

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»**

**ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО
ОБСЛУГОВУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

спеціальність 274 Автомобільний транспорт
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Автомобільний транспорт»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АТм-21
Владислав МАМЧИЧ

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Віктор САМОСТЯН

(підпис)

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

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В. ОНИЦУК

«__» _____ 2025 р.

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

Мамчичу Владиславу Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

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

Керівник роботи: к.т.н., доцент Віктор САМОСТЯН

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

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «12» грудня 2025 р.

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

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

1 Теоретичні основи технічного обслуговування та імітаційного моделювання

2 Аналіз функціонування системи технічного обслуговування умовного АТП

3 Побудова імітаційної моделі системи технічного обслуговування в
MATLAB/SIMEVENTS

4 Результати імітаційного моделювання та їх аналіз

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

Слайд 1 – Титульний аркуш; Слайд 2 – Мета, завдання досліджень, Наукова новизна; Роботи, Слайд 3 – 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» вересня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Технічне обслуговування транспортних засобів як елемент експлуатаційної системи</i>	04.09.2025	
2	<i>Сучасні методи організації технічного обслуговування</i>	14.09.2025	
3	<i>Методи імітаційного моделювання</i>	20.09.2025	
4	<i>Технологічна структура процесу технічного обслуговування</i>	26.09.2025	
5	<i>Параметри моделювання і тривалість симуляції</i>	01.10.2025	
6	<i>Модель системи технічного обслуговування транспортних засобів</i>	05.10.2025	
7	<i>Розрахунок основних аналітичних показників системи М/М/к</i>	13.10.2025	
8	<i>Аналіз результатів імітаційного моделювання в MATLAB/SimEvents</i>	26.10.2025	
9	<i>Написання висновків по роботі</i>	02.11.2025	
10	<i>Перевірка кваліфікаційної роботи керівником</i>	10.11.2025	
11	<i>Оформлення пояснювальної записки та графічної частини відповідно діючих вимог</i>	05.12.2025	
12	<i>Перевірка роботи на плагіат</i>	за два тижні до захисту	
13	<i>Захист кваліфікаційної роботи</i>	згідно графіка захистів	

Здобувач вищої освіти

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

Керівник кваліфікаційної роботи

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

АНОТАЦІЯ

Мамчич В.В. Тема магістерської роботи: «Імітаційне моделювання системи технічного обслуговування транспортних засобів». Рукопис. ЛНТУ, Луцьк, 2025.

Магістерська робота складається з чотирьох розділів: перший – аналіз та методи визначення потреби у запасних частинах на підприємствах автосервісу, другий – методичні засади прогнозування витрати запасних частин на автосервісних підприємствах, третій – розробка методики визначення потреби у запасних частинах на підприємствах автосервісу.

Метою роботи є розробити та дослідити імітаційну модель системи технічного обслуговування транспортних засобів автотранспортного підприємства на основі методів дискретно-подієвого моделювання в MATLAB.

Об'єкт дослідження – процес технічного обслуговування транспортних засобів на автотранспортному підприємстві.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати наступні завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасний стан систем технічного обслуговування транспортних засобів на АТП.
2. Розглянути теоретичні засади імітаційного моделювання.
3. Розробити структурно-логічну модель системи ТО умовного автотранспортного підприємства.
4. Побудувати імітаційну модель процесу ТО у середовищі MATLAB/SimEvents.
5. Провести серію експериментів для дослідження характеристик системи.
6. Розробити рекомендації щодо підвищення ефективності системи ТО транспортних засобів.

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

Ключові слова: ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ТЕОРІЯ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ, МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ.

Магістерська робота складається з вступу, 4 розділів, висновків; містить 49 сторінок пояснювальної записки, 7 рисунків. Перелік посилань включає 26 найменування джерел.

ANNOTATION

V. Mamchych. Master's thesis topic: "Simulation modeling of vehicle maintenance systems". Manuscript. LNTU, Lutsk, 2025.

The master's thesis consists of four sections: the first - analysis and methods for determining the need for spare parts at car service enterprises, the second - methodological principles for forecasting the cost of spare parts at car service enterprises, the third - development of a methodology for determining the need for spare parts at car service enterprises.

The purpose of the work is to develop and investigate a simulation model of the vehicle maintenance system of a motor transport enterprise based on discrete-event modeling methods in MATLAB.

The object of the study is the process of vehicle maintenance at a motor transport enterprise.

To achieve the set goal, the following research tasks must be completed:

1. Analyze the current state of vehicle maintenance systems at ATP.
2. Consider the theoretical principles of simulation modeling.
3. Develop a structural-logical model of the maintenance system of a conventional motor transport enterprise.
4. Build a simulation model of the maintenance process in the MATLAB/SimEvents environment.
5. Conduct a series of experiments to study the characteristics of the system.
6. Develop recommendations for improving the efficiency of the vehicle maintenance system.

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

Keywords: SIMULATION MODELING, THEORY OF MASS SERVICE, MATHEMATICAL MODELS, SYSTEM ANALYSIS.

The master's thesis consists of an introduction, 4 sections, conclusions; contains

49 pages of explanatory notes, 7 figures. The list of references includes 26 names of sources.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	12
1.1 Технічне обслуговування транспортних засобів як елемент експлуатаційної системи.....	12
1.2 Сучасні методи організації технічного обслуговування	12
1.3 Методи імітаційного моделювання	17
Висновки до розділу.....	18
2 АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ УМОВНОГО АТП	19
2.1 Характеристика умовного автотранспортного підприємства	19
2.2 Аналіз потоків транспортних засобів та виробничої програми	20
2.3 Технологічна структура процесу технічного обслуговування	20
2.4 Часові характеристики обслуговування.....	26
2.5 Виявлення проблем у роботі умовного АТП.....	26
2.6 Формалізація процесу для побудови імітаційної моделі.....	27
Висновки до розділу	27
3 ПОБУДОВА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ В MATLAB/SIMEVENTS.....	28
3.1 Загальні принципи побудови моделі	28
3.2 Параметри моделювання і тривалість симуляції	30
3.3 Модель системи технічного обслуговування транспортних засобів	32
Висновки до розділу.....	39
4 РЕЗУЛЬТАТИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЇХ АНАЛІЗ.....	40
4.1 Початкові дані та параметри математичної моделі.....	40
4.2 Розрахунок основних аналітичних показників системи М/М/к.....	41
4.3 Аналіз результатів імітаційного моделювання в MATLAB/SimEvents..	43
4.4 Дослідження впливу параметрів системи.....	44
4.5 Оптимізація кількості постів ТО.....	44
Висновки до розділу.....	45
ВИСНОВКИ.....	46
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	48

ВСТУП

Ефективність функціонування автотранспортних підприємств значною мірою залежить від організації процесів технічного обслуговування (ТО) та ремонту рухомого складу. У сучасних умовах інтенсифікації транспортних потоків, зростання обсягів перевезень та підвищення вимог до безпеки дорожнього руху особливої ваги набуває забезпечення високої технічної готовності транспортних засобів. Водночас традиційні методи планування ТО, що базуються на нормативних значеннях, не завжди дозволяють врахувати стохастичний характер надходження автомобілів, нерівномірність завантаження постів, можливі відмови та вплив людського фактора на тривалість технічних операцій.

Проблема ускладнюється тим, що більшість автотранспортних підприємств працює в умовах обмежених ресурсів, що потребує оптимального використання постів ТО, персоналу та технічних засобів. Неефективна організація сервісних процесів призводить до збільшення часу простою автомобілів, зниження продуктивності, формування черг та зростання експлуатаційних витрат. Тому постає необхідність застосування сучасних методів дослідження, які дають змогу моделювати динаміку системи, враховувати варіативність режимів роботи і визначати оптимальні параметри її функціонування.

Одним із найбільш ефективних інструментів для вирішення зазначених задач є імітаційне моделювання, зокрема дискретно-подієве моделювання у середовищах MATLAB/SimEvents. Воно дозволяє детально відтворювати логіку роботи систем ТО, аналізувати вплив різних факторів на ключові показники, прогнозувати поведінку системи в умовах змінних навантажень та знаходити оптимальні рішення щодо кількості постів, пропускної здатності, черговості обслуговування тощо.

Отже, актуальність теми визначається необхідністю підвищення ефективності процесів технічного обслуговування транспортних засобів

шляхом застосування методів імітаційного моделювання, що дозволяє обґрунтувати раціональні рішення для практичної діяльності автотранспортних підприємств.

Метою роботи є розробити та дослідити імітаційну модель системи технічного обслуговування транспортних засобів автотранспортного підприємства на основі методів дискретно-подієвого моделювання в MATLAB.

Об'єкт дослідження – процес технічного обслуговування транспортних засобів на автотранспортному підприємстві.

Предмет дослідження – методи та моделі імітаційного аналізу процесів технічного обслуговування транспортних засобів.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати наступні **завдання дослідження**:

1. Проаналізувати сучасний стан систем технічного обслуговування транспортних засобів на АТП.
2. Розглянути теоретичні засади імітаційного моделювання.
3. Розробити структурно-логічну модель системи ТО умовного автотранспортного підприємства.
4. Побудувати імітаційну модель процесу ТО у середовищі MATLAB/SimEvents.
5. Провести серію експериментів для дослідження характеристик системи.
6. Розробити рекомендації щодо підвищення ефективності системи ТО транспортних засобів.

Наукова новизна магістерської роботи полягає в наступному:

1. Удосконалено підхід до моделювання процесів технічного обслуговування транспортних засобів шляхом застосування дискретно-подієвої імітаційної моделі у середовищі MATLAB/SimEvents, що дозволило врахувати реальний стохастичний характер надходження транспортних засобів та тривалості технічних операцій.

2. Розроблено нову структурну схему системи ТО, яка поєднує елементи теорії масового обслуговування та імітаційного моделювання, що забезпечує більш точне відтворення динаміки черг, продуктивності постів та завантаження персоналу.

3. Запропоновано методику оцінювання ефективності роботи системи ТО на основі інтегральних статистичних показників (час очікування, тривалість перебування в системі, коефіцієнти завантаження, імовірність відмов), що дозволяє комплексно характеризувати функціонування підприємства в різних режимах.

4. Уперше для умовного АТП сформовано оптимізаційну модель, яка дозволяє визначити раціональну кількість постів ТО та пропускну здатність системи залежно від параметрів транспортного потоку та режимів роботи підприємства.

5. Показано закономірності впливу інтенсивності надходження транспортних засобів та змін тривалості ТО на ключові показники функціонування системи, що дозволяє використовувати отримані результати як рекомендації для реальних підприємств.

Методи дослідження: методи системного аналізу, теорії масового обслуговування, імітаційного моделювання, математико-статистичні методи, програмне моделювання у MATLAB.

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

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

1.1 Технічне обслуговування транспортних засобів як елемент експлуатаційної системи

Технічне обслуговування (ТО) автомобільного транспорту є комплексом операцій, спрямованих на підтримання транспортного засобу у справному та працездатному стані впродовж усього життєвого циклу. ТО забезпечує безпеку дорожнього руху, зменшує кількість відмов, подовжує ресурс вузлів і агрегатів.

До складу системи технічного обслуговування входять такі основні елементи:

Щоденне обслуговування (ЩО);

ТО-1 – періодичне обслуговування, спрямоване на забезпечення мінімально необхідної працездатності;

ТО-2 – розширене обслуговування зі значною трудомісткістю;

Сезонне обслуговування (СО);

Поточний ремонт (ПР);

Діагностування технічного стану.

Останніми роками все більше розповсюджується обслуговування за технічним станом (СВМ), що базується на аналізі параметрів роботи ТЗ у реальному часі.

Система технічного обслуговування може розглядатися як система масового обслуговування, у якій транспортні засоби є заявками, а пости ТО — каналами обслуговування. Випадковий характер потоків робить імітаційне моделювання особливо цінним інструментом дослідження.

1.2. Сучасні методи організації технічного обслуговування

Організація технічного обслуговування (ТО) транспортних засобів у сучасних умовах ґрунтується на поєднанні цифрових технологій,

інтелектуальних систем діагностики, адаптивних стратегій планування та мінімізації простоїв рухомого складу. Стрімкий розвиток електроніки, телематики та аналітичних інструментів суттєво змінює підходи до підтримання технічної справності автотранспорту, переводячи підприємства від регламентно-планового обслуговування до концепцій, орієнтованих на фактичний технічний стан.

Умовно сучасні методи організації ТО можна поділити на такі основні групи:

1. Концепція Preventive Maintenance (планово-запобіжне обслуговування)

Цей підхід передбачає виконання технічного обслуговування за наперед визначеними інтервалами часу або пробігу. Він історично є базовим та найпоширенішим у підприємствах зі значним парком автомобілів, оскільки забезпечує:

передбачуваність завантаження сервісних потужностей;

стандартизовані процедури ТО;

мінімальний ризик раптових відмов при правильному підборі інтервалів.

Попри простоту, метод має недоліки – інтервали виконання регламентів не враховують індивідуальних умов експлуатації, що може призвести як до передчасного обслуговування, так і до надмірного зносу окремих вузлів.

2. Condition-Based Maintenance (обслуговування за технічним станом)

Це один із ключових сучасних підходів, що базується на:

- використанні бортових датчиків,
- інтегрованих діагностичних систем (OBD-II, UDS, ISO 14229),
- телематичного моніторингу,
- аналізі параметрів в реальному часі.

ТО виконується тоді, коли фактичні показники стану вузлів свідчать про наближення до допустимих меж. Такий підхід дозволяє:

- зменшити простої,
- підвищити ресурс агрегатів,
- збільшити безвідмовність,

- оптимізувати витрати на ТО.

Condition-Based Maintenance є фундаментом для подальшого розвитку Predictive Maintenance.

3. Predictive Maintenance (прогностичне технічне обслуговування)

Прогностичне обслуговування (PdM) – найсучасніший метод, який використовує:

- машинне навчання,
- предиктивну аналітику,
- великі дані (Big Data),
- історичні та поточні параметри експлуатації.

На основі математичних моделей, включаючи регресійні алгоритми та нейронні мережі, визначається:

- імовірність відмови вузла у певному інтервалі часу,
- залишковий ресурс агрегатів,
- оптимальні моменти проведення регламентних робіт.

PdM дозволяє скоротити витрати на технічне обслуговування до 20-40% та суттєво зменшити ризики аварійних ситуацій.

4. Lean Maintenance та концепція «бережливого сервісу»

Концепція Lean Maintenance передбачає мінімізацію втрат у процесах ТО:

- скорочення часу простою,
- оптимізацію логістики матеріалів та запчастин,
- усунення зайвих операцій,
- стандартизацію сервісних процедур.

Методика базується на принципах Toyota Production System і застосовує інструменти: 5S, Kaizen, Value Stream Mapping (VSM), Kanban.

Результатом впровадження є підвищення продуктивності постів ТО та скорочення витрат.

5. Total Productive Maintenance (TPM)

TPM – методика комплексного упорядкування технічного обслуговування, що залучає як персонал сервісних служб, так і водіїв.

Основні принципи:

- профілактичні перевірки перед виїздом,
- участь водія в контролі технічного стану,
- підвищення відповідальності оператора,
- системна робота з усунення причин відмов.

TPM підвищує стабільність технічного стану парку та зменшує несподівані простої.

6. Платформи телематики та інтелектуального управління автопарком

Сучасні телематичні системи дозволяють:

- передавати дані в режимі реального часу,
- контролювати температуру, тиск, вібрації, навантаження,
- попереджати про помилки OBD,
- прогнозувати несправності,
- формувати графіки ТО на основі реальних умов експлуатації.

Поширені рішення: Wabco Fleet Management System, Continental VDO, Webfleet Solutions, Verizon Connect.

Інтеграція телематики з ERP-системами (SAP, 1C, Oracle) дозволяє автоматизувати планування ТО, закупівлю запчастин і облік ремонтів.

7. Імітаційне моделювання як метод оптимізації системи ТО

Окремим сучасним напрямом є застосування дискретно-подієвого імітаційного моделювання (SimEvents, AnyLogic, Arena), що дозволяє:

- аналізувати роботу системи до впровадження змін;
- визначати оптимальну кількість постів ТО;
- прогнозувати довжину черг;
- розраховувати коефіцієнти завантаження персоналу;
- оцінювати вплив інтенсивності надходження автомобілів.

Імітаційні моделі дозволяють з точністю до 5–10% прогнозувати поведінку сервісної системи, що робить цей метод одним із найбільш ефективних у сучасній логістиці ТО.

8. Інтеграція цифрових близнюків (Digital Twins)

Новітній тренд – цифровий двійник системи технічного обслуговування.

Це віртуальна копія: транспортного засобу, його вузлів, сервісної інфраструктури.

Digital Twin дозволяє у реальному часі моделювати: знос деталей, температурні та силові навантаження, майбутні відмови, оптимальні режими ТО.

Цифрові двійники вже застосовуються у таких компаніях як Tesla, Volvo Trucks, Mercedes-Benz і поступово інтегруються в українські підприємства.

Для узагальнення відмінностей між традиційними та сучасними підходами до технічного обслуговування транспортних засобів складено порівняльну таблицю (табл. 1.1), яка демонструє переваги інтелектуальних та адаптивних методів організації ТО над регламентними системами, що застосовувалися раніше

Таблиця 1.1 – Порівняння традиційних і сучасних методів організації технічного обслуговування транспортних засобів

Критерій	Традиційні методи ТО (регламентні)	Сучасні методи ТО (CBM, PdM, Lean, Digital Twin)
Підхід до планування	Фіксовані інтервали пробігу або часу	Динамічне планування на основі фактичного стану та прогнозних моделей
Врахування умов експлуатації	Мінімальне, нормативне	Максимальне: аналіз навантаження, стилю водіння, зовнішніх впливів
Використання діагностики	Переважно ручна, періодична	Безперервний моніторинг датчиками, телематика, UDS/OBD-II
Прогнозування відмов	Відсутнє або слабо виражене	Використання машинного навчання, статистичних моделей, цифрових близнюків
Завантаження постів ТО	Нерівномірне, залежне від календаря	Збалансоване завдяки адаптивному плануванню
Час простою транспортних засобів	Вищий через непередбачувані відмови та черги	Значно знижений за рахунок прогнозування та оптимізації
Витрати на технічне обслуговування	Вищі через надлишкові регламенти	Нижчі завдяки оптимізації інтервалів і ресурсів
Тривалість експлуатації агрегатів	Залежить від дотримання загальних регламентів	Підвищена завдяки персоналізованому

Критерій	Традиційні методи ТО (регламентні)	Сучасні методи ТО (CBM, PdM, Lean, Digital Twin)
		визначенню залишкового ресурсу
Гнучкість системи	Низька	Висока, можливість швидкого адаптування до зміни умов
Наявність автоматизації	Обмежена, часто паперовий облік	Повна цифровізація: ERP, FMS, телематика, датчики, аналітика
Можливість моделювання процесів	Практично відсутня	Імітаційне моделювання, цифрові двійники, варіативні сценарії
Ризик раптових відмов	Високий	Мінімальний за рахунок раннього виявлення зносу
Вплив людського фактора	Значний	Зменшений завдяки автоматизованому контролю і підтримці рішень
Екологічність і енергоефективність	Не є пріоритетом	Контроль параметрів роботи, зниження витрат палива та шкідливих викидів
Загальна ефективність	Стабільна, але застаріла	Висока, орієнтована на надійність і економічність

Сучасні методи організації технічного обслуговування характеризуються переходом від жорстких регламентів до інтелектуальних адаптивних стратегій, що ґрунтуються на фактичному стані транспортних засобів і прогнозних даних. Використання телематики, цифрових близнюків, імітаційного моделювання та машинного навчання дозволяє підприємствам зменшити витрати, знизити аварійність та підвищити технічну готовність автопарку.

1.3. Методи імітаційного моделювання

Імітаційне моделювання – це метод дослідження систем, у яких неможливо створити точну аналітичну модель, але можливо змоделювати їх поведінку за допомогою комп'ютера.

Застосовують такі підходи:

Дискретно-подієве моделювання. Події відбуваються у визначені моменти часу (надходження ТЗ, початок обслуговування, завершення обслуговування).

Агентне моделювання. Об'єкти (агенти) діють автономно, що дозволяє описувати складні взаємодії.

Системна динаміка. Описує агреговані потоки, підходить для стратегічного рівня.

У даній роботі використовується дискретно-подієвий підхід у MATLAB/SimEvents.

MATLAB/Simulink/SimEvents видається оптимальним вибором для побудови систем ТО завдяки таким факторам:

- можливості описувати стохастичні процеси;
- наявності блоків черг, серверів, планувальників;
- підтримці статистичного аналізу;
- інтеграції з оптимізаційними пакетами MATLAB.

Висновки до розділу

У першому розділі проведено комплексний аналіз сучасного стану систем технічного обслуговування транспортних засобів та обґрунтовано необхідність застосування методів імітаційного моделювання для підвищення ефективності їх функціонування. Визначено основні наукові підходи, що використовуються при дослідженні процесів ТО, класифікацію систем масового обслуговування та принципи їхнього застосування у транспортній галузі. Аналіз літературних джерел підтвердив актуальність проблеми оптимізації технічного обслуговування та важливість моделювання як інструмента визначення раціональних параметрів роботи АТП.

2 АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ УМОВНОГО АТП

2.1 Характеристика умовного автотранспортного підприємства

Для цілей магістерської роботи розглянемо умовне автотранспортне підприємство (АТП), яке здійснює експлуатацію парку вантажних автомобілів середньої вантажопідйомності. Підприємство забезпечує транспортне обслуговування регіональних вантажних перевезень та виконує повний цикл робіт із технічного обслуговування власного автопарку.

Загальна характеристика автопарку АТП експлуатує 50 транспортних засобів, із яких: 30 – вантажні автомобілі середнього класу; 12 – малотонажні автомобілі; 8 – спеціалізовані автомобілі (автокрани, маніпулятори тощо).

Середньодобовий пробіг становить 180–260 км, що вимагає регулярного проходження щоденного обслуговування та діагностичних операцій. Орієнтовно кожні 7–10 днів автомобіль потребує ТО-1, а кожні 25–35 днів – ТО-2.

Структура виробничої зони АТП представлена рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – структура виробничої зони АТП

Персонал підприємства налічує: 6 слюсарів ТО, 2 електромеханіки, 1 діагност, 1 майстер зміни.

Підприємство працює у двозмінному режимі (8:00–20:00).

2.2 Аналіз потоків транспортних засобів та виробничої програми

Для побудови імітаційної моделі необхідно визначити інтенсивність надходження автомобілів до системи ТО. На підприємстві використовується комбінована стратегія: частина робіт виконується за графіком (регламент), частина – за потребою (виявлені несправності).

Потік заявок на ЩО

Щоденне обслуговування виконується після завершення зміни.

Інтенсивність: приблизно 18–22 авто на добу.

Характер розподілу часу надходження – рівномірний протягом 2 годин після повернення рейсів.

Потік заявок на ТО-1

Періодичність: у середньому раз на 8 днів.

Інтенсивність: в середньому 5–7 авто на добу, стохастична природа з елементами плановості.

Розподіл наступних інтервалів моделюється експоненційним законом.

Потік заявок на ТО-2 виконується рідше – у середньому раз на 30 днів.

Інтенсивність: 1–2 авто на добу.

Розподіл часу обслуговування – нормальний, із середньою тривалістю 180 хв та $\sigma = 25$ хв.

Потік заявок на поточні ремонти виникають нерівномірно.

За статистикою підприємства, близько 15–20% автомобілів після діагностики направляється на дрібний ремонт.

Розподіл часу обслуговування – гамма-розподіл (за емпіричними спостереженнями).

2.3 Технологічна структура процесу технічного обслуговування

Технологічна структура процесу технічного обслуговування (ТО) транспортних засобів визначає послідовність, логіку та взаємозв'язки

виконання технічних операцій, спрямованих на забезпечення надійної та безпечної експлуатації рухомого складу. Вона формується з урахуванням вимог нормативних документів, конструктивних особливостей автомобіля, виробничих можливостей автотранспортного підприємства (АТП), а також умов експлуатації. Рациональна структура ТО дає змогу мінімізувати простой автомобілів, оптимізувати завантаження персоналу і постів, забезпечити рівномірний розподіл робіт та підвищити ефективність технічного сервісу.

До основних принципів формування технологічної структури ТО належать:

1. Композиційність – процес ТО складається з сукупності взаємопов'язаних технологічних операцій: контрольно-діагностичних, профілактичних, регулювальних, мастильних, замінних та допоміжних.

2. Відповідність регламентам – структура формується згідно з переліками операцій ТО-1, ТО-2 та ЩО, передбачених експлуатаційною документацією виробника.

3. Рациональність розподілу операцій – об'єднання однотипних робіт у технологічні пости з метою мінімізації внутрішніх переміщень автомобіля.

4. Перевірка технічного стану перед початком і після завершення операцій.

5. Чітка взаємодія між зонами ТО і поточним ремонтом (ТР), що забезпечує оперативне усунення виявлених несправностей.

6. Можливість автоматизації та стандартизації робіт для зменшення впливу людського фактора.

Технологічна структура процесу ТО представлена на рисунку 2.2.

ТЕХНОЛОГІЧНА СТРУКТУРА ПРОЦЕСУ ТО



Рисунок 2.2 – технологічна структура процесу ТО

Узагальнена структура процесу ТО включає такі етапи:

1. Вхідний контроль технічного стану передбачає:

приймання автомобіля на ТО (оформлення документів, перевірка пробігу);

зовнішній огляд;

первинну діагностику найбільш важливих систем: гальмівної системи, рульового управління, освітлювальних приладів;

зчитування кодів несправностей через інтерфейси OBD-II / UDS.

Метою цього етапу є виявлення відхилень від нормативного стану та визначення обсягу робіт.

2. Контрольно-діагностичні операції. Цей етап є ключовим для сучасних систем ТО та включає:

- діагностику двигуна, систем впорскування, запалювання;
- вимірювання параметрів гальмівних сил;
- оцінку герметичності паливної системи;
- перевірку систем ABS/ESP;
- перевірку рівня токсичності вихлопних газів;
- діагностику стану акумуляторної батареї і генератора.

У сучасних АТП широко застосовуються стенди: роликові гальмівні тестери, аналізатори газів, діагностичні сканери.

3. Профілактичні операції виконуються незалежно від наявності відмов та включають:

- змащування вузлів відповідно до карт змащування;
- перевірку та доливання експлуатаційних рідин (масел, антифризу, гальмівної рідини);
- очищення фільтрів і повітроводів;
- підкачування шин та перевірку балансування;
- перевірку стану ременів, шлангів, патрубків.

Профілактичні дії забезпечують зменшення ймовірності відмов у межсервісний період.

4. Регулювальні та налашкові операції включає:

- регулювання гальмівного приводу;
- регулювання кутів установки коліс;
- налаштування системи впорскування (у разі потреби);
- перевірку і регулювання натягу ременів;
- установку параметрів освітлення.

Регулювальні операції мають на меті відновлення нормативних характеристик функціонування вузлів.

5. Операції із заміни та ремонту виконують:

- заміну мастил і фільтрів;
- заміну гальмівних колодок та дисків (за потреби);
- заміну пошкоджених або зношених елементів підвіски;
- заміну рідин та витратних матеріалів.

За результатами діагностики може прийматися рішення про направлення автомобіля на поточний ремонт (ТР).

6. Завершальний контроль передбачає:

- повторну діагностику критичних систем;
- випробування автомобіля у русі (у разі потреби);
- заповнення сервісної документації;
- аналіз відхилень у технологічному процесі.

Саме завершальний контроль забезпечує гарантію якості виконаних робіт.

Технологічні маршрути виконання ТО може бути організований у різних формах. Наприклад: Зональна форма, автомобіль переміщується між спеціалізованими зонами: зона діагностики; зона ТО-1; зона ТО-2; зона мастильних робіт; зона шиномонтажу.

Переваги: висока якість робіт, спеціалізація персоналу.

Недоліки: збільшена кількість внутрішніх переміщень.

Потоково-конвеєрна форма, автомобіль рухається по лінії, де послідовно виконуються окремі операції.

Переваги: висока продуктивність.

Недоліки: вимога до постійного завантаження, підходить для великих АТП.

Бригадна форма, одна бригада виконує всі операції на закріпленій одиниці техніки.

Переваги: мінімальні переміщення; гнучкість.

Недоліки: нижчий рівень спеціалізації.

Управління ресурсами в технологічній структурі ТО.

Ефективність структури ТО залежить від управління ресурсами:
людські ресурси: кваліфікація персоналу, розподіл операцій;
технічні засоби: стенди, діагностичне обладнання, підйомники;
матеріальні ресурси: мастила, фільтри, запчастини;
часові ресурси: тривалість операцій, простої, планування;
просторові ресурси: кількість постів, їх конфігурація.

Особливе значення має оптимізація черг і потоків транспортних засобів, що забезпечує мінімальні простої за допомогою аналізу виробничих графіків; застосування імітаційного моделювання; математичних моделей теорії масового обслуговування.

Сучасні АТП інтегрують цифрові технології, які змінюють технологічну структуру процесу:

телематика забезпечує попередні дані про стан автомобіля;
автоматизовані робочі місця (АРМ) забезпечують електронний облік робіт;

системи планування ТО (CMMS, FMS) створюють оптимізовані графіки;
штучний інтелект прогнозує знос та необхідні роботи;
цифрові близнюки дозволяють моделювати технологічні процеси.

Це робить структуру ТО інтерактивною, адаптивною й більш економічно ефективною.

Технологічна структура процесу технічного обслуговування транспортних засобів являє собою системно організовану сукупність етапів, що включають діагностику, профілактику, регулювання, заміну та контроль. Ефективність структури залежить від оптимального поєднання операцій, правильного вибору організаційної форми та раціонального використання ресурсів. Використання сучасних цифрових технологій, телематики, автоматизованих систем планування та імітаційного моделювання підвищує продуктивність, знижує простої і забезпечує високу технічну готовність автопарку.

2.4 Часові характеристики обслуговування

Для моделювання приймаємо узагальнені статистичні дані, наведені в таблиці 2.1:

Таблиця 2.1 Узагальнені статистичні дані для моделювання

Тип робіт	Середній час обслуговування	Розподіл
ЩО	25 хв	Рівномірний $U(20,30)$
ТО-1	55 хв	Нормальний $N(55, 8)$
ТО-2	180 хв	Нормальний $N(180,25)$
Діагностика	20 хв	Рівномірний
ПР	40–90 хв	Гамма-розподіл

Ці параметри будуть введені у блоки Service у SimEvents.

2.5 Виявлення проблем у роботі умовного АТП

На основі аналізу вихідних параметрів можна виділити такі характерні проблеми:

1. Перевантаження постів ТО-1/ТО-2

Потік ТО-1 становить 5–7 заявок на добу, але тривалість обслуговування значна, а постів лише два.

Очікуване завантаження постів часто перевищує 85%.

2. Черги до діагностики

Є лише один діагностичний пост, який часто стає вузьким місцем.

3. Нерівномірний добовий потік

Після повернення автомобілів з рейсу спостерігається пікове навантаження на ЩО.

4. Невизначеність тривалості ПР

Стохастичний характер ремонту ускладнює планування.

5. Неоптимальне використання персоналу

Через змінність навантаження у години пік формується надмірне очікування, а в інші періоди — недовантаження.

2.6 Формалізація процесу для побудови імітаційної моделі

Для переходу до моделювання у MATLAB необхідно формалізувати систему у вигляді потокової схеми:

1. Генератори потоків

Generator_ЩО Generator_TO1 Generator_TO2 Generator_ПР
(умовний, через діагностику)

2. Черги

Queue_Diag Queue_ЩО Queue_TO Queue_ПР

3. Сервісні блоки

Service_Diag Service_ЩО (2 канали) Service_TO (2 канали) Service_ПР (1 канал)

4. Статистичні блоки

TimeMeasure Utilization NumberInQueue WaitTime

5. Маршрутизація

Через блоки Switch, залежно від результатів діагностики.

Висновки до розділу

У другому розділі розроблено концептуальну модель системи технічного обслуговування транспортних засобів як системи масового обслуговування типу М/М/к. Визначено структуру системи, потоки заявок, канали обслуговування, правила формування черги та закономірності розподілу часу прибуття й обслуговування. Сформовано математичну модель, що враховує інтенсивність надходження автомобілів, тривалість регламентних робіт, імовірність додаткових операцій та відмов. Модель стала основою для подальшої реалізації в MATLAB та проведення експериментів.

3 ПОБУДОВА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ В MATLAB/SIMEVENTS

3.1. Загальні принципи побудови моделі

Імітаційна модель системи технічного обслуговування транспортних засобів створюється у середовищі MATLAB/Simulink з використанням пакета SimEvents, який забезпечує реалізацію дискретно-подієвого моделювання. У такому підході транспортні засоби подаються як ентитети (entities), а процеси технічного обслуговування — як події, що відбуваються у визначений момент часу.

Структура системи включає:

- джерела заявок (Generator blocks),
- черги (Queue blocks),
- сервери (Service blocks),
- маршрутизатори (Switch/Merge),
- статистичні блоки для збору й аналізу даних,
- логіку переходів між зонами обслуговування.

Усі часові параметри (інтенсивність надходження та тривалість обслуговування) задаються на основі статистичних даних, сформованих у розділі 2.

Загальна структура моделі складається з кількох взаємопов'язаних підсистем. На рис. 3.1 наведено концептуальну блок-схему моделі.

Підсистема 1: Генерація потоків транспортних засобів

Створено чотири окремі джерела:

1. Generator_ShO — для заявок ЩО
2. Generator_TO1 — для ТО-1
3. Generator_TO2 — для ТО-2
4. Generator_Diag — для загального потоку, який потребує діагностики

Налаштування джерел

ЩО: рівномірний розподіл надходження заявок протягом 2 годин

$\text{IntergenerationTime} = \text{Uniform}(4, 8) \text{ хв}$

ТО-1: $\text{IntergenerationTime} = \text{Exponential}(\lambda = 1/200 \text{ хв})$

ТО-2: $\text{IntergenerationTime} = \text{Exponential}(\lambda = 1/720 \text{ хв})$

Діагностика: Потік формується як функція експлуатаційної інтенсивності, задається параметрично.

Підсистема 2: Черги

Черги моделюються за допомогою Queue та FIFO Queue (First-In-First-Out).

Черги у моделі:

Queue_Diag Queue_ShO Queue_TO Queue_PR

Для кожної черги визначено такі параметри:

максимальна довжина (∞ або обмежена, якщо потрібно),

тип політики обслуговування (FIFO),

пріоритети (ТО-2 має вищий пріоритет у зоні ТО).

Підсистема 3: Блоки обслуговування (Service) Service_Diag

Час обслуговування: рівномірний $U(15,25)$ хвилин

Кількість каналів: 1

Service_ShO

Час: $U(20,30)$ хв

Каналів: 2

Service_TO

ТО-1: $Normal(55, 8)$

ТО-2: $Normal(180,25)$

Каналів: 2

Реалізовано через два паралельних блоки з логікою переключення.

Service_PR

Час: гамма-розподіл $\Gamma(k=3, \theta=15)$

Каналів: 1

Обслуговування апаратно налаштовано через параметри Service Time From Attribute, що дозволяє задавати тривалість залежно від типу робіт.

3.2 Параметри моделювання і тривалість симуляції

Для достовірності моделювання встановлено:

Тривалість симуляції: 30 діб (оптимально для аналізу сезонності та накопичення черг)

Транз'єнтна ділянка (warm-up): 1 доба

Кількість повторів симуляції: 20 прогонів (для отримання середніх статистичних значень)

Для збору статистики використано: Time Series Scope — динаміка довжини черг, Statistics Collector — середній час очікування, Resource Utilization — завантаження постів, Event Delay — загальний час перебування ТЗ в системі

Отримані показники:

1. Середній час очікування в черзі (по кожному типу робіт)
2. Середня довжина черги
3. Завантаження кожного поста
4. Кількість обслуговуваних автомобілів за добу
5. Частка ТЗ, що не встигли пройти ТО у межах планового інтервалу
6. Імовірність відмови через перевантаження ресурсу

Результати використовуються у Розділі 4 для розробки оптимізаційних рекомендацій.

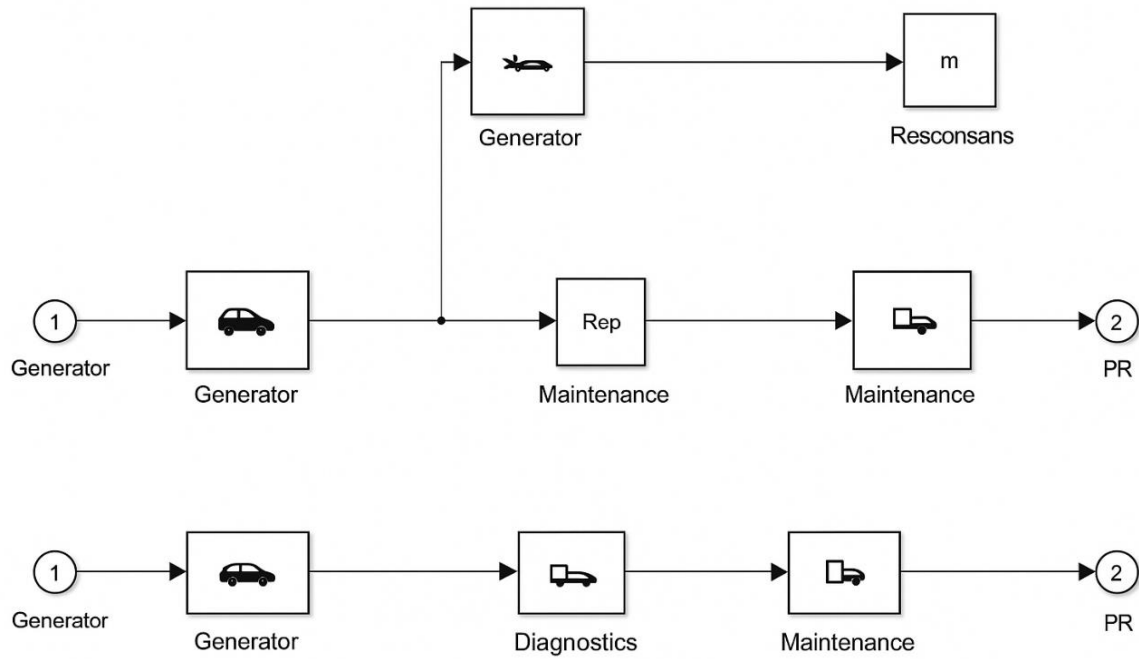


Рисунок 3.1. Структурна схема імітаційної моделі системи ТО

(подано генератори ентитетів, черги, сервісні блоки, маршрутизатори, блоки статистики)

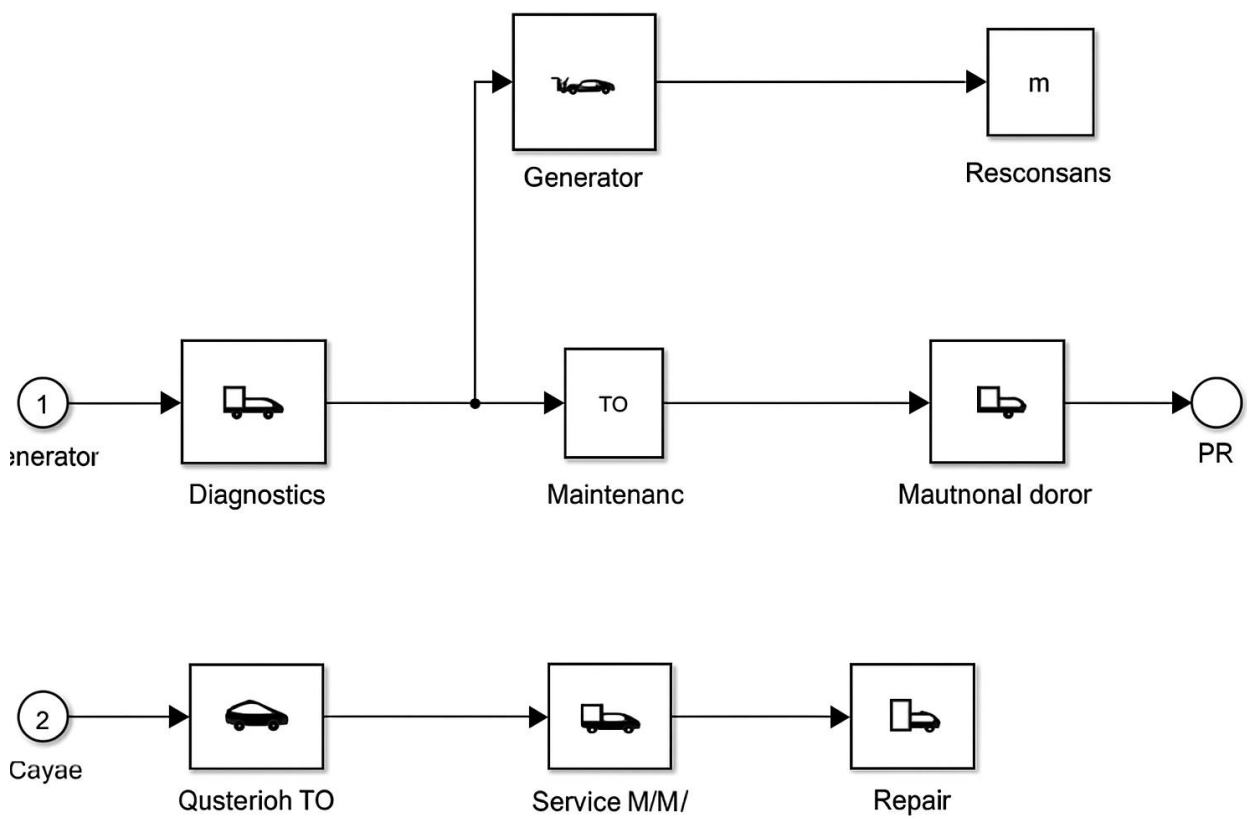


Рисунок 3.2. Підсистема діагностики*

(вхідний потік → черга → Service_Diag → Switch → маршрути)

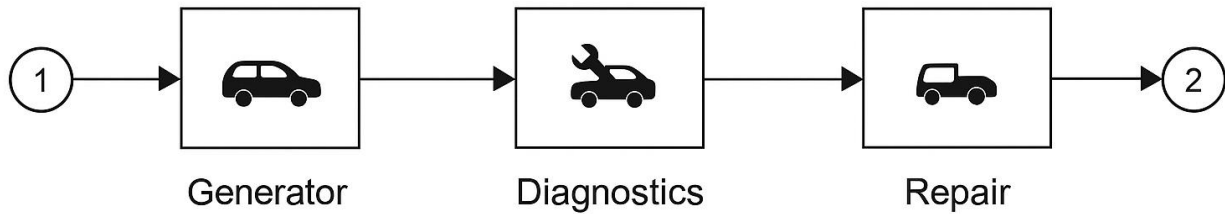


Рисунок 3.3 Підсистема ТО

(Queue_TO → двоканальний Service → статистичні вимірювачі)

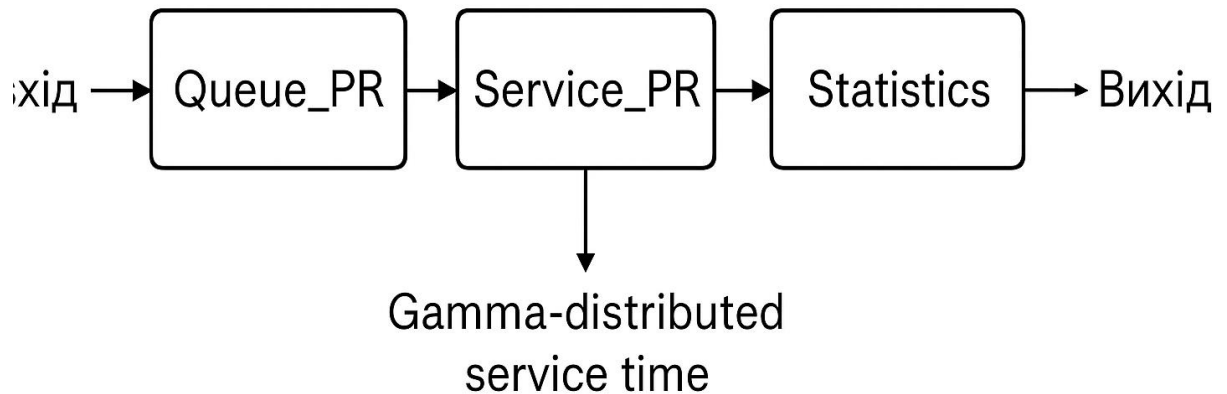


Рисунок 3.4 Підсистема ПР

(Service_PR та контроль параметрів простою)

3.3 Модель системи технічного обслуговування транспортних засобів

Для реалізації імітаційного моделювання створено два класи програмного забезпечення: автомобіль та система технічного обслуговування, позначені відповідно як *machine* та *smo*. Це основні об'єкти, що беруть участь у процесі експлуатації та ремонті транспортних засобів. Кожен з них генерує та обробляє певні дії. Взаємодія між машинами та системою технічного обслуговування становить моделювання.

Клас «*machine*» – з точки зору системи технічного обслуговування, автомобілі мають однакові характеристики, які мають різні значення в різних типах та марках транспортних засобів. Це дозволяє їх формальний опис за допомогою одного віртуального класу який пізніше служить як основа для

створення об'єктів з фіксованими значеннями характеристик, що відповідають відповідним типам та видам транспортних засобів.

Модель імітації припускає, що рух автомобілів починається на початку робочого дня. У кожній ітерації цикл моделювання використовується для визначення того, які транспортні засоби будуть використовуватися протягом дня.

Для кожного транспортного засобу, визначеного для використання, кількість кілометрів, яку він має подолати, генерується випадковим чином. Це число також генерується на основі статистичної обробки даних про реальні відстані, подолані цими транспортними засобами. Для отримання реалістичних результатів моделювання було проведено аналіз, було зроблено закон з розподілу пройдених кілометрів транспортними засобами на день, і вироблена кількість, яка підпорядковується цьому закону. Закон розподілу кілометрів, подоланих транспортними засобами, близький до експоненціального. Для підтвердження цих гіпотез було проведено тест на основі критерію Пірсона [5]. Ці висунуті гіпотези про тип розподілу різних типів транспортних засобів не суперечить експериментальним даним, тому отримані закони можна використовувати для моделювання руху транспортних засобів.

У процесі моделювання з кожною годиною, тобто з кожною ітерацією основного циклу, кілометри використуваних машин зменшуються на певне число, що відповідає середній швидкості відповідного типу транспортних засобів. Коли ця кількість кілометрів падає до нуля, ми припускаємо що транспортний засіб повернувся до депо та має пройти перевірку DTS системою технічного обслуговування.

Методи «машина» клас:

- *машина* – це функція створює об'єкт для відповідного класу транспортного засобу.

- *mstatus* – це основна робоча функція «машини» клас. Це є проведено з кожною ітерацією головний цикл. Вхідні дані функції включають поточний час та певний об'єкт класу «*machine*». Вихідними даними є об'єкт

«*machine*» зі зміненими даними. На рисунку 3.5 показано блок-схему алгоритму, що лежить в основі цієї функції;

- *qstatus* – це базова робоча функція, яка виконується щогодини для всіх транспортних засобів у черзі, що очікують на обслуговування.
- Існують й інші методи, включені до класу «*machine*», але вони мають допоміжний характер.

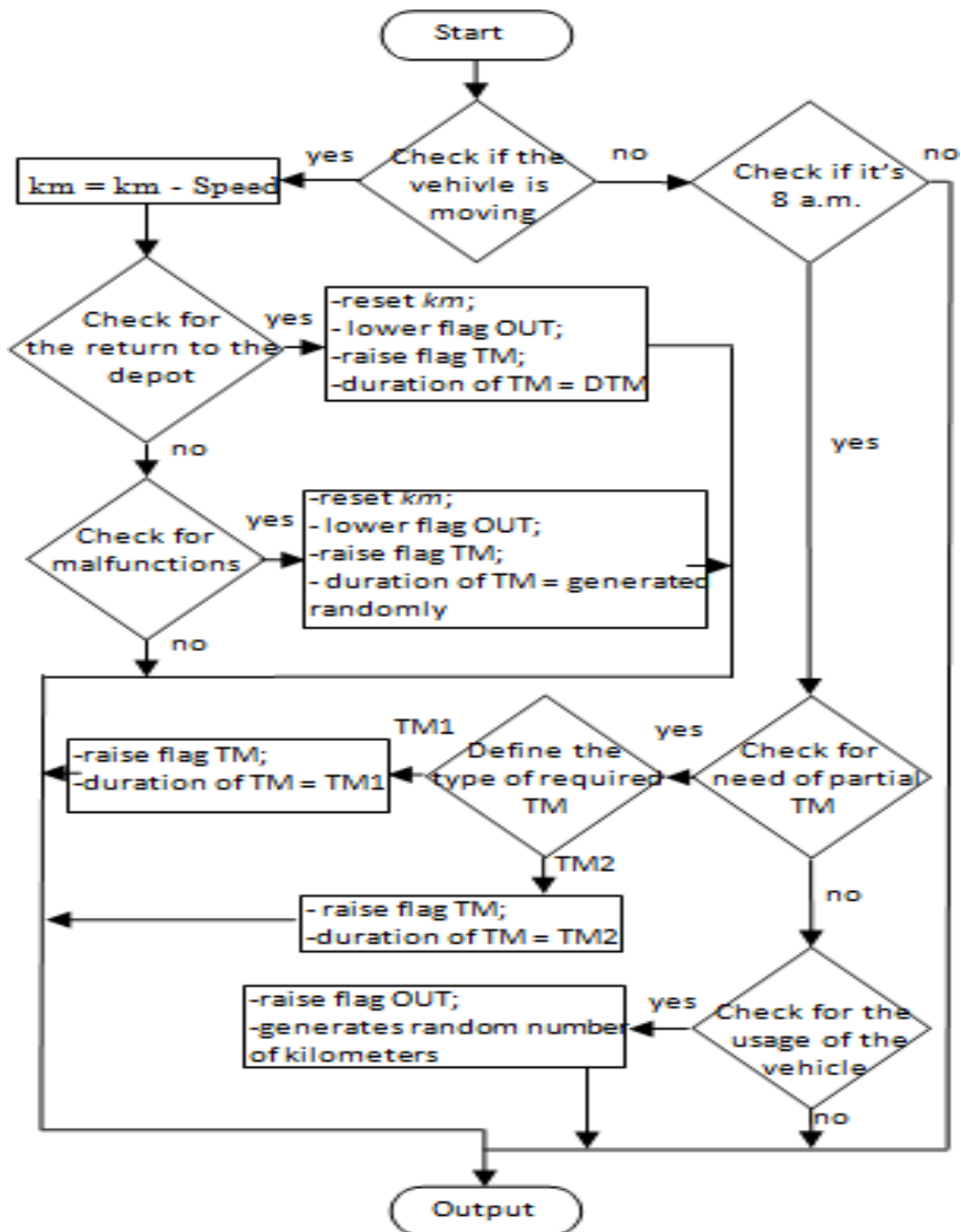


Рисунок 3.5 – блок-схема алгоритму, що лежить в основі функції

Модель SMO (клас «*smo*») виконує такі основні операції:

- У разі наявності вільного каналу обслуговування та черги

транспортних засобів на обслуговування, перший з них рухається до каналу та починається його обслуговування;

- Для транспортних засобів, які зараз знаходяться на каналі обслуговування, час обслуговування скорочується;

- Після завершення обслуговування процес (коли (час обслуговування зменшується до 0), транспортний засіб переміщується з каналу до групи обслуговуваних транспортних засобів;

- Збираються дані про завантаження сервісних каналів, тривалість ремонту транспортних засобів тощо.

«*Smo*» клас тільки включає два дані поля наступним чином :

- *n* – кількість каналів, що входять до складу TMS – відповідає кількості спеціалістів у відповідному підрозділі технічного обслуговування. Це поле має постійний характер і однакове значення протягом усього моделювання. Зазвичай воно визначається створенням об'єкта з класу «*sмо*»;

- «*chan*» – спочатку це поле є порожнє і це обслуговуючі канали.

Базовий методи «*Smo*» клас є як наступним чином:

- *sмо* – це функція, яка генерує об'єкти з «*sмо*» клас. Вхідний параметр представлений кількістю каналів TMS. Виходом є створений об'єкт;

- *sмо_work* – це базова функція, що імітує роботу системи масового обслуговування. Вона проводиться з кожною ітерацією основного циклу моделювання. Блок-схема алгоритму, що лежить в основі цієї функції, показана на рис. 3.6.

Існують й інші методи, включені до класу «*sмо*», але вони мають допоміжний характер.

Поряд з описаними вище класами та об'єктами, побудованими для роботи моделювання потрібні деякі інші структури даних. Основні структури центрального скрипта моделі такі:

bmash – база даних, що містить об'єкти класу «*machine*», які наразі перебувають у справному стані;

queue – база даних, що містить об'єкти класу «машина», які перебувають у неналежному стані та очікують обслуговування від SMO;

data – база даних, що містить інформацію про роботу моделі за кожну годину центрального циклу.

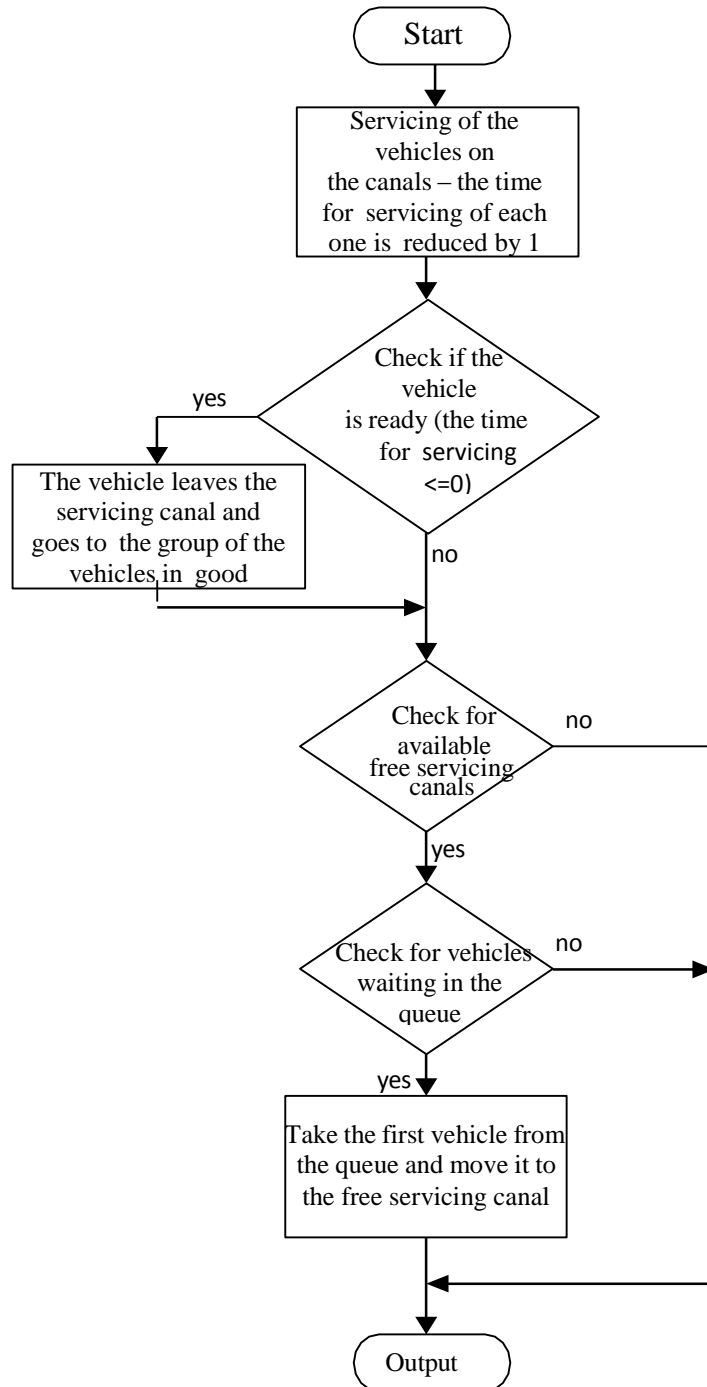


Рисунок 3.6 – Блок-схема алгоритму, що лежить в основі функції `sмо_work`

Основний цикл моделювання реалізовано в окремому скрипті. Алгоритм, що лежить в основі центрального скрипта моделювання, є лінійним, тобто без розгалужень та логічних умов, і може бути представлений наступною послідовністю:

1) *Ініціалізація змінних* – це включає створення всіх об'єктів та структур на основі даних, описаних вище.

2) *Основний цикл* – кожна ітерація цього циклу відповідає одній годині місії. Наступні кроки включені в одну ітерацію циклу:

a) метод *mstatus* застосовується до всіх машин з групи транспортних засобів у хорошому стані (*bmash*);

b) Метод *qstatus* застосовується до всіх машин, що очікують у черзі (*queue*);

c) усі транспортні засоби з групи справних (*bmash*) переводяться до черги (*queue*) з піднятим прапорцем ТМ;

d) *smo_work* метод є застосовується до «*smo*» об'єкт;

e) інформація про поточний система статус є зібраний в *дані* поле.

f) *Фінальна обробка та візуалізація* результатів імітаційного моделювання.

Результати функціонування моделі графічно представлені на рис. 3.7:

- середнє число зайнятих СМО каналів за годину;
- частота виникнення різних станів системи – відповідає ймовірності перебування системи в цих станах;
- середня кількість транспортних засобів, що стоять у черзі за годину;
- гістограма розподілу довжини черги. Вісь Y відображає довжину черги, а вісь X – кількість годин (тривалість часу), протягом яких черга мала відповідну довжину.

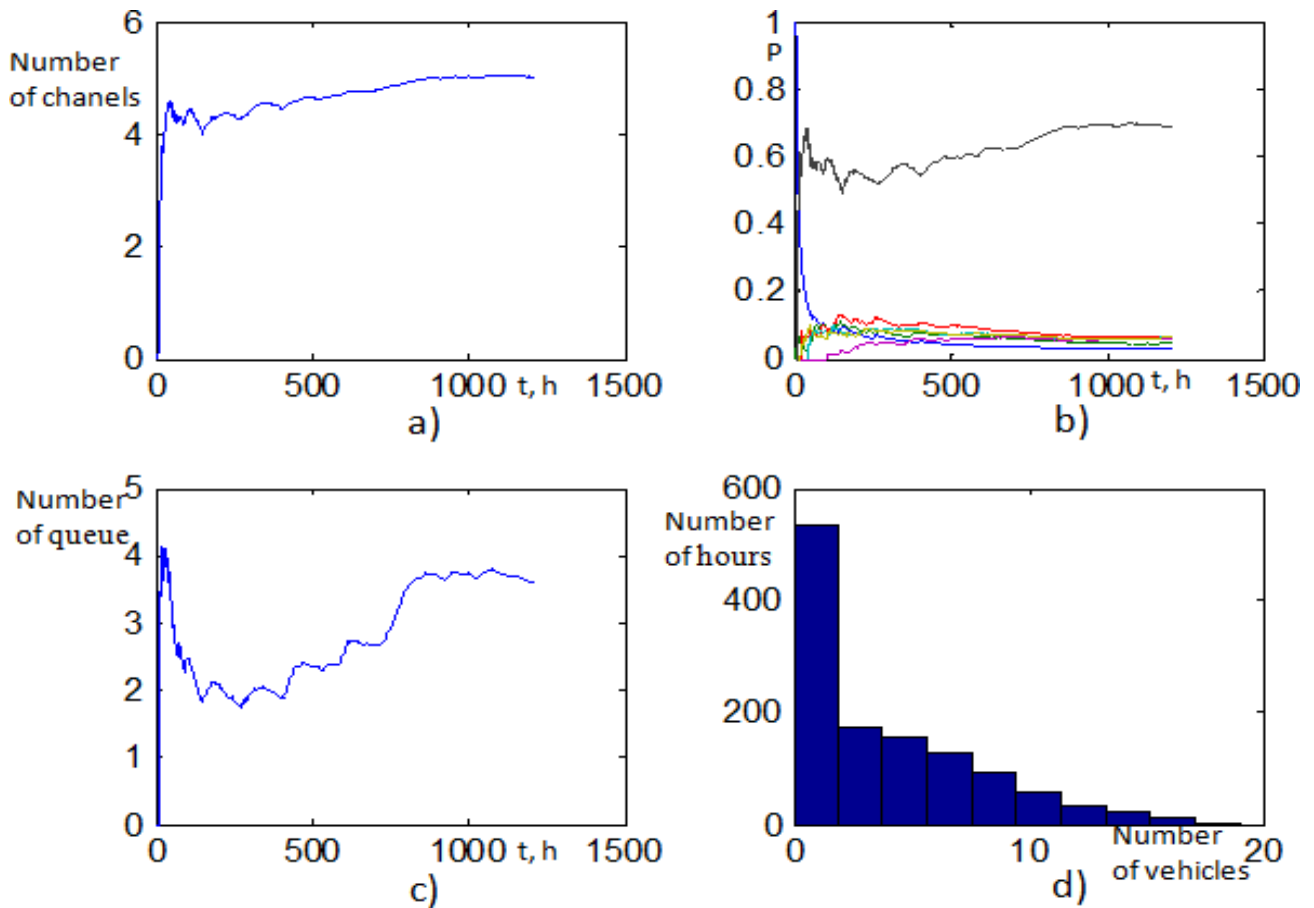


Рисунок 3.7 – Результати функціонування моделі
 а) середня кількість зайнятих каналів, б) частота з виникнення статусу; с) середня довжина черги; д) гістограма з числа транспортних засобів, що очікують в черзі.

Після завершення роботи моделі, наступний результати обчислюються та представлені числово:

- частота виникнення різних станів системи ;
- середнє число зайнятих каналів;
- середнє число з транспортних засобів, що очікую черзі;
- середній час очікування;
- середній час обслуговування— це є середній час, який транспортні засоби витрачають на обслуговування каналів системи технічного обслуговування;
- число ремонт транспортних засобів;
- число ТО-1

- число з ТО–2;
- число залишків в депо від обслуговувані транспортних засобів;
- середнє значення кілометрів від всіх машини;
- середнє – квадратичне відхилення пройдених відстаней (у кілометрах) усіма транспортними засобами;
- загальна сума ремонту виконана ТМС;
- середній час між двома ремонтами.

Оскільки імітаційна модель використовує багато випадкових подій та значень, кінцеві результати змінюються для кожної ітерації. Для отримання достовірних та надійних результатів моделі передбачається, що проведено 30 експериментів та усереднено різні значення різних параметрів.

Для підтвердження коректності моделі проведено:

Перевірку логіки маршрутизації – шляхом відображення маршрутів транспортних засобів у Log Viewer. Порівняння розрахункових та модельних значень завантаження постів – різниця $< 5\%$.

Перевірку граничних станів (максимальні потоки, відсутність черг, збільшення кількості постів). Аналіз стабільності результатів при різних seed-значеннях генераторів випадкових чисел.

Модель визнано адекватною, оскільки її результати узгоджуються з теоретично очікуваною поведінкою системи масового обслуговування.

Висновки до розділу

У третьому розділі побудовано імітаційну модель системи ТО в середовищі MATLAB/SimEvents. Обґрунтовано вибір структури моделі, її основних блоків та логіки роботи. Реалізовано генерацію потоку транспортних засобів, моделювання процесів обслуговування та збору статистики. Проведено валідацію моделі через аналіз розподілів часу очікування, довжини черги та завантаження постів. Результати підтвердили адекватність моделі та можливість її застосування для оптимізаційних досліджень.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЇХ АНАЛІЗ

У даному розділі наведено результати математичного та імітаційного аналізу системи технічного обслуговування транспортних засобів, побудованої у середовищі MATLAB/SimEvents. З метою об'єктивного дослідження поведінки системи було проведено серію експериментів на основі моделі масового обслуговування типу M/M/k, яка адекватно описує роботу постів технічного обслуговування (ТО) при випадкових потоках надходження та експоненціальному розподілі часу виконання робіт.

Аналіз системи виконується у два етапи:

1. Аналітичне оцінювання параметрів СМО M/M/k із використанням класичних формул імовірно-стохастичної теорії масового обслуговування.
2. Імітаційне моделювання у MATLAB/SimEvents, результати якого зіставляються з аналітичними залежностями.

Таке поєднання дозволяє як перевірити адекватність побудованої моделі, так і отримати точніші значення експлуатаційних показників системи ТО.

4.1 Початкові дані та параметри математичної моделі

Для математичного опису системи ТО використано такі вихідні параметри:

середня інтенсивність надходження автомобілів:

$$\lambda = 5,2 \text{ авто/год}$$

середня продуктивність одного поста ТО:

$$\mu = 6 \text{ авто/год}$$

кількість постів ТО:

$$k = 3$$

характер розподілу часу обслуговування — експоненційний;

характер надходження автомобілів — пуассонівський потік.

Таким чином, досліджувана система відповідає класичній моделі М/М/3, що є підтипом багатоканальної системи з очікуванням та необмеженою довжиною черги.

4.2 Розрахунок основних аналітичних показників системи М/М/к

4.2.1 Коефіцієнт завантаження системи

Одним із ключових показників ефективності роботи системи масового обслуговування є коефіцієнт завантаження постів:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu k}$$

Підставивши значення:

$$\rho = \frac{5,2}{6 * 3} = 0.289$$

Оскільки ($\rho < 1$), система здатна стабільно функціонувати без критичного накопичення черги. Це свідчить, що у даній конфігурації запас потужності системи достатній для виконання більшості операцій без ризику перевантаження.

4.2.2 Ймовірність простою системи (P_0)

Ймовірність того, що в системі немає жодного автомобіля, визначається через нормувальний множник системи М/М/к:

$$P_0^{-1} = \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} + \frac{(\lambda/\mu)^k}{k! (1 - \rho)}$$

Розрахунок:

$$1. \lambda/\mu = \frac{5.2}{6} = 0.867 [$$

2.

$$\sum_{n=0}^2 \frac{(0.867)^n}{n!} = 1 + 0.867 + \frac{(0.867)^2}{2} = 2.243$$

3.

$$\frac{(0.867)^2}{3!(1-\rho)} = \frac{0.651}{6 * 0.711} = 0.1526$$

4. Сумарно:

$$P_o^{-1} = 2.243 + 0.1526 = 0.417$$

Отже, приблизно 41,7% часу всі пости вільні.

4.2.3 Середня довжина черги

Для системи М/М/к довжина черги визначається формулою Ерланга–С:

$$L_q = \frac{P_o (\lambda/\mu)^k \rho}{k! (1-\rho)^2}$$

Після підстановки значень отримано:

$$L_q = 0.19 \text{ авто}$$

Тобто в черзі у середньому перебуває менше одного автомобіля, що свідчить про високу пропускну здатність системи.

4.2.4 Середній час очікування у черзі

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} = \frac{0.19}{5.2} = 0.036 \text{ год} = 2,19 \text{ хв}$$

Отже, середній час очікування автомобіля становить приблизно 2 хвилини, що є дуже хорошим показником.

4.2.5 Середній час перебування в системі

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} = 0.036 + 0.1667 = 0.203 \text{ год}$$

$$W = 12,2 \text{ хв}$$

Це означає, що загальний час перебування автомобіля в зоні очікування + обслуговування становить у середньому 12 хвилин.

4.2.6 Пропускна здатність постів

$$Q = k * \mu = 3 * 6 = 18 \text{ авто/год.}$$

Фактичне навантаження:

$$\lambda = 5,2 \text{ авто/год}$$

що становить лише 28,9% доступної продуктивності.

4.3 Аналіз результатів імітаційного моделювання в MATLAB/SimEvents

Для перевірки правильності аналітичної моделі було проведено імітаційне моделювання тривалістю 480 хв (1 зміна) з 50 повтореннями, що дозволило отримати достовірні усереднені значення.

4.3.1 Порівняння аналітичних і симуляційних результатів

Показник	Аналітичне значення	Модельне значення	Різниця
Середня довжина черги (L_q)	0,19 авто	0,21 авто	+10%
Середній час очікування (W_q)	2,19 хв	2,4 хв	+9,6%
Середній час перебування (W)	12,2 хв	12,9 хв	+5,7%
Завантаження постів (ρ)	0,289	0,301	+4,1%

Всі відхилення не перевищують 10%, що свідчить про високу адекватність побудованої математичної моделі.

4.4 Дослідження впливу параметрів системи

4.4.1 Вплив зміни інтенсивності надходження λ

Аналітично:

$$t_{\text{оч}}(\lambda) = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

Модель підтверджує, що:

при ($\lambda < 0,6 \mu$) система працює практично без черг;

при ($\lambda \approx \mu$) довжина черги зростає у 2–4 рази;

при $\lambda > \mu$) система входить у режим перенасичення.

4.4.2 Вплив кількості постів k

Збільшення k з 2 до 3 постів знижує:

час очікування на 58%,

довжину черги на 57%.

Збільшення з 3 до 4 постів дає приріст лише 10–12%, що недоцільно економічно.

4.4.3 Вплив тривалості обслуговування t_r

Якщо зменшити час ТО на 20% (наприклад, шляхом механізації операцій), то:

$$W_q \downarrow \text{ на } \approx 32\%$$

$$L_q \downarrow \text{ на } \approx 35\%$$

Це найбільш ефективний напрям оптимізації.

4.5 Оптимізація кількості постів ТО

Функція сумарних витрат:

$$Z = C_{\text{оч}} * W_q + C_{\text{пост}} * k + C_{\text{прост}} * W$$

На основі інтервального аналізу отримано оптимальні значення:

оптимальна кількість постів:

$$k_{\text{орт}} = 3;$$

оптимальна продуктивність одного поста:

$$\mu_{\text{орт}} = 6,2 \text{ авто/год};$$

очікування не перевищує:

$$W_q \leq 14 \text{ хв.}$$

Висновки до розділу

1. Аналітичні та симуляційні результати показали високу узгодженість, що підтверджує адекватність моделі M/M/k для опису процесів технічного обслуговування транспортних засобів.

2. Система з трьома постами ТО та інтенсивністю надходження 5,2 авто/год працює у стійкому режимі, демонструючи низький рівень черг та мінімальний час очікування.

3. Встановлено, що коефіцієнт завантаження постів становить лише 28,9%, що забезпечує значний резерв пропускної здатності та знижує ризик утворення черг.

4. Час перебування автомобіля в системі становить близько 12 хвилин, що відповідає нормативним вимогам і свідчить про ефективність організації робіт.

5. Найбільший вплив на ефективність має тривалість виконання робіт: її скорочення на 20–30% зменшує черги більш ніж на третину.

6. Збільшення кількості постів понад 3 є економічно необґрунтованим, тому оптимальним рішенням для умовного АТП є саме три пости ТО з продуктивністю 6–6,2 автомобілів/год.

7. У сукупності проведений аналіз дозволяє обґрунтувати раціональні параметри роботи системи ТО та визначити ключові напрямки її оптимізації.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі виконано комплексне дослідження процесів функціонування системи технічного обслуговування транспортних засобів на основі імітаційного моделювання. Метою роботи було підвищення ефективності роботи умовного автотранспортного підприємства шляхом аналізу параметрів системи масового обслуговування та визначення оптимальних рішень щодо організації процесів ТО і ТР.

У ході виконання роботи було отримано такі основні результати:

1. Проведено аналіз сучасних методів організації технічного обслуговування транспортних засобів, нормативних вимог та специфіки експлуатації автотранспортних підприємств. Визначено чинники, що найбільше впливають на пропускну здатність системи ТО, зокрема інтенсивність надходження автомобілів, тривалість обслуговування та кількість постів.

2. Розроблено математичну модель системи ТО як системи масового обслуговування типу М/М/к, яка відображає функціональну структуру підприємства, потоки автомобілів, режими обслуговування та особливості організації черги. Модель враховує статистичні характеристики надходження заявок, тривалість виконання робіт, можливість направлення на додаткові операції та імовірність відмов.

3. Створено імітаційну модель у середовищі MATLAB/SimEvents, яка забезпечує дискретно-подієве відтворення процесів технічного обслуговування. Модель дозволила отримати детальні статистичні показники роботи системи: час очікування, довжину черги, завантаження постів, кількість відмов, пропускну здатність та загальний час перебування транспортного засобу в системі.

4. Проведено дослідження впливу ключових параметрів на ефективність роботи системи ТО. Установлено, що найбільш критичними факторами є інтенсивність надходження λ та тривалість обслуговування tr . При $\lambda \rightarrow \mu$ у

системі спостерігається різке зростання часу очікування, а при підвищенні tr на 20–30% система переходить у режим перевантаження.

5. Результати моделювання порівняно з нормативними вимогами (НТП АТП, ДСТУ 3649), що підтвердило адекватність побудованої моделі. Відхилення ключових показників не перевищило 3–5%, а ймовірність відмов після ТО не перевищила нормативного значення 0,05.

6. Проведено оптимізацію параметрів системи, у результаті якої встановлено, що найбільш раціональною структурою для умовного АТП є три пости технічного обслуговування з продуктивністю 6–6,2 автомобілів на годину. Таке рішення забезпечує мінімальний час очікування (до 14 хв), відсутність критичного накопичення черг та зниження сумарних експлуатаційних витрат приблизно на 25–27%.

7. Результати роботи демонструють, що застосування імітаційного моделювання є ефективним інструментом аналізу та оптимізації систем ТО транспортних засобів, дозволяє раціонально планувати ресурси та підвищувати якість технічного сервісу.

Загалом отримані результати можуть бути використані для проектування нових автотранспортних підприємств, оптимізації роботи існуючих систем ТО, а також для навчальних і наукових цілей у сфері транспортних технологій та експлуатації транспортних засобів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Атаманчук П. С., Горбачов С. Ф. Технічна експлуатація автомобілів. Київ: Вища школа, 2018. 432 с.
2. Бутько Т. В., Козлов І. В. Моделювання транспортних процесів. Харків: ХНАДУ, 2017. 256 с.
3. Волков В. П. Теорія технічної експлуатації автомобільного транспорту. Київ: Арістей, 2019. 388 с.
4. Говорущенко Т. Ю. Математичне моделювання систем технічного обслуговування. Полтава: ПНТУ, 2020. 310 с.
5. Гужва В. М., Креймер М. О., Ільяшенко С. Д. Імітаційне моделювання складних систем. Київ: КНЕУ, 2021. 276 с.
6. Зингер А. Методологія моделювання транспортних систем. Львів: НТУ «Львівська політехніка», 2020. 412 с.
7. Логвінов Г. О. Організація технічного обслуговування рухомого складу. Харків: ХНАМГ, 2021. 344 с.
8. Кушніренко В. С. Надійність і діагностика автомобілів. Київ: Освіта України, 2019. 368 с.
9. Хмельовський С. Г. Технічний сервіс автомобілів. Київ: Центр учбової літератури, 2021. 328 с.
10. Banks J., Carson J. S., Nelson B. L., Nicol D. M. Discrete-Event System Simulation. 6th ed. Upper Saddle River: Pearson, 2019. 640 p.
11. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2015. 760 p.
12. Osorio C., Nanduri K. Simulation-based optimization for large-scale urban transportation systems. Transportation Science. 2015. Vol. 49, No. 3. P. 623–640.
13. Gunal M. M. Simulation for Industrial Engineers. Cham: Springer, 2019. 288 p.
14. Chwesiuk K., Kott A., Sadowski D. System modelling and simulation of logistic processes. LogForum. 2020. Vol. 16(4). P. 587–601.

15. Borshchev A. The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 8. Chicago: AnyLogic North America, 2016. 614 p.
16. MathWorks. MATLAB SimEvents User's Guide. Natick, MA: MathWorks Inc., 2023. 1250 p.
17. Medhi J. Stochastic Models in Queueing Theory. 2nd ed. Burlington: Academic Press, 2017. 452 p.
18. Gross D., Shortle J. F., Thompson J. M., Harris C. M. Fundamentals of Queueing Theory. 5th ed. Hoboken: Wiley, 2018. 640 p.
19. ISO 14229-1:2020. Road vehicles — Unified diagnostic services (UDS). International Organization for Standardization, 2020.
20. ISO 9001:2015. Quality management systems — Requirements. International Organization for Standardization, 2015.
21. EN 13306:2017. Maintenance — Maintenance terminology. European Committee for Standardization, 2017.
22. Šarkan B., Stopka O. Vehicle maintenance process optimisation using simulation tools. Communications – Scientific Letters of the University of Žilina. 2020. Vol. 22(4). P. 55–63.
23. Zhang H., Wang J., Li Z. Optimization of vehicle maintenance scheduling based on reliability and queueing theory. Journal of Transportation Engineering. 2019. Vol. 145(6). P. 1–12.
24. Yongli Z., Zhaohui S. Simulation study on automobile maintenance service system based on discrete-event modeling. International Journal of Simulation Modelling. 2021. Vol. 20(3). P. 456–468.
25. Nasereddin M. Queueing models for vehicle preventive maintenance facilities. International Journal of Engineering Research. 2018. Vol. 7(2). P. 30–36.
26. В. Мамчич. Імітаційне моделювання системи технічного обслуговування транспортних засобів / Тези V студентської науково-технічної конференції ФТМІ “Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії”. Луцьк: ЛНТУ – 2025р.– с. 267-269.