

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет транспорту та механічної інженерії

(повне найменування факультету)

Кафедра автомобілів і транспортних технологій

(повна найменування кафедри)

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

**ФОРМУВАННЯ СТРАТЕГІЇ УПРАВЛІННЯ ПАРКОМ
РУХОМОГО СКЛАДУ АВТОТРАНСПОРТНОГО
ПІДПРИЄМСТВА З ОРІЄНТАЦІЄЮ НА ЗНИЖЕННЯ
ВИТРАТ ПРОТЯГОМ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ**

спеціальність 274 Автомобільний транспорт
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Автомобільний транспорт»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АТм-21
Сергій ІЛБЮК

(підпис)

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

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2025 р.
гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент,
Олег СІТОВСЬКИЙ

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В. ОНИЩУК

«__» _____ 2025 р.

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

Ілюк Сергій Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Формування стратегії управління парком рухомого складу автотранспортного підприємства з орієнтацією на зниження витрат протягом життєвого циклу»

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

затвержені наказом вищого навчального закладу від «26» листопада 2025 р. № 499/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «09» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: статистичні показники експлуатації транспортних засобів, зокрема напрацювання на відмову, частота та структура відмов, коефіцієнти технічної готовності й технічного використання, а також середньорічні пробіги.

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

1. Теоретичні основи оцінювання технічного стану та надійності транспортних засобів.

2. Аналіз сучасного технічного стану автопарків і нормативних вимог щодо строків експлуатації.

3. Розроблення математичних моделей зміни показників надійності та технічного використання.

4. Прогнозування залишкового ресурсу транспортних засобів.

5. Алгоритм прийняття рішень щодо подальшої експлуатації або списання.

6. Висновки та рекомендації.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «05» лютого 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Теоретичні основи оцінювання технічного стану та надійності транспортних засобів</i>	04.10.2025	
2	<i>Аналіз сучасного технічного стану автопарків і нормативних вимог щодо строків експлуатації</i>	18.10.2025	
3	<i>Розроблення математичних моделей зміни показників надійності та технічного використання</i>	25.10.2025	
4	<i>Прогнозування залишкового ресурсу транспортних засобів</i>	08.11.2025	
5	<i>Алгоритм прийняття рішень щодо подальшої експлуатації або списання</i>	15.11.2025	
6	<i>Висновки та рекомендації.</i>	22.11.2025	
7	<i>Перевірка кваліфікаційної роботи керівником</i>	26.11.2025	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу відповідно діючих вимог</i>	29.11.2024	
9	<i>Перевірка роботи на плагіат</i>	після 01.12.2025	
10	<i>Захист кваліфікаційної роботи</i>	згідно графіка захистів	

Здобувач вищої освіти

_____ (С. ІЛЬЮК)
(підпис) (ініціали, прізвище)

Керівник кваліфікаційної роботи

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

АНОТАЦІЯ

Ільюк С.С. Формування стратегії управління парком рухомого складу автотранспортного підприємства з орієнтацією на зниження витрат протягом життєвого циклу.

Кваліфікаційна робота магістра освітньої програми «Автомобільний транспорт» спеціальності 274 Автомобільний транспорт. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, п'яти розділів, висновків, переліку джерел посилань. Обсяг кваліфікаційної роботи становить 69 сторінок основного тексту, 1 таблицю, 13 рисунків та 34 джерела за переліком посилань.

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання підвищення ефективності управління життєвим циклом транспортних засобів шляхом удосконалення методів оцінювання технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу. З метою вирішення поставлених завдань проведено огляд теоретичних основ надійності автотранспортних засобів, виконано аналіз сучасного технічного стану автопарків та нормативних вимог щодо строків експлуатації, досліджено методи прийняття рішень про продовження чи припинення експлуатації транспортних засобів. Розроблено математичну модель зміни показників надійності та модифіковану модель прогнозування коефіцієнта технічного використання, визначено критичні порогові значення техніко-економічної доцільності подальшої експлуатації. Запропоновано алгоритм прийняття рішень для автотранспортних підприємств щодо оптимізації строків експлуатації та оновлення рухомого складу.

Ключові слова: технічний стан, надійність, коефіцієнт технічного використання, інтенсивність відмов, залишковий ресурс, моделювання, строк експлуатації, автотранспортний засіб.

ANNOTATION

Ilyuk S.S. Formation of a strategy for managing the rolling stock fleet of a motor vehicle enterprise with an orientation towards reducing costs during the life cycle.

Master's qualification work of the educational program "Motor Transport" specialty 274 Motor Transport. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The master's qualification work consists of an introduction, five chapters, conclusions, a list of references. The volume of the qualification work is 69 pages of the main text, 1 table, 13 figures and 34 sources according to the list of references.

The qualification work considers the issue of increasing the efficiency of vehicle life cycle management by improving methods for assessing the technical condition and predicting the residual resource. In order to solve the tasks set, a review of the theoretical foundations of vehicle reliability was conducted, an analysis of the current technical condition of vehicle fleets and regulatory requirements for service life was performed, and methods for making decisions on the continuation or termination of vehicle operation were investigated. A mathematical model of changes in reliability indicators and a modified model for predicting the technical utilization coefficient have been developed, critical threshold values of the technical and economic feasibility of further operation have been determined. A decision-making algorithm for motor transport enterprises regarding optimization of service life and renewal of rolling stock has been proposed.

Keywords: technical condition, reliability, technical utilization coefficient, failure rate, residual resource, modeling, service life, motor vehicle.

ЗМІСТ

Вступ	8
1 Теоретичні основи надійності автотранспортних засобів та ефективності їх експлуатації	11
1.1 Поняття надійності транспортних засобів.	11
1.2 Показники працездатності та ефективності використання автомобіля.	13
1.3 Вплив старіння та пробігу на технічний стан автомобіля.	15
1.4 Концепції оцінювання залишкового ресурсу.	17
Висновки до розділу.	19
2 Аналіз сучасного стану автотранспортних парків та вимог до оцінки доцільності експлуатації.	22
2.1 Технічний стан автотранспортних засобів в Україні та світі.	22
2.2 Аналіз нормативних вимог щодо строків експлуатації.	24
2.3 Огляд методів прийняття рішень щодо списання або продовження експлуатації.	29
Висновки до розділу.	32
3 Математична модель зміни показників надійності та ефективності експлуатації автомобіля.	34
3.1 Обґрунтування вибору показників для моделювання. .	34
3.2 Математична модель зміни показників у часі.	36
3.3 Модель прогнозування коефіцієнта технічного використання.	40
3.4 Алгоритм прийняття рішень.	44
Висновки до розділу.	47

4	Практична оцінка ефективності експлуатації та залишкового ресурсу (на прикладі тролейбусів т701).	49
4.1	Обґрунтування вибору вихідних даних.	49
4.2	Аналіз вихідних експлуатаційних даних та їх статистична обробка.	50
4.3	Моделювання та прогноз зміни коефіцієнта технічного використання транспортних засобів.	53
4.4	Прогнозування залишкового ресурсу.	57
4.5	Оцінювання критичної інтенсивності відмов.	60
	Висновки до розділу.	62
5	Рекомендації щодо підвищення ефективності управління парком транспортних засобів.	64
	Висновки до розділу.	66
	Висновки.	68
	Перелік джерел посилання	70

ВСТУП

Забезпечення надійної, ефективної та економічно обґрунтованої експлуатації парку транспортних засобів є одним із ключових завдань сучасних транспортних підприємств. В умовах зростання інтенсивності міських перевезень, підвищення вимог до якості транспортних послуг та обмеженості фінансових ресурсів проблема раціонального управління життєвим циклом рухомого складу набуває особливої актуальності. Значна частина транспортних засобів експлуатується із перевищенням нормативних строків, що супроводжується зниженням технічної готовності, збільшенням кількості відмов та зростанням експлуатаційних витрат. Традиційні підходи, засновані на регламентному обслуговуванні, не забезпечують необхідної точності прогнозування стану транспортних засобів і не дозволяють своєчасно визначати момент втрати ефективності. Тому виникає потреба у впровадженні сучасних методів діагностування, математичного моделювання та аналізу надійності, які дають можливість прогнозувати залишковий ресурс і оптимізувати технічне обслуговування. Комплексне вирішення цих питань сприятиме підвищенню ефективності управління транспортним парком і забезпеченню безпеки пасажирських перевезень.

Метою роботи є розроблення науково обґрунтованого способу оцінювання технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу транспортних засобів на основі аналізу експлуатаційних даних, математичного моделювання показників надійності та визначення критеріїв техніко-економічної доцільності подальшої експлуатації, що забезпечить підвищення ефективності управління парком транспортних засобів.

Об'єктом дослідження є процес експлуатації транспортних засобів у автотранспортному підприємстві та показники ефективності їх використання в умовах реальних експлуатаційних навантажень.

Предметом дослідження є закономірності зміни технічного стану та показників надійності транспортних засобів у процесі експлуатації.

Завдання роботи:

- проаналізувати сучасні наукові підходи до оцінювання технічного стану та надійності транспортних засобів;
- сформулювати математичний апарат прогнозування зміни технічного стану;
- провести аналіз фактичних експлуатаційних даних та статистичну обробку показників надійності;
- здійснити прогноз залишкового ресурсу транспортних засобів на основі отриманих моделей;
- оцінити критичну інтенсивність відмов, за якої можливе досягнення нормативних та цільових показників міжвідмовного ресурсу;
- розробити рекомендації щодо підвищення ефективності управління парком транспортних засобів.

Науково-практичну цінність становить запропонована комплексна методика оцінювання технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу транспортних засобів, що базується на поєднанні статистичного аналізу, моделей надійності та експлуатаційної ефективності. Запропоновані математичні моделі коефіцієнта технічного використання та функцій надійності забезпечують можливість визначення граничних строків техніко-економічно доцільної експлуатації та є інструментом для прийняття рішень щодо модернізації або списання транспортних засобів. Практична цінність роботи полягає у можливості використання отриманих результатів транспортними підприємствами для оптимізації технічного обслуговування, зниження інтенсивності відмов, підвищення технічної готовності та планування оновлення парку.

Методи досліджень, застосовані в роботі, спираються на положення теорії надійності, математичного моделювання технічних систем, експлуатаційної діагностики та аналізу експлуатаційних даних. Для розв'язання поставлених завдань використано методи статистичного аналізу, моделювання деградаційних процесів, прогнозування коефіцієнта технічного

використання, а також підходи оцінювання залишкового ресурсу й інтенсивності відмов. Розрахунки та побудова графічних залежностей виконувалися з використанням персонального комп'ютера, пакетів прикладних програм для технічних обчислень і сучасного програмного забезпечення для аналізу даних та візуалізації результатів.

Апробація результатів роботи. Результати роботи доповідалися на V студентської науково-технічної конференції факультету транспорту та механічної інженерії «Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії» ЛНТУ (13 листопада 2025 р.) та опубліковано: С. Ільюк. Актуальність формування стратегії управління автопарком, зорієнтованої на зниження витрат життєвого циклу \ \ Тези V студентської науково-технічної конференції факультету транспорту та механічної інженерії “ Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії ”. Луцьк: ЛНТУ – 2025р.– с. 243-245.

На захист виносяться результати, отримані в процесі комплексного дослідження технічного стану та експлуатаційної надійності транспортних засобів: методика оцінювання технічного стану, запропонована математична модель зміни коефіцієнта технічного використання у часі, результати оцінювання критичної інтенсивності відмов.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

1.1 Поняття надійності транспортних засобів

Надійність автомобільних транспортних засобів традиційно визначається як властивість об'єкта зберігати у часі працездатний стан за встановлених умов технічного обслуговування, ремонту та експлуатації. Одне з класичних визначень надає Є. Ю. Форнальчик у праці «Технічна експлуатація та надійність автомобілів» [1]. Автори підкреслюють, що надійність включає такі складові, як безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збережуваність, що визначають ресурсні властивості транспортного засобу протягом його життєвого циклу.

Практичний вплив надійності на ефективність міських транспортних систем розкрито у роботі «Експлуатаційна надійність автобусів міського громадського транспорту» [2]. Автори зазначають, що надійність є інтегральною характеристикою, яка формується під впливом як конструктивних особливостей транспортного засобу, так і зовнішніх чинників: умов руху, навантажень, якості технічного обслуговування та культури експлуатації.

У сучасних автомобілях рівень надійності значною мірою залежить від складності конструкції та рівня інтеграції електронних систем. Поглиблений техніко-експлуатаційний аналіз цього питання подано у дослідженні В. Хаврука «Вплив техніко-експлуатаційних властивостей вантажних автомобілів на показники ефективності експлуатації» [3]. Автор підкреслює, що зростання кількості електронних модулів, систем допомоги водію, елементів управління та контролю суттєво змінює структуру відмов і ремонтпридатність транспортних засобів.

Наукові засади математичного опису зміни показників надійності в процесі старіння автомобіля були сформульовані у роботах Я. І. Несвицького, М. Я. Говоруценка, Є. С. Кузнецова та Б. Д. Прудковського. У дослідженнях

цих авторів показано, що зміни показників надійності підпорядковуються експоненційному закону, а динаміка деградації може бути описана узагальненою залежністю виду , що дозволяє враховувати характер зростання відмов або зменшення ефективності [4].

Вагомий внесок у практичне вивчення надійності сучасних автомобілів роблять також дослідження, виконані на основі періодичних технічних оглядів. Зокрема, у статті [5] продемонстровано залежність частоти несправностей від віку й інтенсивності експлуатації транспортних засобів, що підтверджує закономірності старіння, характерні для теорії надійності (рис. 1.1 та 1.2).

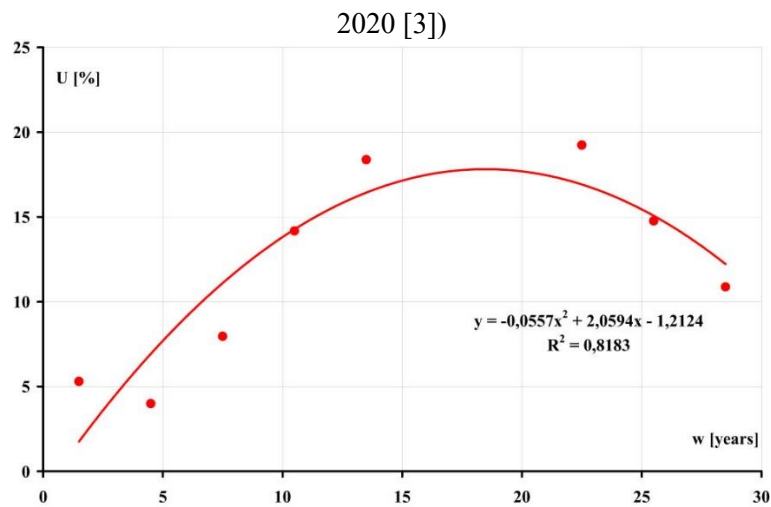


Рисунок 1.1 – Частка несправних автомобілів (за даними [24])

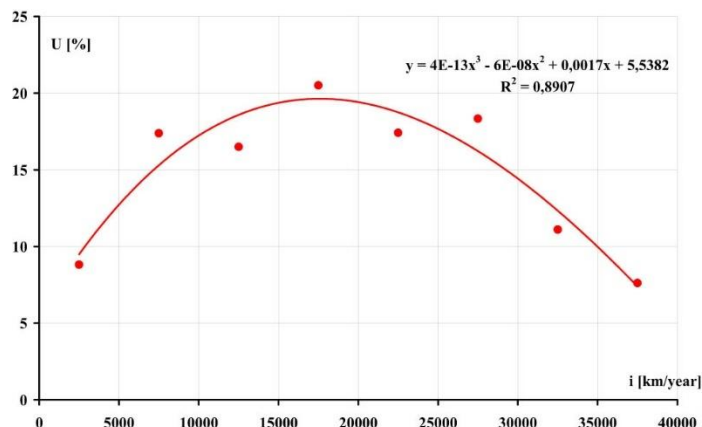


Рисунок 1.2 – Залежність частки несправних транспортних засобів серед транспортних засобів у заданому діапазоні інтенсивності експлуатації.
(за даними [24])

Отже, надійність транспортних засобів є багатофакторною інтегральною характеристикою, яка формується під впливом конструктивних, експлуатаційних та організаційних чинників. Вона визначає рівень працездатності автомобіля, інтенсивність відмов, обсяг ремонтних робіт та економічну доцільність подальшої експлуатації, забезпечуючи основу для прийняття управлінських рішень щодо планування технічного обслуговування, модернізації або списання транспортних засобів.

1.2 Показники працездатності та ефективності використання автомобіля

Оцінювання працездатності автомобіля та ефективності його використання ґрунтується на системі техніко-експлуатаційних показників, які характеризують здатність транспортного засобу виконувати заплановану транспортну роботу з необхідним рівнем надійності. Базові підходи до визначення таких показників викладені у фундаментальній праці Є. Ю. Формальчика [1], де наголошено, що ефективність експлуатації автомобіля є прямим відображенням його технічного стану та умов роботи.

Одним із ключових показників є коефіцієнт технічної готовності, який характеризує ймовірність того, що автомобіль перебуває у працездатному стані в будь-який момент, коли він потрібен для виконання транспортних завдань. Деталізований підхід до визначення цього показника та його практичної значущості подано у роботі [4]. Автори зазначають, що коефіцієнт технічної готовності інтегрує тривалість працездатного стану та час усунення відмов, а його зменшення є одним з головних індикаторів старіння транспортного засобу.

Другим важливим показником є коефіцієнт оперативної готовності, що додатково враховує простой з організаційних причин (наприклад, очікування запчастин або затримки в графіку ремонтних робіт). Це дозволяє точніше оцінювати реальну доступність автомобіля для роботи. Практичне застосування цього показника набуває особливого значення у міських

транспортних системах, про що йдеться у статті [2], де показано залежність регулярності перевезень від технічної готовності рухомого складу.

Надзвичайно важливим для аналізу транспортної експлуатації є коефіцієнт технічного використання, який відображає відношення часу перебування автомобіля у працездатному стані до загального часу його використання у транспортному процесі. Його динаміка безпосередньо пов'язана з технічним станом та інтенсивністю появи відмов, а у дослідженні [4]. Зокрема, розглядається залежність, де параметр «коефіцієнт старіння» визначає швидкість деградації показника.

Показником, що дає змогу оцінювати зміни фактичної транспортної роботи, є коефіцієнт збереження ефективності, який використовується для порівняння фактичних результатів експлуатації з номінальними. У працях В. Хаврука [3] підкреслюється, що цей показник є особливо чутливим до зростання трудомісткості ремонтів та збільшення порушень регулярності транспортного процесу, що властиво для автомобілів старшого віку.

Сучасні міжнародні дослідження також підтверджують значущість цих показників. Наприклад, у статті [5] встановлено закономірності зменшення технічної готовності та зростання обсягів ремонтних втручань із віком транспортних засобів на основі даних масових технічних оглядів. Ці результати узгоджуються з національними та європейськими тенденціями зміни технічного стану парків автомобілів.

Таким чином, система показників працездатності та ефективності експлуатації автомобіля є основою для техніко-економічного аналізу його стану, прогнозування залишкового ресурсу та обґрунтування управлінських рішень. Ці показники відображають комплексний вплив конструктивних, експлуатаційних та організаційних чинників і дають змогу узгоджувати технічну політику автопідприємства з економічною доцільністю подальшої експлуатації транспортних засобів.

1.3 Вплив старіння та пробігу на технічний стан автомобіля

Пробіг та тривалість експлуатації транспортного засобу є ключовими факторами, що визначають зміну його технічного стану, інтенсивність відмов, витрати на обслуговування та рівень технічної готовності. Питанням впливу старіння на параметри надійності автомобілів присвячено значну кількість вітчизняних і зарубіжних досліджень, що формують широку теоретико-прикладну базу для моделювання й прогнозування технічного стану.

Однією з фундаментальних праць, що заклала основу сучасних підходів до оцінювання надійності автомобілів, є монографія «Надійність машин» [6]. У ній докладно розглядаються механізми зносу та деградації агрегатів, зокрема вузлів ходової частини, що виступають одними з найбільш чутливих до впливу пробігу. Наведені закономірності підтверджують експоненціальний характер інтенсивності відмов у другій половині життєвого циклу.

Праці В. В. Ауліна також роблять вагомий внесок у розуміння механізмів деградації транспортних засобів. У дослідженні «Методи підвищення експлуатаційної надійності елементів ходової частини автомобіля» [7] експериментально показано закономірності зростання трудомісткості ремонту та ймовірності відмов залежно від пробігу, що повністю корелює з висновками сучасних міжнародних досліджень.

Суттєвий інтерес становлять роботи Є. Ю. Формальчика, який у монографії «Технічна експлуатація та надійність автомобілів» [1] описує структуру відмов залежно від напрацювання, доводячи, що старіння автомобіля проявляється не лише в підвищенні кількості відмов, а й у зміні їх характеру — від випадкових до закономірних, пов'язаних із деградацією матеріалів та втратою металу. Подальші дослідження автора, такі як «Експлуатаційна надійність автобусів міського громадського транспорту» [2], підтверджують, що збільшення віку транспортних засобів призводить до диспропорційного зростання простоїв у ремонті, що безпосередньо знижує коефіцієнт технічного використання.

Сучасні міжнародні дослідження пропонують більш складні математичні моделі старіння. Зокрема, у статті «Reliability Analysis for Unrepairable Automotive Components» [8] застосовано методи аналізу виживання і статистичні моделі Вейбулла, які описують зростання інтенсивності відмов зі старінням компонентів. Подібні результати наведено у роботі [9], де застосовано нечіткі моделі для врахування невизначеності технічного стану електродвигунів EV.

У статті Oszczywała M. та ін. «Modeling the Operation Process of Light Utility Vehicles Using Monte Carlo Simulation» [10] застосовано підхід Монте-Карло для моделювання експлуатаційного процесу, що дозволяє враховувати випадковість відмов та їх залежність від пробігу. Автори демонструють, що старіння автотранспорту супроводжується нелінійним зростанням витрат та зниженням доступності транспортних засобів.

Дані періодичних технічних оглядів, проаналізовані у роботі [5], підтверджують чітку залежність частки несправних автомобілів від віку, причому після 10–12 років експлуатації частота критичних дефектів зростає удвічі порівняно з автомобілями до 5 років. Такі закономірності узгоджуються з висновками [4], де автори наводять графічні залежності зменшення коефіцієнта технічного використання відповідно до експоненційної моделі старіння.

Окремий блок досліджень присвячено впливу старіння на економічні характеристики експлуатації. Наприклад, праця «Comprehensive Total Cost of Ownership Quantification for Vehicles...» (Burnham A. та ін. Argonne National Laboratory, 2021) демонструє різке зростання складових ТСО на пізніх етапах життєвого циклу, що безпосередньо пов'язано з падінням надійності та зростанням затрат на ремонт.

Нарешті, у роботах В. Д. Мигаля «Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів» [12] розглядаються інтелектуальні методи прогнозування надійності, які застосовують дані сенсорів, машинне навчання та цифрові моделі деградації. Доведено, що використання цифрових

інструментів зменшує суб'єктивність оцінювання технічного стану та значно підвищує точність прогнозів залишкового ресурсу.

Таким чином, аналіз літератури свідчить про універсальність закономірностей старіння транспортних засобів, незалежно від типу автомобіля чи умов експлуатації. Старіння проявляється у зростанні інтенсивності відмов, збільшенні витрат на ремонт, зменшенні коефіцієнтів технічної готовності та технічного використання. Сучасні тенденції підтверджують, що експоненційні моделі деградації, є узгодженими з міжнародною науковою практикою та забезпечують ефективну основу для прогнозування технічного стану автотранспортних засобів.

1.4 Концепції оцінювання залишкового ресурсу

Оцінювання залишкового ресурсу автотранспортних засобів та визначення доцільності їх подальшої експлуатації є важливою складовою сучасних систем управління автопарками. У світовій та українській науковій практиці сформовано широкий спектр методичних підходів, що базуються на аналізі надійності, показників технічного стану, експлуатаційних витрат та економічної ефективності. Вони охоплюють як класичні статистичні методи, так і сучасні інтелектуальні технології прогнозування.

Одним із базових підходів, що широко застосовується у вітчизняній науковій школі, є метод експоненційного моделювання деградації технічного стану. Цей метод системно викладено у роботах Я. І. Несвицького, М. Я. Говоруценка, Є. С. Кузнецова та Б. Д. Прудковського, де доведено, що зміна показників надійності автомобіля у часі може бути описана залежністю, яка точно відображає експоненційну закономірність старіння транспортних засобів. Узагальнення цього підходу представлено у статті «Підвищення ефективності управління автотранспортом на основі оцінки його надійності та якості» [4], де автори формують модель прогнозування коефіцієнта технічного використання і визначення граничного стану автомобіля.

Суттєвий внесок у розвиток теорії технічного стану і ресурсу зробила українська наукова школа, представлена працями Є. Ю. Форнальчика. У монографії «Технічна експлуатація та надійність автомобілів» [1] наведено класифікацію моделей зносу вузлів і агрегатів, підходи до оцінювання технічного ресурсу і способи прогнозування залишкового ресурсу на основі інтенсивності відмов. У пізніших роботах автора (наприклад, [2]) розглядається практичне застосування цих моделей до міських автобусів, де старіння проявляється особливо інтенсивно через підвищені навантаження.

Окремий – важливий – вектор досліджень пов'язаний із використанням економічних критеріїв для оцінки доцільності експлуатації автомобіля. Сучасна концепція Total Cost of Ownership (TCO), широко застосовувана у світовій практиці, докладно представлена у праці [12] Andrew Burnham та колег, де наведено моделі прогнозування витрат протягом усього життєвого циклу – від придбання до списання. Автори демонструють, що на пізніх етапах експлуатації різко зростають витрати на ремонт, енергоспоживання, знижується залишкова вартість транспортного засобу – що прямо впливає на доцільність його використання.

Методи оцінювання ремонтпридатності та довговічності технічних систем активно розробляються у європейських дослідженнях. Так, у роботі [8] застосовано класичні статистичні моделі Вейбулла для оцінювання показників виживання та прогнозування граничних відмов. Значний внесок у розроблення моделей технічної готовності систем зроблено у статті [13], де використано напівмарковські процеси для оцінювання станів працездатності та деградації.

Сучасні тенденції демонструють активний перехід до моделей, що включають елементи штучного інтелекту. Наприклад, автори у статті [9] пропонують нечіткі моделі оцінювання старіння електродвигунів електромобілів із врахуванням невизначеності технічних параметрів. У роботі [14] розглядаються інтелектуальні алгоритми планування роботи автономних транспортних засобів з врахуванням ймовірнісних моделей деградації транспортних систем.

Важливий внесок у розвиток методів оцінювання ресурсу зробив В. Д. Мигаль у монографії [12]. Автор пропонує цифрові моделі діагностики, системи прогнозування стану на основі машинного навчання та підходи до оцінювання ресурсу з використанням інтелектуальних датчиків і великих масивів експлуатаційних даних.

Дані діагностичних станцій, узагальнені у роботі [5], демонструють різке зростання частки несправних автомобілів зі збільшенням віку, що підтверджує практичну значущість нормативних вказівок щодо граничних строків експлуатації, у тому числі встановлених Податковим кодексом України.

Узагальнюючи, можна зазначити, що сучасні підходи до оцінювання залишкового ресурсу поєднують:

- математичні моделі деградації;
- економічні методи аналізу життєвого циклу;
- статистичні моделі випадкових процесів;
- цифрові інтелектуальні системи;
- дані технічних оглядів та реальної експлуатації.

Все це формує комплексну методологію, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо продовження експлуатації, капітального ремонту або списання транспортних засобів.

Висновки до розділу

Здійснено комплексний теоретичний аналіз надійності автотранспортних засобів, основних показників їх працездатності та ефективності експлуатації, а також сучасних підходів до оцінювання залишкового ресурсу й моделювання технічного стану. Науковий огляд продемонстрував багатофакторний характер формування надійності та її ключову роль у визначенні доцільності подальшої експлуатації транспортних засобів.

Узагальнення понятійного апарату показало, що надійність є інтегральною характеристикою, яка включає безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збережаність. Встановлено, що ці складові визначають можливість транспортного засобу виконувати заплановану транспортну роботу впродовж життєвого циклу. Вітчизняні автори підкреслюють значний вплив конструктивних особливостей і умов експлуатації на зміну надійності, що є особливо актуальним у контексті сучасної складності електронних та механічних систем автомобіля.

Розглянуті показники технічної готовності, оперативної готовності, технічного використання та збереження ефективності дають можливість комплексно оцінювати працездатний стан автомобіля. Показано, що ці коефіцієнти є важливими індикаторами старіння транспортного засобу, відображаючи як технічні відмови, так і організаційні аспекти експлуатації. Їх динаміка лежить в основі прийняття рішень щодо планування технічного обслуговування, ремонту та списання рухомого складу.

Аналіз наукових джерел засвідчив, що процес старіння автомобіля має закономірний, переважно експоненційний характер, що проявляється у зростанні інтенсивності відмов, підвищенні трудомісткості ремонтів і збільшенні простоїв. Як вітчизняні, так і зарубіжні дослідження підтверджують, що після певного порогу напрацювання технічний стан автомобіля погіршується прискореними темпами, що негативно впливає на економічні показники експлуатації.

В огляді концепцій оцінювання залишкового ресурсу показано, що сучасні підходи базуються на поєднанні статистичних методів, моделей старіння, економічних критеріїв, напівмарковських процесів і цифрових технологій, включно зі штучним інтелектом. Встановлено, що експоненційні моделі, застосовані у класичних працях українських учених, узгоджуються з міжнародними підходами та дозволяють ефективно прогнозувати технічний стан та залишковий ресурс транспортних засобів.

Теоретичні результати, викладені у розділі, формують наукове підґрунтя для подальшої розробки математичної моделі оцінювання ефективності експлуатації автомобілів та визначення граничної доцільності їх використання.

2 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОТРАНСПОРТНИХ ПАРКІВ ТА ВИМОГ ДО ОЦІНКИ ДОЦІЛЬНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

2.1 Технічний стан автотранспортних засобів в Україні та світі

Сучасний технічний стан автотранспортних засобів характеризується значною диференціацією за віком, умовами експлуатації, рівнем технічного обслуговування та доступністю сервісної інфраструктури. У багатьох країнах, зокрема в Україні, зношеність автопарків залишається критично високою, що безпосередньо впливає на безпеку руху, витрати на технічне обслуговування та ефективність транспортних процесів. За аналітикою МВС та даними технічних оглядів, середній вік легкових автомобілів в Україні перевищує 15 років, а у сегменті вантажних автомобілів часто сягає 20–25 років. Це значно відрізняється від показників країн ЄС, де середній вік автомобілів здебільшого становить 11–12 років, а рівень технічного контролю є значно суворішим.

Одним із найрепрезентативніших джерел для аналізу технічного стану транспортних засобів є результати періодичних технічних оглядів. Дослідження, проведене польськими науковцями у статті [5], демонструє чітку залежність між віком автомобіля та імовірністю виявлення несправностей. Так, частка технічно несправних автомобілів різко зростає після 10 років експлуатації, причому у старших вікових групах (15–20 років) кількість критичних несправностей перевищує 50 % від загальної кількості оглянутих ТЗ. Автори встановили також кореляцію між інтенсивністю експлуатації та частотою появи дефектів у системах безпеки, гальмівних механізмах та ходовій частині.

Українські дослідження підтверджують аналогічні тенденції [1], [2], [4].

Значний внесок у вивчення технічного стану транспортних засобів зробили міжнародні дослідження, присвячені оцінюванню надійності електромобілів, гібридних та сучасних дизельних автомобілів. У статті [15] представлені моделі деградації акумуляторних систем, які визначають ключові аспекти технічного стану електротранспорту. Автори доводять, що у разі

електромобілів старіння проявляється інакше: провідну роль відіграють термічні процеси, циклічність заряджання та деградація електрохімічних компонентів, а це надає іншу структуру відмов порівняно з традиційними автомобілями.

У роботі [10] використано методи Монте-Карло та напівмарковські процеси для моделювання технічного стану легких комерційних транспортних засобів. Результати підтверджують, що складові технічної готовності зменшуються нерівномірно, а основними факторами деградації є умови навантаження, якість технічного обслуговування та стиль водіння.

Суттєву увагу стану транспортних засобів у світі приділено також у роботі [16]. Автори доводять, що технічний стан автомобіля тісно пов'язаний з екологічними та економічними показниками життєвого циклу, а погіршення технічного стану зумовлює різке зростання викидів і витрат на ремонт на пізніх етапах експлуатації.

Узагальнюючи представлені джерела, можна зробити висновок, що у глобальному вимірі технічний стан автотранспортних засобів визначається такими ключовими чинниками:

- високий середній вік автопарків (особливо в країнах, що розвиваються);
- недостатнє фінансування систем ТО і ремонтів;
- нерівномірна якість дорожньої інфраструктури;
- інтенсифікація транспортних потоків;
- зростаюча складність систем автомобіля;
- прискорене старіння окремих компонентів (АКБ, електронних систем).

Ці чинники безпосередньо впливають на структуру відмов, ремонтні витрати та коефіцієнти технічної готовності, а також визначають тенденції розвитку методів оцінювання технічного стану транспортного засобу.

2.2 Аналіз нормативних вимог щодо строків експлуатації

Строки експлуатації автотранспортних засобів та вимоги до визначення їх граничного ресурсу регулюються системою нормативно-правових документів, економічних стандартів та технічних регламентів. В Україні ці положення мають змішаний характер, поєднуючи податкові норми, вимоги безпеки дорожнього руху та правила здійснення технічного контролю. На міжнародному рівні переважають технічні стандарти, вимоги екологічної відповідності та рекомендації щодо безпечної експлуатації транспортних засобів.

Одним із ключових нормативних актів в Україні є Податковий кодекс України, який визначає мінімальні строки корисного використання основних засобів. Відповідно до пункту 145.1 статті 145, мінімально допустимий строк корисного використання транспортних засобів встановлено на рівні п'яти років. Ця вимога прямо згадується у дослідженні [4], де автори застосовують цей показник як нормативну нижню межу експлуатаційного циклу під час моделювання технічного ресурсу автомобіля.

Окремим аспектом регулювання строків експлуатації є методи нарахування амортизації, які впливають на визначення граничного періоду використання транспортних засобів у господарській діяльності підприємств. Практичні підходи до амортизації розглянуті у низці професійних джерел, зокрема «Методи нарахування амортизації основних засобів» [17], «Амортизація основних засобів на підприємстві у 2024 році» [18] та О. Шурков «Методи нарахування амортизації» [19]. У цих джерелах обґрунтовано, що амортизація не лише відображає економічне старіння активу, але й виконує роль економічного маркера, який може застосовуватися для визначення граничної доцільності подальшої експлуатації автомобіля (рис. 2.1, 2.2).

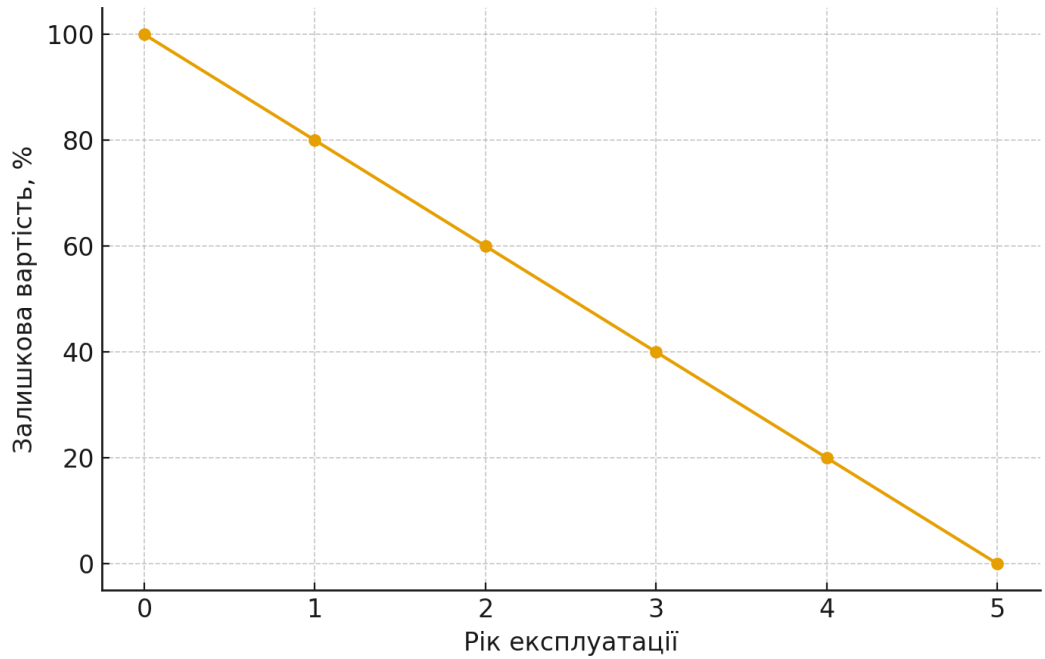


Рисунок 2.1 – Лінійний спосіб нарахування амортизації

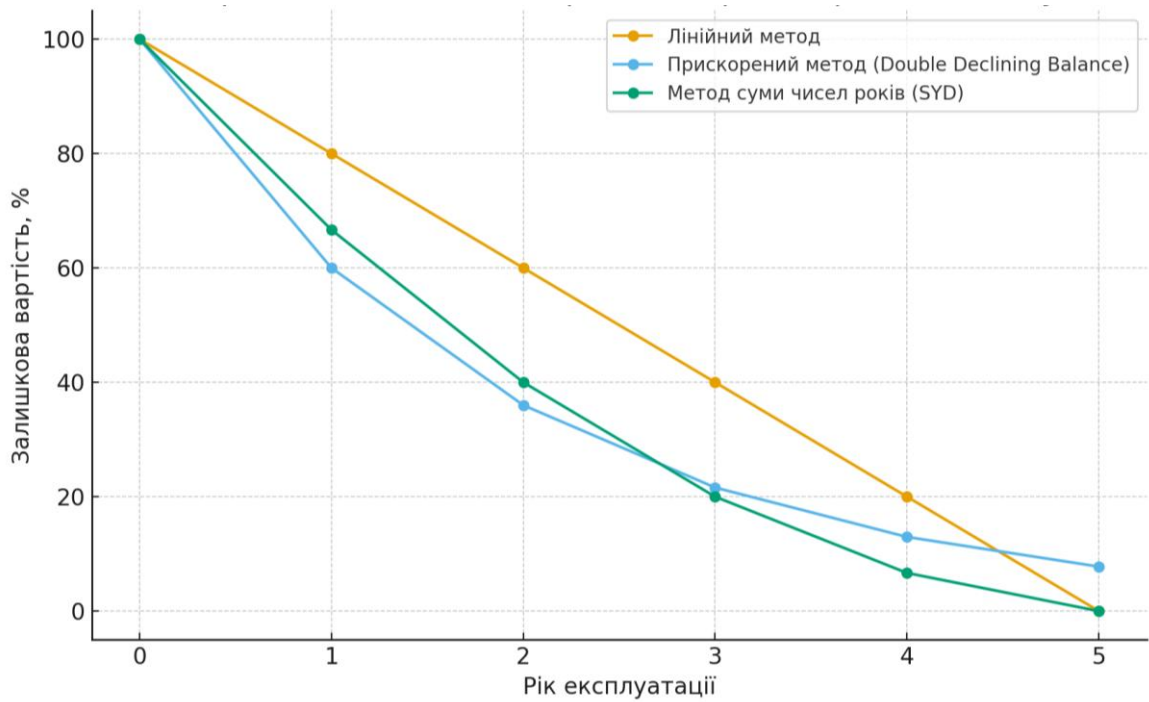


Рисунок 2.2 – Порівняння різних методів нарахування амортизації транспортного засобу

Лінійний метод (рис. 2.1) передбачає рівномірне списання вартості транспортного засобу протягом усього строку його корисного використання. Він є найпростішим і найбільш поширеним у бухгалтерському обліку, оскільки

забезпечує стабільні та прогнозовані нарахування витрат. Метод відображає ситуації, коли знос активу відбувається рівномірно в часі.

Прискорений метод (подвійне зменшення залишку, рис. 2.2) передбачає значно більші амортизаційні відрахування в перші роки експлуатації та поступове їх зменшення. Він відображає реальнішу картину технічного старіння автомобілів, оскільки транспортні засоби найшвидше втрачають цінність саме на початку свого життєвого циклу. Метод доцільний для рухомого складу з інтенсивним зносом або швидкою моральною деградацією.

Метод суми чисел років (рис. 2.2) є також варіантом прискореної амортизації, проте має більш плавну криву списання, ніж DDB. Вартість активу зменшується швидше на початку строку служби й повільніше наприкінці, що відповідає типовому процесу фізичного та функціонального старіння транспортних засобів. Метод особливо актуальний для автомобілів, у яких продуктивність і технічний ресурс зменшуються нерівномірно.

Регламентація технічного стану транспортних засобів у країнах ЄС базується на системі директив та регламентів, що встановлюють вимоги до технічного контролю. Найважливішими з них є Регламент (ЄС) № 2014/45 щодо періодичних технічних оглядів транспортних засобів та Регламент (ЄС) № 2014/47 щодо технічних перевірок комерційних автомобілів на дорогах. У цих документах не встановлюються прямі строки експлуатації, проте формулюються вимоги до мінімального рівня технічної справності, що фактично обмежує використання автомобілів зі значним зносом. Дані про результати таких перевірок у країнах Центральної Європи наведено у дослідженні [5], що демонструє чітку тенденцію до виведення з експлуатації автомобілів старших 15–20 років через критичні відмови систем безпеки.

У міжнародній практиці значну роль відіграють стандарти, які визначають порядок оцінювання технічного стану та залишкового ресурсу транспортних засобів. Наприклад, у дослідженні [15] розглядаються критерії придатності електромобілів залежно від деградації акумуляторів. Зниження ємності тягових батарей нижче 70–80 % у багатьох країнах (США, Німеччина,

Норвегія) вже вважається фактичним критерієм граничного строку використання транспортного засобу у первинному призначенні.

Значний вплив на регулювання строків експлуатації має й екологічне законодавство, яке встановлює обмеження на використання транспортних засобів, що не відповідають сучасним стандартам викидів (Euro 4, Euro 5, Euro 6). У великих містах Європи функціонують Low Emission Zones (LEZ) і Zero Emission Zones (ZEZ), що фактично скорочують період експлуатації дизельних та бензинових автомобілів за екологічними критеріями.

У науковій літературі також відзначається зв'язок між нормативними строками експлуатації та інженерними моделями ресурсу. Зокрема, у праці [16] показано, що технічний ресурс та граничний строк використання автомобіля можуть визначатися не лише за надійнісними характеристиками, а й за критеріями екологічного та економічного навантаження протягом життєвого циклу (рис. 2.3).

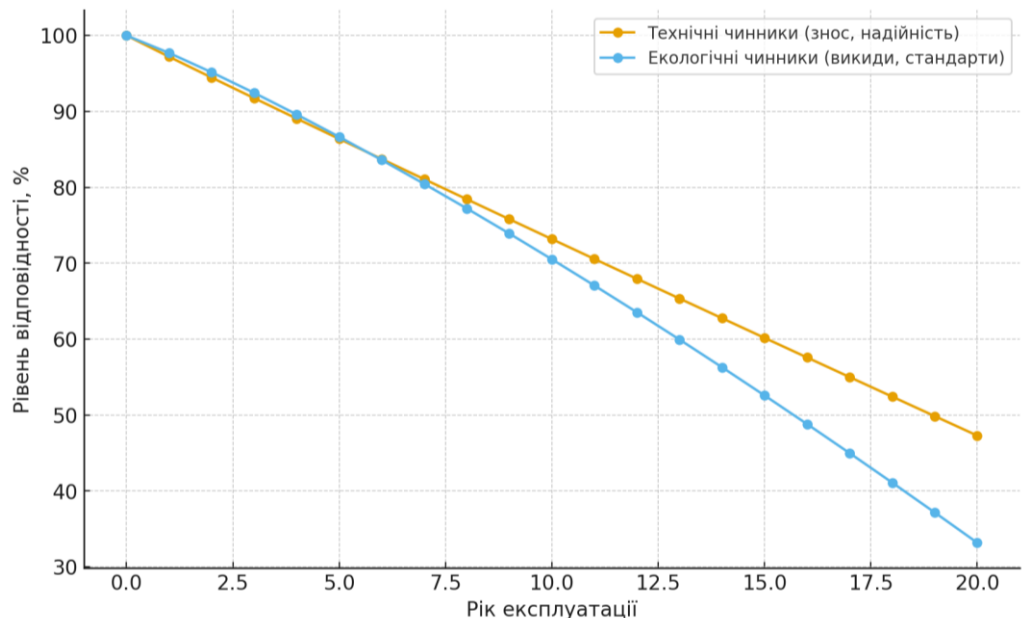


Рисунок 2.3 – Динаміка технічних та екологічних чинників, які впливають на строк експлуатації транспортних засобів

Графік на рисунку 2.3 демонструє, що екологічні вимоги дедалі частіше стають домінуючим чинником, який змушує власників оновлювати автопарк раніше, ніж це продиктовано технічним зносом.

Узагальнюючи, нормативно-правова база щодо строків експлуатації транспортних засобів має три основні групи визначальних чинників (рис. 2.4):

- 1) економічні – амортизаційні строки, фінансові втрати від зростання ремонтних витрат;
- 2) технічні – показники технічної готовності, межі допустимого зносу, результати періодичних техоглядів;
- 3) екологічні – відповідність стандартам викидів та обмеження зон низьких викидів.

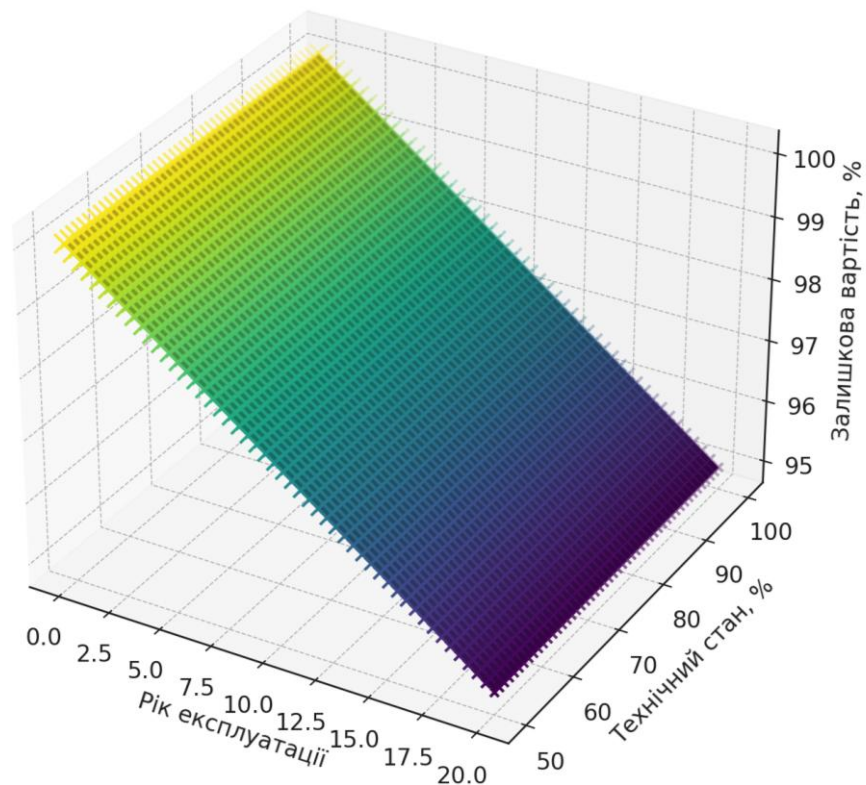


Рисунок 2.4 – 4D-візуалізація старіння автомобіля

Побудована тривимірна поверхня (рис. 2.4) відображає інтегрований вплив віку транспортного засобу, технічного стану та залишкової вартості з

одночасною візуалізацією екологічного чинника як четвертого параметра. Вісь абсцис відображає роки експлуатації, вісь ординат характеризує зміну технічного стану у відсотках, а вісь аплікату — динаміку залишкової вартості. На поверхню нанесено кольорові маркери, розмір і колір яких відповідають величині екологічного фактора: темніші та більші маркери означають швидше погіршення екологічних характеристик транспортного засобу. Графік демонструє, що з віком автомобіля одночасно знижується його технічний стан і ринкова вартість, тоді як екологічна придатність деградує значно швидше, що формує випереджувальний вплив екологічних обмежень на граничний строк експлуатації в порівнянні з технічним зносом.

Таким чином, нормативні вимоги встановлюють не фіксований строк експлуатації, а систему критеріїв, відповідність яким визначає можливість подальшого використання транспортного засобу. Ці критерії формують основу для розрахунків техніко-економічної доцільності експлуатації та будуть використані у наступних підпунктах для аналізу прийняття рішень щодо списання або продовження використання транспортних засобів.

2.3 Огляд методів прийняття рішень щодо списання або продовження експлуатації

Прийняття рішень щодо продовження експлуатації, капітального ремонту або списання транспортних засобів є важливим елементом управління автопарком і базується на комплексному аналізі технічних, економічних та експлуатаційних параметрів. У сучасній науковій літературі представлено широкий спектр методів, які дозволяють визначити момент, коли подальша експлуатація стає економічно недоцільною або технічно небезпечною (рис. 2.5).

Одним із найбільш поширених підходів є аналіз життєвого циклу та вартості володіння (Life Cycle Cost, LCC). У роботі [20] продемонстровано, що критичним моментом для списання транспортного засобу стає різке зростання

експлуатаційних витрат у кінці життєвого циклу. Модель LCC дозволяє визначити рік, у якому сукупні витрати на ремонт та обслуговування починають перевищувати економічний ефект від подальшого використання автомобіля.

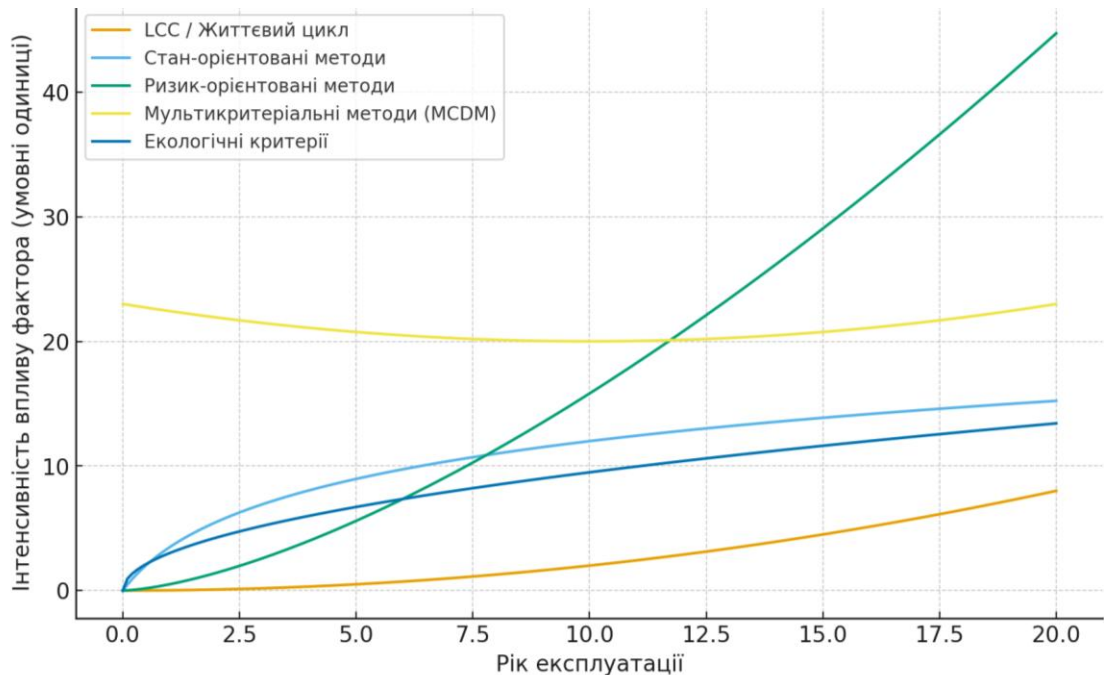


Рисунок 2.5 – Основні групи методів прийняття рішень щодо списання або продовження експлуатації транспортних засобів (підготовлено з використанням ШІ)

Широке застосування отримали також методи аналізу стану (Condition-Based Decision Making), які ґрунтуються на фактичних діагностичних даних. У статті [21] запропоновано систему прийняття рішень на основі прогнозування майбутнього технічного стану із застосуванням алгоритмів машинного навчання. Рішення про виведення автомобіля з експлуатації приймається, коли прогнозований стан наближається до критичної межі працездатності.

Серед інженерних методів значне поширення отримали моделі ризик-орієнтованого аналізу, які враховують імовірність критичних відмов. Так, у роботі [22] запропоновано оцінювати граничний строк експлуатації на основі

імовірності виникнення відмов високої небезпеки. Модель дозволяє порівнювати ризик подальшої експлуатації з ризиком інвестицій у новий транспортний засіб.

Для автотранспортних підприємств важливим є також застосування економічно-оптимізаційних моделей, які дозволяють визначити мінімальний рівень сукупних витрат на ремонти та оновлення автопарку. Класичний підхід представлено у статті [23], де розглянуто методи оптимального оновлення рухомого складу на основі інтервалів заміни та прогнозованих витрат. Модель враховує зниження продуктивності старих автомобілів та збільшення ризиків простоїв.

Доволі значне поширення мають мультикритеріальні методи прийняття рішень (MCDM), що дозволяють узгодити різні групи критеріїв — технічні, економічні, екологічні та безпекові. У дослідженні [24] продемонстровано застосування методів АНР та TOPSIS для визначення оптимального строку заміни автомобілів. Автори довели, що використання багатокритеріального підходу дозволяє врахувати різну вагомість критеріїв залежно від специфіки автопідприємства.

У контексті сучасної екологічної політики дедалі більше значення набувають методи, засновані на оцінюванні екологічного впливу (Environmental Impact-Based Decision Making). Наприклад, у роботі [25] обґрунтовано, що транспортні засоби слід списувати не лише через зниження технічної придатності, а й через зростання негативного впливу на довкілля внаслідок підвищених викидів та зниження паливної ефективності.

Узагальненням сучасних підходів є інтегровані системи підтримки рішень (Decision Support Systems, DSS), що поєднують дані технічної діагностики, фінансові показники та прогнозні моделі. Приклад такої системи подано у дослідженні [26], у якому оптимальні рішення щодо списання приймаються з урахуванням одночасної оптимізації ремонтів, простоїв та бюджету підприємства.

Таким чином, сучасні методи прийняття рішень щодо списання або продовження експлуатації транспортних засобів характеризуються міждисциплінарністю та інтеграцією різних підходів — від класичних економічних моделей і оцінки надійності до штучного інтелекту та екологічних критеріїв. Це дозволяє сформулювати комплексні рішення, що враховують реальні умови функціонування автопарку та вимоги сталого розвитку.

Висновки до розділу

Здійснено комплексний аналіз сучасного технічного стану автотранспортних засобів, нормативних вимог щодо строків їх експлуатації, а також методів прийняття рішень про продовження використання або списання рухомого складу. Проведене дослідження дозволяє сформулювати цілісне уявлення про ключові тенденції, що визначають життєвий цикл автомобіля та впливають на управлінську політику автотранспортних підприємств.

Встановлено, що технічний стан автотранспортних засобів в Україні та світі характеризується загальною тенденцією до старіння автопарків, що зумовлює зростання частоти відмов, збільшення обсягів ремонтів та погіршення відповідності транспортних засобів стандартам безпеки. Результати технічних оглядів та експлуатаційних спостережень свідчать про виразну залежність між віком автомобіля та технічною несправністю, причому транспортні засоби старші 15–20 років демонструють критичний рівень зносу й ризиків експлуатації.

Аналіз нормативної бази засвідчив, що в Україні строк експлуатації транспортних засобів регламентується переважно через економічні нормативи амортизації, вимоги технічної справності та екологічні стандарти. Європейська практика демонструє іншу модель регулювання, в якій домінують не фіксовані строки, а вимоги щодо мінімальної відповідності транспортних засобів безпековим та екологічним стандартам. Таким чином, граничний строк

експлуатації формується не стільки за календарним віком, скільки через неможливість забезпечення відповідності вимогам технічного контролю та екологічних регламентів.

Проведено огляд сучасних методів прийняття рішень щодо списання або продовження експлуатації транспортних засобів, які охоплюють економічні, техніко-діагностичні, ризик-орієнтовані, екологічні та мультикритеріальні підходи. Показано, що інтеграція цих методів дозволяє формувати обґрунтовані та оптимальні рішення, які враховують не лише технічний стан, але й динаміку витрат, ризики небезпечних відмов, відповідність екологічним нормам та взаємозалежність управлінських критеріїв. Особливе значення мають сучасні цифрові системи підтримки рішень та прогнозування, що базуються на алгоритмах машинного навчання.

Узагальнюючи вищезазначене, можна стверджувати, що ефективно управління строками експлуатації транспортних засобів потребує системного підходу, який поєднує аналіз фактичного технічного стану, економічних показників та нормативних вимог.

3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗМІНИ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОМОБІЛЯ

3.1 Обґрунтування вибору показників для моделювання

Моделювання технічного стану й ефективності експлуатації транспортних засобів потребує вибору системи показників, які адекватно відображають процеси старіння, зміни надійності, динаміку експлуатаційних витрат та рівень технічної готовності. У теорії надійності та технічної експлуатації автомобілів сформовано низку ключових показників, що дозволяють математично описати деградацію транспортного засобу у часі та прогнозувати момент досягнення критичного стану. Вибір таких показників має ґрунтуватися на їх інформативності, чутливості до змін технічного стану та можливості отримання достовірних даних у реальних умовах експлуатації.

Першою групою є показники технічної працездатності, серед яких центральне місце займає коефіцієнт технічної готовності. Саме він найбільш точно відображає здатність транспортного засобу перебувати у справному стані в будь-який момент часу. Значущість цього показника була неодноразово підтверджена у вітчизняних і міжнародних дослідженнях, зокрема у роботі [27], де підкреслюється, що готовність устаткування є індикатором як технічного, так і організаційного рівня управління. Для транспортних засобів коефіцієнт технічної готовності дозволяє простежити динаміку старіння та вплив відмов на експлуатаційні можливості.

Другою групою є показники інтенсивності використання, передусім коефіцієнт технічного використання. Він інтегрує як технічні, так і організаційні фактори, що впливають на реальну продуктивність транспортного засобу, включаючи простой, інтервали між ремонтами та періодичність технічного обслуговування. Значущість показників технічного та організаційного використання транспортних засобів підтверджена у міжнародних дослідженнях. Зокрема, у праці [28] показано, що відхилення експлуатаційних індикаторів від нормативних значень є важливим маркером

зниження ефективності автопарку та одним із найбільш інформативних критеріїв прогнозування моменту досягнення граничного стану.

Третьою групою виступають економічні показники, що відображають сукупні витрати на експлуатацію та ремонт транспортного засобу, зокрема показники вартості технічного обслуговування, середніх витрат на ремонт та індикатори життєвого циклу (LCC). Дослідження [29] демонструє, що економічні показники є незамінними для прийняття рішень щодо продовження експлуатації або заміни транспортного засобу. Вони дозволяють включати до моделі фінансові ризики, пов'язані з інтенсивністю ремонтних робіт.

До четвертої групи належать показники інтенсивності відмов, які є фундаментальними в теорії надійності. Частота та структура відмов у транспортному засобі є одними з найчутливіших показників старіння. Особливе значення мають показники інтенсивності відмов, які дозволяють описати стохастичний характер старіння та прогнозувати момент переходу системи у критичний стан. У дослідженні [31] обґрунтовано використання імовірнісних моделей деградації та показано, що динаміка відмов є одним із найчутливіших індикаторів вичерпання ресурсу технічних систем, включно з транспортними засобами.

Особливе місце серед обраних показників займає коефіцієнт старіння, що застосовується у моделі, запропонованій Дембіцьким та Самостяном у статті [4]. Цей коефіцієнт дозволяє уніфікувати різні види експлуатаційних показників, описуючи їх деградацію експоненційною закономірністю. Завдяки такому підходу модель стає адаптивною до різних типів транспортних засобів та умов експлуатації.

На завершення, окремо слід виділити екологічні показники, що характеризують рівень викидів та екологічну придатність транспортного засобу. Оцінювання екологічних показників транспортних засобів набуває ключового значення у визначенні граничного строку їх експлуатації, особливо в умовах посилення міжнародних екологічних регламентів. У дослідженні [32] запропоновано системну методика аналізу екологічної ефективності

транспортних засобів, яка демонструє, що деградація екологічних характеристик є одним із перших показників втрати придатності автомобіля згідно сучасних екологічних стандартів.

Таким чином, вибір системи показників для математичного моделювання обґрунтований необхідністю комплексного опису технічних, експлуатаційних, економічних, надійнісних та екологічних характеристик транспортного засобу. Сукупність цих показників забезпечує можливість точного прогнозування залишкового ресурсу та обґрунтованого прийняття рішень щодо подальшої експлуатації чи списання рухомого складу.

3.2 Математична модель зміни показників у часі

Математичне моделювання зміни технічних та експлуатаційних показників автотранспортних засобів є ключовим етапом прогнозування їх залишкового ресурсу та техніко-економічної доцільності подальшої експлуатації. Оскільки процес старіння автомобіля супроводжується поступовою деградацією його технічних властивостей, необхідно застосовувати моделі, здатні відображати як закономірні, так і випадкові компоненти зміни показників у часі. У теорії надійності широко використовуються експоненційні та ймовірнісні моделі деградації, які адекватно відображають реальні процеси зношування агрегатів і систем транспортного засобу.

Базова аналітична модель, що застосовується для опису старіння, ґрунтується на припущенні, що технічні показники погіршуються за експоненційною закономірністю, що було описано вище. У роботі [4] запропоновано універсальну залежність зміни показника $P(t)$ від часу експлуатації t :

$$P(t) = P_0 \cdot e^{-k t} \quad (3.1)$$

де:

$P(t)$ – поточне значення технічного або експлуатаційного показника;

P_0 – початкове (номінальне) значення показника;

k – коефіцієнт старіння, який визначає швидкість деградації;

t – напрацювання або час експлуатації.

Ця модель є узагальненою та може застосовуватись до широкого спектра показників, включаючи коефіцієнт технічного використання, технічну готовність, інтенсивність відмов, економічні витрати та пробіг. Її перевагою є універсальність і здатність описувати як плавні, так і інтенсивні процеси деградації залежно від величини параметра k .

У випадках, коли зменшення показника має більш складний характер, використовується модифікована модель із залежністю від показникової функції:

$$P(t) = P_0 \cdot e^{-k t^\alpha} \quad (3.2)$$

де параметр α дозволяє моделювати нелінійну швидкість погіршення технічного стану. Значення $\alpha > 1$ відображає прискорене старіння (наприклад, для гальмівної системи або акумуляторів), тоді як $\alpha < 1$ відповідає уповільненій деградації, характерній для двигунів і конструктивних елементів.

Модель експоненційної деградації доповнюється стохастичною складовою, що дозволяє враховувати випадкові відмови. Зокрема, ймовірність того, що елемент залишиться працездатним до часу t , можна описати імовірнісною функцією:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (3.3)$$

де λ – інтенсивність відмов.

Дана модель узгоджується з підходом, описаним у роботі [30], де експоненціальна поведінка відмов використовується як базова для прогнозування граничного стану технічних систем.

У контексті автомобільного транспорту показники інтенсивності відмов і технічної готовності пов'язані між собою співвідношенням:

$$K_{т.г.} = \frac{T_{прац.}}{T_{прац.} + T_{рем.}} \quad (3.4)$$

де $T_{прац.}$ – середній час працездатного стану,

$T_{рем.}$ – середній час ремонту.

На основі експоненційного зростання часу ремонту можна отримати модель зміни технічної готовності:

$$K_{т.г.}(t) = \frac{1}{1 + a \cdot e^{b \cdot t}} \quad (3.5)$$

де параметри a та b визначають швидкість зростання ремонтних витрат і часу відновлення. Таке представлення дозволяє відобразити реальну тенденцію до зниження технічної готовності на пізніх етапах експлуатації.

Для оцінювання залишкового ресурсу транспортного засобу застосовується модель досягнення критичного значення показника:

$$P(t_{кр}) = P_{кр} \quad (3.6)$$

де $P_{кр}$ – гранично допустиме значення (наприклад, мінімально допустимий коефіцієнт технічного використання).

Звідси можна отримати прогнозований строк досягнення критичного стану:

$$t_{кр} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{P_0}{P_{кр}} \right) \quad (3.7)$$

Це рівняння дозволяє визначити момент, коли продовження експлуатації стає технічно або економічно недоцільним.

На графіку рис. 3.1 подано динаміку зміни технічного показника $P(t)$ у часі відповідно до експоненційно-степеневі моделі деградації. Крива демонструє характерне для транспортних засобів монотонне зниження технічного стану: на початкових етапах експлуатації спад є відносно плавним, тоді як на пізніших — прискорюється внаслідок накопичення зносу та збільшення інтенсивності відмов. Модель із параметром $\alpha > 1$ відображає прискорене старіння, притаманне більшості агрегатів автомобіля, зокрема елементам ходової частини, гальмівній системі та електронним модулям. Графік чітко демонструє момент, коли значення показника наближається до критичного рівня, що може використовуватися для прогнозування залишкового ресурсу та прийняття рішень щодо подальшої експлуатації або списання транспортного засобу.

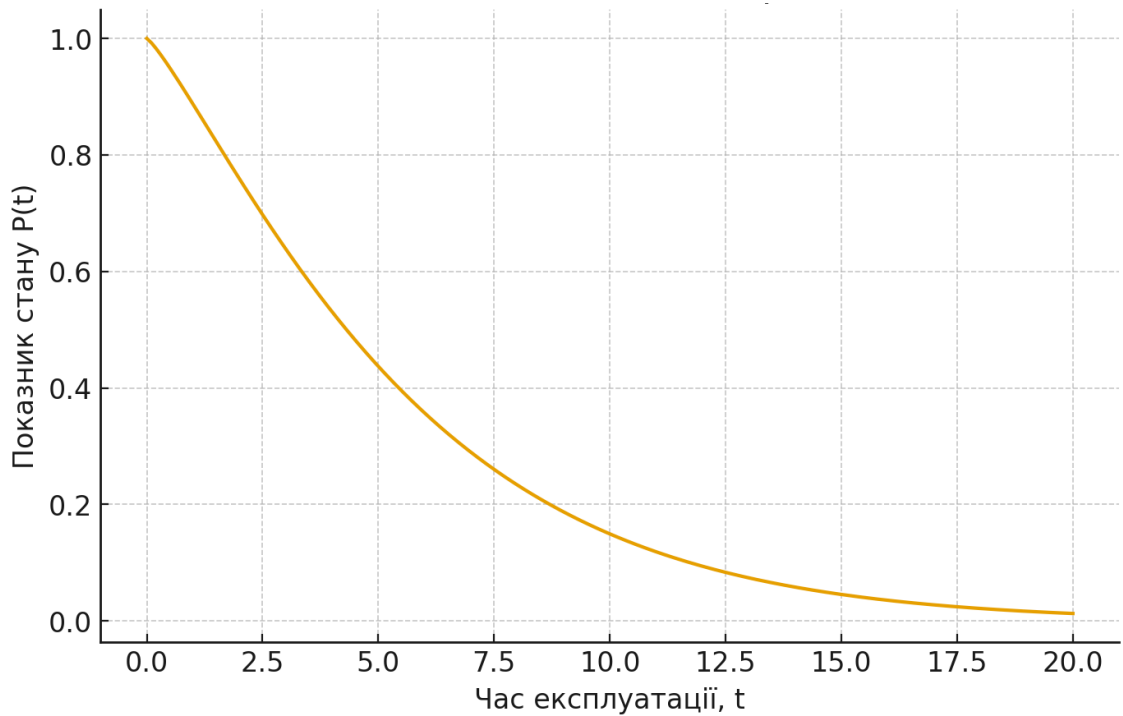


Рисунок 3.1 – Динаміка зміни технічного показника $P(t)$ у часі.

Таким чином, представлені математичні моделі забезпечують універсальний апарат для опису старіння, прогнозування технічного стану та визначення залишкового ресурсу транспортних засобів. Їх застосування дозволяє поєднати технічні, експлуатаційні та економічні показники в єдиній аналітичній основі, що є необхідним для побудови системи підтримки прийняття рішень щодо оптимізації строків експлуатації автотранспортних засобів.

3.3 Модель прогнозування коефіцієнта технічного використання

Коефіцієнт технічного використання є одним із ключових інтегральних показників технічного стану транспортного засобу, оскільки він відображає його здатність забезпечувати виконання транспортної роботи упродовж часу експлуатації. Він визначається співвідношенням фактичного часу перебування автомобіля у працездатному стані до загального фонду часу та є чутливим до

змін інтенсивності відмов, збільшення тривалості ремонтів і старіння агрегатів. Саме тому прогнозування динаміки коефіцієнта технічного використання є важливим інструментом для обґрунтування строків експлуатації та визначення моменту, коли подальше використання транспортного засобу стає економічно та технічно недоцільним.

Базове визначення коефіцієнта технічного використання має вигляд [4]:

$$K_{т.в.} = \frac{T_{прац.}}{T_{прац.} + T_{простоїв}} \quad (3.8)$$

де, $T_{прац.}$ – час у працездатному стані,

$T_{простоїв}$ – час перебування у ремонті та технічному обслуговуванні.

Оскільки процес старіння супроводжується збільшенням імовірності відмов і тривалості ремонтів, доцільно моделювати ці змінні як такі, що зростають у часі. У роботі [4] запропоновано застосовувати експоненційні залежності для опису погіршення технічного стану, що дозволяє отримати адекватну модель зміни коефіцієнта технічного використання.

Тривалість ремонтів у процесі експлуатації може бути описана зростаючою експоненційною функцією:

$$T_{рем.}(t) = T_0 \cdot e^{b \cdot t} \quad (3.8)$$

де T_0 – початкова середня тривалість ремонту,

b – параметр старіння, що визначає інтенсивність збільшення тривалості простоїв.

На підставі цього коефіцієнт технічного використання може бути подано у вигляді [4]:

$$K_{\text{т.в.}}(t) = \frac{1}{1 + a \cdot e^{b \cdot t}} \quad (3.9)$$

де $a = \frac{T_0}{T_{\text{прац.}}}$ – відношення початкової тривалості ремонту до часу працездатності.

Ця модель відповідає реальним процесам експлуатації транспортних засобів, оскільки демонструє поступове зниження коефіцієнта з часом та прискорену деградацію на пізніх етапах експлуатації. Параметри a і b залежать від типу транспортного засобу, умов експлуатації, інтенсивності використання та структури технічного обслуговування.

У випадку, коли необхідно врахувати стохастичний характер відмов, коефіцієнт технічного використання може бути інтегрований із моделлю ймовірнісної надійності:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (3.10)$$

де λ – інтенсивність відмов.

Тоді коефіцієнт технічного використання може бути оцінений як [4]:

$$K_{\text{т.в.}}(t) = R(t) \cdot K_{\text{т.г.}}(t) \quad (3.11)$$

де $K_{\text{т.г.}}(t)$ – коефіцієнт технічної готовності, що також може бути описаний експоненційними моделями деградації.

На рисунку 3.2 представлено зміну коефіцієнта технічного використання $K_{\text{т.в.}}(t)$ у часі, змодельовану за експоненційною залежністю, властивою для процесів старіння транспортних засобів. Крива демонструє плавне зниження

коефіцієнта на початкових етапах експлуатації та прискорене падіння після досягнення певного вікового порогу.

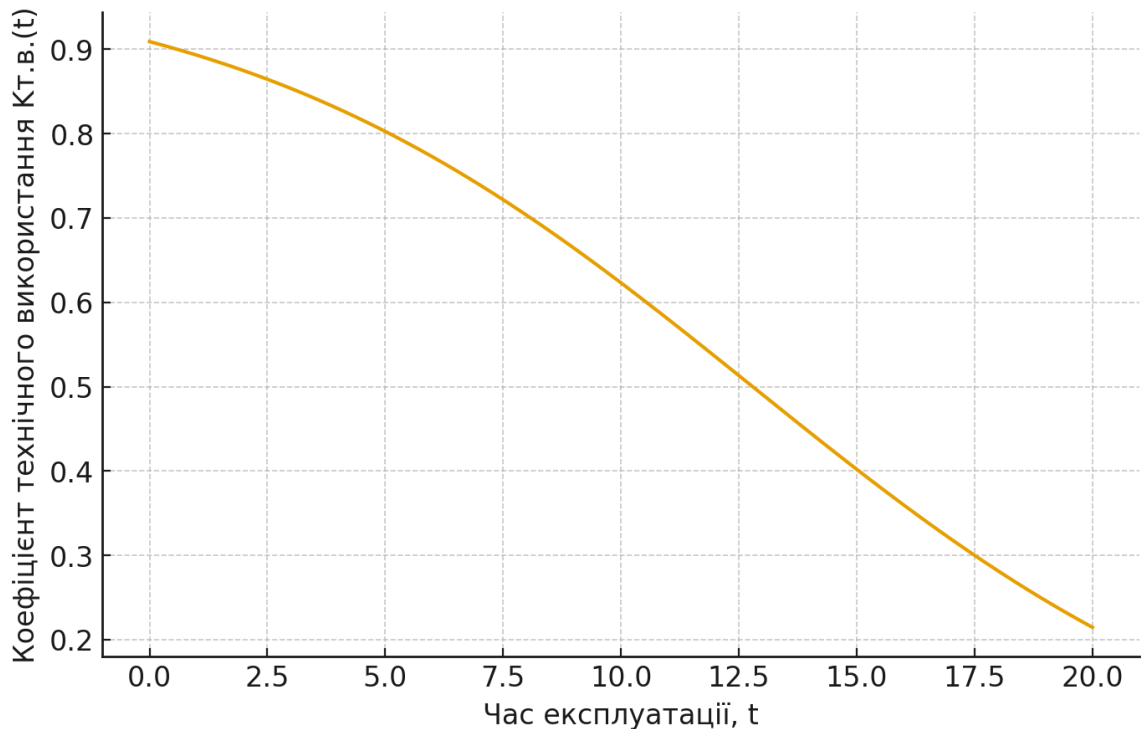


Рисунок 3.2 – Модель прогнозування коефіцієнта технічного використання

Це відображає реальні тенденції накопичення відмов, зростання тривалості ремонтів і збільшення частки простоїв. Модель дозволяє визначити момент, коли значення $K_{т.в.}$ наближається до критичного рівня, що сигналізує про економічну та технічну недоцільність подальшої експлуатації транспортного засобу. Графік є наочною ілюстрацією інтегрального впливу старіння на ефективність використання рухомого складу.

Таким чином, комбінована модель дозволяє отримати прогноз значення коефіцієнта технічного використання у будь-який момент часу експлуатації, що є критично важливим для визначення граничного строку служби транспортного засобу. На практиці ця модель дає змогу:

- обґрунтувати оптимальні інтервали технічного обслуговування;

- прогнозувати ризики простоїв;
- визначати економічну доцільність подовження експлуатації;
- автоматизувати процес прийняття рішень в системах управління автопарком.

Отримана залежність є універсальною та може бути адаптована для транспортних засобів різного призначення шляхом коректного визначення параметрів a , b та λ , що забезпечує високу точність прогнозування.

3.4 Алгоритм прийняття рішень

Розроблення алгоритму прийняття рішень щодо продовження експлуатації або списання транспортних засобів ґрунтується на інтеграції математичних моделей деградації, прогнозування коефіцієнта технічного використання та визначення критичних порогових значень експлуатаційних показників. Метою алгоритму є формування формалізованої послідовності дій, яка дозволяє об'єктивно оцінити технічний стан транспортного засобу, спрогнозувати його залишковий ресурс і прийняти обґрунтоване управлінське рішення.

Алгоритм складається з кількох логічно пов'язаних етапів.

1. Збір вихідних даних. На цьому етапі формується набір вхідної інформації: початкові значення показників P_0 , інтенсивність відмов λ , тривалості ремонтів T_0 , коефіцієнти експлуатації, пробіг, умови експлуатації та попередні статистичні дані про відмови. Достовірність отриманих даних визначає точність прогнозних значень моделі.

2. Розрахунок параметрів старіння. Застосовуючи експоненційно-степеневі моделі, отримують коефіцієнти старіння k та параметри нелінійності α , які відображають швидкість деградації конкретного транспортного засобу. Для моделей, що враховують тривалість простоїв, визначають параметри a та b , які характеризують інтенсивність зростання ремонтних витрат і часу відновлення.

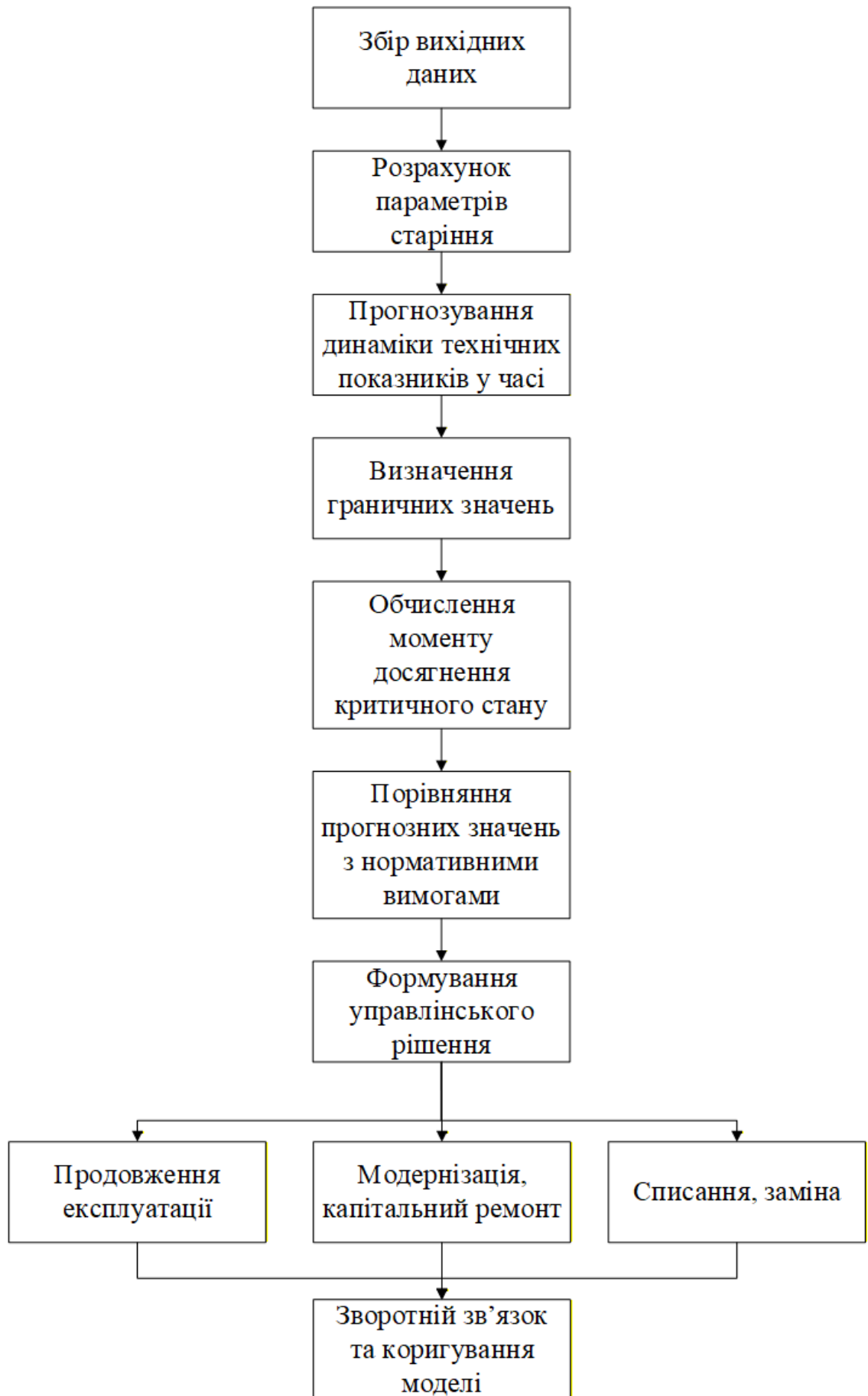


Рисунок 3.3 – Алгоритм прийняття рішень

3. Прогнозування динаміки технічних показників у часі. На основі моделей виду (3.2) та (3.9) проводиться прогноз зміни технічного стану транспортного засобу. Це дозволяє визначити тенденції старіння, темпи зниження працездатності та наближення до граничних порогів.

4. Визначення граничних значень. Встановлюються критичні порогові показники, які визначають технічну або економічну недоцільність подальшої експлуатації. До них належать:

- мінімально допустиме значення коефіцієнта технічного використання $K_{т.в.кр}$;
- критичний рівень технічної готовності;
- максимально припустима частота відмов;
- поріг економічної ефективності, коли витрати на експлуатацію перевищують нормативи;
- екологічні нормативи, за межами яких ТЗ не може бути допущений до експлуатації.

5. Обчислення прогнозного моменту досягнення критичного стану. Застосовується рівняння (3.7) або відповідний вираз для інших показників, що дає можливість визначити прогнозний строк експлуатації до досягнення граничного стану.

6. Порівняння прогнозних значень з нормативними вимогами. На цьому етапі результати прогнозу співвідносяться з нормативами (технічними, екологічними, економічними), визначеними у розділі 2. Якщо прогнозований стан не відповідає встановленим вимогам, транспортний засіб підлягає виведенню з експлуатації або глибокому технічному відновленню (модернізації, капітальному ремонту, тощо).

7. Формування управлінського рішення. Рішення приймається за одним із трьох сценаріїв:

- а) продовження експлуатації, якщо всі показники залишаються в допустимих межах;

- b) проведення модернізації або капітального ремонту, якщо прогнозований стан може бути покращений технічними заходами;
- c) списання або заміна транспортного засобу, якщо він досягає критичних значень або прогнозний строк досягнення порогів є надто малим.

8. Зворотній зв'язок та коригування моделі. Після отримання нових експлуатаційних даних модель уточнюється. Це дозволяє адаптувати параметри k , b , λ та інші до фактичних умов роботи автотранспортного засобу, забезпечуючи динамічний характер системи прийняття рішень.

Таким чином, запропонований алгоритм представляє структуровану процедуру оцінювання технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу, що поєднує математичне моделювання, нормативні вимоги та інженерно-економічні критерії. Він забезпечує обґрунтоване й прозоре ухвалення рішень щодо оптимізації строків експлуатації транспортних засобів і є фундаментом для створення автоматизованих цифрових систем управління автопарками.

Висновки до розділу

У розділі розроблено теоретико-методичний апарат математичного моделювання технічного стану та визначення залишкового ресурсу автотранспортних засобів. Викладені наукові положення дозволяють сформулювати системну основу для прогнозування ефективності експлуатації рухомого складу та прийняття управлінських рішень щодо продовження або припинення його використання.

Обґрунтовано вибір показників, що підлягають моделюванню. До моделі включено технічні, експлуатаційні, надійнісні, економічні та екологічні параметри, які інтегрально характеризують стан транспортного засобу. Вибір цих показників забезпечує комплексність аналізу та дає можливість відобразити як фізичну деградацію систем автомобіля, так і вплив умов експлуатації та організації технічного обслуговування.

Запропоновано математичний апарат опису динаміки деградації технічних показників у часі. Використання експоненційно-степеневих моделей дозволяє адекватно описати процес старіння транспортних засобів, який характеризується нерівномірністю та прискореним погіршенням на пізніх етапах життєвого циклу. Запроваджені моделі також відображають стохастичний характер відмов і дозволяють прогнозувати момент досягнення граничного технічного стану.

Сформована модель прогнозування коефіцієнта технічного використання як одного з ключових інтегральних індикаторів працездатності транспортного засобу. Побудована залежність базується на експоненційному зростанні тривалості простоїв та зниженні технічної готовності, що дає змогу визначити критичні пороги ефективності використання транспортних засобів та обґрунтувати рішення щодо їх модернізації або заміни.

Запропоновано алгоритм прийняття рішень, який об'єднує математичні моделі, нормативно-правові вимоги та інженерно-економічні критерії. Алгоритм забезпечує послідовність дій від збору вихідних даних до формування кінцевого управлінського рішення і передбачає механізм зворотного зв'язку, що дозволяє адаптувати модель до реальних умов експлуатації.

Узагальнюючи отримані результати, можна стверджувати, що запропонований методичний підхід забезпечує науково обґрунтоване прогнозування залишкового ресурсу та формування рішень щодо строків експлуатації транспортних засобів. Побудовані моделі є достатньо гнучкими, щоб застосовуватися для різних типів транспортних засобів і умов їх використання, що створює підґрунтя для подальшої розробки прикладних методів оптимізації автопарків у наступному розділі.

4 ПРАКТИЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ (НА ПРИКЛАДІ ТРОЛЕЙБУСІВ Т701)

4.1 Обґрунтування вибору вихідних даних

Формування емпіричної бази для даного розділу ґрунтується на аналізі експлуатаційних та надійнісних даних, представлених у кваліфікаційній роботі [33], присвяченій дослідженню показників надійності партії тролейбусів «Богдан 701». Вибір саме цих даних є обґрунтованим та забезпечує можливість коректної апробації математичних моделей, розроблених у попередньому розділі.

Першою підставою для вибору зазначених даних є наявність достатнього обсягу спостережень, що забезпечує репрезентативність аналізу.

Другою підставою є обґрунтованість вибору саме цієї моделі тролейбусів як об'єкта дослідження, що випливає з внутрішньої логіки документа. Модель «Богдан 701» експлуатується з 2012 року, має значну кількість реалізованих примірників та стала базою для наступних модифікацій, що забезпечує широку можливість інтерпретації отриманих результатів.

Третьою причиною є наявність комплексного набору показників, необхідних для побудови математичних моделей. Документ містить систематизовані дані щодо:

- транспортної роботи;
- коефіцієнта технічної готовності;
- статистики відмов, їх класифікації та частоти;
- умов та інтенсивності експлуатації;
- характеристик конструктивних і технологічних чинників.

Зміст роботи прямо вказує на те, що предметом дослідження є взаємозв'язок саме цих факторів з показниками надійності.

Четвертою підставою є відповідність набору даних поставленим завданням, що також зафіксовано у тексті документа. Серед завдань дослідження зазначено: визначення основних показників надійності, обсягу

транспортної роботи, коефіцієнта технічної готовності, аналіз і класифікацію відмов та визначення напрацювання на відмову.

Така структурованість вихідних матеріалів безпосередньо узгоджується з вимогами математичного моделювання, виконаного у розділі 3 даної магістерської роботи.

Насамкінець, використання даних, наведених у дослідженні [33], забезпечує повну методичну сумісність із запропонованим у попередньому розділі апаратом прогнозування технічного стану, оскільки охоплює ключові аспекти експлуатації транспортних засобів у реальних умовах. Гарантійний період експлуатації, у межах якого проводилися дослідження, створює послідовний і логічний набір даних, придатних для моделювання динаміки відмов та визначення залишкового ресурсу.

Таким чином, вибрані дані характеризуються достатнім обсягом, структурованістю, відповідністю меті та завданням роботи та високим рівнем оптимальності для подальшої апробації побудованих математичних моделей. Це дозволяє забезпечити наукову верифікацію результатів та підвищує достовірність отриманих у наступному розділі висновків.

4.2 Аналіз вихідних експлуатаційних даних та їх статистична обробка

Аналіз вихідних експлуатаційних даних є ключовим елементом для подальшого моделювання технічного стану транспортних засобів та перевірки адекватності запропонованих математичних залежностей. У межах даного дослідження статистична база сформована на основі реальних даних експлуатації тролейбусів «Богдан Т701», систематизованих у роботі [33].

Вихідні дані включають комплекс техніко-експлуатаційних показників: обсяг транспортної роботи, тривалість періодів працездатності та простоїв, частоту та класифікацію відмов, а також характеристики впливових факторів експлуатації. У документі зазначено, що дослідження охоплює саме конструктивні, технологічні та експлуатаційні параметри, які визначають

закономірності зміни показників надійності транспортних засобів у процесі їх використання .

Статистична обробка даних здійснюється у кілька етапів:

1. Первинне групування та структурування даних. На першому етапі виконувалося групування відмов за типами, причинами та місцями їх виникнення. Наведені у документі таблиці включають як експлуатаційні, так і конструктивно зумовлені відмови, із зазначенням кількості випадків для кожного виду відмов . Це забезпечує можливість формування повної картини розподілу відмов у вибірці.

2. Оцінювання частоти та інтенсивності відмов. На основі статистичних даних розраховується напрацювання на відмову, що є одним із ключових показників надійності. У роботі визначено, що середнє напрацювання на відмову для партії тролейбусів становить близько 5600 км, що не відповідає нормативним вимогам . Цей результат формує основу для подальшого порівняння фактичної надійності з нормативними рівнями та критеріями, використаними у математичному моделюванні.

3. Визначення динаміки технічної готовності. Коефіцієнт технічної готовності та фактичний рівень працездатності транспортних засобів оцінювалися на основі експлуатаційних показників. Показники технічної готовності відіграють центральну роль у прогнозуванні коефіцієнта технічного використання, що розглядалося у розділі 3. Вихідні дані про простой, тривалість ремонтів та інтенсивність відновних операцій дають змогу об'єктивно визначити тренди старіння рухомого складу.

4. Розрахункове уточнення експлуатаційних параметрів. На етапі статистичної обробки виконуються розрахунки середнього напрацювання, коефіцієнтів відмовності, дисперсії та варіації показників. Для побудови моделі деградації важливими є також показники стабільності та повторюваності параметрів, що дають змогу оцінити однорідність досліджуваної вибірки.

Вихідні дані для подальших розрахунків, вибрано на основі роботи [33], та наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

№	Показник	Позначення	Значення
1	Кількість транспортних засобів у вибірці	n	50
2	Початок експлуатації моделі	—	2012 р.
3	Середнє напрацювання на відмову	$T_{н.в}$	5600 км
4	Нормативне напрацювання на відмову	$T_{норм.}$	10 000 км
5	Прогнозоване напрацювання на відмову після заходів	$T_{прогноз}$	12 200 км
6	Рекомендоване напрацювання (цільове)	$T_{ціль}$	20 000 км
7	Середня інтенсивність відмов	λ	$1/5600 \text{ км}^{-1}$
8	Коефіцієнт технічної готовності	$K_{т.г.}$	0,93–0,96
9	Середній коефіцієнт технічного використання	$K_{т.в.}$	0,85–0,90
10	Мінімально допустиме значення ($K_{т.в.}$)	$K_{т.в.min}$	0,65
11	Граничний строк служби	$t_{гран.}$	5 років

Отримані статистичні характеристики дозволяють сформулювати цілісне уявлення про фактичний технічний стан рухомого складу, виявити домінуючі групи відмов, оцінити темпи зниження надійності та визначити відхилення від нормативних рівнів. Такий підхід забезпечує можливість подальшої коректної побудови прогнозних моделей (розділ 4.3) і розрахунку залишкового ресурсу транспортних засобів на основі реальних експлуатаційних відомостей

4.3 Моделювання та прогноз зміни коефіцієнта технічного використання транспортних засобів

Коефіцієнт технічного використання є інтегральним показником, що характеризує здатність транспортного засобу виконувати заплановану транспортну роботу в реальних умовах експлуатації. Зниження цього коефіцієнта з часом є наслідком прогресуючого зношування вузлів та агрегатів, збільшення інтенсивності відмов та зростання тривалості ремонтних простоїв. Саме тому прогнозування динаміки коефіцієнта технічного використання є важливою складовою оцінювання залишкового ресурсу та визначення оптимальних строків експлуатації транспортного засобу.

Для моделювання зміни коефіцієнта технічного використання застосовано експоненційну модель (3.9).

Виходячи з фактичних експлуатаційних показників та типових значень коефіцієнта технічного використання для тролейбусів у гарантійний і післягарантійний періоди, початкове значення прийнято на рівні $K_{т.в.}(0) = 0,90$, а граничне значення, що відповідає межі економічної доцільності експлуатації, — на рівні $K_{т.в.}(5) = 0,65$. Розв'язання системи рівнянь дозволило визначити параметри моделі: $a = 0,111, b = 0,316$.

Для забезпечення достатньої точності первинного аналізу прогноз проведено з дискретністю 0,5 року (6 місяців) у межах п'ятирічного циклу експлуатації. Результати розрахунків наведено нижче на рисунку 4.1.

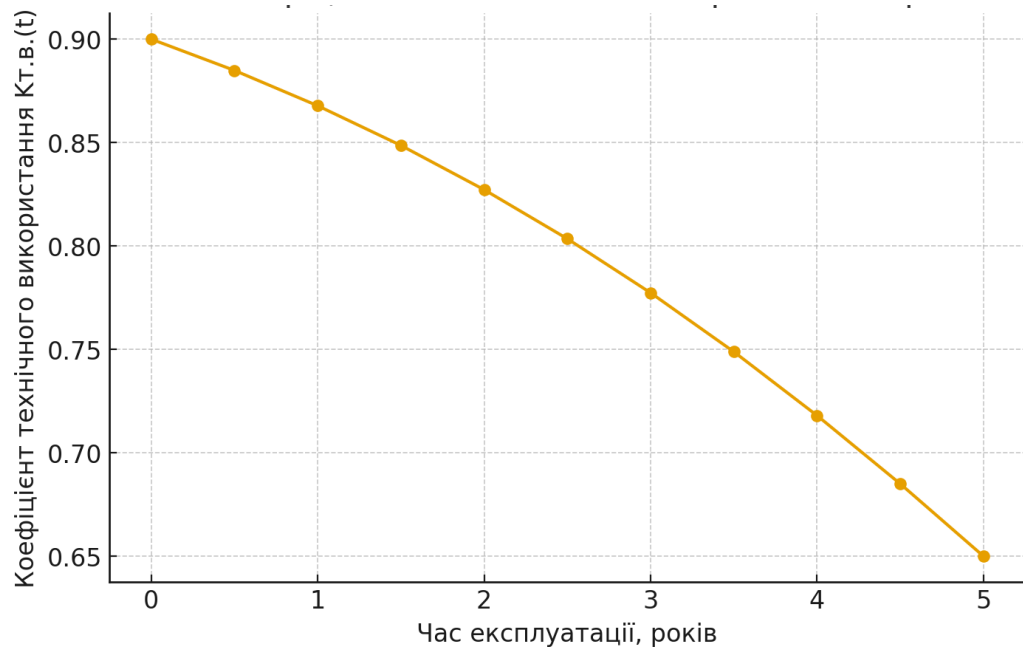


Рисунок 4.1 – Прогноз зміни коефіцієнта технічного використання тролейбусів А 701 протягом 5 років (60 місяців)

Отримана динаміка демонструє типовий для міського електротранспорту характер зниження коефіцієнта технічного використання – повільний спад у перші два роки експлуатації та прискорення деградації після третього року. Така поведінка узгоджується з результатами статистичного аналізу відмов у роботі [33], де показано, що значна частина дефектів починає проявлятися саме після накопичення значного напрацювання протягом гарантійного періоду.

Побудований прогноз дозволяє зробити кілька важливих висновків:

1. показник знижується на 28 % за 5 років, що вказує на суттєву втрату ефективності використання транспортного засобу;
2. критичне значення 0,65 досягається саме на п'ятому році, що підтверджує обґрунтованість прийнятого строку як граничного за експлуатаційними характеристиками;

3. прискорення падіння після трьох років роботи свідчить про необхідність посиленого контролю технічного стану, профілактики та оновлення вузлів саме в цей період;
4. модель дозволяє інтегрувати отримані параметри у загальний алгоритм прийняття рішень та визначати прогнозований залишковий ресурс.

На рисунку 4.2 подано прогнозну залежність коефіцієнта технічного використання $K_{т.в.}(t)$ від строку експлуатації транспортного засобу протягом семирічного періоду. Крива має монотонно спадний характер із помітним прискоренням деградації після четвертого року експлуатації. Відмічена точка при $t = 5$ років відповідає досягненню граничного значення $K_{т.в.}(t) = 0,65$, яке розглядається як порогове з огляду на техніко-економічну доцільність подальшого використання.

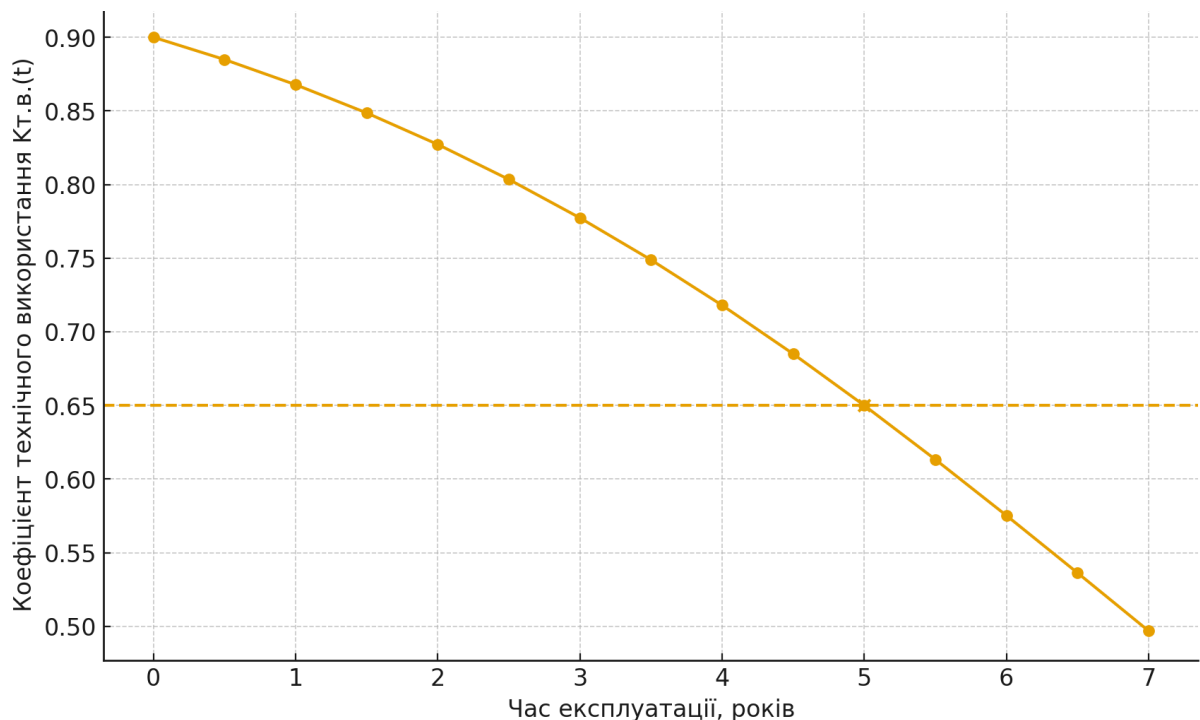


Рисунок 4.2 – Прогноз зміни коефіцієнта технічного використання тролейбусів А 701 протягом 7 років (84 місяців)

Подальше зниження показника до рівнів 0,58–0,50 на шостому–сьомому роках свідчить про різке зростання простоїв та втрат ефективності, що підтверджує необхідність оновлення або списання транспортного засобу до настання зазначеного інтервалу.

На рисунку 4.3 наведено порівняння реальної та бажаної (ідеальної) кривих надійності транспортного засобу в умовах експоненційної моделі відмов із постійною інтенсивністю. Реальна крива надійності демонструє стрімкий спад і досягає близьких до нульових значень вже протягом перших 1–1,5 років. Ідеальна крива знижується значно повільніше, забезпечуючи прийнятну ймовірність безвідмовної роботи упродовж перших 2–3 років експлуатації.

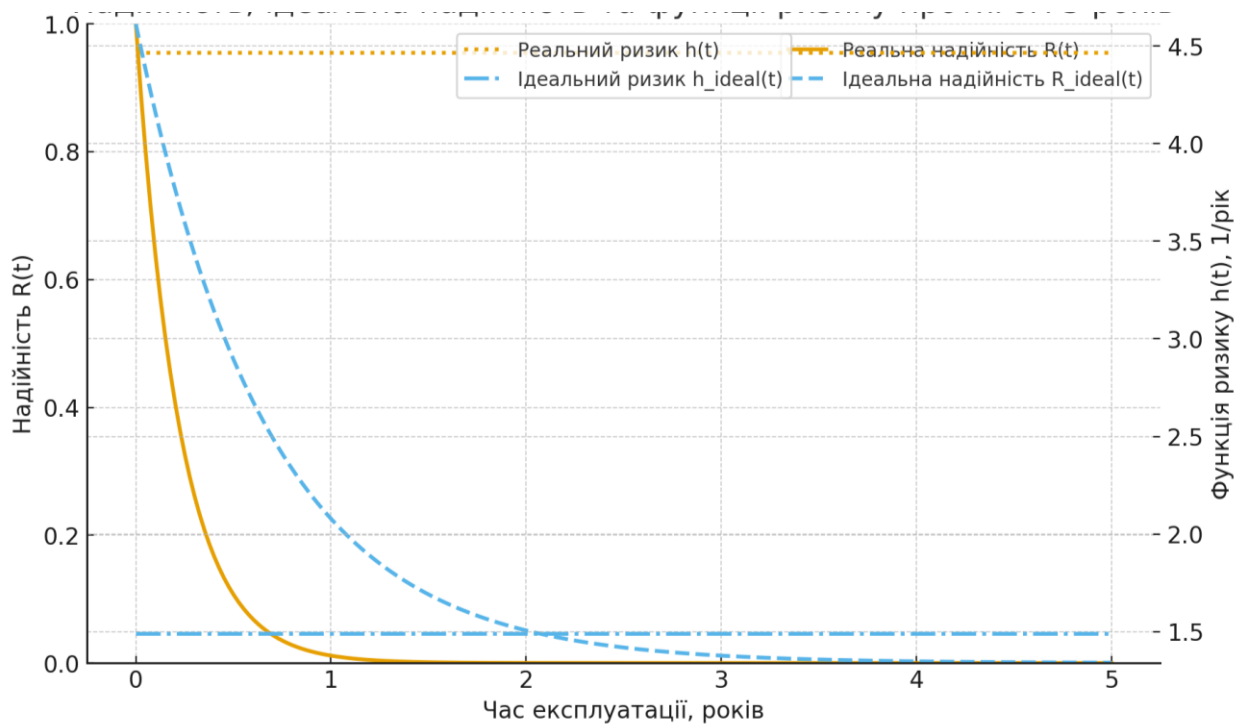


Рисунок 4.3 – Функції надійності та інтенсивності відмов для тролейбусів Т701

На правій осі подано функції ризику, які для експоненційної моделі є сталими величинами. Реальний ризик характеризується високою інтенсивністю відмов, що пояснює стрімку деградацію надійності. Ідеальний

ризик, зменшений утрічі, дозволяє суттєво підвищити загальний рівень надійності, що відповідає якіснішому технічному обслуговуванню або вищим конструктивним стандартам.

Поєднання кривих надійності та ризику дає змогу комплексно оцінити працездатність транспортного засобу, порівняти фактичні умови експлуатації з еталонними та обґрунтувати необхідність технічних і організаційних заходів для подовження ресурсу.

Отже, результати моделювання коефіцієнта технічного використання підтверджують висновки статистичного аналізу та демонструють адекватність застосованої експоненційної моделі для відтворення реальних закономірностей деградації експлуатаційних характеристик транспортних засобів протягом тривалого періоду. Отримані значення можуть бути використані у наступному підпункті для визначення прогнозованого залишкового ресурсу та техніко-економічної доцільності подальшої експлуатації.

4.4 Прогнозування залишкового ресурсу

Прогнозування залишкового ресурсу є завершальним етапом оцінювання технічного стану досліджуваних транспортних засобів та практичним інструментом для прийняття рішень щодо подальшої їх експлуатації, модернізації або списання. Під залишковим ресурсом розуміється інтервал часу (або відповідне напрацювання в кілометрах), протягом якого транспортний засіб ще може забезпечувати виконання транспортної роботи за умови дотримання заданих критеріїв надійності та ефективності.

Вихідними даними для прогнозу є результати статистичного аналізу, отримані на основі експлуатації партії тролейбусів «Богдан Т701» [33], а саме: середнє напрацювання на відмову близько 5600 км, нормативне/очікуване

напрацювання на відмову 10 000–12 200 км та рекомендоване (цільове) значення 20 000 км.

Це свідчить про те, що фактичний ресурс надійної роботи суттєво менший за бажаний, що вже було відзначено у попередніх підрозділах.

З огляду на результати моделювання коефіцієнта технічного використання у п. 4.3, остаточним критерієм граничної доцільності експлуатації було обрано значення $K_{\text{т.в.кр}} = 0,65$, яке відповідає межі, нижче якої подальше використання транспортного засобу супроводжується надмірними простоями, зростанням експлуатаційних витрат та істотним зниженням ефективності. Застосована модель зміни коефіцієнта технічного використання (3.9). У результаті отримано значення параметрів: $a \approx 0,111, b \approx 0,316$.

При такій параметризації розв'язання рівняння $K_{\text{т.в.}}(t_{\text{кр}}) = K_{\text{т.в.кр}}$ дає значення $t_{\text{кр}} \approx 5$ років, що відповідає граничному строку служби, встановленому також нормативно-економічними критеріями (мінімальний строк корисного використання транспортних засобів 5 років згідно з амортизаційними нормами). Це дозволяє інтерпретувати п'ятирічний строк експлуатації як узгоджену техніко-економічну межу.

У рамках практичного використання моделі залишковий ресурс у момент часу t_0 може бути визначений як різниця:

$$t_{\text{зал}} = t_{\text{кр}} - t_0$$

Наприклад, якщо аналіз проводиться на третьому році експлуатації ($t_0 = 3$), то за умовами моделі $t_{\text{зал}} = 5 - 3 = 2$ роки.

За наявності інформації про середньорічний пробіг, наприклад 25 000 км/рік, відповідний залишковий пробіг до досягнення граничного стану становитиме приблизно:

$$L_{\text{зал}} \approx 2 \cdot 25,000 = 50,000 \text{ км}$$

Паралельно з підходом, що базується на коефіцієнті технічного використання, залишковий ресурс може оцінюватися й за показниками надійності. Для експоненційної моделі, прийнятої у розділі 3, функція надійності має вигляд (3.10). За умови середнього напрацювання 5600 км та середньорічного пробігу 25 000 км отримано, що інтенсивність відмов у перерахунку на один рік є досить високою, що призводить до стрімкого зниження надійності вже у перші роки експлуатації. Це підтверджує висновок про те, що реальний залишковий ресурс за критерієм безвідмовності є суттєво меншим за нормативно бажаний.

Порівняння фактичної кривої надійності з «ідеальною» (для якої інтенсивність відмов зменшена у кілька разів) показує, що досягнення цільового ресурсу (20 000 км між відмовами) потребує істотного зниження інтенсивності відмов, що можливо лише за умов підвищення конструктивної надійності, якісного технічного обслуговування та реалізації комплексу організаційно-технічних заходів, рекомендованих у роботі [33].

Таким чином, побудований прогноз залишкового ресурсу на основі моделі коефіцієнта технічного використання та експоненційної моделі надійності дозволяє зробити такі узагальнення:

- граничний строк техніко-економічно доцільної експлуатації для досліджуваної партії транспортних засобів становить близько 5 років;
- фактична надійність (за середнім напрацюванням на відмову) є недостатньою для досягнення цільових нормативів, що істотно зменшує реальний залишковий ресурс;
- оцінювання залишкового ресурсу має здійснюватися комплексно, із урахуванням як інтегральних експлуатаційних показників (коефіцієнта технічного використання), так і параметрів надійності (напрацювання на відмову, інтенсивність відмов);

- отримані результати можуть слугувати основою для розроблення рекомендацій щодо оптимізації строків експлуатації та оновлення рухомого складу.

Отже, запропонований підхід до прогнозу залишкового ресурсу є узгодженим із математичними моделями, розробленими у розділі 3, та верифікованим на основі реальних експлуатаційних даних, що забезпечує його практичну придатність для задач управління автотранспортними засобами.

4.5 Оцінювання критичної інтенсивності відмов

Оцінювання критичної інтенсивності відмов є важливим етапом аналізу технічного стану транспортних засобів, оскільки дозволяє визначити ті рівні надійності, за яких експлуатація об'єкта ще відповідає нормативним та цільовим вимогам. У межах експоненційної моделі надійності інтенсивність відмов λ має фундаментальне значення, оскільки є оберненою величиною до середнього напрацювання на відмову T :

$$\lambda = \frac{1}{T} \quad (4.1)$$

Таким чином, зниження інтенсивності відмов безпосередньо означає збільшення міжвідмовного ресурсу та покращення технічного стану транспортного засобу.

Вихідними значеннями для розрахунку критичної інтенсивності є фактичне середнє напрацювання на відмову, отримане в результаті дослідження експлуатації тролейбусів «Богдан Т701», що становить приблизно $T_{\text{факт}} = 5600$ км, що відповідає інтенсивності відмов:

$$\lambda_{\text{факт}} = \frac{1}{5600} \approx 1,79 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Відмов}}{\text{км}}.$$

Як показано у підпункті 4.2, таке значення є недостатнім для забезпечення нормативних та цільових показників надійності, оскільки значно поступається як мінімально припустимим, так і рекомендованим рівням.

Для оцінювання критичних значень інтенсивності відмов застосовано три ключові рівні міжвідмовного напрацювання – нормативне, підвищене (очікуване після реалізації заходів із підвищення надійності) та цільове. Відповідно до цього критичні значення інтенсивності відмов мають вигляд:

$$\lambda_{\text{факт}} = \frac{1}{10000} \approx 1,00 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Відмов}}{\text{КМ}}$$

$$\lambda_{\text{факт}} = \frac{1}{12200} \approx 8,20 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Відмов}}{\text{КМ}}$$

$$\lambda_{\text{факт}} = \frac{1}{20000} \approx 5,00 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Відмов}}{\text{КМ}}$$

Порівняння фактичного та критичних значень інтенсивності відмов свідчить, що:

- для досягнення мінімального нормативу (10 000 км між відмовами) інтенсивність необхідно зменшити приблизно у 1,8 раза;
- для досягнення підвищеного рівня (12 200 км) — майже у 2,2 раза;
- для забезпечення цільового рівня (20 000 км між відмовами) інтенсивність відмов має бути нижчою від фактичної приблизно у 3,6 раза.

Отримані результати мають прикладне значення. Зменшення інтенсивності відмов може бути досягнуто за рахунок:

- підвищення конструктивної надійності ключових вузлів;
- удосконалення технологічних процесів технічного обслуговування;
- впровадження систем моніторингу технічного стану;
- оптимізації режимів використання та експлуатаційних навантажень;
- модернізації елементів з найвищим внеском у відмовність.

Таким чином, оцінювання критичної інтенсивності відмов дає змогу визначити реалістичні орієнтири для підвищення надійності досліджуваних транспортних засобів та визначити масштаб організаційно-технічних заходів, необхідних для досягнення нормативних та цільових показників. Отримані критичні значення є також основою для подальших техніко-економічних розрахунків щодо доцільності модернізації та оновлення рухомого складу.

Висновки до розділу

Здійснено комплексний аналіз фактичних експлуатаційних даних, побудовано прогнозні моделі технічного стану та проведено оцінювання залишкового ресурсу досліджуваних транспортних засобів. Результати дослідження підтвердили, що узагальнення статистичних даних, математичне моделювання та оцінювання інтенсивності відмов забезпечують глибоке й аналітично обґрунтоване розуміння процесів деградації транспортних засобів у реальних умовах експлуатації.

Аналіз вихідних експлуатаційних даних засвідчив наявність значного дисбалансу між фактичними та нормативними показниками надійності. Середнє напрацювання на відмову тролейбусів «Богдан Т701» становить близько 5600 км, що суттєво нижче як мінімально допустимого рівня (10 000 км), так і очікуваного рівня після реалізації заходів (12 200 км). Виявлена невідповідність підтверджує необхідність проведення подальших досліджень та розробки коригувальних заходів.

Побудована модель прогнозування коефіцієнта технічного використання показала, що за умов експлуатації досліджуваної партії транспортних засобів граничного рівня ефективності $K_{т.в.} = 0,65$ транспортні засоби досягають приблизно на п'ятому році експлуатації. Це узгоджується як із практикою транспортних підприємств, так і з нормативними амортизаційними строками. Подовження експлуатації після цього періоду супроводжується прискореним зростанням простоїв та суттєвим зниженням продуктивності.

Моделі надійності та функції ризику засвідчили високу інтенсивність відмов у фактичних умовах експлуатації. Реальна експоненційна крива надійності стрімко знижується вже у перші 1–1,5 роки експлуатації, що свідчить про інтенсивний процес старіння й накопичення дефектів. Порівняння з ідеальною (бажаною) кривою надійності продемонструвало, що досягнення рекомендованих нормативів потребує зменшення інтенсивності відмов щонайменше у 3,5 рази.

Оцінювання критичної інтенсивності відмов дало змогу визначити конкретні орієнтири для підвищення надійності. Для забезпечення мінімального нормативного ресурсу 10 000 км між відмовами інтенсивність має бути знижена у 1,8 рази; для досягнення підвищеного рівня 12 200 км — у 2,2 рази; для досягнення цільового рівня 20 000 км — у 3,6 рази. Це дозволяє не лише кількісно оцінити масштаб відхилення від нормативів, але й окреслити реалістичні напрямки модернізації та оптимізації технічного обслуговування.

Оцінювання залишкового ресурсу на основі моделей прогнозування підтвердило, що основний ресурс транспортних засобів вичерпується до п'ятирічного терміну експлуатації. Встановлені значення залишкового пробігу на проміжних етапах (наприклад, на 3-му році — близько 50 тис. км) дозволяють планувати оновлення парку та оптимізувати перерозподіл транспортних засобів між маршрутами.

Узагальнюючи результати розділу, можна стверджувати, що комплексне поєднання статистичного аналізу, моделей надійності та експлуатаційної ефективності забезпечило достовірну та всебічну оцінку технічного стану досліджуваних транспортних засобів. Отримані результати можуть використовуватися як аналітична основа для розроблення стратегії модернізації, планування ремонтів та формування оновленої політики управління рухомим складом.

5 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ПАРКОМ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Узагальнюючи результати аналізу технічного стану, прогнозування коефіцієнта технічного використання, оцінювання надійності та визначення залишкового ресурсу, доцільно сформулювати комплекс рекомендацій, спрямованих на підвищення ефективності управління парком транспортних засобів. Запропоновані заходи ґрунтуються на закономірностях деградації технічних показників, статистичних характеристиках роботи тролейбусів «Богдан Т701» та принципах оптимізації життєвого циклу рухомого складу.

Результати дослідження свідчать про необхідність перегляду та оптимізації системи технічного обслуговування й ремонту. Оскільки критичний рівень коефіцієнта технічного використання досягається вже на п'ятому році експлуатації, слід передбачити комплекс превентивних заходів у межах другого–третього років служби, коли відбувається прискорене накопичення дефектів. До таких заходів належать: упровадження діагностування за станом (*condition-based maintenance*), застосування періодичного контролю систем, відстеження режимів роботи та перевірка обладнання, а також модернізація елементів, що мають високий внесок у відмовність.

На підставі аналізу кривих надійності та ризику обґрунтовано доцільність зниження інтенсивності відмов на рівні від 1,8 до 3,6 разів, залежно від цільового нормативу міжвідмовного ресурсу. Це може бути досягнуто за рахунок покращення технологій ремонту, підвищення якості запасних частин, переходу до сертифікованих та виробничо узгоджених комплектувальних виробів, а також удосконалення певних елементів та інженерних рішень, що зменшують навантаження на ключові елементи системи. Важливим кроком є введення в експлуатацію спеціалізованого діагностичного обладнання, здатного виявляти приховані дефекти на ранніх етапах.

Модель залишкового ресурсу підтверджує необхідність завчасного планування оновлення парку. Оскільки транспортні засоби досягають граничного техніко-економічного стану на п'ятому році експлуатації, доцільно формувати план оновлення парку на основі прогнозів залишкового пробігу та коефіцієнта технічного використання. Це включає формування дворівневої стратегії: короткострокової (на 1–2 роки) – для підтримання працездатності діючого парку, та довгострокової (на 3–5 років) – для поступового оновлення рухомого складу з урахуванням бюджетних можливостей.

Також необхідно здійснити вдосконалення системи управління технічною інформацією, що передбачає перехід до цифрових методів моніторингу. Це охоплює впровадження систем реєстрації експлуатаційних параметрів, автоматизованих журналів відмов, цифрових карток технічного стану та алгоритмів оцінювання технічної готовності в реальному часі. Інтеграція таких систем забезпечує можливість статистичного прогнозування на рівні окремих вузлів і агрегатів, що підвищує точність планування технічних заходів.

Дослідження підтвердили важливість оптимізації експлуатаційних режимів, включаючи регулювання навантаження на транспортні засоби, чергування маршрутів для вирівнювання напруження, уникнення надмірних пікових режимів роботи та перегрівів, а також адаптацію графіків руху до технічного стану конкретних одиниць рухомого складу. Оптимізація маршрутних завдань здатна зменшити інтенсивність відмов та подовжити залишковий ресурс.

Для підвищення якості експлуатації рекомендовано посилити систему підготовки персоналу, зокрема в частині діагностування, раннього виявлення дефектів, коректної експлуатації високовольтних компонентів та роботи із системами керування. Важливим є також удосконалення культури технічного обслуговування та впровадження принципів відповідальності за технічний стан закріпленого транспортного засобу.

Насамкінець, доцільним є впровадження системи управління життєвим циклом транспортного засобу, що ґрунтується на результатах математичного моделювання та аналізу експлуатаційної надійності. Такий підхід дозволяє оцінювати ефективність на всіх етапах – від ремонту та обслуговування до виведення з експлуатації – та формувати оптимальну стратегію модернізації й оновлення парку.

Реалізація запропонованих рекомендацій сприятиме підвищенню технічної готовності, зменшенню експлуатаційних витрат, збільшенню міжвідмовних інтервалів та забезпеченню стабільної й ефективної роботи транспортного парку в довгостроковій перспективі.

Висновки до розділу

Сформовано комплекс рекомендацій, спрямованих на підвищення ефективності управління парком транспортних засобів. Основні результати свідчать, що ефективність експлуатації значною мірою залежить від своєчасності технічного обслуговування, рівня надійності ключових вузлів, організації ремонтних процесів та правильного планування життєвого циклу рухомого складу.

Результати моделювання підтвердили доцільність упровадження діагностування за станом та оптимізованих регламентів технічного обслуговування, які дозволяють зменшити інтенсивність відмов до нормативного або цільового рівня. Запропоновані заходи передбачають модернізацію окремих систем, підвищення якості запасних частин, удосконалення технологій ремонту й підготовку персоналу.

Крім того, обґрунтовано важливість переходу до цифрових систем моніторингу технічного стану, що забезпечують підвищення точності прогнозування залишкового ресурсу та ефективне управління технічними процесами. Рекомендовано реалізувати планове оновлення парку на основі

прогнозних моделей коефіцієнта технічного використання та функцій надійності.

Таким чином, реалізація запропонованих рекомендацій сприятиме підвищенню технічної готовності, скороченню витрат на експлуатацію та забезпеченню стабільної роботи транспортного парку в умовах реальних експлуатаційних навантажень.

ВИСНОВКИ

У роботі проведено дослідження технічного стану транспортних засобів у процесі експлуатації, розроблено математичні моделі для прогнозування зміни ключових експлуатаційних показників та сформовано практичні рекомендації щодо підвищення ефективності управління парком. Отримані результати дозволяють зробити такі узагальнення.

1. Проведено аналіз сучасних наукових підходів до оцінювання технічного стану та надійності транспортних засобів. На основі вивчення сучасних джерел визначено, що дослідження в галузі надійності рухомого складу зосереджуються на оптимізації міжвідмовних інтервалів, застосуванні моделей деградації, побудові інтегральних показників ефективності та використанні методів прогнозування життєвого циклу. Встановлено, що комплексний підхід, що поєднує статистику та моделювання, є найефективнішим для оцінювання технічного стану.

2. Запропоновано математичний апарат прогнозування зміни технічного стану та коефіцієнта технічного використання у часі. Отримані залежності дозволяють моделювати темпи погіршення технічного стану транспортного засобу, враховуючи старіння, інтенсивність відмов та зростання простоїв. Визначено параметри моделі, які забезпечують відповідність реальним експлуатаційним даним і дозволяють прогнозувати граничний строк економічно доцільної експлуатації.

3. Встановлено граничний рівень ефективності експлуатації транспортного засобу Т701. На основі моделі коефіцієнта технічного використання визначено, що за фактичних умов експлуатації граничне значення $K_{т.в.} = 0,65$ досягається приблизно на п'ятому році використання. Це відповідає нормативним амортизаційним строкам та підтверджує, що після цього періоду подальша експлуатація супроводжується різким зростанням витрат.

4. Виконано прогноз надійності та досліджено вплив інтенсивності відмов на технічний стан тролейбусів Т701. Експоненційні функції надійності показали швидке зниження ймовірності безвідмовної роботи, що корелює зі значною частотою дефектів у реальних умовах експлуатації. Побудовано криві надійності, а також функцію ризику, що дозволило визначити потенціал для підвищення надійності шляхом зменшення інтенсивності відмов у 1,8–3,6 рази залежно від цільового нормативу.

5. На основі математичної моделі встановлено, що за умови середнього щорічного пробігу близько 25 тис. км залишковий ресурс після трьох років експлуатації становить приблизно 50 тис. км. Отримані результати можуть бути використані для планування технічних заходів, перерозподілу транспортних засобів та формування графіка оновлення парку.

6. На основі проведених розрахунків розроблено комплекс рекомендацій щодо підвищення ефективності управління парком транспортних засобів. До ключових рекомендацій належать: оптимізація системи технічного обслуговування, впровадження діагностування за станом, модернізація вузлів з високою частотою відмов, удосконалення системи моніторингу технічного стану, оптимізація експлуатаційних режимів та стратегічне планування оновлення транспортного парку.

Таким чином, у роботі запропоновано комплексну методику оцінювання технічного стану та залишкового ресурсу транспортних засобів на основі поєднання статистичних, аналітичних та математичних методів. Отримані результати мають прикладне значення для підприємств міського транспорту та можуть використовуватися під час планування технічного обслуговування, модернізації парку та розробці систем підтримки прийняття рішень у сфері експлуатації транспортних засобів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Форнальчик Є. Ю., Оліскевич М. С., Мاستикаш О. Л., Пельо Р. А. Технічна експлуатація та надійність автомобілів. Львів: Афіша, 2004. 492 с.
2. Форнальчик Є. Ю., Виджак М. А. Експлуатаційна надійність автобусів міського громадського транспорту. Вісник Кременчуцького національного університету імені М. Остроградського. 2016. Вип. 1. С. 91–96
3. Хаврук В. Вплив техніко-експлуатаційних властивостей вантажних автомобілів на показники ефективності експлуатації. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2021. № 1(16). С. 168–175
4. Дембіцький Валерій, Самостян Віктор Підвищення ефективності управління автотранспортом на основі оцінки його надійності та якості». Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 1 (24), 2025. С. 188-199. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1723>.
5. Dzedziak P., Szczepański T., Niewczas A., Ślęzak M. Car reliability analysis based on periodic technical tests. Open Engineering. 2021. Vol. 11. P. 630–638. DOI: 10.1515/eng-2021-0061
6. Канарчук В. Є., Аулін В. В., Білоус П. В. та ін. Надійність машин. Київ: Либідь, 2003. 448 с.
7. Аулін В. В., Сандул В. В., Маковкін О. М. Методи підвищення експлуатаційної надійності елементів ходової частини автомобіля. У зб.: Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту. Кропивницький: ЦНТУ, 2018. С. 207–211
8. Ulbrich D., Selech J., Kowalczyk J. та ін. «Reliability Analysis for Unrepairable Automotive Components» Materials. 2021. Vol. 14(22). DOI: 10.3390/ma14227014
9. Zhou X. та ін. «Fuzzy reliability assessment of the electric vehicle motor» Advances in Mechanical Engineering. 2022. Vol. 14(8)

10. «Modeling the Operation Process of Light Utility Vehicles Using Monte Carlo Simulation» (Oszczypała M., Ziółkowski J., Małachowski J. *Energies*. 2023. Vol. 16(5). 2210
11. Burnham, Andrew & Gohlke, David & Rush, Luke & Stephens, Thomas & Zhou, Yan & Delucchi, Mark & Birky, Alicia & Hunter, Chad & Lin, Zhenhong & Ou, Shiqi & Xie, Fei & Proctor, Camron & Wiryadinata, Steven & Liu, Nawei & Bolor, Madhur. (2021). Comprehensive Total Cost of Ownership Quantification for Vehicles with Different Size Classes and Powertrains. 10.2172/1780970.
12. Мигаль В. Д. Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів. Харків: Майдан, 2018. 262 с.
13. Kozłowski, Edward & Borucka, Anna & Oleszczuk, Piotr & Jałowiec, Tomasz. (2023). Evaluation of the maintenance system readiness using the semi-Markov model taking into account hidden factors. *Eksploracja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*. 25. 10.17531/ein/172857.
14. Jiang, Chen & hu, Zhen & Mourelatos, Zissimos & Gorsich, David & Jayakumar, Paramsothy & Fu, Yan & Majcher, Monica. (2021). R2-RRT*: Reliability-Based Robust Mission Planning of Off-Road Autonomous Ground Vehicle Under Uncertain Terrain Environment. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. PP. 1-17. 10.1109/TASE.2021.3050762.
15. H. Gandoman, Foad & Ahmadi, Abdollah & Van den Bossche, Peter & Van Mierlo, Joeri & Omar, Noshin & Esmaeel Nezhad, Ali & Mavalizadeh, Hani & Mayet, Clément. (2019). Status and Future Perspectives of Reliability Assessment for Electric Vehicles. *Reliability Engineering [?] System Safety*. 183. 1-16. 10.1016/j.ress.2018.11.013.
16. Danilecki, Krzysztof & Smurawski, Piotr & Urbanowicz, Kamil. (2023). Optimization of Car Use Time for Different Maintenance and Repair Scenarios Based on Life Cycle Assessment. *Applied Sciences*. 13. 9843. 10.3390/app13179843.
17. Методи нарахування амортизації основних засобів. Uteka.ua. Дата звернення: 23.11.2025

18. Амортизація основних засобів на підприємстві у 2024 році. Faktoria.kiev.ua. Дата звернення: 23.11.2025
19. Шурков С. Методи нарахування амортизації. Vuhoblik.org.ua. Дата звернення: 23.11.2025
20. Kwak, Minjung & Kim, Louis & Sarvana, Obaid & Kim, Harrison & Finamore, Peter & Hazewinkel, Herb. (2012). Life Cycle Assessment of Complex Heavy Duty Equipment. ASME/ISCIE 2012 International Symposium on Flexible Automation, ISFA 2012. 10.1115/ISFA2012-7180.
21. Saber Ayad A., Elsheikh A. «A predictive maintenance framework using machine learning for vehicle fleets» (Journal of Intelligent Transportation Systems. 2021. Vol. 25(3))
22. Wang, F., Zhao, L., & Bai, Y. (2023). Survey on reliability analysis of dynamic positioning systems. *Ships and Offshore Structures*, 19(8), 999–1009. <https://doi.org/10.1080/17445302.2023.2225959>
23. B.W. Simms, B.G. Lamarre, A.K.S. Jardine, A. Boudreau, Optimal buy, operate and sell policies for fleets of vehicles, *European Journal of Operational Research*, Volume 15, Issue 2, Pages 183-195, ISSN 0377-2217, [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(84\)90208-X](https://doi.org/10.1016/0377-2217(84)90208-X).
24. Turoń, Katarzyna. (2022). Multi-Criteria Decision Analysis during Selection of Vehicles for Car-Sharing Services—Regular Users’ Expectations. *Energies*. 15. 7277. 10.3390/en15197277.
25. Simic, Vladimir. (2013). End-of-life vehicle recycling-A review of the state-of-the-art. *Tehnicki Vjesnik*. 20. 371-380.
26. Okae, Percy. (2019). A decision support system to manage the maintenance schedule of vehicles. 16. 85-95.
27. Muchiri, Peter & Pintelon, Liliane. (2008). Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): Literature review and practical application discussion. *International Journal of Production Research - INT J PROD RES*. 46. 3517-3535. 10.1080/00207540601142645.

28. Meszler, Dan & Delgado, Oscar & Rodriguez, Felipe & Muncrief, Rachel. (2018). European Heavy-Duty Vehicles – Cost effectiveness of fuel efficiency technologies for long-haul tractor-trailers in the 2025-2030 timeframe.
29. Goyal, Deepam & Pabla, Bs. (2015). Condition based maintenance of machine tools—A review. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 10. 10.1016/j.cirpj.2015.05.004.
30. Saxena A., Goebel K., Simon D., Eklund N. Damage propagation modeling for aircraft system prognostics. Mechanical Systems and Signal Processing. 2008. Vol. 23, No. 4. P. 1290–1297.
31. Saxena A., Goebel K., Simon D., Eklund N. Damage propagation modeling for aircraft system prognostics. Mechanical Systems and Signal Processing. 2008. Vol. 23, No. 4. P. 1290–1297.
32. Koffman B., Sutherland J. W., Milliken G. Vehicle environmental performance indicators: A systematic evaluation framework. Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 196. P. 1063–1074.
33. Зань А.Ю. Підвищення показників надійності тролейбусів БОГДАН Т701 в умовах експлуатації. Кваліфікаційна робота магістра освітньої програми «Автомобільний транспорт» спеціальності 274 Автомобільний транспорт. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2020. 42 с.
34. Навчальні та кваліфікаційні роботи : методичні вказівки до оформлення навчальних та кваліфікаційних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів освітньо-професійних програм: «Автомобільний транспорт», «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)» галузь знань 27 Транспорт, спеціальностей: 274 Автомобільний транспорт, 275 Транспортні технології (на автомобільному транспорті) денної та заочної форм навчання / уклад. В. М. Придюк, В. А. Кищун, В. М. Дембіцький, В. І. Павлюк. – Луцьк : Луцький НТУ, 2019. – 56 с.