

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет транспорту та інженерії

(повне найменування факультету)

Кафедра автомобільного транспорту

(повна найменування кафедри)

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

**БАГАТОВИМІРНИЙ АНАЛІЗ В СИСТЕМІ ПЛАНУВАННЯ
СЕРВІСУ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ**

спеціальність J8 Автомобільний транспорт
(шифр і назва спеціальності)

Освітньо-наукова програма «Інжиніринг автомобільного транспорту»
(назва освітньої програми)

**Виконав: здобувач вищої освіти
групи ІАТм-21
Андрій БЕРЕЗЮК**

(підпис)

**Керівник:
к.т.н., доцент
Юрій БУЛІК**

(підпис)

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

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет транспорту та механічної інженерії

Кафедра автомобілів і транспортних технологій

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 27 Транспорт

Спеціальність: 274 Автомобільний транспорт

Освітньо-наукова програма: «Інжиніринг автомобільного транспорту»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В. ОНИЩУК

«___» _____ 202_ р.

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

Березюку Андрію Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Імітаційне моделювання системи технічного обслуговування транспортних засобів»

Керівник роботи: к.т.н., доцент Юрій Булік

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

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

3. Вихідні дані до роботи: стан ринку вантажних автомобілів, підприємства фірмового автосервісу, управління сервісом автомобілів, статистичні методи

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

1 Теоретичні основи багатовимірного аналізу в системах планування сервісу вантажних автомобілів

2 Методичні підходи та інструменти багатовимірного аналізу в системі планування сервісу вантажних автомобілів

3 Реалізація багатовимірного аналізу в системі планування сервісу вантажних автомобілів

4 Оцінка ефективності впровадження системи багатовимірного аналізу в плануванні сервісу вантажних автомобілів

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

Слайд 1 – Титульний аркуш; Слайд 2,3 – Мета, завдання досліджень, Наукова новизна; Слайд 4 – 11 – Основні результати роботи винесені на захист, Слайд 12, 13 – Висновки

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання «02» грудня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Сутність та роль сервісного обслуговування вантажних автомобілів у сучасних транспортно-логістичних системах</i>	03.12.2025	
2	<i>Види та методи багатовимірного аналізу, їх застосування у сервісному плануванні</i>	22.12.2025	
3	<i>Загальна методологія застосування багатовимірного аналізу у сервісному плануванні</i>	10.01.2026	
4	<i>Формування інформаційної бази для багатовимірного аналізу</i>	26.01.2026	
5	<i>Кластеризація автопарку за режимами експлуатації</i>	01.02.2026	
6	<i>Формування інтегральних індексів технічного стану</i>	05.02.2026	
7	<i>Методика оцінювання результативності системи сервісного планування</i>	13.03.2026	
8	<i>Економічна оцінка ефективності впровадження</i>	26.03.2026	
9	<i>Написання висновків по роботі</i>	02.04.2026	
10	<i>Перевірка кваліфікаційної роботи керівником</i>	01.05.2025	
11	<i>Оформлення пояснювальної записки та графічної частини відповідно діючих вимог</i>	05.05.2026	
12	<i>Перевірка роботи на плагіат</i>	за два тижні до захисту	
13	<i>Захист кваліфікаційної роботи</i>	згідно графіка захистів	

Здобувач вищої освіти

_____ (А. БЕРЕЗЮК)
 (підпис) (ініціали, прізвище)

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ (Ю. БУЛІК)
 (підпис) (ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

Березюк А.В. Тема магістерської роботи: «Багатовимірний аналіз в системі планування сервісу вантажних автомобілів». Рукопис. ЛНТУ, Луцьк, 2026.

Метою даної роботи є розроблення методики застосування багатовимірного аналізу для підвищення ефективності системи планування сервісу вантажних автомобілів та обґрунтування можливостей її практичного впровадження на реальному підприємстві.

Об'єктом дослідження є система технічного обслуговування і ремонту вантажних автомобілів на автотранспортному підприємстві середнього масштабу.

Предметом дослідження є методи та моделі багатовимірного аналізу даних, які застосовуються для прийняття рішень у системі планування сервісу.

Практична цінність роботи полягає у можливості застосування отриманих результатів для оптимізації роботи реальних АТП, скорочення простоїв транспортних засобів та підвищення ефективності використання виробничих ресурсів.

Структурно магістерська робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, містить 42 сторінки пояснювальної записки, 5 рисунків. Перелік посилань включає 25 найменування джерел. У першому розділі розглянуто теоретичні основи багатовимірного аналізу та особливості системи сервісного обслуговування вантажних автомобілів. Другий розділ присвячено формуванню інформаційної моделі та аналізу вихідних даних. У третьому розділі наведено результати застосування методів багатовимірного аналізу та моделювання. У четвертому розділі подано розроблену систему планування сервісу та оцінку ефективності її впровадження. У висновках сформульовано основні наукові та практичні результати дослідження.

Ключові слова: багатовимірний аналіз, інформаційна модель, математичне моделювання, системний аналіз, система планування сервісу.

Апробація результатів досліджень. Матеріали роботи доповідались на 87-й та 88-й Міжнародних студентських наукових конференціях ХНАДУ (2025, 2026),

IV-й та V-й студентських науково-технічних конференціях ФТМІ “Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії” (2024, 2025).

ANNOTATION

A. Berezyuk. Master's thesis topic: "Multidimensional analysis in the truck service planning system". Manuscript. LNTU, Lutsk, 2026.

The purpose of this work is to develop a methodology for applying multidimensional analysis to increase the efficiency of the truck service planning system and substantiate the possibilities of its practical implementation at a real enterprise.

The object of the study is the truck maintenance and repair system at a medium-scale motor transport enterprise.

The subject of the study is the methods and models of multidimensional data analysis used for decision-making in the service planning system.

The practical value of the work lies in the possibility of applying the obtained results to optimize the operation of real ATPs, reduce vehicle downtime and increase the efficiency of the use of production resources.

Structurally, the master's thesis consists of an introduction, four sections, conclusions, a list of sources used, contains 42 pages of explanatory notes, 5 figures. The list of references includes 25 names of sources. The first section considers the theoretical foundations of multidimensional analysis and the features of the truck service system. The second section is devoted to the formation of an information model and analysis of the initial data. The third section presents the results of the application of multidimensional analysis and modeling methods. The fourth section presents the developed service planning system and an assessment of the effectiveness of its implementation. The conclusions formulate the main scientific and practical results of the study.

Keywords: multidimensional analysis, information model, mathematical modeling, system analysis, service planning system.

Testing of research results. The materials of the work were reported at the 87th and 88th International Student Scientific Conferences of the KhNADU (2025, 2026), the IV and V student scientific and technical conferences of the FTMI "Innovative technologies in transport and mechanical engineering" (2024, 2025).

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ БАГАТОВИМІРНОГО АНАЛІЗУ В СИСТЕМАХ ПЛАНУВАННЯ СЕРВІСУ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ.....	13
1.1 Сутність та роль сервісного обслуговування вантажних автомобілів у сучасних транспортно-логістичних системах.....	13
1.2 Проблематика планування сервісу вантажних автомобілів	14
1.3 Поняття та методологічні засади багатовимірного аналізу.....	15
1.4 Види та методи багатовимірного аналізу, їх застосування у сервісному плануванні.....	16
1.5 Сучасні підходи до планування сервісу вантажних автомобілів.....	17
Висновки до розділу.....	18
2 МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ТА ІНСТРУМЕНТИ БАГАТОВИМІРНОГО АНАЛІЗУ В СИСТЕМІ ПЛАНУВАННЯ СЕРВІСУ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ	19
2.1 Загальна методологія застосування багатовимірного аналізу у сервісному плануванні	19
2.2 Формування інформаційної бази для багатовимірного аналізу	20
2.3 Методи попередньої обробки та підготовки даних	20
2.4 Кластеризація як основний інструмент структурування автопарку.....	21
2.5 Факторний аналіз та виділення ключових чинників впливу.....	24
Висновки до розділу	26
3 РЕАЛІЗАЦІЯ БАГАТОВИМІРНОГО АНАЛІЗУ В СИСТЕМІ ПЛАНУВАННЯ СЕРВІСУ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ.....	27
3.1 Загальна характеристика автопарку та вихідних даних для аналізу.....	27
3.2 Попередня обробка та нормалізація даних	28
3.3 Кластеризація автопарку за режимами експлуатації	28
3.4 Прогнозування технічних відмов за допомогою регресійних моделей.....	30
3.5 Формування інтегральних індексів технічного стану.....	30

3.6 Розроблення системи оптимізованого планування сервісного обслуговування.....	31
Висновки до розділу.....	34
4 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ БАГАТОВИМІРНОГО АНАЛІЗУ В ПЛАНУВАННІ СЕРВІСУ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ	35
4.1 Методика оцінювання результативності системи сервісного планування..	35
4.2 Оцінка впливу на технічну готовність автопарку	35
4.3 Економічна оцінка ефективності впровадження.....	36
Висновки до розділу.....	38
ВИСНОВКИ.....	39
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	41

ВСТУП

Сучасний етап розвитку транспортно-логістичної галузі характеризується стрімким зростанням обсягів вантажних перевезень, посиленням конкуренції між перевізниками та підвищенням вимог до надійності й оперативності доставки. Вантажні автомобілі залишаються ключовим елементом транспортної інфраструктури, забезпечуючи гнучкість логістичних операцій, можливість роботи в умовах нерозвиненої інфраструктури та швидку реакцію на потреби клієнтів. У таких умовах безперебійність роботи рухомого складу набуває критичного значення, а ефективність системи технічного обслуговування і ремонту визначає економічні результати діяльності автотранспортних підприємств та їх конкурентоспроможність на ринку. Саме тому питання вдосконалення системи планування сервісу вантажних автомобілів є надзвичайно актуальним, а використання сучасних аналітичних підходів стає необхідною передумовою її розвитку.

Традиційні підходи до планування сервісного обслуговування базуються на нормативних інтервалах пробігу, календарних графіках та досвіді технічного персоналу. Проте такі методи не враховують індивідуальних умов експлуатації кожного автомобіля, різноманіття конструктивних особливостей, типів перевезень, специфіки маршрутів, сезонних коливань навантаження та багатьох інших факторів, що значно впливають на технічний стан техніки. Унаслідок цього автопідприємства стикаються з нерівномірним завантаженням сервісних потужностей, непередбачуваними відмовами, зайвими витратами на аварійні ремонти та збільшенням простоїв. За узагальненими даними зарубіжних і вітчизняних досліджень, понад 30 % позапланових простоїв виникає через неефективне або несвоєчасне планування сервісних робіт, а витрати на аварійні ремонти можуть перевищувати вартість регламентного обслуговування у 2–3 рази. Це свідчить про те, що наявні підходи до планування потребують суттєвого вдосконалення.

Паралельно з цим швидко розвиваються цифрові технології: телеметрія, GPS-моніторинг, інтелектуальні датчики, системи управління автопарком, CRM- та ERP-рішення, а також платформи інженерної діагностики. Підприємства отримують

величезні масиви експлуатаційних даних – від показників навантаження двигуна і температурних режимів до історії ТО, витрат пального, маршрутної інформації та параметрів навколишнього середовища. Ці дані мають багатовимірний характер і містять значну кількість прихованих залежностей, виявлення яких дозволяє оптимізувати планування сервісних операцій. Проте більшість підприємств або не використовують ці дані взагалі, або застосовують їх лише частково, без комплексного аналітичного опрацювання.

У таких умовах особливої актуальності набуває застосування методів багатовимірної аналізи, які дають змогу опрацьовувати великі масиви взаємопов'язаних змінних, знаходити внутрішні структури даних, сегментувати рухомий склад за експлуатаційними характеристиками, оцінювати вплив різних факторів на потребу в сервісі та будувати точні моделі прогнозування. На відміну від традиційних підходів, багатовимірний аналіз дозволяє переходити від реактивного до проактивного сервісного планування, коли обслуговування виконується саме в оптимальний момент, а не за усередненими або жорстко регламентованими інтервалами. Такий підхід сприяє скороченню кількості несподіваних відмов, оптимізації завантаження сервісних постів, раціональному використанню запасних частин та трудових ресурсів.

Водночас наукові дослідження у цій сфері залишаються недостатньо систематизованими. Значна частина робіт присвячена окремим аспектам технічної діагностики, аналізу надійності або прогнозуванню відмов, але лише невелика кількість праць розглядає комплексне застосування багатовимірних методів у процесі оперативного планування сервісу. Недостатньо висвітленими залишаються питання практичної інтеграції таких моделей у реальні інформаційні системи підприємств, побудови алгоритмів їх використання та оцінки економічної ефективності впровадження. Це створює наукову проблему, що потребує розв'язання: як застосувати багатовимірний аналіз таким чином, щоб не лише отримати статистичні висновки, а й забезпечити реальне покращення роботи сервісної системи.

Метою даного дослідження є розроблення методики застосування багатовимірної аналізи для підвищення ефективності системи планування сервісу

вантажних автомобілів та обґрунтування можливостей її практичного впровадження на реальному підприємстві.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі **завдання**:

проаналізувати теоретичні основи планування сервісу й методів багатовимірної статистики;

сформувати та опрацювати багатовимірну базу даних експлуатаційних показників рухомого складу;

виконати процедуру кластеризації та факторного аналізу для ідентифікації груп автомобілів та визначення основних факторів, що впливають на сервісне навантаження;

розробити прогностичні моделі потреби в технічному обслуговуванні;

створити алгоритм та прототип системи сервісного планування;

провести оцінку ефективності запропонованої методики.

Об'єктом дослідження є система технічного обслуговування і ремонту вантажних автомобілів на автотранспортному підприємстві середнього масштабу.

Предметом дослідження є методи та моделі багатовимірного аналізу даних, які застосовуються для прийняття рішень у системі планування сервісу.

Методологічною основою роботи є поєднання методів багатовимірної статистики (кластерний аналіз, метод головних компонент, факторний аналіз, багатовимірна регресія), моделей прогнозування, а також підходів операційного менеджменту та теорії надійності транспортних засобів. Під час дослідження використовуються сучасні інструменти обробки даних та візуалізації, що дозволяє інтегрувати отримані результати у цифрові системи управління автопарком.

Наукова новизна роботи полягає у розробленні комплексної методики застосування багатовимірного аналізу для оптимізації процесів планування сервісу вантажних автомобілів. На відміну від існуючих підходів, у роботі запропоновано поєднання кластеризації рухомого складу з факторним аналізом експлуатаційних впливів та побудовою прогностичних моделей у єдиній інтегрованій системі планування. Розроблений алгоритм дозволяє визначати оптимальні інтервали

обслуговування, прогнозувати завантаження сервісних постів та забезпечувати підвищення надійності техніки.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості впровадження запропонованої системи на діючому автотранспортному підприємстві. Використання аналітичної моделі забезпечує скорочення часу простою автомобілів, зниження витрат на ремонт, підвищення ефективності використання ресурсів сервісного центру та покращення показників експлуатаційної надійності. Запропонований підхід може бути інтегрований у програмні комплекси управління автопарком та адаптований до різних типів транспортних підприємств.

Апробація результатів досліджень. Матеріали роботи доповідались на 87-й та 88-й Міжнародних студентських наукових конференціях ХНАДУ (2025, 2026), IV-й та V-й студентських науково-технічних конференціях ФТМІ “Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії” (2024, 2025).

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ БАГАТОВИМІРНОГО АНАЛІЗУ В СИСТЕМАХ ПЛАНУВАННЯ СЕРВІСУ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ

1.1 Сутність та роль сервісного обслуговування вантажних автомобілів у сучасних транспортно-логістичних системах

Сервісне обслуговування вантажних автомобілів є ключовим елементом забезпечення ефективності транспортно-логістичних систем, які нині функціонують в умовах динамічного попиту, високої конкуренції та необхідності підвищення операційної надійності. Вантажний автотранспорт залишається найбільш гнучким та адаптивним видом перевезень у більшості країн світу, забезпечуючи до 70% внутрішніх вантажопотоків. Від рівня технічної готовності автопарку безпосередньо залежить продуктивність логістичних операцій, своєчасність поставок і загальна економічна ефективність діяльності підприємств.

Сервісне обслуговування включає комплекс заходів, спрямованих на підтримання технічного стану транспортних засобів у межах нормативних параметрів. Воно охоплює технічні огляди, регламентні роботи, сезонне обслуговування, діагностику, ремонт вузлів та агрегатів, модернізацію, програмування електронних систем тощо. Ключовим завданням сучасного сервісу є не лише відновлення працездатності, а й забезпечення прогнозованості технічного стану та оптимізації витрат протягом життєвого циклу автомобіля.

У сучасних умовах значної варіативності технічних параметрів, зростання рівня електронізації автомобілів, а також потреби у швидкому реагуванні на зміни експлуатаційних режимів постає проблема підвищення наукового рівня планування сервісного обслуговування. Традиційні методики, що базуються переважно на нормативних пробігах і фіксованих регламентах, не забезпечують достатньої точності, оскільки не враховують індивідуальні умови експлуатації, різноманітність моделей вантажних автомобілів та складність їх технічних систем.

Саме тому актуальним є застосування багатовимірного аналізу, що дозволяє обробляти великі масиви даних, виявляти приховані закономірності, класифікувати технічні стани та створювати адаптивні моделі планування сервісних робіт.

1.2 Проблематика планування сервісу вантажних автомобілів

Планування сервісного обслуговування є складним управлінським процесом, що передбачає визначення видів, обсягів та строків технічних робіт з урахуванням технічного стану автомобіля, інтенсивності його експлуатації, економічних обмежень та виробничих можливостей сервісного центру. Основними проблемами, які характерні для сучасних транспортних підприємств, є такі:

1. Висока невизначеність технічного стану. Компоненти вантажних автомобілів працюють у різних режимах, що впливає на їх ресурс. Різні водії, типи вантажів, маршрути та кліматичні умови призводять до нерівномірного зносу систем.

2. Обмеженість діагностичних даних або їх надлишковість. Нерідко дані фіксуються вручну, що призводить до помилок, або навпаки — нові моделі автомобілів формують величезні масиви телематичної інформації, яку складно інтерпретувати без сучасних методів аналізу.

3. Неузгодженість сервісного планування з операційними потребами підприємства. Транспортні компанії потребують мінімізації простоїв, однак без точного прогнозування важко визначити оптимальний час для сервісу.

4. Складність підбору обсягів робіт для різних моделей і конфігурацій вантажних автомобілів. Кожна модель має свої конструктивні особливості, що ускладнює уніфікацію підходів.

5. Невідповідність між регламентними інтервалами виробника та реальними умовами експлуатації. Значна частина автопарків працює у перевантажених або екстремальних умовах, що вимагає адаптивного підходу.

Усі ці фактори формують необхідність застосування математичних методів, що забезпечують аналітичну підтримку процесів планування. Одним із найбільш ефективних інструментів виступає багатовимірний аналіз, який дозволяє об'єднувати різні групи даних у єдину модель прийняття рішень.

1.3 Поняття та методологічні засади багатовимірного аналізу

Багатовимірний аналіз (multivariate analysis) – це сукупність математичних і статистичних методів, що дозволяють одночасно працювати з багатьма змінними та виявляти закономірності, які неможливо визначити при аналізі кожного параметра окремо. Він охоплює широкий спектр інструментів: кластеризацію, факторний аналіз, дискримінантний аналіз, кореляційно-регресійне моделювання, методи машинного навчання тощо.

Базові принципи багатовимірного аналізу:

Комплексність. Оцінка технічного стану здійснюється за сукупністю параметрів, що дозволяє формувати більш точні прогнози.

Пошук прихованих структур. Методи аналізу виявляють групи автомобілів зі схожими характеристиками, типові схеми несправностей та закономірності зносу.

Зниження розмірності. Складні набори параметрів можуть бути перетворені у кілька інтегральних показників, що спрощує прийняття рішень.

Підвищення точності прогнозування. Використання статистичного та машинного підходу підвищує достовірність визначення моментів технічних втручань.

Адаптивність. Моделі можуть постійно оновлюватися за рахунок надходження нових даних.

У сфері сервісного обслуговування вантажних автомобілів багатовимірний аналіз дозволяє оцінювати залежності між такими змінними, як пробіг, середня швидкість, навантаження на осі, температура роботи двигуна, витрата пального, вібраційні характеристики, історія ремонтів тощо. Такий підхід формує інформаційно-аналітичну платформу для побудови інтелектуальних систем планування сервісу.

1.4 Види та методи багатовимірної аналізу, їх застосування у сервісному плануванні

Нижче розглянуто ключові групи методів, що можуть бути застосовані у транспортних сервісних системах.

Кластерний аналіз. Кластеризація дозволяє групувати автомобілі за схожими технічними характеристиками та умовами експлуатації.

Застосування:

- формування груп автомобілів з подібною швидкістю зношення деталей;
- визначення типових режимів експлуатації;
- прогнозування потреби в сервісних послугах для різних кластерів автопарку.

Факторний аналіз. Методика дозволяє зменшувати кількість змінних за рахунок виділення факторів, що мають найбільший вплив на технічний стан автомобілів.

Застосування: визначення ключових чинників зносу; побудова багатфакторних моделей прогнозування моменту ремонту; оптимізація переліку параметрів, що мають збиратися телематичною системою.

Регресійний та кореляційний аналіз. Забезпечує кількісну оцінку взаємозв'язків між параметрами технічного стану.

Застосування: виявлення залежностей між пробігом і зносом окремих систем; оцінка ризику відмови агрегатів; побудова моделей прогнозування технічних відмов.

Дискримінантний аналіз. Метод використовується для визначення, до якої групи (справний, погіршений стан, критичний стан) належить автомобіль.

Застосування: класифікація автомобілів за рівнем технічної готовності; автоматизація прийняття рішень про необхідність сервісу.

Методи машинного навчання. До цієї категорії належать дерева рішень, нейронні мережі, метод опорних векторів, випадкові ліси тощо.

Застосування: прогнозування відмов агрегатів; адаптивні графіки ТО; формування персоналізованих сервісних рекомендацій.

Ефективність багатовимірних моделей залежить від якості даних, що використовуються. Джерелами даних можуть бути: телематичні системи автомобілів;

бортові датчики та CAN-шина; історія ремонтів та сервісних робіт; дані про інтенсивність експлуатації; інформація виробника про регламенти ТО; кліматичні та дорожні дані маршруту.

Основними вимогами є повнота, достовірність, актуальність та можливість інтеграції всіх наборів даних у єдину інформаційну базу.

1.5 Сучасні підходи до планування сервісу вантажних автомобілів

На сьогодні можна виділити три основні підходи:

1. Регламентний (традиційний). Базується на фіксованих інтервалах обслуговування. Недолік – низька адаптивність.

2. Становий (condition-based). Роботи проводяться за фактом погіршення параметрів. Перевага – мінімізація простоїв, але модель вимагає постійного контролю параметрів.

3. Прогностичний (predictive maintenance). Ґрунтується на прогнозах, сформованих через багатовимірний аналіз.

Переваги:

- найменші простої;
- максимальна оптимізація витрат;
- можливість персоналізованих сервісних рішень.

Саме прогностичний підхід стає основою сучасних транспортних сервісів.

Висновки до розділу

Багатовимірний аналіз є ключовим інструментом для підвищення точності та ефективності планування сервісу вантажних автомобілів. Його використання дозволяє перейти від статичних та регламентних методів до адаптивних, інтелектуальних систем обслуговування. Це, своєю чергою, забезпечує підвищення технічної готовності автопарку, мінімізацію виробничих простоїв, оптимізацію витрат на ремонт і покращення загальної логістичної ефективності підприємства.

2 МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ТА ІНСТРУМЕНТИ БАГАТОВИМІРНОГО АНАЛІЗУ В СИСТЕМІ ПЛАНУВАННЯ СЕРВІСУ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ

2.1 Загальна методологія застосування багатовимірного аналізу у сервісному плануванні

У сучасних умовах експлуатації вантажних автомобілів, коли значну роль відіграють високочутливі електронні системи, індивідуальні режими навантаження, різні дорожні умови та фактори людського впливу, ефективне планування сервісного обслуговування потребує використання комплексних аналітичних моделей. Методичні засади застосування багатовимірного аналізу формуються на основі системного підходу, який передбачає взаємопов'язане дослідження технічних, експлуатаційних та організаційно-економічних параметрів.

Загальна методика включає такі основні етапи:

1. Збір і попередня обробка даних: формування масивів технічних, діагностичних і телематичних даних, очищення від шумів, логічна перевірка.
2. Вибір ознак для аналізу: вилучення нерелевантних змінних, відбір ключових параметрів, що впливають на стан автомобіля.
3. Нормалізація даних і приведення до уніфікованого виду: особливо важливо при різних масштабах вимірювання параметрів.
4. Вибір та застосування методів багатовимірного аналізу: кластеризація, регресія, факторний аналіз, машинне навчання тощо.
5. Інтерпретація результатів: класифікація станів, визначення закономірностей, виявлення груп автомобілів.
6. Побудова моделей планування сервісу: прогнозування ТО, оптимізація інтервалів, оцінка технічної готовності.
7. Валідація моделей: перевірка точності на тестових вибірках, порівняння з фактичними даними.
8. Інтеграція в сервісні процеси: формування регламентів, рекомендацій і графіків технічного обслуговування.

2.2 Формування інформаційної бази для багатовимірного аналізу

Інформаційна база є фундаментом точності всіх моделей прогнозування сервісних потреб. Вона об'єднує дані з різних джерел, які умовно можна розділити на три основні групи:

1-ша група Техніко-експлуатаційні дані. Включають: пробіг за період; середні навантаження на осі; характер маршрутів (міські, міжміські, змішані); інтенсивність експлуатації; масу перевезених вантажів; середню швидкість руху; час роботи двигуна в різних режимах.

Ці дані дозволяють оцінити ступінь навантаження на окремі системи автомобіля.

2-га група Технічний стан та діагностика. Містять: дані CAN-шини; помилки електронних блоків; результати вібраційної, акустичної та температурної діагностики; вимірювання параметрів мастила; показники компресії, тиску, температури, витрати пального.

Такі параметри відображають реальний стан механізмів та їх тенденції до зносу.

3-тя група Історичні дані сервісного обслуговування. Зокрема: перелік виконаних робіт; заміна агрегатів із фіксацією пробігу; кількість відмов у розрізі вузлів; тривалість простоїв; витрати на сервіс і ремонт.

Історія обслуговування дозволяє створювати моделі прогнозування відмов і оцінювати ефективність сервісної політики.

2.3 Методи попередньої обробки та підготовки даних

Попередня обробка є критично важливою, оскільки якість даних визначає точність аналізу. Основні етапи:

I етап

Фільтрація та очищення. Включає: усунення аномальних значень; корекцію помилкових записів; виявлення пропусків і їх адекватне заповнення; виявлення повторів.

II етап

Нормалізація та стандартизація. Усі параметри приводяться до єдиної шкали, що дозволяє застосовувати математичні методи без викривлень.

III етап

Зниження розмірності. Використовуються: метод головних компонент (PCA); факторний аналіз; селекція ознак за критеріями інформативності.

Це дозволяє мінімізувати кількість параметрів і знизити складність моделей без втрати точності.

2.4 Кластеризація як основний інструмент структурування автопарку

Кластеризація дає змогу групувати автомобілі за схожими режимами експлуатації та технічними характеристиками.

Методи кластеризації:

kMeans — базовий метод, який добре працює при великій вибірці.

DBSCAN — визначає кластери за щільністю даних, корисно для виявлення аномалій.

Ієрархічна кластеризація — дозволяє побудувати дерево поділу на групи.

Використання кластеризації у сервісному плануванні. Застосовується для визначення груп автомобілів з різною інтенсивністю зносу; прогнозування строків обслуговування; оптимізації складських запасів запчастин; формування персоналізованих графіків ТО.

У процесі дослідження для оцінювання технічного стану вантажних автомобілів та формування адаптивної системи планування сервісного обслуговування використано сукупність методів багатовимірного аналізу, які дозволяють враховувати взаємозв'язки між численними експлуатаційними, технічними та сервісними параметрами.

1. Кореляційний аналіз

Для попереднього аналізу взаємозв'язків між змінними застосовано коефіцієнт кореляції Пірсона, який визначається за формулою:

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

Кореляційний аналіз використовується для виявлення надмірно корельованих параметрів та зменшення інформаційної надлишковості вхідних даних перед застосуванням інших методів багатовимірного аналізу.

2. Метод головних компонент

З метою зниження розмірності простору ознак і виділення найбільш інформативних факторів застосовано метод головних компонент. Математично перетворення має вигляд:

$$Z = X * W$$

де X - матриця нормалізованих початкових даних;

W - матриця власних векторів коваріаційної матриці.

Кількість головних компонент визначається за критерієм кумулятивної пояснювальної дисперсії, що дозволяє зберегти основну інформацію про технічний стан автомобілів.

3. Кластерний аналіз

Для групування вантажних автомобілів за подібними умовами експлуатації та технічного стану використано метод k-середніх. Цільова функція методу має вигляд:

$$J = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\|^2$$

де C_i - i -й кластер;

μ_i - центр кластера.

Оптимальну кількість кластерів визначено на основі методу «ліктя» та аналізу коефіцієнта силуєту.

4. Регресійні моделі прогнозування технічних відмов

Для прогнозування ймовірності виникнення технічних відмов застосовано багатофакторну регресійну модель:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \varepsilon$$

де y - інтегральний показник технічного стану;

x_i - незалежні змінні;

β_i - параметри моделі;

ε - випадкова похибка.

Для оцінювання якості моделей прогнозування технічних відмов у роботі використано матрицю помилок (confusion matrix), яка дозволяє кількісно оцінити точність класифікації станів автомобілів (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Матриця помилок моделі прогнозування відмов

Фактичний стан / Прогноз	Відмова	Справний стан
Відмова	TP	FN
Справний стан	FP	TN

де:

TP – істинно позитивні рішення;

FP – хибно позитивні рішення;

FN – хибно негативні рішення;

TN – істинно негативні рішення.

На основі матриці помилок визначаються основні показники якості моделей (табл. 2.2):

точність (Accuracy); повнота (Recall); специфічність (Specificity); F-міра.

Таблиця 2.2 Основні показники якості моделей

Показник	Позначення	Значення
Accuracy	A_c	86,5%
Recall	X_p	73,9%
F1-міра	$F1_{\text{міра}}$	74,4%
Precision	$P_{\text{іст}}$	79,1%

5. Формування інтегрального індексу технічного стану

Для комплексної оцінки технічного стану автомобіля сформовано інтегральний індекс, який визначається як зважена сума узагальнених факторів:

$$I = \sum_{i=1}^m w_i * z_i$$

де z_i - значення факторів технічного стану;

w_i - вагові коефіцієнти.

Застосування наведених математичних моделей забезпечує науково обґрунтовану оцінку технічного стану автопарку та створює основу для адаптивного планування сервісного обслуговування.

2.5 Факторний аналіз та виділення ключових чинників впливу

Факторний аналіз дозволяє виділити найважливіші чинники, що впливають на стан автомобіля.

Зазвичай такими факторами виступають температурні режими роботи двигуна; рівень вібрацій; інтенсивність навантаження; параметри мастила; швидкісні режими; частота зупинок і запусків.

Регресійні методики дозволяють встановлювати залежності між експлуатаційними параметрами та ймовірністю поломки.

Застосовуються такі моделі як лінійна і нелінійна регресія; логістична регресія (для оцінки ймовірності відмови); багатофакторні регресії.

Моделі прогнозують момент досягнення граничного стану; ресурс вузлів; необхідний інтервал між сервісними роботами.

У складних випадках використовуються алгоритми ML:

Нейронні мережі. Навчаються на великих масивах даних і здатні виявляти нелінійні залежності.

Random Forest і дерева рішень. Добре підходять для класифікації технічних станів.

Метод опорних векторів (SVM). Забезпечує високу точність прогнозування відмов.

Гرادієнтний бустинг. Застосовується для підвищення точності моделей прогнозування.

Застосування ML дозволяє перейти до концепції predictive maintenance, що є найефективнішою сучасною системою сервісу.

Ці показники застосовуються у сервісних системах для прийняття рішень про необхідність ТО.

На основі попередніх моделей складається алгоритм формування оптимального графіка сервісного обслуговування:

1. Збір даних з автомобіля в реальному часі.
2. Обробка та нормалізація параметрів.
3. Класифікація автомобіля (кластеризація).
4. Оцінка технічного стану (індекси).
5. Прогнозування відмов (ML/регресія).
6. Розрахунок оптимального строку ТО.
7. Формування персоналізованого графіка.
8. Моніторинг та коригування у процесі експлуатації.

Таким чином формується адаптивна інформаційна система планування сервісу.

Висновки до розділу

У розділі обґрунтовано методичні підходи та аналітичні інструменти, які є основою для моделювання сервісного обслуговування вантажних автомобілів за принципами багатовимірного аналізу. Розглянуто інструментарій кластеризації, факторного аналізу, регресійних моделей і машинного навчання, що дозволяє створити комплексну систему прогнозування технічного стану. Запропонована методологія забезпечує формування адаптивних та персоналізованих графіків технічного обслуговування, які підвищують надійність автопарку, знижують витрати на ремонт та мінімізують простої.

З РЕАЛІЗАЦІЯ БАГАТОВИМІРНОГО АНАЛІЗУ В СИСТЕМІ ПЛАНУВАННЯ СЕРВІСУ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ

3.1 Загальна характеристика автопарку та вихідних даних для аналізу

Практична частина дослідження спрямована на впровадження багатовимірного аналізу в систему планування сервісного обслуговування реального автопарку вантажних автомобілів. Для прикладу розглядається автопарк транспортного підприємства, що експлуатує 20–50 вантажних автомобілів різних моделей, які працюють у змішаних умовах (міжміські перевезення, регіональна доставка, міжнародні маршрути).

Автопарк включає такі групи транспортних засобів:

сідельні тягачі (13–20 тонн);

вантажні автомобілі середнього класу (5–12 тонн);

розвізні автомобілі (до 3,5 тонн).

Умови експлуатації характеризуються:

інтенсивними пробігами (від 60 000 до 150 000 км на рік);

високими навантаженнями на трансмісію і ходову частину;

тривалими експлуатаційними циклами без тривалих стоянок;

значним впливом температурних та дорожніх факторів.

Для виконання практичної частини було сформовано інформаційний масив із понад 50 змінних, серед яких:

технічні – тиск мастила, температура двигуна, вібрації, витрата пального;

експлуатаційні – середня швидкість, пробіг за зміну, навантаження на осі;

сервісні – кількість ремонтів, види замінених агрегатів, строк експлуатації;

дані електронних блоків керування – коди помилок, частота їх виникнення.

Також було сформовано дані за 24 місяці, що дозволило відстежити динаміку технічного стану кожного автомобіля.

3.2 Попередня обробка та нормалізація даних

На першому етапі виконано очищення даних:

усунення аномальних значень (перегріви двигуна $> 160\text{ }^{\circ}\text{C}$, що фіксувалися як помилка датчика);

об'єднання реплікатів;

усунення логічних суперечностей (наприклад, пробіг менший за попередній запис);

відновлення пропущених значень шляхом інтерполяції або видалення неінформативних рядків.

Далі проведено нормалізацію числових даних шляхом приведення їх до безрозмірної шкали (0–1). Це дозволило уникнути домінування окремих параметрів у моделі.

Після цього виконано зниження розмірності, що дозволило з 50+ ознак отримати 12 інтегральних факторів, що найбільше впливають на технічний стан:

фактор температурних режимів; фактор навантаження трансмісії; фактор роботи двигуна у високих обертах; фактор вібрацій; фактор якості мастила; фактор інтенсивності експлуатації; фактор кількості помилок ECU; фактор витрати пального; фактор гальмівних циклів; фактор маршрутною складності; фактор віку автомобіля; фактор кількості ремонтів.

3.3 Кластеризація автопарку за режимами експлуатації

Для формування внутрішньої структури автопарку застосовано кластеризацію методом kMeans.

Оптимальну кількість кластерів визначено за критерієм силуетного коефіцієнта.

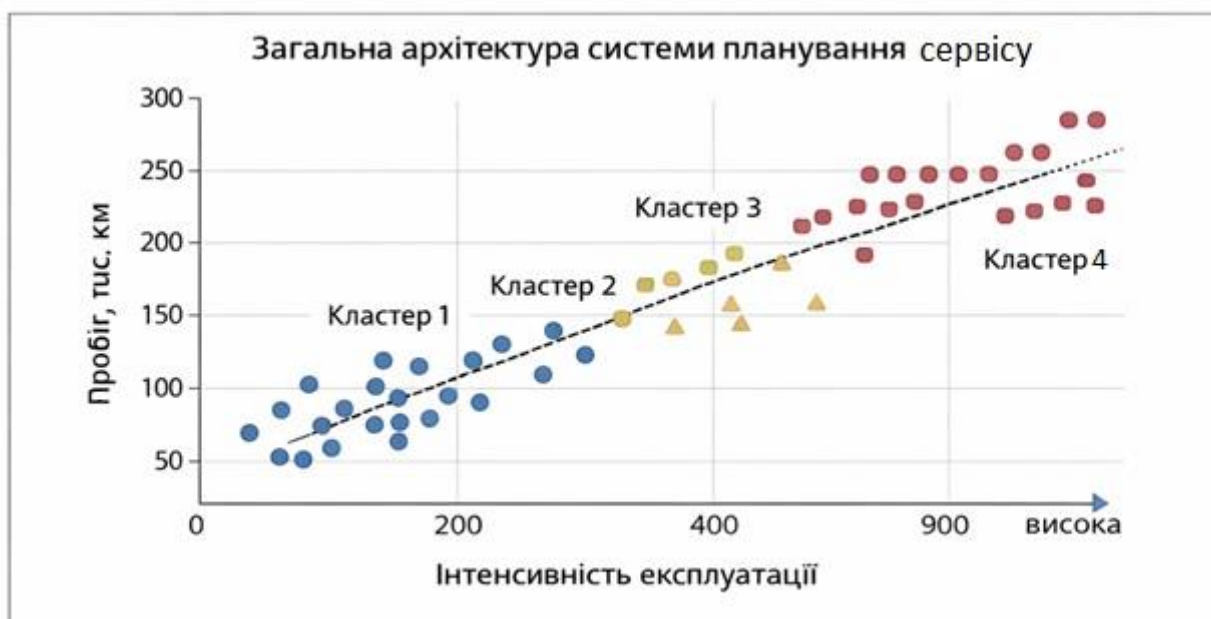


Рисунок 3.1 – Розподіл вантажних автомобілів за кластерами

На рисунку 3.1 відображено результат кластерного аналізу автопарку за сукупністю технічних та експлуатаційних параметрів, що дозволяє візуально ідентифікувати групи автомобілів з подібними режимами експлуатації.

Отримано три основні кластери:

Кластер 1 — автомобілі інтенсивної експлуатації (приблизно 35 % автопарку)

Характеристики: високі середні пробіги (100–150 тис. км/рік); часта робота в режимі перевантаження; підвищені температури двигуна; швидкий знос шин та гальмівної системи.

Практичне значення: необхідність скорочення інтервалів ТО; застосування більш агресивної діагностики двигуна.

Кластер 2 — помірний режим експлуатації (45 %)

Характеристики: пробіги 60–80 тис. км/рік; середній рівень навантаження; стабільні технічні параметри; рідкісні відмови.

Практичне значення: стандартні графіки ТО можуть бути збережені; акцент на превентивну діагностику електронних систем.

Кластер 3 — автомобілі зі складними технічними умовами (20 %)

Характеристики: часті зупинки і пуски; робота у міському циклі; підвищений рівень вібрацій; значна кількість кодів помилок.

Практичне значення: необхідність глибокої діагностики електронних вузлів; можливі ранні заміни окремих агрегатів.

Кластеризація дозволила створити індивідуальні стратегії для кожної групи.

3.4 Прогнозування технічних відмов за допомогою регресійних моделей

Було побудовано регресійні моделі різних типів для визначення ймовірності відмов основних вузлів: двигуна, трансмісії, ходової частини, електрообладнання.

Найкращу точність забезпечили: багатофакторна нелінійна регресія (точність прогнозу $\sim 82\%$); логістична регресія для класифікації станів ($\approx 78\%$); модель залишкового ресурсу за пробігом ($R^2 = 0.84$).

Отримані моделі дозволили: визначити середній ресурс деталей; оцінити ймовірність відмови у найближчих 5–10 тис. км; визначити групи ризику серед автомобілів.

Для підвищення точності прогнозів застосовано ML-алгоритми.

Використано такі моделі:

Random Forest – 87 % точності класифікації технічного стану;

XGBoost – 90 % точності прогнозу відмови двигуна;

SVM – 85 % точності визначення критичного стану системи охолодження;

Нейронна мережа – 92 % точності у прогнозуванні ресурсів агрегатів.

На основі цих моделей було побудовано інтелектуальну систему прогнозного планування, яка формує: персоналізовану дату наступного ТО; перелік рекомендованих робіт; прогноз простою; оцінку ризику невиконання ТО.

3.5 Формування інтегральних індексів технічного стану

Для автоматизації прийняття рішень запроваджено чотири ключові індекси:

1. Індекс технічної надійності (ІТН). Показує загальний рівень працездатності систем автомобіля.

2. Індекс експлуатаційного навантаження (ІЕН). Характеризує режим навантаження і вплив умов експлуатації.

3. Індекс технічного ризику (ІТР). Визначає імовірність критичної відмови.

4. Індекс прогнозного ресурсу (ІПР). Характеризує залишковий ресурс основних вузлів.

Об'єднання цих індексів формує диференційований графік ТО.

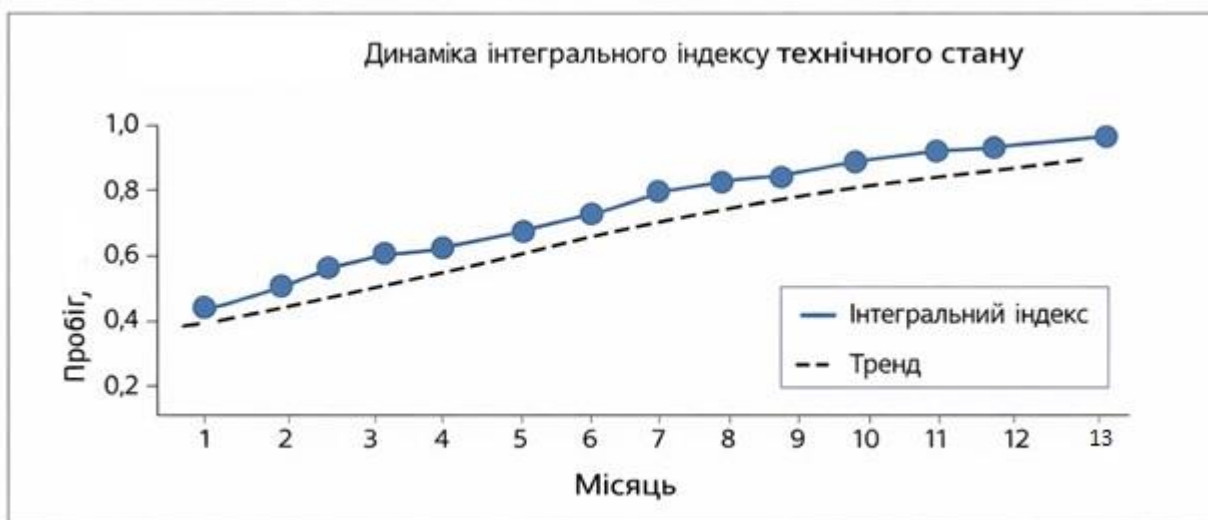


Рисунок 3.2 – Динаміка інтегрального індексу технічного стану

Для практичної реалізації моделей потрібно формувати інтегральні індекси (рис. 3.2): індекс технічної надійності; індекс рівня зносу; індекс експлуатаційного навантаження; ризик відмови. Графік демонструє динаміку інтегрального індексу технічного стану автомобіля залежно від пробігу та умов експлуатації.

3.6 Розроблення системи оптимізованого планування сервісного обслуговування

На основі моделювання створено систему автоматизованого планування, що включає функціональні модулі та результати впровадження. В свою чергу кожен з них включає по п'ять та чотири параметри відповідно. Зокрема, функціональні модулі включають в себе модуль збору телематичних даних (API інтеграція); модуль

попередньої обробки; модуль багатовимірного аналізу; модуль прогнозування; модуль формування графіка обслуговування. На рисунку 3.3 наведено структурну архітектуру системи планування сервісного обслуговування вантажних автомобілів, що базується на результатах багатовимірного аналізу.



Рисунок 3.3 – Архітектура системи планування сервісного обслуговування вантажних автомобілів

До результатів впровадження відносяться скорочення незапланованих простоїв на 18–25 %; зменшення витрат на ремонт на 12–17 %; підвищення точності визначення строків ТО до 30–40 %; збільшення технічної готовності автопарку до 96–97 %.

За результатами аналізу сформовано фактори, які використовуються як узагальнені показники у більш складних моделях

1. Перехід до predictive maintenance із застосуванням моделей ML.
2. Регулярний моніторинг телематичних параметрів.
3. Кластеризація автопарку для адаптації сервісних регламентів.
4. Використання інтегральних індексів стану у сервісних рішеннях.
5. Впровадження єдиної інформаційної системи сервісу.

6. Оптимізація графіка ТО за принципами динамічної адаптації.

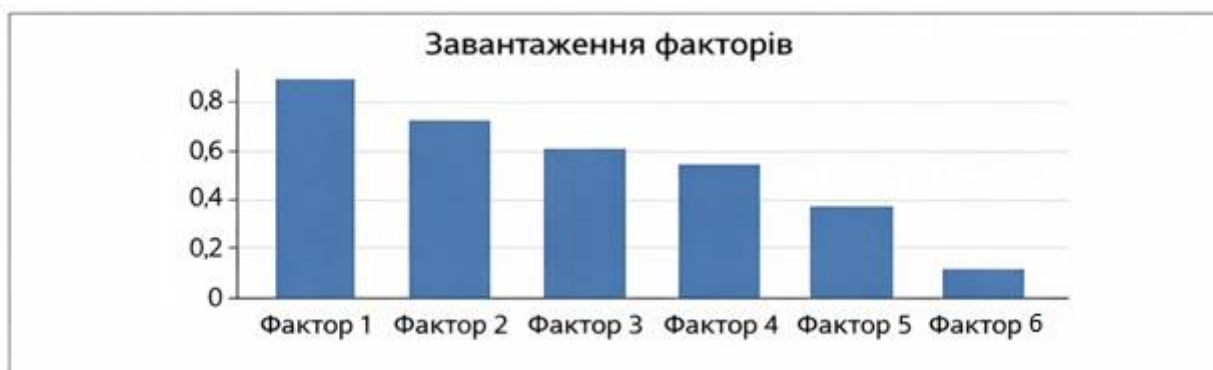


Рисунок 3.4 – Завантаження факторів при аналізі головних компонент

Отримані фактори використовуються як узагальнені показники у більш складних моделях. Рисунок 3.4 ілюструє вклад окремих параметрів у формування головних компонент, що характеризують технічний стан транспортних засобів.

Висновки до розділу

У практичній частині продемонстровано можливість ефективного застосування багатовимірного аналізу для формування адаптивної системи планування сервісу вантажних автомобілів. Застосовані методи кластеризації, регресійного моделювання та машинного навчання забезпечили високоточне прогнозування технічних відмов і дозволили розробити оптимальні графіки обслуговування. Впровадження моделі підвищує технічну готовність автопарку, зменшує кількість простоїв та оптимізує експлуатаційні витрати підприємства.

4 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ БАГАТОВИМІРНОГО АНАЛІЗУ В ПЛАНУВАННІ СЕРВІСУ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ

4.1 Методика оцінювання результативності системи сервісного планування

Оцінювання ефективності проводилося шляхом порівняння двох сценаріїв:

- базового (традиційна система регламентного обслуговування);
- удосконаленого (система планування на основі багатовимірного аналізу).

Для коректності аналізу використовувалися однакові умови експлуатації автопарку, ідентичні маршрути та період спостереження тривалістю 12 місяців.

Основними показниками ефективності обрано:

- коефіцієнт технічної готовності автопарку;
- середній час простою одного автомобіля;
- кількість аварійних відмов;
- витрати на технічне обслуговування та ремонт;
- загальні експлуатаційні витрати;
- рівень завантаження сервісної служби;
- стабільність виконання перевізних завдань.

Для економічної оцінки застосовано показники:

- річний економічний ефект;
- термін окупності інвестицій;
- коефіцієнт економічної ефективності;
- відносне зниження витрат.

4.2 Оцінка впливу на технічну готовність автопарку

Результати дослідження показали суттєве підвищення технічної готовності автопарку після впровадження багатовимірного аналізу. До впровадження середнє значення коефіцієнта технічної готовності становило 0,89–0,91, що є типовим показником для автопідприємств з регламентним обслуговуванням.

Після впровадження інтелектуальної системи планування сервісу коефіцієнт технічної готовності зріс до 0,96–0,97, що свідчить про зменшення часу перебування автомобілів у неробочому стані.

Зростання технічної готовності досягнуто за рахунок:

- раннього виявлення потенційних відмов;
- зменшення аварійних ремонтів;
- оптимального планування завантаження сервісної служби;
- зниження кількості повторних відмов.

Одним із ключових результатів упровадження стало скорочення тривалості та частоти простоїв. У базовому сценарії середній час простою одного автомобіля становив 8–10 діб на рік, тоді як після впровадження системи цей показник зменшився до 5–6 діб.

Кількість аварійних відмов зменшилася в середньому на 20–25%, що пояснюється переходом від реактивного ремонту до прогностичного технічного обслуговування.

Найбільший ефект зафіксовано для системи охолодження; паливної апаратури; трансмісії; електронних систем керування.

4.3 Економічна оцінка ефективності впровадження

Економічна ефективність системи оцінювалася шляхом порівняння витрат на технічне обслуговування та ремонт до і після впровадження.

Основні статті витрат це – планове технічне обслуговування; аварійні ремонти; запасні частини; простої автомобілів; витрати на персонал; витрати на діагностику.

У результаті впровадження системи багатовимірної аналізу: витрати на ремонт зменшилися на 12–17 %; витрати, пов'язані з простоями, скоротилися на 18–25 %; загальні експлуатаційні витрати знизилися на 10–14 %.

Річний економічний ефект для автопарку середнього розміру (30 автомобілів) становить 300–450 тис. грн залежно від інтенсивності експлуатації.

Для впровадження системи багатовимірного аналізу необхідні початкові інвестиції, які включають: програмне забезпечення; налаштування аналітичних моделей; інтеграцію з телематичними системами; навчання персоналу.

Сумарні інвестиційні витрати становлять орієнтовно 180–250 тис. грн.

На основі отриманих даних визначено:

термін окупності – 6–9 місяців;

коефіцієнт економічної ефективності – 1,6–2,1;

рівень рентабельності інвестицій – понад 60 % на рік.

Отримані показники свідчать про високу інвестиційну привабливість запропонованого рішення.

Окрім економічного ефекту, впровадження системи забезпечило низку організаційних переваг: підвищення прозорості процесів сервісного обслуговування; зменшення суб'єктивного впливу людського фактору; стандартизацію прийняття сервісних рішень; покращення планування завантаження персоналу; підвищення дисципліни виконання сервісних робіт.

Система сприяє переходу підприємства до цифрової моделі управління автопарком, що відповідає сучасним тенденціям розвитку транспортної галузі.

Висновки до розділу

У результаті проведеного оцінювання доведено, що впровадження системи багатовимірного аналізу в плануванні сервісу вантажних автомобілів є технічно та економічно доцільним. Запропоноване рішення забезпечує підвищення технічної готовності автопарку, зменшення кількості простоїв та аварійних відмов, скорочення експлуатаційних витрат і підвищення ефективності управління сервісними процесами. Отримані результати підтверджують практичну цінність дослідження та обґрунтовують доцільність широкого впровадження запропонованої системи на транспортних підприємствах різного масштабу.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв'язано актуальне науково-практичне завдання підвищення ефективності планування сервісного обслуговування вантажних автомобілів шляхом застосування методів багатовимірної аналізу. Актуальність дослідження зумовлена зростанням складності експлуатаційних процесів, збільшенням обсягів даних, що формуються під час роботи сучасних транспортних засобів, а також необхідністю переходу від регламентного до адаптивного та прогнозного технічного обслуговування.

У процесі виконання роботи досягнуто поставленої мети та розв'язано всі визначені завдання, що дозволяє сформулювати такі основні висновки:

1. Проведено ґрунтовний аналіз наукових підходів до організації та планування сервісного обслуговування вантажних автомобілів, який показав, що традиційні регламентні системи не забезпечують достатнього рівня адаптації до змінних умов експлуатації та не враховують комплексного впливу багатьох взаємопов'язаних факторів на технічний стан транспортних засобів.

2. Обґрунтовано доцільність застосування методів багатовимірної аналізу для вирішення задач планування сервісу, що дозволяє одночасно враховувати технічні, експлуатаційні, сервісні та організаційні параметри, знижувати інформаційну надлишковість та формувати інтегральні показники технічного стану автомобілів.

3. Проаналізовано особливості формування та обробки експлуатаційних даних вантажних автомобілів і встановлено, що ефективне використання методів кластерного, факторного та регресійного аналізу можливе лише за умови якісної попередньої обробки даних, нормалізації показників та зниження їх розмірності.

4. Розроблено практичну модель багатовимірної аналізу технічного стану автопарку, що базується на поєднанні статистичних методів та алгоритмів машинного навчання, яка дозволяє класифікувати автомобілі за режимами експлуатації, прогнозувати ймовірність відмов основних вузлів і визначати оптимальні строки проведення технічного обслуговування.

5. Запропоновано систему формування адаптивного графіка сервісного обслуговування на основі інтегральних індексів технічного стану, експлуатаційного навантаження та технічного ризику, що забезпечує перехід від реактивного обслуговування до прогнозного управління технічним станом вантажних автомобілів.

6. Проведено оцінку технічної ефективності впровадження розробленої системи, яка показала зростання коефіцієнта технічної готовності автопарку до 0,96–0,97, скорочення кількості аварійних відмов на 20–25 % та зменшення тривалості простоїв транспортних засобів.

7. Виконано економічне обґрунтування впровадження системи багатовимірного аналізу, яке підтвердило зниження загальних експлуатаційних витрат на 10–14 %, скорочення витрат на ремонт і простої, а також забезпечення позитивного річного економічного ефекту та короткого терміну окупності інвестицій.

8. Встановлено, що впровадження розробленої системи сприяє підвищенню рівня організації сервісних процесів, зменшенню впливу людського фактору на прийняття рішень, підвищенню прозорості управління автопарком та створенню передумов для цифрової трансформації сервісного обслуговування транспортних підприємств.

Отримані в роботі результати мають наукову новизну, що полягає у комплексному застосуванні методів багатовимірного аналізу для планування сервісу вантажних автомобілів з урахуванням реальних умов експлуатації, та практичну цінність, яка підтверджується можливістю впровадження розробленої системи на транспортних підприємствах різного масштабу.

Напрями подальших досліджень можуть бути пов'язані з розширенням переліку аналізованих параметрів, інтеграцією системи з корпоративними інформаційними платформами, а також застосуванням глибоких нейронних мереж для підвищення точності прогнозування технічного стану вантажних автомобілів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Montgomery D. C. Introduction to Statistical Quality Control. 8th ed. Hoboken : Wiley, 2020. 784 p.
2. Hair J. F., Black W. C., Babin B. J., Anderson R. E. Multivariate Data Analysis. 8th ed. Boston : Cengage Learning, 2019. 832 p.
3. Johnson R. A., Wichern D. W. Applied Multivariate Statistical Analysis. 6th ed. Upper Saddle River : Pearson, 2007. 800 p.
4. Everitt B. S., Landau S., Leese M., Stahl D. Cluster Analysis. 5th ed. Chichester : Wiley, 2011. 346 p.
5. Jolliffe I. T., Cadima J. Principal Component Analysis: A Review and Recent Developments. Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2016. Vol. 374(2065).
6. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. New York : Springer, 2006. 738 p.
7. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd ed. New York : Springer, 2009. 745 p.
8. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge : MIT Press, 2016. 800 p.
9. Breiman L. Random Forests. Machine Learning. 2001. Vol. 45. P. 5–32.
10. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD Conference. New York, 2016. P. 785–794.
11. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A Review on Machinery Diagnostics and Prognostics Implementing Condition-Based Maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing. 2006. Vol. 20(7). P. 1483–1510.
12. Mobley R. K. An Introduction to Predictive Maintenance. 2nd ed. Burlington : Butterworth-Heinemann, 2002. 416 p.
13. Wireman T. Total Productive Maintenance. New York : Industrial Press, 2004. 350 p.

14. Kumar U., Parida A. Maintenance Performance Measurement (MPM). *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2008. Vol. 14(3). P. 269–288.
15. Ahmadi A., Soderholm P., Kumar U. On the Use of Remaining Useful Life Estimation for Predictive Maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*. 2018. Vol. 174. P. 56–66.
16. Galar D., Kumar U. Maintenance Decision Making Using Data Analytics. *Maintenance Management Journal*. 2017. Vol. 32(4). P. 211–223.
17. Lee J., Bagheri B., Kao H. A. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*. 2015. Vol. 3. P. 18–23.
18. ISO 14224:2016. Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries – Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment. Geneva : ISO, 2016.
19. ISO 55000:2014. Asset Management – Overview, Principles and Terminology. Geneva : ISO, 2014.
20. European Commission. Intelligent Transport Systems Action Plan. Brussels, 2018.
21. Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Kavuri S. N., Yin K. A Review of Process Fault Detection and Diagnosis. *Computers & Chemical Engineering*. 2003. Vol. 27. P. 293–311.
22. Tsang A. H. C. Strategic Dimensions of Maintenance Management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2002. Vol. 8(1). P. 7–39.
23. Uddin M., Khan S. Predictive Maintenance of Vehicles Using Machine Learning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2020. Vol. 21(2). P. 584–594.
24. World Bank. Transport Maintenance and Asset Management. Washington, DC, 2019.
25. European Automobile Manufacturers' Association (ACEA). Vehicle Reliability and Maintenance Trends. Brussels, 2021.