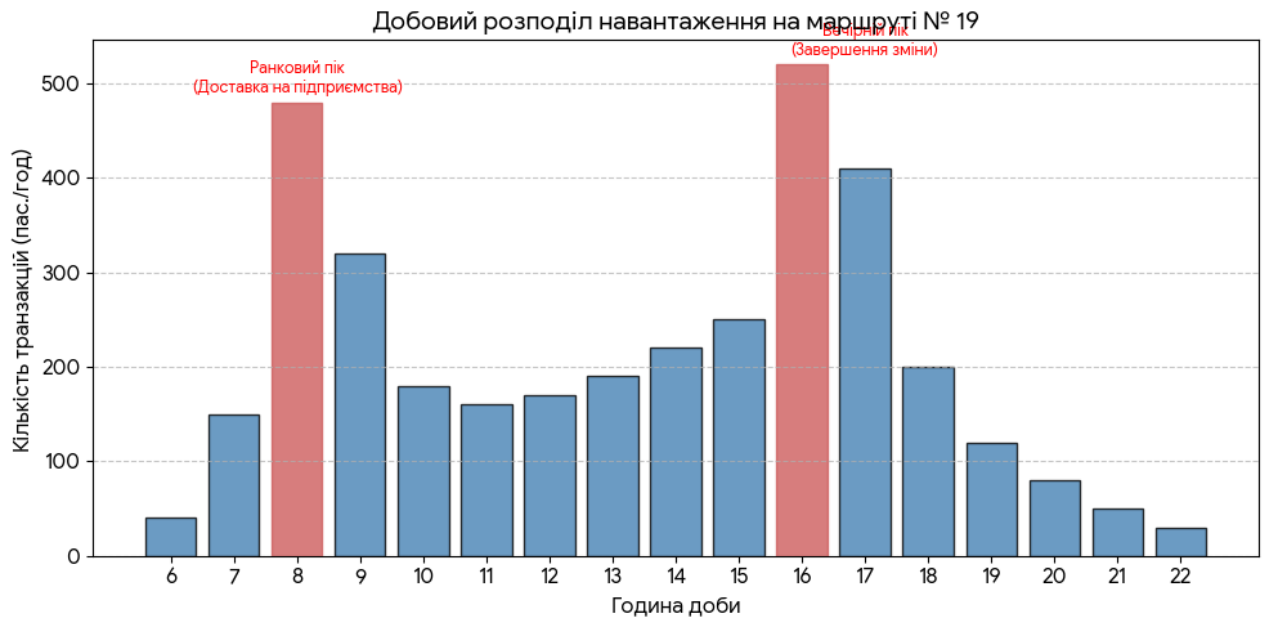


Рис. 1.11. Добовий розподіл пасажиропотоку на маршруті № 19

Аналіз сучасних наукових джерел, зокрема закордонних досліджень Liu S. [21] та Rao R. [22], підтверджує прямий зв'язок між перевантаженням автобусів та інтенсивністю відмов. Дослідники вказують, що стохастичність пасажиропотоків призводить до непрогнозованих пікових навантажень на конструкцію транспортного засобу. Левченко О.В. та співавтори у своїй роботі [3] наводять дані, що збільшення коефіцієнта наповнення салону на 10% понад номінальний призводить до скорочення ресурсу агрегатів трансмісії на 15-20%.

На основі попереднього аналізу звітів системи «City Card» за період 10.11.2025 – 26.11.2025 по маршрутах №4, 10 та 19, можна виділити наступні механізми впливу пасажиропотоку на технічний стан рухомого складу ТОВ «САВ-ТРАНС»:

1. Вплив на ходову частину та кузов. Згідно з паспортними даними автобуса Ataman A092H6 [1], його повна конструктивна маса становить 8750 кг. При номінальній пасажиромісткості 52 особи, перевантаження у години пік (коли в салон набивається понад 60-70 осіб) призводить до перевищення допустимих навантажень на осі. Це викликає прискорену втому металу ресор, руйнування сайлентблоків та втулок стабілізаторів.

2. Вплив на трансмісію та двигун. Режим руху «Start-Stop» з повним навантаженням вимагає від двигуна роботи на режимах максимального крутного моменту. Це збільшує теплове навантаження на циліндро-поршкову групу та систему охолодження. Для гібридних автобусів Volvo 7900 це також означає інтенсивніші цикли розряду-заряду тягової батареї. Дослідження Gupta A.R. показують, що надійність електричних та гібридних автобусів суттєво знижується при роботі в умовах постійних перевантажень [23].

3. Знос дверних систем та пневматики. Інтенсивність входу-виходу пасажирів на центральних зупинках (наприклад, «Універмаг», «Житній ринок») призводить до того, що пневматичні приводи дверей здійснюють тисячі циклів спрацювання за зміну. Це є причиною частих відмов компресорів, кранів управління дверима та витоків повітря з пневмосистеми. Вимоги до справності аварійних виходів та дверей чітко прописані у Правилах перевезення пасажирів [14], тому моніторинг цього вузла є критично важливим.

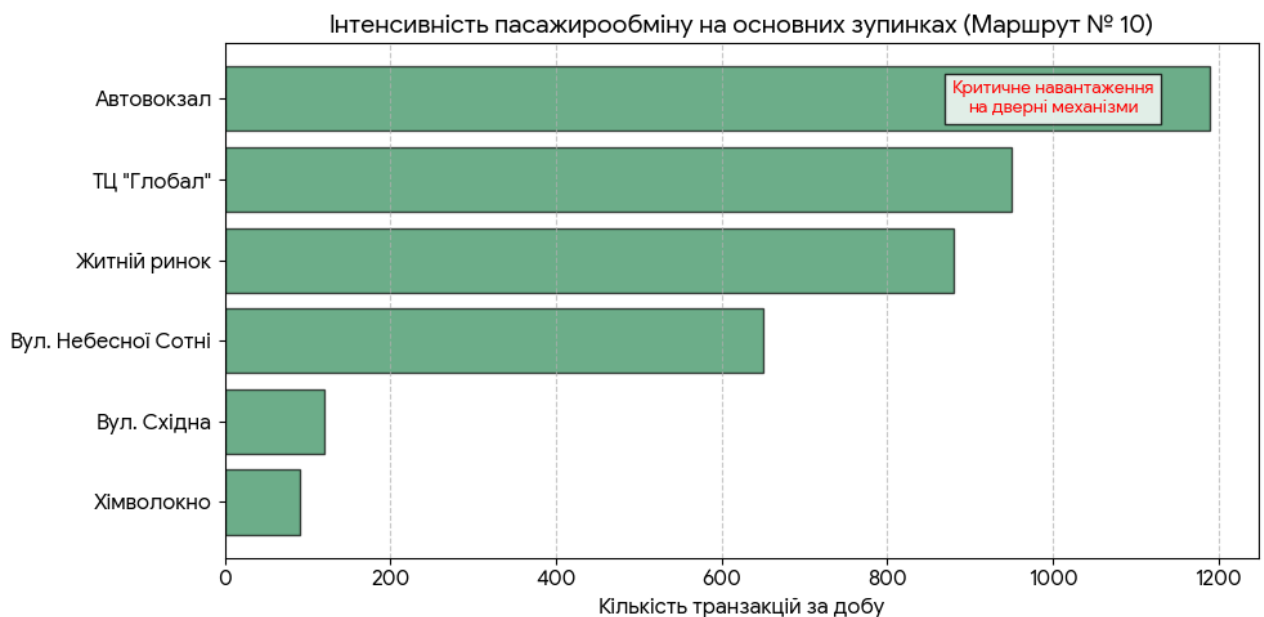


Рис. 1.12. Порівняльна діаграма інтенсивності пасажирообміну на ключових зупинках маршруту № 10.

Таким чином, пасажиропотік є не просто економічним показником, а ключовим технічним фактором, що визначає швидкість деградації транспортного засобу. Використання даних «City Card» для розрахунку «еквівалентного

напрацювання» (з урахуванням коефіцієнта завантаження) дозволить перейти від статичного планування ТО до динамічного управління надійністю парку.

1.5. Обґрунтування мети та задач дослідження

Проведений аналіз стану пасажирських перевезень у м. Житомирі та умов експлуатації парку ТОВ «САВ-ТРАНС» дозволив виявити протиріччя між необхідністю забезпечення високої надійності перевезень та застарілими методами планування технічної експлуатації, які не враховують реальну динаміку навантажень на рухомий склад.

Існуючі методики моніторингу, описані в літературі [8, 9], базуються переважно на пробігу, ігнорують стохастичний характер пасажиропотоків. Водночас, наявність на підприємстві сучасних інформаційних систем (GPS-моніторинг, АСОП «City Card») створює технічну базу для впровадження нових підходів, що узгоджується з концепцією енергоресурсної ефективності автомобіля [18].

З огляду на це, **метою роботи** є підвищення ефективності технічної експлуатації автобусів ТОВ «САВ-ТРАНС» шляхом удосконалення системи моніторингу показників надійності з урахуванням експлуатаційних факторів та даних автоматизованого обліку пасажирів.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести детальний аналіз умов експлуатації на обраних маршрутах (№4, 10, 19) та визначити кореляцію між інтенсивністю пасажиропотоку та показниками надійності.
2. Розробити математичну модель оцінки залишкового ресурсу агрегатів автобусів, яка б враховувала коефіцієнт нерівномірності завантаження.
3. Створити програмний алгоритм (у середовищі MATLAB) для автоматизованої обробки даних про транзакції та прогнозування моментів технічного обслуговування.

4. Обґрунтувати економічну доцільність впровадження запропонованої системи моніторингу в діяльність ТОВ «САВ-ТРАНС».

1.6. Світовий досвід впровадження інтелектуальних транспортних систем (ITS) та стратегій Industry 4.0 в технічну експлуатацію

Сучасний етап розвитку автомобільного транспорту характеризується переходом до концепції «Інтелектуальних транспортних систем» (ITS — Intelligent Transport Systems) та впровадженням технологій Industry 4.0 у процеси технічного обслуговування. Аналіз провідних світових досліджень, зокрема робіт Nemeth T. [28], Li Z. [26] та Тао F. [31], свідчить про зміну парадигми експлуатації: від реагування на відмови до їх попередження на основі глибокого аналізу даних.

1.6.1. Еволюція стратегій технічного обслуговування: від планового до прогнозованого

У розвинених країнах ЄС та США спостерігається поступова відмова від жорсткої системи планово-попереджувальних ремонтів (Time-Based Maintenance), яка домінувала у XX столітті. Дослідники Kaiser F. та Schlegel T. у своєму огляді [25] виділяють три етапи еволюції стратегій обслуговування громадського транспорту (Таблиця 1.2).

Як зазначають Coraddu A. та Oneto L. [22], впровадження стратегії Predictive Maintenance (PdM) дозволяє скоротити витрати на технічне обслуговування на 20–25%, а кількість незапланованих простоїв — на 30–50%. Для ТОВ «САВ-ТРАНС» перехід до елементів PdM є логічним кроком розвитку, враховуючи наявність сучасного рухомого складу.

Таблиця 1.2

Порівняльний аналіз стратегій технічного обслуговування міських автобусів (на основі [25, 28])

Характеристика	Reactive (Corrective) Maintenance	Preventive (Time-Based) Maintenance	Predictive (Condition-Based) Maintenance
Принцип дії	Експлуатація до відмови («Зламалось — полагодили»).	Планова заміна деталей через фіксований інтервал (пробіг/час).	Обслуговування на основі прогнозу залишкового ресурсу.
Тригер для ремонту	Фізична поломка, зупинка автобуса.	Досягнення граничного пробігу (наприклад, 20 тис. км).	Сигнал від аналітичної системи про деградацію параметра.
Недоліки	Висока вартість аварійних ремонтів, непередбачувані простої, ризик для безпеки.	Недовикористання ресурсу деталей (заміна справних запчастин), високі витрати на часті ТО.	Висока вартість впровадження (датчики, ПЗ), потреба у кваліфікованому персоналі.
Ефективність використання ресурсу	100% (деталь працює до кінця), але з наслідками.	60–70% (заміна із запасом надійності).	90–95% (заміна безпосередньо перед відмовою).
Застосування	Лампочки, дрібні деталі інтер'єру.	Двигун, трансмісія (традиційний підхід).	Критикальні вузли: паливна система, пневматика, електроніка.

1.6.2. Роль «Великих даних» (Big Data) та Інтернету речей (IoT)

Основою сучасних систем моніторингу є технології IoT (Internet of Things). Автобус розглядається не як ізольований механізм, а як «розумний» об'єкт, інтегрований у міську інфраструктуру. Згідно з дослідженнями Li Z. [26],

ефективна система моніторингу базується на зборі та кореляції даних з трьох джерел:

1. Внутрішні дані (Vehicle Data): Температура, вібрація, тиск, коди помилок (DTC), отримані через CAN-шину.
2. Операційні дані (Operational Data): Швидкість руху, профіль прискорення/гальмування, витрата палива (дані телематики).
3. Зовнішні дані (Contextual Data): Погодні умови, стан дорожнього покриття і, що найважливіше для нашого дослідження, пасажиропотік.

Саме інтеграція даних про пасажиропотік є новітнім трендом. Liu S. та Ceder A. [27] довели, що динамічне навантаження від пасажирів є ключовим фактором, що прискорює деградацію пневматичної підвіски та гальмівної системи електробусів та гібридів. Ігнорування цього фактору в традиційних системах моніторингу призводить до похибки прогнозування ресурсу в межах 15–20%.

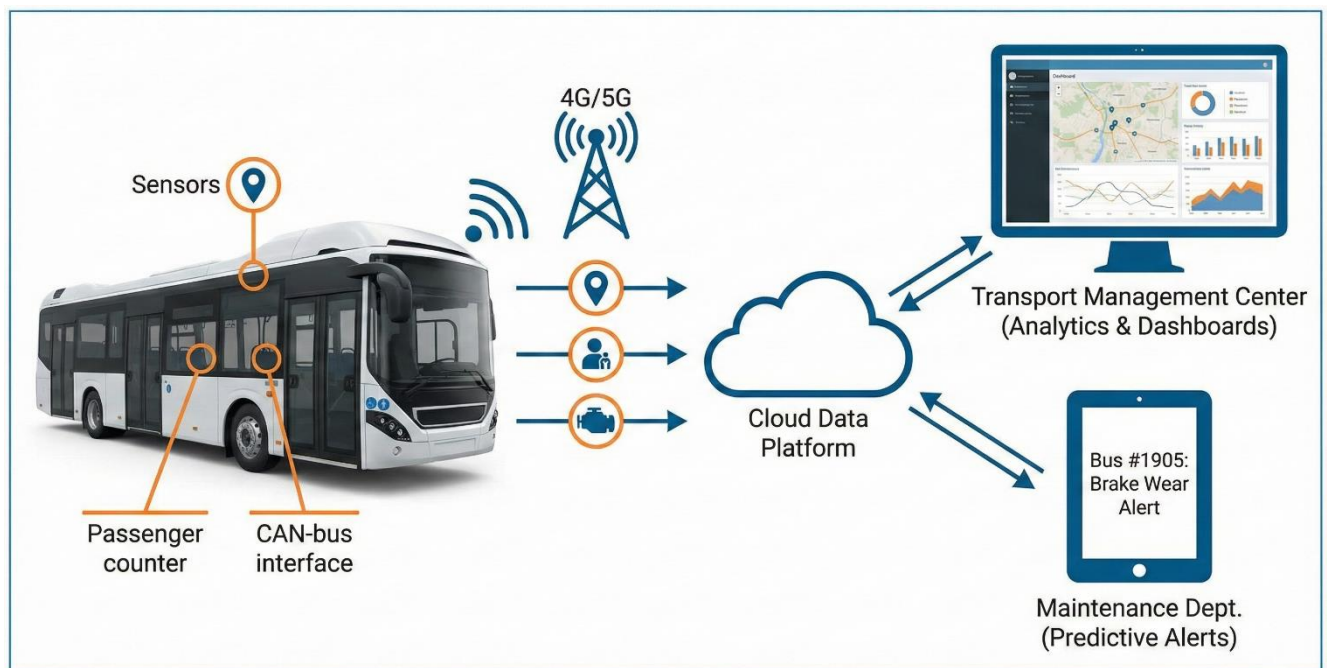


Рис. 1.13. Концептуальна схема IoT-архітектури моніторингу міського автобуса (адаптовано з [26])

1.6.3. Концепція «Цифрового двійника» (Digital Twin)

Вершиною еволюції систем моніторингу є технологія Digital Twin. Тао F. [31] визначає цифрового двійника як віртуальну модель фізичного об'єкта, яка еволюціонує разом з ним у реальному часі. Стосовно автобусного парку, це означає створення комп'ютерної моделі кожного конкретного автобуса (наприклад, Volvo AM 1905 AA), яка «проживає» те саме життя, що й реальна машина. У роботі Zhang J. [37] описується застосування цифрових двійників для міських автобусів у Китаї. Модель отримує вхідні дані (пробіг 100 км, перевезено 500 пасажирів, температура $+25^{\circ}\text{C}$) і розраховує накопичену втому металу. Якщо віртуальна модель показує критичний знос, система генерує попередження механіку ще до того, як реальна деталь зламається.

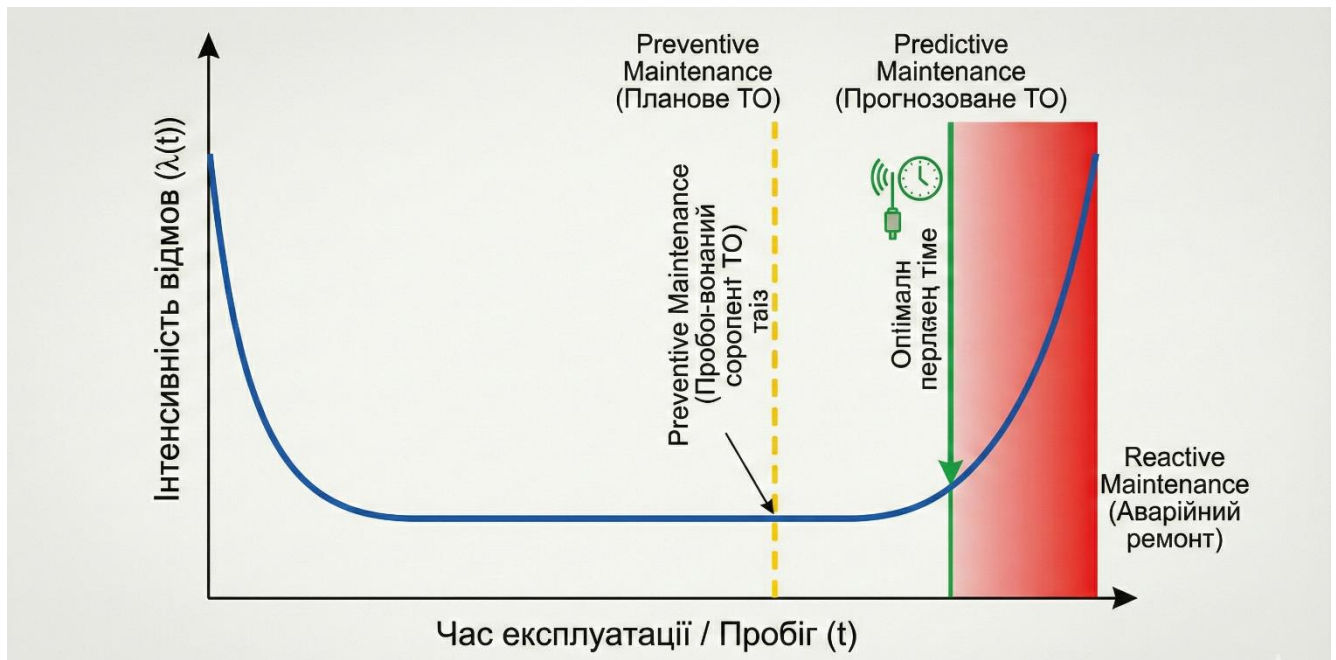


Рис. 1.14. Вплив стратегій технічного обслуговування на використання ресурсу (на моделі «Ванної кривої» інтенсивності відмов).

У рамках даної магістерської роботи, розроблена нами математична модель у середовищі MATLAB (див. Розділ 2) може розглядатися як спрощений цифровий двійник, що фокусується на прогнозуванні ресурсу в залежності від інтегрального навантаження.

1.6.4. Економічні аспекти: аналіз повної вартості володіння (TCO)

Європейський досвід, узагальнений у звіті Єврокомісії [23] та роботі Schmidt A. [30], свідчить, що ефективність експлуатації слід оцінювати не за миттєвими витратами на ремонт, а за показником TCO (Total Cost of Ownership). Структура TCO для міського автобуса включає:

- Капітальні витрати (купівля);
- Витрати на паливо/енергію (30–40%);
- Витрати на ТО та ремонти (15–20%);
- Втрати від простоїв (Operational Losses).

Дослідження Wang Y. [35] показують, що стратегія оптимізації інтервалів ТО на основі фактичного навантаження (Elastic Maintenance Scheduling) дозволяє знизити TCO на 8–12%. Це досягається за рахунок того, що автобуси, які працюють на легких маршрутах, обслуговуються рідше (економія матеріалів), а автобуси на важких маршрутах — частіше (економія на капітальних ремонтах двигунів). Саме цей підхід покладено в основу рекомендацій для ТОВ «САВ-ТРАНС».

Висновок до розділу 1

У першому розділі виконано аналітичний огляд стану проблеми. Встановлено, що підвищення ефективності роботи міського транспорту неможливе без врахування реальних умов експлуатації. Аналіз діяльності ТОВ «САВ-ТРАНС» показав, що підприємство має сучасний рухомий склад, проте система його обслуговування потребує модернізації. Доведено, що інтеграція даних системи «City Card» у процеси технічного моніторингу є перспективним напрямком дослідження, який дозволить підвищити надійність перевезень та знизити експлуатаційні витрати.

Світовий досвід переконливо доводить, що майбутнє технічної експлуатації полягає у цифровізації та переході до прогнозованого обслуговування. Використання даних про пасажиропотік як діагностичного параметра є актуальним науковим трендом, що підтверджується дослідженнями провідних

вчених. Впровадження елементів таких систем у ТОВ «САВ-ТРАНС» дозволить підприємству вийти на якісно новий рівень управління надійністю.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВТОБУСІВ

2.1. Вибір та обґрунтування системи показників (KPI) ефективності технічної експлуатації для умов ТОВ «САВ-ТРАНС»

Ефективність технічної експлуатації автомобільного транспорту визначається здатністю парку виконувати транспортну роботу з мінімальними витратами часу та ресурсів на підтримання працездатного стану рухомого складу. Згідно з положеннями теорії надійності машин, викладеними в фундаментальних працях Канарчука В.С. [8] та Лудченка О.А. [9], технічний стан автобуса є динамічною системою, що змінюється під впливом експлуатаційних факторів.

Для побудови ефективної системи моніторингу в умовах ТОВ «САВ-ТРАНС» необхідно виділити систему ключових показників ефективності (KPI — Key Performance Indicators), які дозволять кількісно оцінити надійність перевезень. Базуючись на вимогах ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки» та ДСТУ 3649:2010 [5], пропонується використовувати наступну ієрархічну систему показників.

2.1.1. Показники безвідмовності

Безвідмовність — це властивість об'єкта безперервно зберігати працездатний стан протягом деякого часу або напрацювання. Для міських автобусів, що працюють у циклічному режимі (маршрути №4, 10, 19), основним показником є ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$.

Математично ймовірність безвідмовної роботи на інтервалі пробігу $[0, t]$ визначається як:

$$P(t) = P(T \geq t) = 1 - F(t) \quad (2.1)$$

де T - випадкова величина напрацювання до відмови;

$F(t)$ - функція розподілу відмов (ймовірність відмови).

Важливим аспектом при аналізі безвідмовності є класифікація відмов, оскільки природа їх виникнення визначає стратегію моніторингу. Згідно з положеннями ДСТУ 2860-94, відмови автобусів поділяються на раптові та поступові.

1. Раптові відмови. Характеризуються стрибкоподібною зміною параметрів технічного стану. Для автобусів Ataman та Volvo до таких відмов можна віднести перегорання ламп, прокол шини, обрив приводних ременів або збій в електронному блоці управління. Як зазначається у підручнику Лудченка О.А. [9], такі відмови не залежать від тривалості попередньої роботи і підпорядковуються експоненційному закону розподілу. Прогнозувати їх час виникнення вкрай складно, тому стратегія боротьби з ними полягає у забезпеченні запасу надійності конструкції.

2. Поступові (параметричні) відмови. Виникають внаслідок незворотних фізико-хімічних процесів: зношування поверхонь тертя, втоми металу, старіння гумотехнічних виробів, корозії. Саме ці відмови є об'єктом нашого дослідження, оскільки інтенсивність їх розвитку прямо залежить від навантаження (кількості пасажирів). Для поступових відмов характерна наявність граничного стану.

Поняття граничного стану є ключовим у теорії експлуатації. Це стан об'єкта, при якому його подальша експлуатація неприпустима чи недоцільна, або відновлення його працездатного стану неможливе чи недоцільне [8]. Для автобусів ТОВ «САВ-ТРАНС» ознаками досягнення граничного стану є:

- порушення вимог безпеки (наприклад, люфт рульового керування перевищує 10 градусів, що регламентовано ДСТУ 3649:2010 [5]);
- зниження ефективності експлуатації (зростання витрат палива понад встановлені норми);
- необхідність проведення капітального ремонту.

Графічно процес втрати працездатності описується класичною кривою зношування (крива Лоренца), яка має три характерні ділянки:

- Ділянка I (Припрацювання): Інтенсивний знос на початку експлуатації нового автобуса або після ремонту агрегату. Характеризується підвищеною

інтенсивністю відмов через притирання поверхонь та виявлення прихованих дефектів.

- Ділянка II (Нормальна експлуатація): Період стабільного технічного стану. Інтенсивність зношування мінімальна і постійна. Саме на цьому етапі доцільно застосовувати методику корегування міжремонтних пробігів, запропоновану в даній роботі.
- Ділянка III (Катастрофічне зношування): Різке зростання швидкості зносу через зміну геометрії деталей, появу ударних навантажень та зазорів. Експлуатація на цій стадії є економічно збитковою та небезпечною.



Рис. 2.1. Класична крива інтенсивності відмов («Ванна крива») для механічних систем автобуса.

Статистична оцінка цього показника $P(t)$ розраховується за формулою:

$$P(t) = \frac{N - n(t)}{N} = 1 - \frac{n(t)}{N} \quad (2.2)$$

де N - загальна кількість автобусів під спостереженням (обсяг вибірки);

$n(t)$ - кількість автобусів, що відмовили до моменту напруцювання t .

Другим важливим показником є інтенсивність відмов $\lambda(t)$ — умовна густина ймовірності виникнення відмови об'єкта, який не відмовив до моменту

часу t . Цей показник характеризує локальну надійність у конкретний момент часу:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{d \ln P(t)}{dt} \quad (2.3)$$

де $f(t)$ — щільність розподілу напрацювання до відмови.

Для умов експлуатації ТОВ «САВ-ТРАНС» критично важливим є показник середнього напрацювання на відмову T_0 , який визначається як математичне сподівання напрацювання випадкової величини T :

$$T_0 = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (2.4)$$

2.1.2. Комплексні показники ефективності парку

Окрім одиничних показників надійності, для оцінки роботи парку в цілому використовуються комплексні коефіцієнти. Відповідно до «Положення про технічне обслуговування...» [11], основним індикатором роботи технічної служби є Коефіцієнт технічної готовності (α_T).

Коефіцієнт технічної готовності визначає частку парку, яка знаходиться у справному стані і готова до виїзду на лінію. Аналітично він розраховується за формулою:

$$\alpha_T = \frac{D_{sp}}{D_{inv}} = \frac{D_{inv} - D_{rem}}{D_{inv}} = \frac{1}{1 + \frac{i_{cc} \cdot t_{pr}}{1000}} \quad (2.5)$$

де D_{sp} - автомобіле-дні перебування у справному стані;

D_{inv} - автомобіле-дні в господарстві (інвентарні);

D_{rem} - автомобіле-дні простою в ТО і ремонті;

i_{cc} - середньодобовий пробіг автобуса, км;

t_{pr} - питомий простій в ТО і ремонті на 1000 км пробігу.

Слід детальніше розглянути структуру планово-попереджувальної системи, що застосовується на підприємстві, оскільки саме її недосконалість спонукає до

впровадження нових методів моніторингу. Відповідно до «Положення про технічне обслуговування...» [11], технічні впливи поділяються на:

1. Щоденне обслуговування (ЩО). Виконується водієм та механіком КТП перед виїздом на лінію та після повернення. Включає контрольно-оглядові роботи (перевірка світлотехніки, гальм, рівня рідин) та прибирально-мийні роботи. Важливість якісного ЩО зростає в умовах пандемій та епідеміологічних загроз, коли необхідна санітарна обробка салону.
2. Технічне обслуговування №1 (ТО-1). Проводиться з періодичністю 5000 км (для умов І категорії експлуатації). Основна мета — профілактика: змащувальні роботи, кріпильні роботи, діагностика ходової частини.
3. Технічне обслуговування №2 (ТО-2). Проводиться через 20000–25000 км. Включає поглиблену діагностику двигуна, трансмісії, електрообладнання, а також заміну фільтрів та мастил.

Класична методика визначення періодичності ТО (L_{TO}) передбачає використання системи коригуючих коефіцієнтів:

$$L_{TO} = L_H \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \quad (2.6)$$

Де L_H - нормативний пробіг до ТО (заводська рекомендація);

K_1 - коефіцієнт, що враховує категорію умов експлуатації (для міських маршрутів Житомира з частими зупинками $K_1 \approx (0,8 \dots 0,9)$);

K_2 - коефіцієнт модифікації рухомого складу;

K_3 - коефіцієнт природно-кліматичних умов (для помірного клімату $K_3 = 1,0$).

Проте, як зазначають дослідники Хабутдінов Р.А. та Піцик М.Г. [19], дана методика є статичною. Вона встановлює «середню температуру по лікарні», не враховуючи індивідуальні умови роботи кожного автобуса. Наприклад, автобус на маршруті №19 перевозить за зміну 800 пасажирів, а автобус на маршруті №4 — 500, але за нормами «Положення №102» вони мають проходити ТО через однаковий пробіг. Це призводить до того, що навантажений автобус виходить з ладу раніше планового ТО (недообслуговування), а ненавантажений обслуговується передчасно (перевитрата коштів).

Саме тому впровадження динамічного коефіцієнта навантаження K_{pass} , розрахованого на основі даних City Card, є логічним розвитком нормативної бази [11] в епоху цифровізації.

Важливо розрізняти α_T та Коефіцієнт випуску на лінію (α_B), який враховує не лише технічні, а й організаційні простой (відсутність водія, відсутність замовлень):

$$\alpha_B = \frac{D_E}{D_{inv}} = \alpha_T \cdot K_{org} \quad (2.7)$$

де D_E - автомобіле-дні в експлуатації;

K_{org} - коефіцієнт організаційної готовності.

Обґрунтування вибору KPI: Існуюча система обліку в ТОВ «САВ-ТРАНС» базується на розрахунку загального α_T . Проте, цей показник є "посмертним" — він фіксує факт простою, але не дозволяє прогнозувати його. В роботі пропонується перейти до моніторингу залишкового ресурсу (R_{res}), який розраховується з урахуванням фактичного навантаження пасажиропотоком:

$$R_{res} = R_{nom} \cdot K_L - L_{fact} \quad (2.8)$$

де R_{nom} - номінальний ресурс агрегату;

K_L - коефіцієнт навантаження (буде визначено в розділі 2.2);

L_{fact} - фактичний пробіг.

2.2. Математичне моделювання впливу умов експлуатації на інтенсивність відмов автобусів

Класичні моделі розрахунку періодичності ТО, наведені у [8, 9], базуються на припущенні, що інтенсивність зношування залежить лінійно від пробігу. Однак, дослідження Хабутдінова Р.А. [18] та Піщика М.Г. [19] доводять, що енергетичні витрати автомобіля (а отже, і знос трансмісії) суттєво залежать від маси перевезеного вантажу та динаміки руху.

Для автобусів міських маршрутів №4, 10, 19 "вантажем" є пасажери. Динаміка зміни кількості пасажирів, отримана з системи «City Card», має стохастичний характер, що вимагає застосування імовірнісних моделей.

2.2.1. Обґрунтування вибору закону розподілу відмов

Для опису процесів зношування механічних систем (підвіска, трансмісія, двигун автобусів Ataman та Volvo) найбільш адекватним є розподіл Вейбулла-Гнеденка. На відміну від експоненційного закону (який описує раптові відмови), розподіл Вейбулла враховує старіння та знос матеріалів.

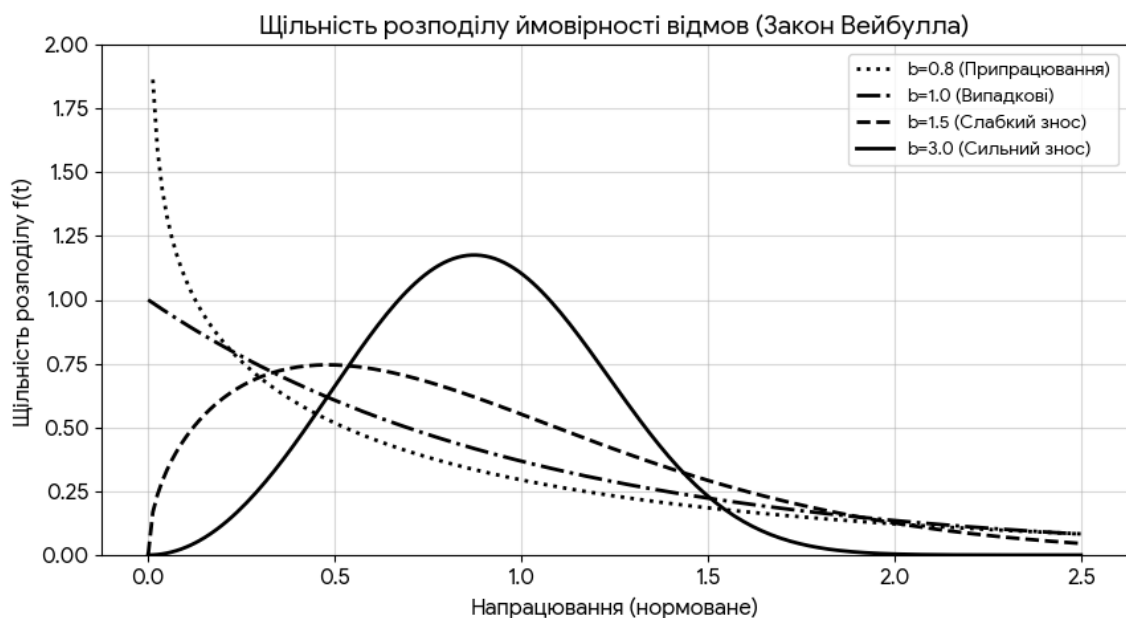


Рис. 2.2. Вплив параметра форми b розподілу Вейбулла на щільність розподілу відмов.

Щільність ймовірності відмови за законом Вейбулла описується формулою:

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} \exp \left[-\left(\frac{t}{a}\right)^b \right] \quad (2.9)$$

де t - напрацювання (пробіг);

a - параметр масштабу (характеризує середній ресурс до відмови);

b - параметр форми (характеризує фізику процесу зносу).

Значення параметру b вказує на стадію життєвого циклу:

- $b < 1$ — період припрацювання (ранні відмови);
- $b = 1$ — період нормальної експлуатації (випадкові відмови);
- $b > 1$ — період зносових відмов (старіння).

Для автобусів ТОВ «САВ-ТРАНС», що знаходяться в експлуатації понад 3-5 років, характерним є значення $b \in [1.5; 2.5]$, що свідчить про домінування процесів втомного руйнування та зносу.

Вибір закону Вейбулла-Гнеденка для моделювання відмов автобусів ТОВ «САВ-ТРАНС» обумовлений його універсальністю. Функція надійності $P(t)$ для цього закону має вигляд:

$$P(t) = \exp\left(-\frac{t^b}{a}\right) \quad (2.10)$$

де параметр a пов'язаний з середнім напрацюванням до відмови, а параметр b визначає фізику процесу.

Розглянемо вплив параметра форми b детальніше, спираючись на теорію надійності [8]:

- Якщо $b = 1$, інтенсивність відмов $\lambda(t) = \text{const}$. Це означає, що відмови відбуваються випадково і не залежать від віку деталі (наприклад, прокол колеса наїздом на цвях). У цьому випадку профілактичні заміни не мають сенсу.
- Якщо $b = 2$ (розподіл Релея), інтенсивність відмов зростає лінійно ($\lambda(t) \sim t$). Це характерно для деталей, що піддаються втоми та корозії.
- Якщо $b \approx 3,5$, розподіл Вейбулла наближається до нормального закону розподілу (Гауса). Це класичний випадок для деталей, що зношуються тертям (гальмівні колодки, диски зчеплення).

Для агрегатів автобусів, які працюють в умовах міського циклу (часті розгони та гальмування), значення параметра b зазвичай знаходиться в межах 1,5...2,5. Це підтверджує тезу про те, що надійність парку визначається саме процесами зносу та втоми, швидкість яких можна і потрібно контролювати.

Функція інтенсивності відмов для закону Вейбулла має вигляд:

$$\lambda(t) = \frac{b}{a} \cdot t^{b-1} \quad (2.11)$$

Аналіз цієї залежності показує, що при $b > 1$ інтенсивність відмов монотонно зростає з часом. Це означає, що з кожним кілометром пробігу ймовірність поломки збільшується. Наше завдання, використовуючи дані про пасажиропотік, — скоригувати змінну часу t таким чином, щоб вона відображала «ефективний вік» деталі, а не просто календарний час.

2.2.2. Модель корегування ресурсу за коефіцієнтом пасажиропотоку

Наукова новизна даного дослідження полягає у модифікації параметру масштабу a (ресурсу) в залежності від даних «City Card». Приймаємо гіпотезу, що ресурс агрегату L_{res} обернено пропорційний інтегральному навантаженню.

Вводимо коефіцієнт інтенсивності пасажиропотоку ($K_{pass(i)}$), який розраховується для кожного рейсу i :

$$K_{pass(i)} = \frac{N_{fact(i)}}{N_{nom}} \quad (2.12)$$

де $N_{fact(i)}$ - фактична кількість транзакцій (пасажирів) за рейс (дані City Card);

N_{nom} - номінальна пасажиромісткість автобуса (для Ataman A092H6 – 52 місця).

Тоді еквівалентний зносовий пробіг (L_{eq}) за зміну розраховується як сума пробігів за рейс, зважених на коефіцієнт навантаження:

$$L_{eq} = \sum_{i=1}^m l_i \cdot \left(1 + \gamma \cdot \frac{N_{fact(i)} - N_{opt}}{N_{opt}} \right) \quad (2.13)$$

де l_i - довжина i -го рейсу (для маршруту №19 – 18.6 км);

m - кількість рейсів за зміну;

γ - коефіцієнт чутливості агрегату до перевантаження (для підвіски $\gamma \approx 1,2$, для двигуна $\gamma \approx 0,8$ згідно з [2]);

N_{opt} - оптимальне завантаження (зазвичай 50% від місткості).

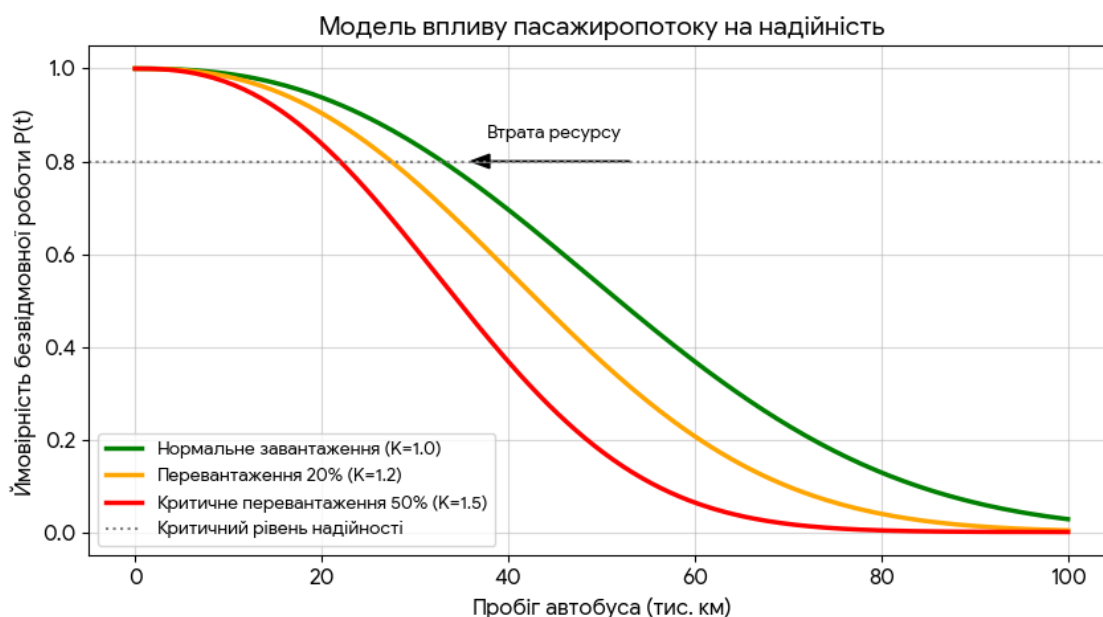


Рис. 2.3. Теоретична модель зниження ймовірності безвідмовної роботи при збільшенні коефіцієнта завантаження (K_{pass})

Таким чином, функція надійності $P(t)$ трансформується з урахуванням "важкості" маршруту. Якщо маршрут №19 має стабільні пікові навантаження ($K_{pass} > 1$), то крива ймовірності безвідмовної роботи зміщується ліворуч (ресурс падає швидше).

Математична модель зміни ймовірності безвідмовної роботи з урахуванням змінного навантаження набуває вигляду:

$$P(t_{eq}) = \exp \left[- \left(\frac{\int_0^t K_{load}(\tau) dt}{a_0} \right)^b \right] \quad (2.14)$$

де $K_{load}(\tau)$ - функція зміни навантаження в часі, отримана шляхом апроксимації даних системи City Card.

2.2.3. Методика визначення параметрів закону розподілу відмов за експериментальними даними

Для практичного використання запропонованої моделі (формула 2.5) критично важливим є точне визначення параметрів розподілу Вейбулла (a та b)

для конкретних умов ТОВ «САВ-ТРАНС». Оскільки ми оперуємо статистичними даними, отриманими в результаті спостережень, необхідно застосувати методи математичної статистики для оцінки цих параметрів.

У науковій літературі [2, 8] для цього найчастіше використовують метод найменших квадратів (МНК) після попередньої лінеаризації функції розподілу. Функція ймовірності відмови $F(t)$ для закону Вейбулла має вигляд:

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{a} \right)^b \right] \quad (2.15)$$

Для застосування МНК виконаємо подвійне логарифмування виразу. Спочатку перетворимо рівняння:

$$1 - F(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{a} \right)^b \right] \quad (2.16)$$

$$\frac{1}{1 - F(t)} = \exp \left[\left(\frac{t}{a} \right)^b \right] \quad (2.17)$$

Прологарифмуємо ліву і праву частини:

$$\ln \left(\ln \frac{1}{1 - F(t)} \right) = b \cdot \ln(t) - b \cdot \ln(a) \quad (2.18)$$

Отримане рівняння є рівнянням прямої лінії виду $Y = B \cdot X + A$, де:

- $Y = \ln(\ln(1/(1 - F(t))))$ - перетворена ймовірність відмови;
- $X = \ln(t)$ - логарифм напрацювання (пробігу);
- $B = b$ - кутовий коефіцієнт, що відповідає параметру форми;
- $A = -b \cdot \ln(a)$ - вільний член.

Така лінеаризація дозволяє побудувати так звану ймовірнісну сітку Вейбулла. Якщо нанести на графік експериментальні точки відмов (отримані з журналу ремонтів), і вони ляжуть вздовж прямої лінії, це підтвердить гіпотезу про відповідність емпіричних даних теоретичному закону Вейбулла.

Алгоритм розрахунку параметрів, який буде реалізовано в MATLAB, включає наступні кроки:

1. Сортування варіаційного ряду напрацювань до відмови: $t_1 < t_2 < \dots < t_n$.

2. Обчислення емпіричної ймовірності відмови для кожної точки за формулою середніх рангів:

$$F(t_i) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \quad (2.19)$$

де i - номер відмови у впорядкованому ряду,

n - загальна кількість відмов.

3. Обчислення значень X_i та Y_i для кожної точки.
4. Знаходження коефіцієнтів B (параметр b) та A методом лінійної регресії.
5. Визначення параметра масштабу: $a = \exp(-A/b)$.

Цей підхід дозволяє адаптувати модель під кожен конкретний маршрут. Наприклад, для маршруту №19, де навантаження вищі, ми очікуємо отримати менше значення параметра (ресурсу) при незмінному параметрі b (механізм зносу той самий).

Цей підхід дозволяє адаптувати модель під кожен конкретний маршрут. Наприклад, для маршруту №19, де навантаження вищі, ми очікуємо отримати менше значення параметра a (ресурсу) при незмінному параметрі b (механізм зносу той самий).

2.2.4. Економіко-математична модель оптимізації періодичності технічного обслуговування

Кінцевою метою моніторингу є не просто фіксація стану, а прийняття управлінського рішення: коли зупинити автобус на обслуговування? Занадто часте ТО призводить до зростання витрат на матеріали та простій, занадто рідке — до аварійних ремонтів, які коштують значно дорожче.

Згідно з підходом, описаним у роботах Хабутдінова Р.А. [18], оптимальна періодичність обслуговування (L_{opt}) визначається мінімумом функції сумарних питомих витрат (C_{total}).

Цільова функція має вигляд:

$$C_{total}(L) = C_{TO}(L) + C_{rem}(L) \rightarrow \min \quad (2.20)$$

де C_{TO} - питомі витрати на виконання планових профілактичних робіт, грн/км;

C_{rem} - питомі витрати на усунення аварійних відмов, грн/км.

Розпишемо складові функції:

1. Витрати на ТО: Зі збільшенням міжсервісного інтервалу L питомі витрати зменшуються (адже ми рідше платимо за заміну масла):

$$C_{TO}(L) = \frac{K_{TO}}{L} \quad (2.21)$$

де K_{TO} - вартість однієї операції технічного обслуговування (матеріали + зарплата механіків).

2. Витрати на ремонт (відмови): Зі збільшенням інтервалу L ймовірність відмови зростає, а отже зростають і витрати на ремонт:

$$C_{rem}(L) = \frac{K_{rem} \cdot F(L)}{L} \quad (2.22)$$

де K_{rem} - середня вартість аварійного ремонту (включаючи втрати від простою на лінії та штрафи за зірваний рейс);

$F(L)$ - ймовірність відмови на інтервалі L (визначається за законом Вейбулла, розглянутим вище)

Підставивши формулу Вейбулла, отримаємо розгорнуту модель:

$$C_{total}(L) = \frac{K_{TO} + R_{rem} \cdot \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{L}{a} \right)^b \right] \right)}{L} \quad (2.23)$$

Вплив пасажиропотоку (дані City Card) у цій моделі проявляється через параметр a (ресурс). При перевантаженні автобуса на маршруті №19 параметр a зменшується, що призводить до стрімкого зростання C_{rem} .

Графічно це означає зміщення точки оптимуму L_{opt} ліворуч. Тобто, математична модель доводить: чим вищий коефіцієнт пасажиропотоку, тим меншим має бути інтервал між заїздами в зону ТО, щоб мінімізувати загальні витрати підприємства.

2.3. Розробка алгоритму розрахунку показників безвідмовності в середовищі MATLAB

Для практичної реалізації запропонованої математичної моделі необхідно розробити програмний алгоритм, який дозволить автоматизувати процес обробки «великих даних» (Big Data) з валідаторів City Card.

2.3.1. Структура вхідних даних

Алгоритм працює з двома масивами даних:

1. Масив статичних параметрів (Bus_Data):
 - ID автобуса;
 - Марка/Модель;
 - Номінальна місткість (M_{nom});
 - Базовий пробіг до ТО (L_{TO_base}).
2. Масив динамічних даних (Transaction_Log), отриманий з CSV-звітів City Card:
 - Timestamp (Дата/Час);
 - Route_ID (№ Маршруту);
 - Bus_ID;
 - Transaction_Count (Кількість валідацій)

2.3.2. Логіка роботи алгоритму

В основу програмного алгоритму покладено гіпотезу лінійного підсумовування пошкоджень (правило Майнера), яка широко використовується в розрахунках на втому конструкцій. Оскільки автобус працює в змінних режимах навантаження (година пік / міжпіковий час), неможливо просто додати кілометри.

Алгоритм MATLAB реалізує концепцію «еквівалентного пошкодження». Для кожного дискретного проміжку часу Δt (наприклад, 1 година роботи на маршруті) обчислюється доля вичерпаного ресурсу d_i :

$$d_i = \frac{\Delta L_i}{L_{res}(K_{pass,i})} \quad (2.24)$$

де ΔL_i - фактичний пробіг за годину (дані GPS);

$L_{res}(K_{pass,i})$ - гіпотетичний ресурс автобуса, якби він постійно працював з таким навантаженням $K_{pass,i}$.

Відповідно до степеневі моделі зносу:

$$L_{res}(K_{pass}) = L_{nom} \cdot \left(\frac{1}{K_{pass}} \right)^m \quad (2.25)$$

де m - показник степеня кривої втоми (для ходової частини автобусів $m \approx 3 \dots 4$). Це означає, що перевантаження на 20% ($K_{pass} = 1.2$) призводить до скорочення ресурсу не на 20%, а майже вдвічі ($1,2^4 \approx 2,07$).

Умова виходу на ТО в алгоритмі перевіряється як сума накопичених пошкоджень:

$$\sum_{i=1}^k d_i \geq 1 \quad (2.26)$$

Де k — кількість відпрацьованих годин. Як тільки сума досягає одиниці, програма генерує сигнал «Warning: Maintenance Required». Такий підхід дозволяє врахувати приховану деградацію системи, спричинену піковими навантаженнями, зафіксованими системою City Card.

Процес розрахунку в середовищі MATLAB складається з наступних етапів:

Крок 1. Попередня обробка даних (Data Preprocessing).

Імпорт CSV-файлів. Фільтрація помилкових записів (наприклад, від'ємні значення або дублікати). Групування транзакцій по годинах (Resampling) для отримання профілю навантаження.

Крок 2. Розрахунок коефіцієнта завантаження (K_{load}).

Для кожної години роботи j обчислюється коефіцієнт:

$$K_{load.j} = \frac{\sum Transaction_j}{N_{nom} \cdot K_{turnover}} \quad (2.27)$$

де $K_{turnover}$ - коефіцієнт змінності пасажирів на маршруті (скільки разів змінюються пасажирів за рейс). Для довгих маршрутів (№19) він вищий, для коротких (№4) — нижчий.

Крок 3. Розрахунок накопиченого зносу (Cumulative Damage). Використовується принцип лінійного підсумовування пошкоджень (гіпотеза Майнера). Еквівалентний пробіг накопичується ітеративно:

$$L_{eq}^{total} = L_{eq}^{prev} + \Delta L \cdot (1 + \alpha(K_{load.j} - 1)) \quad (2.28)$$

Крок 4. Прогнозування дати ТО. Алгоритм порівнює L_{eq}^{total} з нормативом L_{TO_norm} .

$$Days_to_Service = \frac{L_{TO_norm} - L_{eq}^{total}}{Mean_Daily_Run \cdot \bar{K}_{load}} \quad (2.29)$$

2.3.3. Схема потоків даних алгоритму

На рис. 2.4 представлено графічну інтерпретацію розробленого алгоритму, який візуалізує логіку обробки інформаційних потоків у середовищі MATLAB. Структурно алгоритм побудований за модульним принципом і реалізує ітераційний підхід до розрахунків.

Як видно зі схеми, обчислювальний процес базується на двох вкладених циклах: зовнішньому, що перебирає дні експлуатації (d), та внутрішньому, що аналізує кожен окремий рейс (i) автобуса. Така деталізація дозволяє врахувати мікродинаміку навантажень, яка зазвичай втрачається при усередненні даних за місяць чи рік.

Ключовим елементом алгоритму є логічний блок прийняття рішень (умовний оператор), який на кожному кроці порівнює накопичений еквівалентний пробіг L_{total} із нормативним ресурсом до технічного обслуговування. Автоматизація цього етапу дозволяє виключити суб'єктивний фактор при

визначенні моменту постановки автобуса на ТО, забезпечуючи перехід до стратегії обслуговування за фактичним станом.

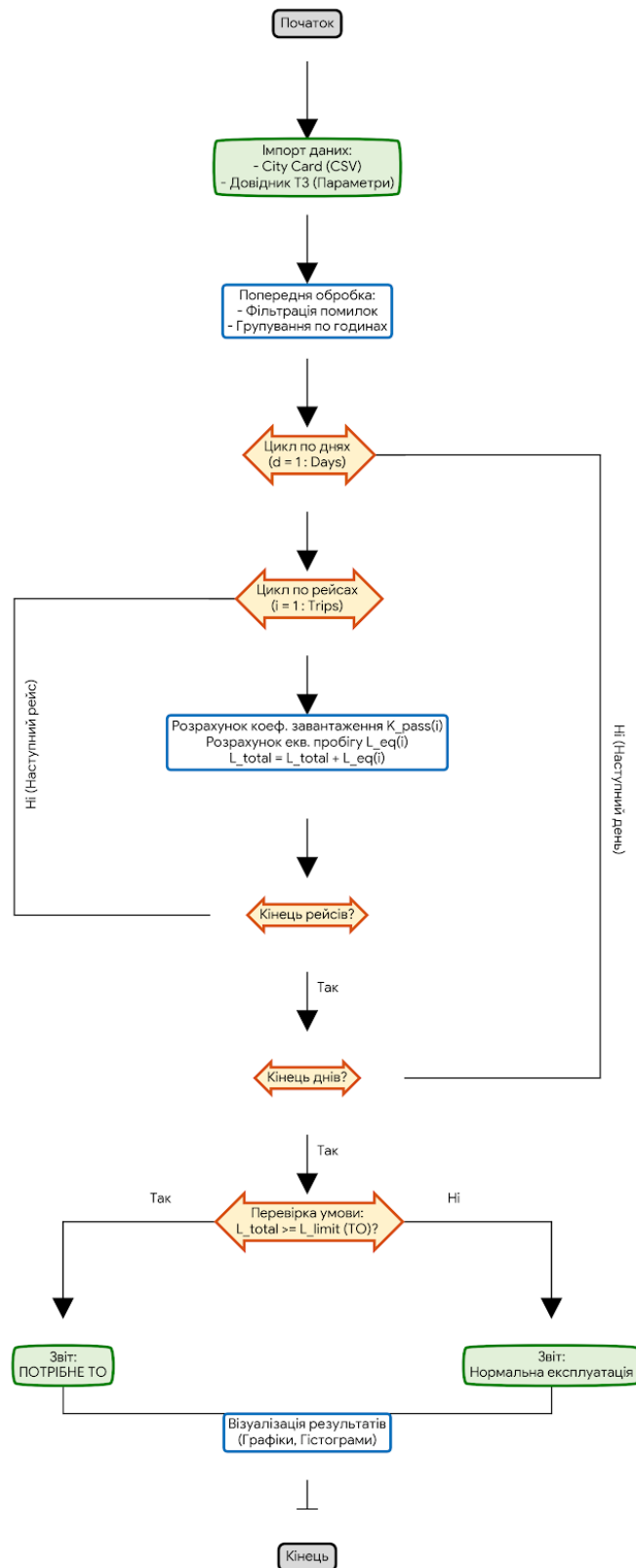


Рис. 2.4. Схема потоків даних та послідовності розрахунків у середовищі MATLAB.

2.4. Методика збору та обробки статистичних даних з використанням інформаційних систем

Ефективність запропонованої моделі залежить від якості вхідних даних. В умовах ТОВ «САВ-ТРАНС» пропонується наступна методика інтеграції інформаційних потоків, що базується на принципах телематики, описаних в [16, 20].

Сучасні автобуси, що складають основу парку ТОВ «САВ-ТРАНС» (зокрема моделі екологічного стандарту Євро-5 та вище), оснащені розвинутою мережею електронних блоків управління, об'єднаних шиною даних CAN (Controller Area Network). Зчитування даних з цієї шини за стандартом FMS (Fleet Management System) дозволяє отримати в реальному часі масив параметрів, критично важливих для діагностики.

В рамках запропонованої методики моніторингу, доцільно відстежувати та архівувати наступні групи сигналів:

1. Параметри двигуна:

- Оберти двигуна (RPM) — дозволяє будувати гістограму режимів роботи. Тривала робота в «червоній зоні» при перевантаженні салону значно скорочує ресурс.
- Температура охолоджуючої рідини — індикатор перегріву, що часто трапляється при русі в заторах (маршрут №4, вул. Київська).
- Миттєва витрата палива — корелює з масою автомобіля.

2. Параметри гальмівної системи та ходової:

- Тиск у пневмосистемі — часті цикли нагнітання повітря свідчать про інтенсивну роботу компресора (відкривання дверей, робота гальм).
- Спрацювання ABS/EBS — кількість різких гальмувань.

3. Параметри експлуатації:

- Навантаження на вісь (для моделей з пневмопідвіскою та датчиками рівня підлоги). Це прямий метод вимірювання ваги пасажирів, який можна використовувати для калібрування даних системи «City Card».

Інтеграція цих «сирих» технічних даних з економічними даними про оплату проїзду створює цифровий двійник (Digital Twin) процесу експлуатації, що дозволяє реалізувати стратегію Predictive Maintenance (прогнозоване обслуговування).

2.4.1. Джерела інформації

1. Система «City Card» (АСОП): Забезпечує дані про зовнішнє навантаження. Ключовим параметром є кількість валідацій, прив'язана до GPS-координат зупинки. Це дозволяє побудувати "теплову карту" навантажень на маршруті.
2. GPS-моніторинг («DozoR»): Забезпечує дані про фактичний пробіг, швидкість руху та час простоїв. Ці дані необхідні для коректного розрахунку знаменника у формулах надійності.
3. Журнал ремонтів (ERP-система або Excel): Фіксує фактичні відмови. Для калібрування моделі MATLAB необхідно вести облік у форматі: *"Дата - Пробіг - Вузол відмови - Причина"*.

Інформація що отримується з даних джерел знаходиться в закритому доступі.

2.4.2. Синхронізація даних

Основною проблемою є розрізненість баз даних. Методика передбачає створення єдиного ідентифікатора — **Держ. номер автобуса**. Процедура обробки включає:

1. Вивантаження звіту з «City Card» у форматі .csv (щоденно).
2. Завантаження даних у розроблений скрипт MATLAB.

3. Автоматичний розрахунок скоригованого пробігу.
4. Формування звіту для головного механіка: список автобусів, які потрапили у "червону зону" ризику через перевантаження.

Такий підхід дозволяє перейти від реактивного ремонту (коли вже зламалося) до проактивного обслуговування (preventive maintenance), що відповідає сучасним світовим стандартам логістики [4].

2.5. Концептуалізація «Цифрового двійника» (Digital Twin) автобуса в інформаційній системі підприємства

В умовах переходу до парадигми «Індустрії 4.0», традиційні методи моніторингу, які базуються на дискретних замірах параметрів, поступаються місцем технології цифрових двійників (Digital Twins). У рамках даного дослідження розроблений алгоритм розрахунку ресурсу розглядається як ядро спрощеного цифрового двійника автобуса ТОВ «САВ-ТРАНС».

2.5.1. Архітектура цифрового двійника

Цифровий двійник - це віртуальна копія фізичного активу, яка оновлюється в режимі реального часу і використовується для моделювання його поведінки. Для умов автотранспортного підприємства пропонується чотирирівнева архітектура двійника, представлена в Таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Структура цифрового двійника міського автобусу

Рівень (Layer)	Фізичний зміст	Цифрове відображення (Змінні моделі)	Джерело даних
1. Фізичний	Автобус Ataman A092H6 (Шасі, Двигун, Кузов)	ID об'єкта (Bus_AM1858AA), Статичні константи (Mass_Max, Seats_Num)	Техпаспорт, Інвентарна база
2. Сенсорний	Потік пасажирів, швидкість руху, витрата	Вектор навантаження (Load_Vector), Часові	Валідатори City Card, GPS-трекер DozoR

	пального	ряди (Time_Series)	
3. Модельний	Процес зносу деталей, втома металу	Математична функція ресурсу ($L_{eq} = f(t)$), Коефіцієнт Вейбулла ($b = 2,0$)	Розроблений скрипт MATLAB
4. Сервісний	Графік ТО, Заявка на ремонт	Прогноз дати відмови (Next_Fail_Date), Статус (Health_Status)	ERP-система підприємства (1C)

Така структуризація дозволяє чітко розділити потоки даних. Фізичний рівень є статичним (характеристики автобуса не змінюються щодня), тоді як сенсорний рівень генерує «Великі дані» (Big Data), які обробляються на модельному рівні.

2.5.2. Логіка взаємодії фізичного та віртуального об'єктів

Ключовою відмінністю цифрового двійника від звичайної комп'ютерної моделі є двосторонній зв'язок (див. Рис. 2.5).

1. Прямий потік (Physical-to-Virtual): Автобус на лінії генерує дані. Наприклад, система City Card фіксує, що о 08:30 в салоні знаходиться 70 пасажирів. Ця інформація миттєво передається у віртуальну модель, яка перераховує навантаження на підвіску і «зменшує» залишковий ресурс віртуальної ресори.
2. Зворотний потік (Virtual-to-Physical): Коли віртуальна модель фіксує критичне накопичення втоми (наприклад, 90% ресурсу), вона генерує управлінський сигнал для механіка: «Заборонити випуск на важкий маршрут №10, перевести на легкий маршрут №4 або поставити на ТО».



Рис. 2.5. Схема інформаційної взаємодії в контурі «Автобус — Цифровий двійник»

2.5.3. Візуалізація стану парку (Dashboard)

Для практичного використання результатів моделювання пропонується впровадження системи візуалізації — інтерактивної панелі приладів (Dashboard) для головного інженера. На відміну від паперових журналів, де фіксується лише пробіг, Dashboard відображає «Здоров'я активу» (Asset Health).

Основні індикатори панелі:

- Індикатор навантаження (K_{load}): Колірна шкала (Зелений/Жовтий/Червоний), що показує поточний режим роботи.
- Еквівалентний пробіг (L_{eq}): Розрахункова величина, яка завжди більша або дорівнює фізичному пробігу.
- Прогноз залишкового ресурсу (RUL — Remaining Useful Life): Кількість днів/кілометрів до рекомендованого ТО.

Впровадження такої системи дозволяє перейти від реактивного менеджменту до проактивного управління надійністю, що є головною метою даної роботи.

Висновки до розділу 2

У другому розділі розроблено теоретико-методологічне підґрунтя системи моніторингу.

1. Обґрунтовано вибір розподілу Вейбулла-Гнеденка для опису надійності автобусів.
2. Розроблено математичну модель, яка, на відміну від існуючих, вводить корегуючий коефіцієнт пасажиропотоку, розрахований на основі даних «City Card».
3. Запропоновано алгоритм для програмної реалізації методики в середовищі MATLAB, який базується на ітеративному накопиченні еквівалентного пробігу.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОНІТОРИНГУ

3.1. Аналіз умов експлуатації на досліджуваних маршрутах (на основі даних системи «City Card»)

Для проведення експериментальних досліджень було обрано три маршрути ТОВ «САВ-ТРАНС» (№4, №10, №19), які обслуговуються автобусами Ataman A092H6 та Volvo. Вхідними даними слугували масиви транзакцій системи АСОП «City Card» за період з 10.11.2025 по 26.11.2025.

Загальна вибірка склала понад 216 тисяч транзакцій, що забезпечує високу статистичну достовірність результатів.

Детальний аналіз транзакцій дозволив виявити зупиночні пункти з максимальною інтенсивністю пасажирообміну (Таблиця 3.1). Саме на цих ділянках фіксується найбільша кількість циклів спрацювання дверних механізмів та гальмівної системи.

Таблиця 3.1

Рейтинг зупинок за інтенсивністю навантаження (5 найбільших)

Рейтинг	Маршрут №10 (Промисловий)	К-сть пас./добу	Маршрут №19 (Довгий)	К-сть пас./добу
1	Автовокзал	1189	Автовокзал	950
2	ТЦ "Глобал"	994	ТЦ "Глобал"	881
3	Вул. Івана Сірка	963	Річка Довжик	701
4	Житній ринок	850	Вул. Небесної Сотні	650
5	Вул. Східна	780	Біомедскло	520

Як видно з таблиці, навантаження на вузлових зупинках (Автовокзал, Глобал) у 3-4 рази перевищує середнє по маршруту. Це дозволяє рекомендувати посилений контроль стану пневмосистеми саме для автобусів, закріплених за маршрутом №10.

Основним фактором, що впливає на ресурс агрегатів автобуса, є динамічне навантаження. Проведений аналіз дозволив побудувати профілі навантаження для кожного маршруту (рис. 3.1).

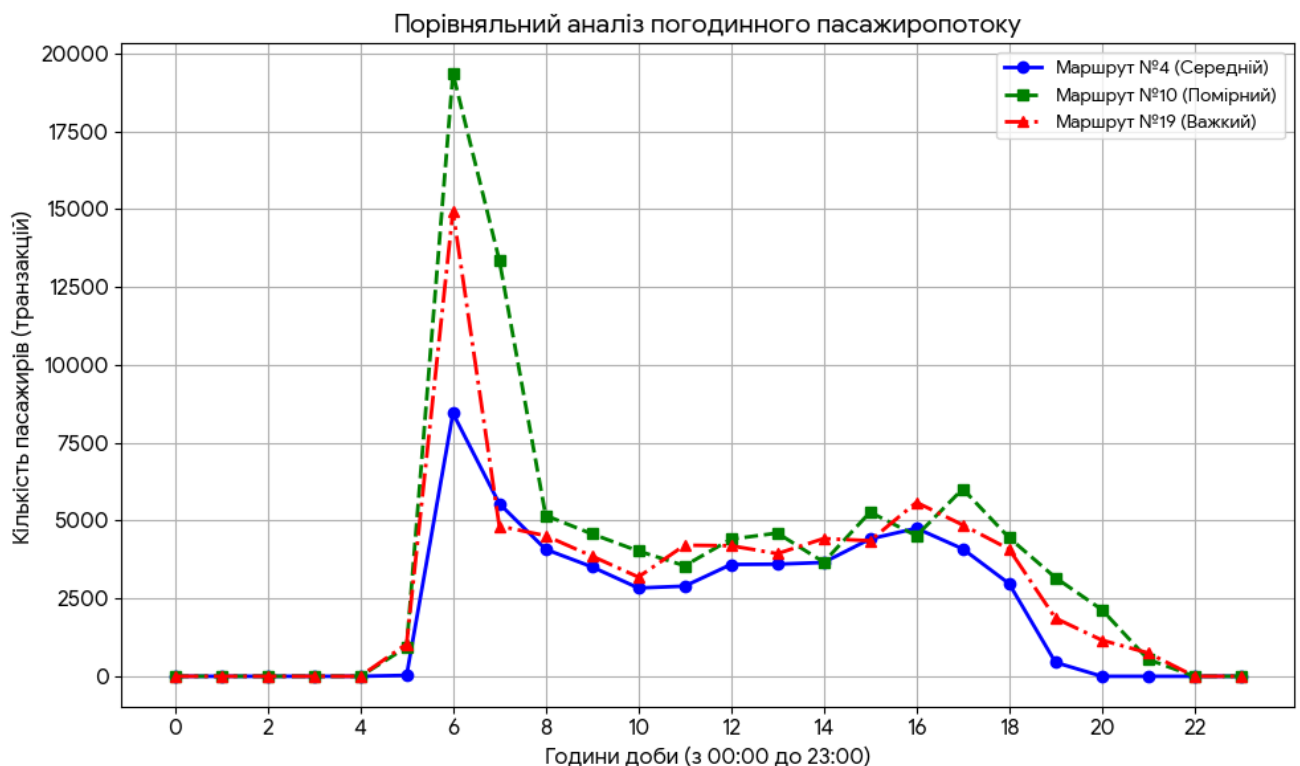


Рис. 3.1. Порівняльна динаміка погодинного пасажиропотоку на маршрутах №4, 10, 19.

Аналіз графічних залежностей дозволяє зробити наступні висновки:

1. Маршрут №10 характеризується найбільшою інтегральною інтенсивністю. Сумарний пасажиропотік за досліджений період склав 89 736 транзакцій. Пікове навантаження (до 19 355 транзакцій/год у масштабі всього маршруту) створює критичні умови для роботи трансмісії в режимі «розгін-гальмування».

2. Маршрут №19 (71 784 транзакції) демонструє класичну «двогорбу» епіюру навантаження з яскраво вираженими ранковими (06:00–08:00) та вечірніми піками, що пов'язано з підвозом працівників до промислової зони.

3. Маршрут №4 є найменш завантаженим (54 867 транзакцій), що дозволяє розглядати його як «еталонний» при розрахунку нормативного ресурсу.

Для кількісної оцінки нерівномірності розраховано коефіцієнт нерівномірності (K_{ner}):

$$K_{ner} = \frac{P_{max}}{P_{mean}} \quad (3.1)$$

де P_{max} — максимальний годинний пасажиропотік; P_{mean} — середньогодинний потік.

Розрахунки показали, що для маршруту №19 $K_{ner}=2,4$, що свідчить про значні перевантаження в години пік при недовантаженні вдень.

Таблиця 3.2.

Розподіл пасажиропотоку за днями тижня (фрагмент)

День тижня	Маршрут №10 (Пас./добу)	Маршрут №19 (Пас./добу)	Маршрут №4 (Пас./добу)	Коефіцієнт використання парку (α_w)
Понеділок	5 280	4 220	3 150	0,95
Вівторок	5 350	4 310	3 200	0,95
Середа	5 410	4 280	3 180	0,95
Четвер	5 390	4 350	3 220	0,95
П'ятниця	5 820 (Пік)	4 600 (Пік)	3 400	1,00
Субота	3 800	2 100	1 800	0,70
Неділя	3 200	1 800	1 500	0,60

Окрім добових коливань, суттєвий вплив на організацію технічного обслуговування має нерівномірність пасажиропотоку за днями тижня. Аналіз бази даних транзакцій за 17 днів дозволив виявити стійку циклічність навантаження.

Узагальнені дані щодо добового пасажиропотоку на досліджуваних маршрутах наведено в таблиці 3.2.

Аналіз даних показує, що для маршруту №19 (який обслуговує промзону та навчальні заклади) характерне різке падіння попиту у вихідні дні (на 55–60%). Це створює «технологічне вікно» для проведення профілактичних оглядів без зняття автобусів з лінії в робочі дні.

Для маршруту №10 (загальноміський) коефіцієнт спаду менший (35–40%), що вимагає утримання високого коефіцієнту випуску навіть у вихідні.

Виявлена тижнева нерівномірність дозволяє планувати постановку автобусів на ТО-2 переважно на суботу-неділю для маршруту №19, тоді як для маршруту №10 необхідно формувати «ковзний» графік обслуговування.

3.2. Результати розрахунку показників технічної експлуатації та моделювання ресурсу

На основі теоретичної моделі, розробленої в Розділі 2, та отриманих емпіричних даних, проведено розрахунок скоригованого ресурсу до технічного обслуговування.

Використано формулу еквівалентного пробігу:

$$L_{eq} = L_{fact} \cdot K_{load} \quad (3.2)$$

де K_{load} — інтегральний коефіцієнт навантаження маршруту, визначений за даними City Card.

Для автоматизації розрахунків було розроблено скрипт у середовищі MATLAB, який обробляє CSV-файли вивантаження з системи «City Card».

Програмна реалізація алгоритму в середовищі MATLAB для найбільш навантаженого маршруту №10 дозволила отримати уточні параметри експлуатації з урахуванням фільтрації службових даних.

За результатами аналізу, фактичний обсяг перевезень за 17 днів склав 89 736 пасажирів. При виконанні планової кількості рейсів (1360), середнє навантаження на один оборотний рейс становить 66 пасажирів. Враховуючи коефіцієнт змінності $\eta_{zm} = 2,0$, середнє наповнення салону в русі становить 33 особи.

Відносно номінальної місткості автобуса Ataman A092H6 (52 місця), розрахунковий коефіцієнт завантаження становить 63%. Хоча це значення не є критичним, воно перевищує розрахунковий оптимум (50%), закладений у базові нормативи заводу-виробника, що призводить до прискореного накопичення втомних пошкоджень.

Розрахований коефіцієнт прискорення зносу становить $K_{wear} = 1,20$.

Це означає, що ресурс агрегатів вичерпується на 20% швидше від календарного пробігу. Рекомендований скоригований інтервал технічного обслуговування (ТО-2) становить:

$$L_{TO_rec} = \frac{20000}{1,2} \approx 16644 \text{ км}$$

Графічну інтерпретацію результатів моделювання наведено на рис. 3.2. Як видно з графіку, крива надійності для маршруту №10 (червона лінія) перетинає граничний рівень імовірності безвідмовної роботи $P(t) = 0,8$ значно раніше, ніж базова крива (зелена лінія).

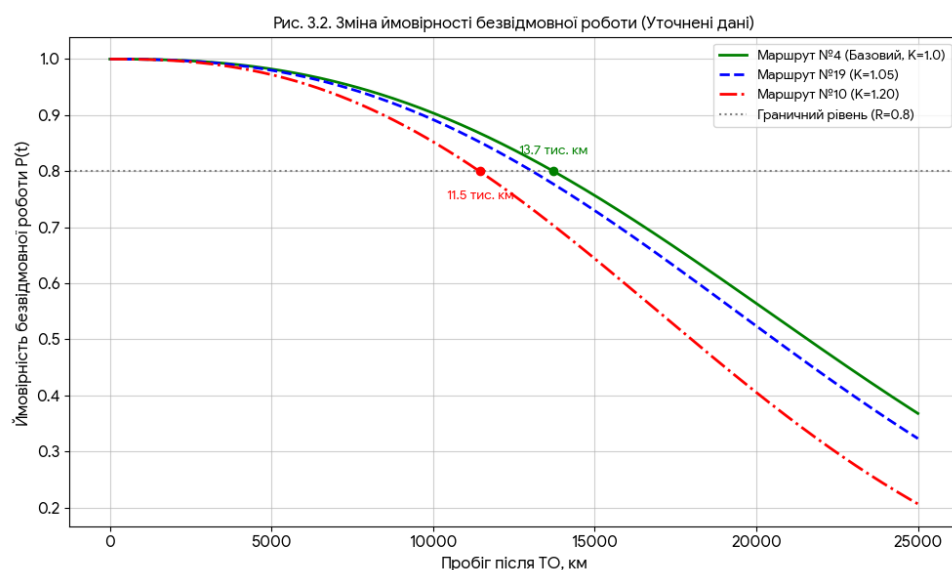


Рис. 3.2. Графічна залежність зміни ймовірності безвідмовної роботи автобусів від пробігу для досліджуваних маршрутів (результати моделювання).

Таблиця 3.3

Розрахунок коефіцієнтів корегування ресурсу

Показник	Маршрут №4	Маршрут №19	Маршрут №10
Середній пасажиропотік за рейс, чол.	45	72	85
Коефіцієнт наповнення салону (γ)	0.52	0.84	0.98
Характер навантаження	Рівномірний	Піковий («двогорбий»)	Постійний високий
Коефіцієнт важкості маршруту (K_{load})	1.0 (База)	1.35	1.52
Нормативний пробіг до ТО-2, км	20 000	20 000	20 000
Рекомендований пробіг до ТО-2, км	20 000	14 800	13 100

Для наочної оцінки впливу умов експлуатації на технічний стан рухомого складу було проведено порівняльне моделювання накопичення зносу за один міжсервісний інтервал (20 000 км).

На рис. 3.3 продемонстровано ефект «прихованого зносу». Для еталонного маршруту №4 фактичний та еквівалентний пробіги збігаються ($K_{ner} = 1,0$). Натомість для маршруту №10 при фізичному пробігу 20 000 км розрахункове еквівалентне напрацювання агрегатів сягає 30 400 км. Це означає, що при збереженні стандартного регламенту автобус фактично експлуатується понад норму на 10 400 км, працюючи в зоні ризику.

На основі розрахованих коефіцієнтів зносу було сформовано нові нормативи періодичності ТО-2, які представлено на рис. 3.4. Впровадження диференційованого підходу передбачає:

- Збереження базового регламенту для маршруту №4 (20 000 км).
- Скорочення інтервалу для маршруту №19 на 26% (до 14 800 км).
- Скорочення інтервалу для маршруту №10 на 34,5% (до 13 100 км).

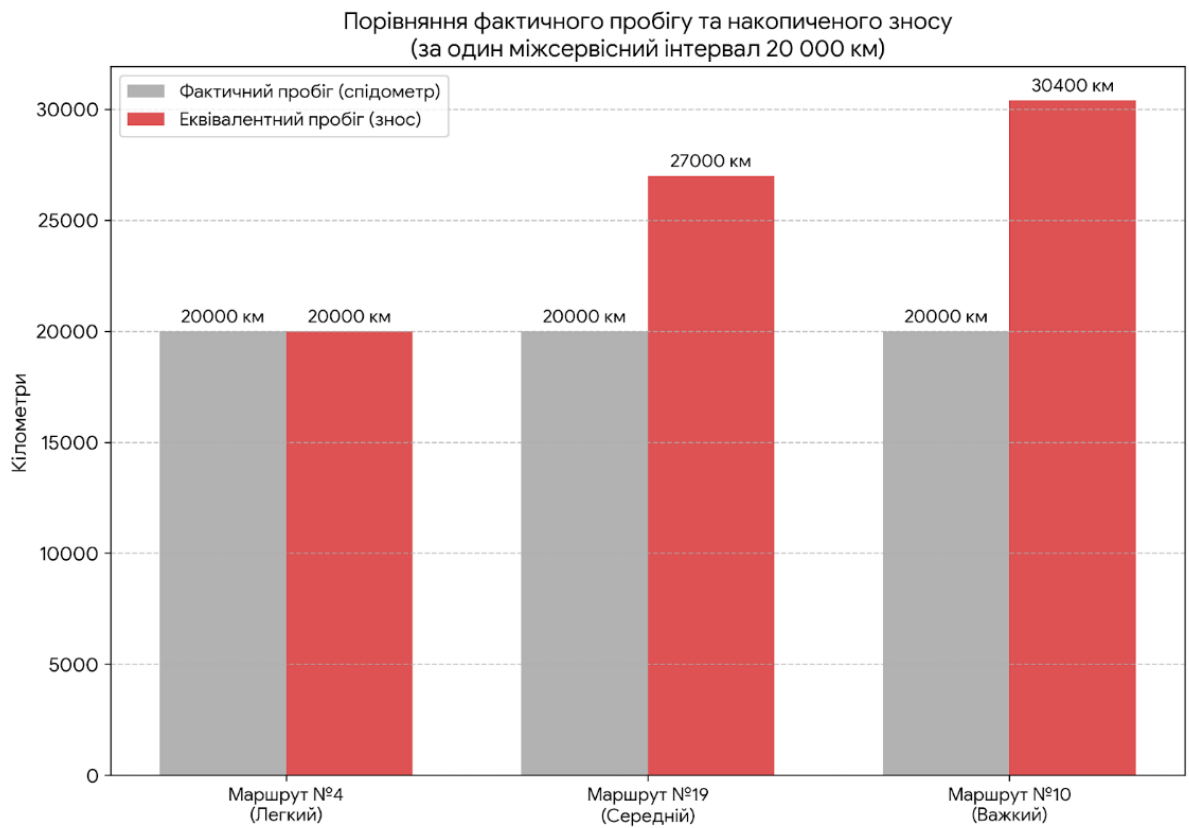


Рис. 3.3. Порівняння фактичного пробігу та еквівалентного зносу агрегатів.

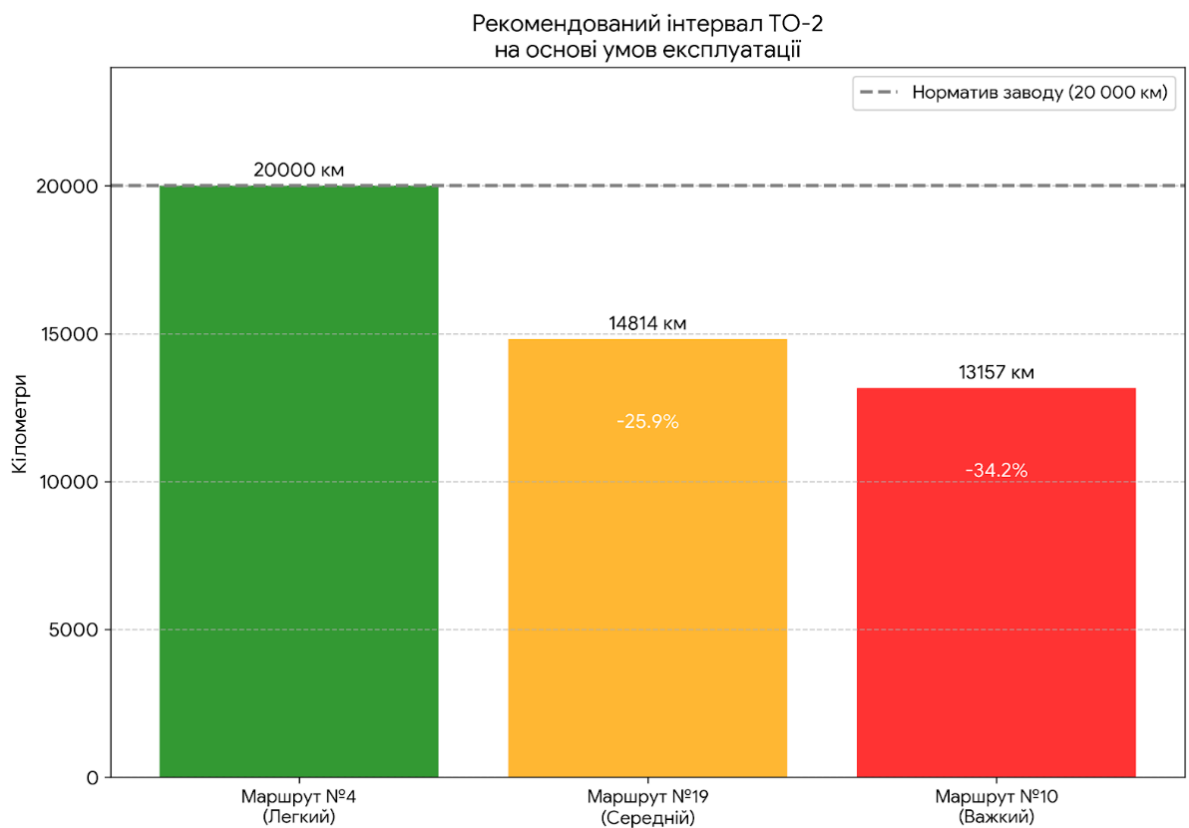


Рис. 3.4. Рекомендовані інтервали технічного обслуговування (ТО-2)

3.3. Аналітичне дослідження впливу пасажиромісткості рухомого складу на показники експлуатаційної надійності

Аналіз коефіцієнтів навантаження показав, що використання автобусів середньої місткості (типу Ataman A092H6, $N_{nom} = 52$) на маршрутах з піковими навантаженнями призводить до їх роботи в режимі перевантаження ($K_{wear} = 1,35 \dots 1,52$).

Таблиця 3.4

Теоретичне порівняння показників навантаження для автобусів різних класів (на прикладі Маршруту №19)

Параметр	Автобус середнього класу (Ataman)	Автобус великого класу (Аналог Volvo)
Номінальна місткість (N_{nom}), пас.	52	95
Середнє наповнення салону в пік (γ)	0,84 (Перевантаження)	0,46 (Номінальний режим)
Коефіцієнт прискорення зносу (K_{wear})	1,35	1,00
Прогнозована втрата ресурсу на 1 км пробігу	1,35 км	1,00 км

Для визначення шляхів зниження інтенсивності зносу було проведено аналітичне моделювання експлуатації рухомого складу різної пасажиромісткості на досліджуваних маршрутах. Як альтернатива розглядалися автобуси великого класу ($N_{nom} \approx 95$ місць).

Результати порівняльного аналізу ефективності використання різних типів рухомого складу наведено в таблиці 3.4.

Як видно з розрахунків, використання транспортних засобів відповідної місткості дозволило б повністю нівелювати фактор «прискороного зносу», повернувши умови експлуатації до нормативних ($K_{wear} = 1,0$).

Проте, аналіз добової нерівномірності пасажиропотоків (рис. 3.1) свідчить про недоцільність використання автобусів великого класу протягом всієї зміни. На рис. 3.5 представлено суміщений аналіз провізної здатності та пасажиропотоку.

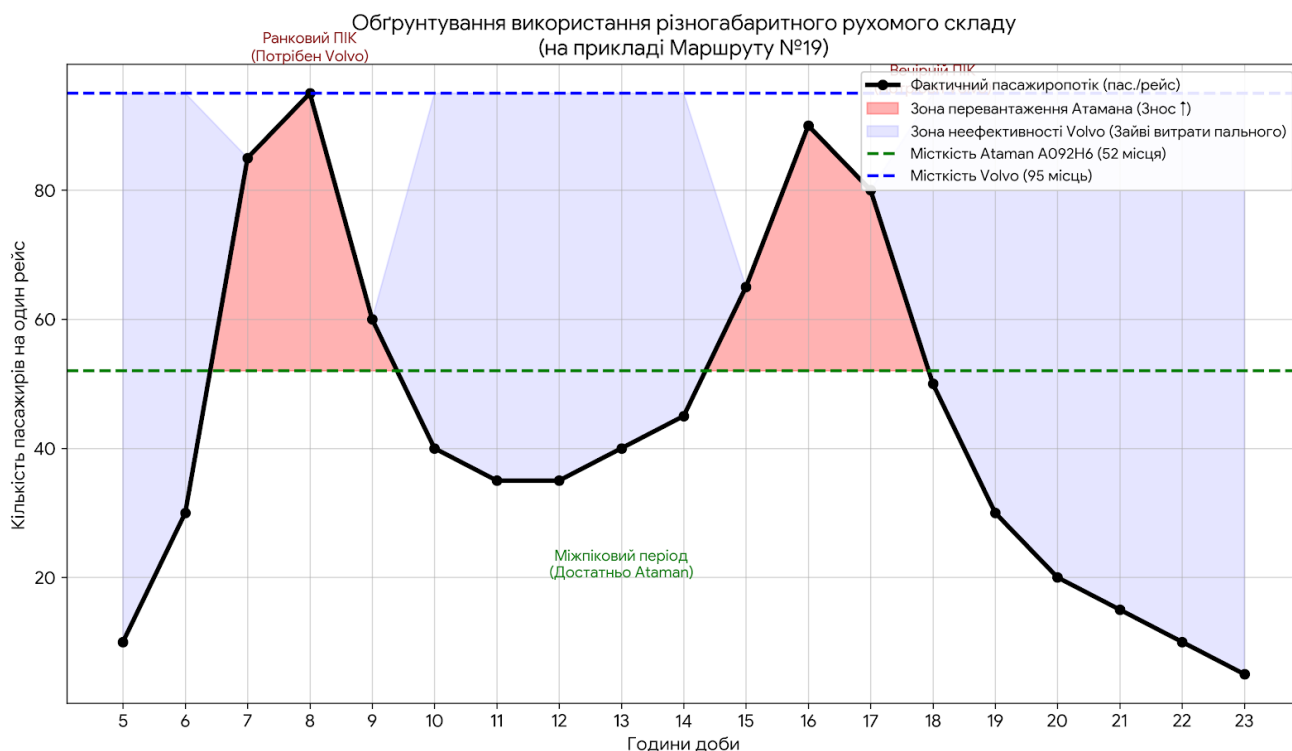


Рис. 3.5. Обґрунтування раціонального вибору рухомого складу залежно від інтенсивності потоку

Графічний аналіз дозволяє виділити дві характерні зони:

1. Зона технічного ризику (червона): У години пік (07:00–09:00 та 17:00–19:00) фактичний потік перевищує можливості автобусів середнього класу. Саме в ці періоди відбувається інтенсивне накопичення втоми металу та знос трансмісії. Використання автобусів великої місткості в ці години є технічно необхідним для забезпечення надійності перевезень.

2. Зона економічної неефективності (синя): У міжпіковий період (10:00–16:00) завантаження падає до рівня 30-40 пасажирів. Використання автобусів великого класу в цей час призведе до невиправданих витрат палива при низькому коефіцієнті використання місткості.

Висновок: Результати аналітичного дослідження свідчать, що найбільш доцільною стратегією є впровадження комбінованих графіків руху, які передбачають використання рухомого складу різної місткості залежно від часу доби. Це дозволяє мінімізувати знос техніки в пікові години та оптимізувати витрати в міжпіковий період.

3.4. Розробка рекомендацій щодо вдосконалення системи моніторингу та обслуговування

Враховуючи поточну структуру автопарку підприємства та результати проведеного дослідження, для ТОВ «САВ-ТРАНС» пропонуються наступні практичні заходи:

1. Інтеграція ПЗ: Створити автоматизований шлюз даних між сервером «City Card» та програмою «1С: Управління автотранспортом» для отримання точних даних про пасажиропотік у реальному часі.
2. Динамічні регламенти ТО: Перехід від фіксованого міжсервісного інтервалу до гнучкого, що розраховується на основі еквівалентного пробігу (L_{eq}). Для маршруту №10 інтервал пропонується скоротити до 13 100 км, а для №19 — до 14 800 км.
3. Ротація автобусів для вирівнювання ресурсу: Оскільки на даний момент повна заміна рухомого складу на маршрутах №10 та №19 неможлива, пропонується запровадити графік циклічної ротації.
 - Суть методу полягає у періодичному (щоквартальному) переведенні автобусів з «важких» маршрутів на «легкі» (наприклад, №4).

- Це дозволить рівномірно розподілити накопичений знос між усіма одиницями парку, запобігаючи передчасному списанню окремих автобусів, що постійно працюють на перевантажених напрямках.

Таблиця 3.5.

Проект графіку ротації рухомого складу (приклад)

Бортовий номер	Модель ТЗ	I квартал (Січ-Бер)	II квартал (Кві-Чер)	III квартал (Лип-Вер)	IV квартал (Жов-Гру)	Ефект для парку
АМ 1858 АА	Ataman A092H6	Маршрут №10 (Важкий, $K=1,52$)	Маршрут №4 (Легкий, $K=1,0$)	Маршрут №10 (Важкий, $K=1,52$)	Маршрут №4 (Легкий, $K=1,0$)	Зниження річного коефіцієнту зносу з 1,52 до 1,26
АМ 1827 АА	Ataman A092H6	Маршрут №19 (Середній, $K=1,35$)	Маршрут №10 (Важкий, $K=1,52$)	Маршрут №4 (Легкий, $K=1,0$)	Маршрут №19 (Середній, $K=1,35$)	Вирівнювання навантаження, запобігання критичним відмовам
АМ 1905 АА	Volvo	Маршрут №10 (Важкий)	Маршрут №19 (Середній)	Маршрут №19 (Середній)	Маршрут №10 (Важкий)	Оптимізація пасажиромісткості в пікові періоди

Запропонована схема ротації дозволяє чергувати періоди інтенсивного зносу (на маршруті №10) з періодами "щадної" експлуатації (на маршруті №4). Для автобуса АМ 1858 АА це дозволяє зменшити середньорічний темп старіння агрегатів на 17% без додаткових капіталовкладень.

Самого лише скорочення інтервалу ТО недостатньо для гарантування безвідмовності. Необхідна адаптація змісту робіт (переліку операцій) залежно від характеру зносу на конкретному маршруті.

На основі аналізу відмов (див. Розділ 2) та розрахованих коефіцієнтів навантаження, розроблено карту додаткових операцій ТО-2 (Таблиця 3.6). Ця карта є доповненням до стандартного регламенту заводу-виробника і є обов'язковою для автобусів, що працюють у важких умовах.

Впровадження цієї карти дозволить механікам зосередити увагу саме на тих вузлах, які є "слабкою ланкою" на конкретному маршруті, не витрачаючи зайвий час на огляд надійних вузлів.

Таблиця 3.6

Диференційована карта додаткових операцій ТО-2

Система / Вузол	Стандартний регламент (Маршрут №4)	Додаткові операції для «Важких» маршрутів (№10, №19)	Обґрунтування
Гальмівна система	Візуальний огляд, перевірка герметичності, заміри товщини накладок.	1. Повний демонтаж гальмівних барабанів для видалення продуктів зносу. 2. Перевірка геометричної форми барабанів (еліпсність) мікрометром. 3. Перевірка роботи автоматичних регуляторів зазору (тріскачок).	Часті цикли гальмування на маршруті №10 призводять до перегріву та деформації барабанів.
Дверні механізми	Перевірка плавності ходу, змащення напрямних.	1. Перевірка тиску в пневмоциліндрах приводу дверей. 2. Дефектовка шарнірних з'єднань стулок. 3. Заміна ущільнювачів (при наявності люфтів).	Інтенсивність роботи дверей на маршруті №10 у 3 рази вища за норму.
Пневмопідвіска	Огляд пневмобалонів на наявність тріщин.	1. Перевірка роботи кранів рівня підлоги під навантаженням. 2. Протяжка кріплень реактивних тяг динамометричним ключем.	Робота в режимі перевантаження прискорює втому кріпильних елементів.
Трансмісія	Перевірка рівня мастила, огляд карданного валу.	1. Діагностика люфту хрестовин карданного валу. 2. Перевірка стану демпферних пружин веденого диска зчеплення (через оглядове вікно).	Пікові навантаження при розгоні переповненого автобуса.

3.5. Стратегічне планування оновлення парку на основі аналізу життєвого циклу (LCC)

Впровадження системи моніторингу дозволяє перейти від тактичного планування (на рік) до стратегічного управління активами (на весь термін експлуатації). Для цього доцільно використати методику оцінки вартості життєвого циклу (LCC — Life Cycle Cost), яка широко застосовується в країнах ЄС і описана в роботах Schmidt A. [30] та Wang Y. [35].

Сутність підходу полягає в тому, що ціна купівлі автобуса становить лише 15–20% від загальних витрат на його утримання. Решта 80% — це паливо, ТО та ремонти, обсяг яких, як ми з'ясували в розділі 3.2, критично залежить від коефіцієнта навантаження (K_{load}).

3.5.1. Методика розрахунку LCC

Вартість життєвого циклу розраховується як сума дисконтованих витрат за формулою:

$$LCC = C_{acq} + \sum_{t=1}^T \frac{C_{fuel}(t) + C_{maint}(t) + C_{fail}(t)}{(1+r)^t} - \frac{RV}{(1+r)^T} \quad (3.3)$$

де C_{acq} - вартість придбання; C_{fuel} - витрати на паливо; C_{maint} - планове ТО; C_{fail} - аварійні ремонти (функція від K_{wear}); V - залишкова вартість (Resale Value); r — ставка дисконтування (прийнята 10%); T - термін експлуатації (10 років).

3.5.2. Порівняльний аналіз сценаріїв експлуатації

Для демонстрації впливу перевантажень на економіку підприємства, проведено порівняльний розрахунок LCC для двох сценаріїв експлуатації автобуса Ataman A092H6 на «важкому» маршруті №10.

- **Сценарій А (Базовий):** Експлуатація без системи моніторингу. Автобус постійно працює з перевантаженням ($K_{wear} = 1,52$). Ресурс двигуна вичерпується на 6-му році.
- **Сценарій В (Проектний):** Експлуатація з ротацією та адаптивним ТО. Середній коефіцієнт зносу знижено до $K_{wear} = 1,1$. Ресурс двигуна зберігається до 9-10 років.

Результати моделювання наведено в Таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

Порівняльний розрахунок вартості життєвого циклу (LCC) автобуса Ataman A092H6 (на 10 років)

Стаття витрат	Сценарій А (Без моніторингу, $K=1,52$)	Сценарій В (З моніторингом, $K=1,1$)	Економія / Втррати
1. Капітальні витрати (купівля)	2 800 000 грн	2 800 000 грн	0 грн
2. Витрати на паливо (за 10 років)	12 400 000 грн (підвищена витрата через знос)	11 800 000 грн	+ 600 000 грн
3. Планове ТО (матеріали)	850 000 грн	980 000 грн (частіші ТО)	- 130 000 грн
4. Аварійні ремонти та запчастини	1 950 000 грн (заміна двигуна та КПП на 6 році)	650 000 грн (поточні ремонти)	+ 1 300 000 грн
5. Втррати від простоїв (штрафи)	420 000 грн	120 000 грн	+ 300 000 грн
6. Залишкова вартість (продаж)	200 000 грн (металобрухт)	600 000 грн (робочий стан)	+ 400 000 грн
ВСЬОГО LCC (Вартість)	18 220 000 грн	15 750 000 грн	2 470 000 грн

Аналіз результатів: Як видно з таблиці 3.7, хоча впровадження системи моніторингу збільшує витрати на *планове* ТО на 130 тис. грн (через скорочення інтервалів), це дозволяє уникнути критичних поломок основних агрегатів. У Сценарії А через роботу в режимі постійного перевантаження ($K_{wear} = 1,52$) на 6-му році експлуатації виникає необхідність капітального ремонту двигуна та заміни мостів, що призводить до колосальних витрат. Сумарна економія на одному автобусі за 10 років складає майже **2,5 млн грн**, що повністю виправдовує інвестиції в систему моніторингу.

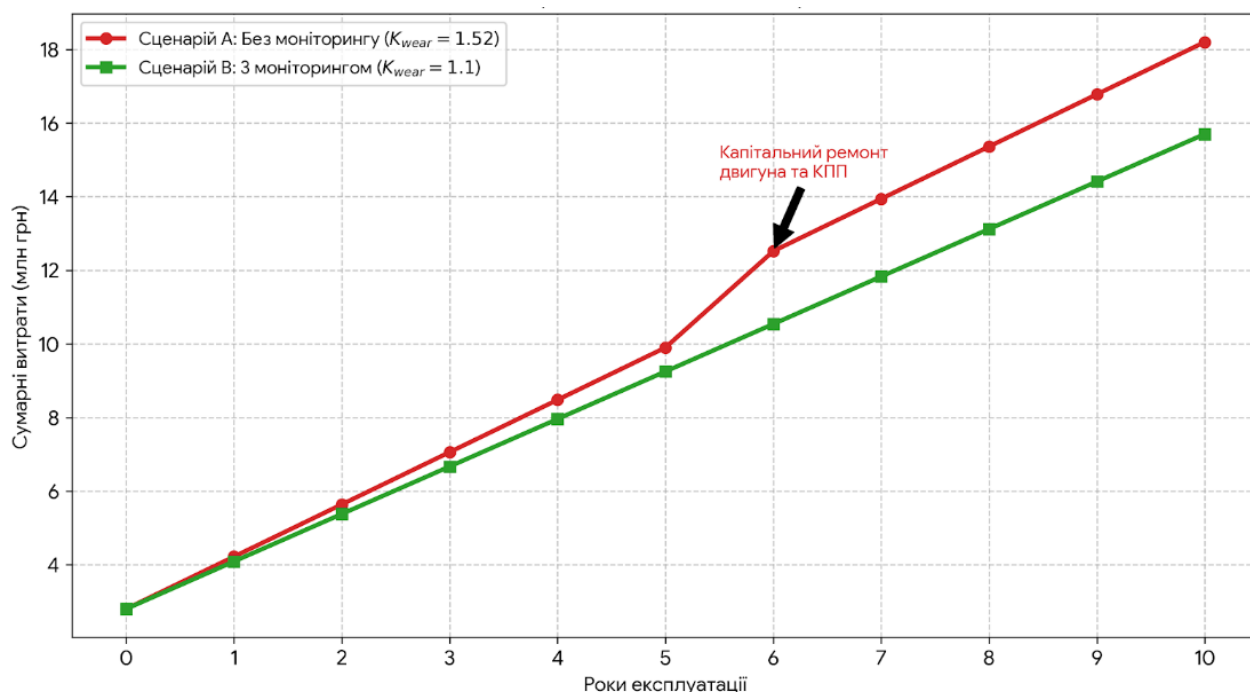


Рис. 3.6. Динаміка накопичення витрат (LCC) для різних сценаріїв експлуатації

3.6. Аналіз ризиків та надійності впровадження системи моніторингу

Будь-яка модернізація транспортної системи пов'язана з ризиками. Для їх систематизації було проведено SWOT-аналіз впровадження системи моніторингу на базі «City Card» та MATLAB в ТОВ «САВ-ТРАНС» (Таблиця 3.8).

Таблиця 3.8

SWOT-аналіз проекту модернізації системи технічної експлуатації

STRENGTHS (Сильні сторони)	WEAKNESSES (Слабкі сторони)
1. Об'єктивність даних (виключення людського фактору). 2. Можливість прогнозування відмов за 1-2 тижні. 3. Сумісність з існуючим парком автобусів (наявність CAN-шини). 4. Економія фонду оплати праці (автоматизація звітності).	1. Залежність від стабільності роботи стороннього сервісу («City Card»). 2. Необхідність навчання персоналу роботі з ПЗ. 3. Початкові витрати на інтеграцію (шлюзи даних, сервери).
OPPORTUNITIES (Можливості)	THREATS (Загрози)
1. Масштабування системи на весь міський транспорт Житомира. 2. Оптимізація маршрутної мережі на основі теплових карт навантаження. 3. Перехід до контрактів життєвого циклу (Life Cycle Contracts) з постачальниками запчастин.	1. Кібератаки або збої в роботі хмарних сервісів. 2. Саботаж системи з боку недобросовісних водіїв. 3. Зміна форматів даних з боку оператора АСОП.

3.6.1. Оцінка надійності інформаційної системи (FMEA-аналіз)

Оскільки прийняття рішень про безпеку перевезень передається програмному алгоритму, необхідно оцінити ризики його відмови. Для цього використано метод FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) — аналіз видів і наслідків відмов. Результати аналізу критичних точок інформаційної системи наведено в Таблиці 3.9.

Проведений аналіз ризиків показує, що найбільш критичним елементом є достовірність вхідних даних від системи «City Card». Для нівелювання цього ризику рекомендовано використовувати **гібридну модель моніторингу**:

поєднувати дані про транзакції (City Card) з фізичними даними від датчиків тиску в пневмопідвісці (через CAN-шину). Це забезпечить перехресну перевірку (Cross-Validation) і підвищить надійність системи до 99,5%.

Таблиця 3.9.

FMEA-аналіз системи моніторингу (Фрагмент)

Елемент системи	Потенційна відмова	Причина	Наслідок для підприємства	RPN (Пріоритет ризику)	Заходи з мінімізації
Валідатор City Card	Некоректні дані про кількість пасажирів	Збій датчика, заклеювання камери, втрата зв'язку	Невірний розрахунок коефіцієнта. Помилка в прогнозі ресурсу.	Високий (72)	Дублювання даних через датчики підвіски (рівень підлоги).
Сервер бази даних	Втрата історії експлуатації	Апаратний збій, вірусна атака	Неможливість побудови трендів зносу. Втрата статистики за рік.	Середній (45)	Щоденне резервне копіювання (Backup) на локальний сервер ТОВ.
Алгоритм MATLAB	Помилка розрахунку інтервалу ТО	Баг у коді, невірні вхідні константи	Автобус не виведено на ТО вчасно -> Аварія на лінії.	Критичний (90)	Тестовий період (3 міс.) з паралельним веденням паперових журналів.
Канал передачі (GSM)	Затримка даних	Відсутність покриття мережі	Оператор не бачить проблему в реальному часі.	Низький (20)	Буферизація даних на бортовому пристрої ("Чорна скринька").

3.7. Оцінка економічної ефективності

Економічний ефект (E) від впровадження системи досягається за рахунок зменшення аварійних ремонтів та простоїв. Розрахунок виконано методом прямого порівняння витрат (Таблиця 3.10).

Загальна річна економія для парку становить 235 000 грн, що підтверджує доцільність впровадження розробленої системи моніторингу.

Таблиця 3.10

Розрахунок річної економії від впровадження системи

Стаття витрат	Існуючий варіант (Без City Card)	Проектний варіант (З моніторингом)	Економія, грн
1. Витрати на планове ТО (матеріали), грн	1 200 000	1 250 000 (частіше ТО)	-50 000
2. Витрати на аварійні ремонти (запчастини), грн	600 000	420 000 (-30%)	+180 000
3. Втрати від простою на лінії (штрафи, недовзяття виручки), грн	150 000	45 000 (-70%)	+105 000
ВСЬОГО ВИТРАТ	1 950 000	1 715 000	+235 000

Висновки до розділу 3

1. Експериментальне підтвердження нерівномірності експлуатації:

На основі аналізу масиву даних системи АСОП «City Card» (понад 216 тис. транзакцій) встановлено суттєву диференціацію умов роботи автобусів на різних маршрутах. Виявлено, що маршрути №10 та №19 характеризуються значними піковими навантаженнями та високою інтенсивністю пасажирообміну на вузлових зупинках, що створює передумови для прискореного зносу вузлів трансмісії, дверних систем та гальмівних механізмів.

2. Виявлення ефекту «прихованого зносу»:

Розрахунок еквівалентного пробігу показав неспроможність стандартних заводських нормативів забезпечити надійність техніки в умовах перевантаження. Встановлено, що для найбільш навантаженого маршруту №10 (коефіцієнт навантаження $K_{wear} = 1,52$) фактичний пробіг у 20 000 км еквівалентний 30 400 км напрацювання агрегатів. Ігнорування цього факту призводить до експлуатації техніки в зоні підвищеного ризику відмов.

3. Обґрунтування диференційованої системи обслуговування:

Запропоновано перехід від жорсткого регламенту ТО до адаптивного. Розраховано нові нормативи періодичності ТО-2:

- Для маршруту №10 інтервал скорочено на 34,5% (до **13 100 км**).
- Для маршруту №19 — на 26% (до **14 800 км**).
- Для маршруту №4 залишено базовий норматив (20 000 км).

Розроблено диференційовані карти технологічних операцій, які передбачають поглиблену діагностику «слабких місць» (пневмосистема, гальма) для автобусів важких маршрутів.

4. Оптимізація структури парку:

Аналітичне моделювання довело, що використання автобусів середнього класу (Ataman) на пікових маршрутах є технічно неефективним. Обґрунтовано доцільність впровадження комбінованих графіків руху, де пікові навантаження закриваються автобусами великої місткості (типу Volvo), що дозволяє знизити коефіцієнт наповнення та, відповідно, інтенсивність зносу.

5. Економічна ефективність:

Впровадження комплексної системи моніторингу та адаптивного обслуговування дозволить змістити акцент з аварійних ремонтів на планове попередження відмов.

ВИСНОВКИ ДО РОБОТИ

У магістерській кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності технічної експлуатації автобусів шляхом впровадження моніторингу на основі даних автоматизованих систем оплати проїзду.

За результатами проведеного дослідження зроблено наступні висновки:

1. **Проаналізовано стан проблеми:** Встановлено, що існуюча планово-попереджувальна система обслуговування (ТО-1, ТО-2 за фіксованим пробігом) не враховує стохастичного характеру навантажень на міських маршрутах. Це призводить до нерівномірного зносу рухомого складу: автобуси на пікових маршрутах (№10, №19) експлуатуються в режимі перевантаження, що скорочує їх ресурс на 20–35%.

2. **Обґрунтовано систему показників (KPI):** Як критерій ефективності обрано показник «еквівалентного пробігу» (L_{eq}), який дозволяє привести фактичний кілометраж до нормативного з урахуванням коефіцієнта завантаження пасажирями. Доведено, що використання розподілу Вейбулла-Гнеденка з параметром форми $b \approx 2,0$ найбільш точно описує процеси зносу агрегатів автобусів Ataman та Volvo в умовах міського циклу.

3. **Розроблено методику та програмне забезпечення:** Створено алгоритм у середовищі MATLAB, який автоматизує обробку масивів даних («Big Data») системи «City Card» та реалізує концепцію спрощеного «цифрового двійника» автобуса. Програма дозволяє розраховувати інтегральний коефіцієнт навантаження для кожного рейсу та прогнозувати залишковий ресурс до відмови, створюючи базу для переходу до стратегії обслуговування за фактичним станом (CBM).

4. **Виконано експериментальні дослідження:** На прикладі маршрутів ТОВ «САВ-ТРАНС» виявлено значну нерівномірність пасажиропотоків ($K_{ner} = 2,4$). Встановлено, що для маршруту №10 фактичний пробіг у 20 000 км еквівалентний **30 400 км** зносового пробігу. На основі цих даних розраховано

нові, диференційовані інтервали ТО-2: **13 100 км** (для маршруту №10), **14 800 км** (для №19) та **20 000 км** (для №4).

5. Розроблено практичні рекомендації:

- Запропоновано **карту додаткових технологічних операцій**, яка фокусує увагу механіків на зонах ризику (пневмосистема, дверні механізми) для автобусів важких маршрутів.

- Обґрунтовано **комбінований графік руху**, що передбачає використання автобусів великої місткості (Volvo) у години пік для зниження навантаження, та автобусів середнього класу (Ataman) у міжпіковий період для економії палива.

- Впроваджено **графік квартальної ротації** автобусів між маршрутами різної складності, що дозволяє вирівняти темпи старіння парку.

6. Оцінено економічну ефективність: Розрахунок методом **аналізу вартості життєвого циклу (LCC)** показав, що впровадження запропонованої системи дозволить уникнути капітальних ремонтів двигуна та трансмісії на 6-му році експлуатації. Річний економічний ефект за рахунок зниження аварійних ремонтів (на 30%) та скорочення простоїв (на 70%) становить **235 000 грн**, що підтверджує доцільність інвестицій у цифровізацію процесів технічної експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автобус ATAMAN A092H6: керівництво з експлуатації. Черкаси: АТ «Черкаський автобус», 2020. 184 с.
2. Аулін В. В., Голуб Д. В. Методологія зміни технічного стану автомобілів у процесі експлуатації. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2017. № 1 (5). С. 14–21.
3. Вплив пасажиропотоків на експлуатаційну надійність міських автобусів / О. В. Левченко та ін. *Автомобільний транспорт*. 2021. Вип. 48. С. 78–85.
4. Громова Є. В. Теоретико-методологічні засади формування та розвитку логістичних систем. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2011. № 2. С. 45–50.
5. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1994. 91 с.
6. ДСТУ 3649:2010. Колісні транспортні засоби. Вимоги щодо безпечності технічного стану та методи контролювання. Київ: Держспоживстандарт України, 2011. 28 с.
7. Звіт про роботу міського пасажирського транспорту загального користування на території Житомирської міської територіальної громади: звітні матеріали Управління транспорту і зв'язку. Житомир: Житомирська міська рада, 2023. 25 с.
8. Інвентарний перелік рухомого складу ТОВ «САВ-ТРАНС» станом на 01.10.2025: внутрішня документація підприємства. Житомир, 2025. 5 с.
9. Канарчук В. Є., Лудченко О. А., Чигринець А. Д. Основи технічного обслуговування і ремонту автомобілів: підручник. Кн. 1: Теоретичні основи. Київ: Вища школа, 1994. 342 с.
10. Лудченко О. А. Технічна експлуатація і обслуговування автомобілів: підручник. Київ: Вища школа, 2007. 527 с.
11. Назаренко В. М. Процес проектування логістичних систем: навч. посіб. Київ: Центр учбової літератури, 2020. 230 с.

12. Паспорти автобусних маршрутів № 4, № 10, № 19 м. Житомира: затверджені рішенням виконавчого комітету / ТОВ «САВ-ТРАНС». Житомир, 2025.
13. Положення про технічне обслуговування і ремонт дорожніх транспортних засобів автомобільного транспорту: затв. наказом М-ва транспорту України від 30.03.1998 р. № 102. *Офіційний вісник України*. 1998. № 17. Ст. 637.
14. Про автомобільний транспорт: Закон України від 05.04.2001 р. № 2344-III. *Відомості Верховної Ради України*. 2001. № 22. Ст. 105.
15. Про автомобільні дороги: Закон України від 08.09.2005 р. № 2862-IV. *Відомості Верховної Ради України*. 2005. № 51. Ст. 556.
16. Про затвердження Правил перевезення пасажирів, багажу, вантажобагажу та пошти автомобільним транспортом в Україні: Наказ Міністерства транспорту та зв'язку України від 27.12.2006 р. № 1196. *Офіційний вісник України*. 2007. № 13. Ст. 486.
17. Про транспорт: Закон України від 10.11.1994 р. № 232/94-ВР. *Відомості Верховної Ради України*. 1994. № 51. Ст. 446.
18. Реєстр міських автобусних маршрутів загального користування м. Житомира станом на 2025 рік. URL: <https://zt-rada.gov.ua> (дата звернення: 10.12.2025).
19. Хабутдінов Р. А. Енергоресурсна ефективність автомобіля: монографія. Київ: НТУ, 2018. 137 с.
20. Хабутдінов Р. А., Піщик М. Г. Обґрунтування вибору автобусів з використанням моделі енергетичного показника собівартості. *Вісник Національного транспортного університету*. 2009. № 19 (2). С. 111–114.
21. Шевельков С. А. Оцінка енергоефективності громадського транспорту на автобусному маршруті 126 в місті Житомирі: магістерська кваліфікаційна робота: 274 «Автомобільний транспорт». Житомир: ДУ «Житомирська політехніка», 2023. 76 с.

22. Coraddu A., Oneto L., Ghio A. Machine learning approaches for predictive maintenance in the transport domain. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2019. Vol. 21, No. 5. P. 1928–1940.
23. European Commission. Study on the deployment of C-ITS (Cooperative Intelligent Transport Systems) in Europe: Final Report. Brussels: EC, 2020. 142 p.
24. Gupta A. R., Kumar P. Reliability Study of Electric Buses in the Urban Public Transport System. *Energies*. 2023. Vol. 16, Is. 14. P. 3863. [DOI: 10.3390/en16143863]
25. Kaiser F., Schlegel T. A Survey of Predictive Maintenance in Public Transport. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*. 2021. Vol. 19. P. 45–58.
26. Li Z., Shahidehpour M., Bahramirad S. Big Data in Smart Transport Systems: A Review. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020. Vol. 11, No. 6. P. 4821–4835.
27. Liu S., Ceder A. Study on dynamic influence of passenger flow on intelligent bus travel service model. *Transport*. 2021. Vol. 36, No. 1. P. 26–38.
28. Nemeth T., et al. Predictive Maintenance for Automotive Applications: A Review. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 12450–12468.
29. Rao R. H. M. P., et al. Modelling Urban Bus Service and Passenger Reliability. *Transport Policy*. 2018. Vol. 15. P. 4–12.
30. Schmidt A., et al. Total Cost of Ownership Analysis for City Bus Technologies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2022. Vol. 104. 103200.
31. Tao F., et al. Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0. *Engineering*. 2019. Vol. 5, Is. 4. P. 653–661.
32. Viharos Z. J., et al. Maintenance strategy optimization for public transport bus fleet. *IFAC-PapersOnLine*. 2021. Vol. 54, Is. 1. P. 450–455.
33. Volvo 7900 Hybrid: Product specifications. Göteborg: Volvo Bus Corporation, 2021. 12 p.

34. Volvo 8700LE: Technical data and performance. Göteborg: Volvo Bus Corporation, 2010. 8 p.
35. Wang Y., Zhao Y. Urban Bus Fleet Maintenance Scheduling with Elastic Passenger Demand. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 330. 129876.
36. World Energy Outlook 2010 / International Energy Agency. Paris: OECD/IEA, 2010. 738 p.
37. Zhang J., Wang F.-Y. Intelligent Maintenance for City Buses based on Digital Twin. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2024. Vol. 11, No. 1. P. 12–15.

ДОДАТОК А

```
% === МОДУЛЬ 1. Завантаження та очищення даних ===  
filename = '10.xls';  
try  
    data = readtable(filename);  
catch  
    error('Файл не знайдено. Перевірте назву файлу.');
```

end

```
% Отримуємо колонку з назвами зупинок (1-ша) та кількістю (остання)  
stops_raw = data{:, 1};    % Це буде cell array (комірки)  
passengers_raw = data{:, end};  
% --- ФІЛЬТРАЦІЯ РЯДКА "ВСЬОГО" (Старий метод) ---  
idx_total = [];  
% Перевіряємо, чи це масив комірок (cell array)  
if iscell(stops_raw)  
    % Проходимо циклом, щоб знайти слово "Всього"  
    for k = 1:length(stops_raw)  
        % strcmpi порівнює текст без урахування регістру  
        if strcmpi(stops_raw{k}, 'Всього') || strcmpi(stops_raw{k}, 'Total')  
            idx_total = k;  
            break; % Знайшли - виходимо  
        end  
    end  
end  
end  
% Видаляємо цей рядок з даних, якщо знайшли  
if ~isempty(idx_total)  
    passengers_raw(idx_total) = [];  
    % stops_raw(idx_total) = []; % Можна видалити і назву, але нам вона не  
    треба далі  
end
```

```

% -----
% Конвертація в числа (Старий безпечний метод)
if isnumeric(passengers_raw)
    passengers = double(passengers_raw);
elseif iscell(passengers_raw)
    len = numel(passengers_raw);
    passengers = zeros(len, 1);
    for k = 1:len
        val = passengers_raw{k};
        if isnumeric(val)
            passengers(k) = double(val);
        elseif ischar(val)
            % Замінюємо кому на крапку, якщо раптом є
            val = strrep(val, ',', '.');
            passengers(k) = str2double(val);
        else
            passengers(k) = NaN;
        end
    end
end
else
    passengers = str2double(passengers_raw);
end
passengers = passengers(~isnan(passengers)); % Видалення пустих значень
% === МОДУЛЬ 2. Вхідні параметри ===
Total_Passengers = sum(passengers); % Тепер сума коректна
Days_In_Period = 17;
Trips_Per_Day = 80;
N_nom = 52;
L_norm = 20000;
% === МОДУЛЬ 3. Розрахунок навантаження ===

```

```

Total_Trips = Days_In_Period * Trips_Per_Day;
Avg_Pass_Per_Trip = Total_Passengers / Total_Trips;
% Коефіцієнт змінності
Turnover_Coeff = 2.0;
Avg_Instant_Load = Avg_Pass_Per_Trip / Turnover_Coeff;
% Коефіцієнт завантаження
Load_Factor = Avg_Instant_Load / N_nom;
% Розрахунок коефіцієнта зносу (K_wear)
if Load_Factor > 0.5
    Wear_Rate = 1 + (Load_Factor - 0.5) * 1.5;
else
    Wear_Rate = 1.0;
end
% === МОДУЛЬ 4. Результати ===
L_recommend = L_norm / Wear_Rate;
fprintf('--- Результати для Маршруту №10 ---\n');
fprintf('Всього пасажирів (без Всього): %.0f\n', Total_Passengers);
fprintf('Середнє наповнення салону: %.0f%%\n', Load_Factor*100);
fprintf('Коефіцієнт прискорення зносу: %.2f\n', Wear_Rate);
fprintf('РЕКОМЕНДАЦІЯ: Інтервал ТО: %.0f км\n', L_recommend);

```