

«Міністерство освіти і науки України

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інженерії машин, споруд та технологій

(назва факультету)

Автомобілів

(повна назва кафедри)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістр

(освітній рівень)

на тему: Розроблення інтелектуальної транспортної системи управління транспортними потоками у містах (комплексна тема)

Виконав: студент 6 курсу, групи МНм-61 спеціальності 275 «Транспортні технології»

(шифр і назва спеціальності)

Студент	(підпис)	Зелінський М.В. (прізвище та ініціали)
	(підпис)	Матвійчук А.М. (прізвище та ініціали)
Керівник	(підпис)	Дзюра В.О. (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	(підпис)	Плекан У.М. (прізвище та ініціали)
Рецензент	(підпис)	Комар Р.В. (прізвище та ініціали)
Зав. каф.	(підпис)	Цьонь О.П. (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інженерії машин, споруд та технологій

Кафедра Автомобілів

Освітній рівень магістр

Напрямок підготовки _____

(шифр і назва)

Спеціальність 275.03 Транспортні технології (на автомобільному транспорті)

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри О.П. Цьонь

«14» листопада 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Зелінському Миколі Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення інтелектуальної транспортної системи
управління транспортними потоками у містах (комплексна тема)

керівник проекту (роботи) Дзюра Володимир Олексійович, д.т.н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «14» листопада 2025 року №4/7-971

2. Термін подання студентом проекту (роботи) 20 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Параметри транспортного процесу, вітки ВДМ міста

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

1.3 Світовий досвід прогресивних інтелектуальних транспортних систем; 1.4 Огляд нормативних документів та наукових джерел із завдань підвищення якості організації дорожнього руху при ДТП

1.5 Висновки до розділу та постановка задач на кваліфікаційну роботу магістра

2.4 Визначення параметрів моделі;

3.3 Імітаційне моделювання для визначення оптимального сценарію управління дорожнім рухом у транспортній мережі міста Тернополя в середовищі PTV Vissim;

4.3 Безпека життєдіяльності при використанні автомобільного пасажирського транспорту в умовах військових дій; 4.4 Розрахунок параметрів функціонування автомобільного пасажирського транспорту в умовах воєнного стану

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Слайди 1-10 графічного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Окіпний І.Б., доцент</i>		
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Стручок В.С., ст. викладач</i>		

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.3	<i>Світовий досвід прогресивних інтелектуальних транспортних систем;</i>	17.11.2025	
1.4	<i>Огляд нормативних документів та наукових джерел із завдань підвищення якості організації дорожнього руху при ДТП</i>	25.11.2025	
1.5	<i>Висновки до розділу та постановка задач на кваліфікаційну роботу магістра</i>	28.11.2025	
2.4	<i>Визначення параметрів моделі;</i>	01.12.2025	
3.3	<i>Імітаційне моделювання для визначення оптимального сценарію управління дорожнім рухом у транспортній мережі міста Тернополя в середовищі PTV Vissim;</i>	03.12.2025	
4.3	<i>Безпека життєдіяльності при використанні автомобільного пасажирського транспорту в умовах військових дій;</i>	05.12.2025	
4.4	<i>Розрахунок параметрів функціонування автомобільного пасажирського транспорту в умовах воєнного стану</i>	13.12.2025	

Студент _____
(підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інженерії машин, споруд та технологій

Кафедра Автомобілів

Освітній рівень магістр

Напрямок підготовки _____

(шифр і назва)

Спеціальність 275.03 Транспортні технології (на автомобільному транспорті)

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри О.П. Цьонь

«14» листопада 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Матвійчуку Андрію Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення інтелектуальної транспортної системи
управління транспортними потоками у містах (комплексна тема)

керівник проекту (роботи) _____

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «14» листопада 2025 року № №4/7-971

2. Термін подання студентом проекту (роботи) 20 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Параметри транспортного процесу, вітки ВДМ міста

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

1.1 Аналіз проблем затримок транспортних засобів на автомобільних дорогах;

1.2 Аналіз міжнародного досвіду вирішення проблем організації дорожнього руху при виникненні ДТП у міській транспортній мережі;

2.1 Опис концепції роботи ремаршрутизації транспортного потоку та обґрунтування структури теоретичного дослідження; 2.2 Визначення цільової функції; 2.3 Визначення типу наукового завдання та обґрунтування математичного апарату.

3.1 Загальне планування імітаційного моделювання; 3.2 Імітаційне моделювання з визначенням оптимальної схеми організації дорожнього руху в міській транспортній мережі (ВДМ)

4.1 Охорона праці на автомобільному пасажирському транспорті; 4.2 Охорона праці при використанні електротранспорту

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Слайди 11-20 графічної частини

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Окіпний І.Б., доцент</i>		
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Стручок В.С., ст. викладач</i>		

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.1	<i>Аналіз проблем затримок транспортних засобів на автомобільних дорогах;</i>	17.11.2025	
1.2	<i>Аналіз міжнародного досвіду вирішення проблем організації дорожнього руху при виникненні ДТП у міській транспортній мережі;</i>	25.11.2025	
2.1	<i>Опис концепції роботи ремаршрутизації транспортного потоку та обґрунтування структури теоретичного дослідження;</i>	28.11.2025	
2.2	<i>Визначення цільової функції;</i>	01.12.2025	
2.3	<i>Визначення типу наукового завдання та обґрунтування математичного апарату.</i>	03.12.2025	
3.1	<i>Загальне планування імітаційного моделювання;</i>	05.12.2025	
3.2	<i>Імітаційне моделювання з визначенням оптимальної схеми організації дорожнього руху в міській транспортній мережі (ВДМ)</i>	08.12.2025	
4.1	<i>Охорона праці на автомобільному пасажирському транспорті;</i>	03.12.2025	
4.2	<i>Охорона праці при використанні електротранспорту</i>	17.12.2025	

Студент _____
(підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	9
ВСТУП	11
1 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ	
1.1 Аналіз проблем затримок транспортних засобів на автомобільних дорогах	13
1.1.1 Аналіз стану затримок транспортних засобів на дорогах України (з оновленими даними)	13
1.1.2 Аналіз наслідків затримок транспортних засобів на автомобільних дорогах	15
1.2 Аналіз міжнародного досвіду вирішення проблем організації дорожнього руху при виникненні ДТП у міській транспортній мережі	20
1.2.1 Аналіз досвіду впровадження системи ІТС у В'єтнамі	21
1.2.2 Найбільш прогресивна інтелектуальна транспортна система: Сінгапурський досвід	22
1.2.3 Інтелектуальні транспортні системи України	24
1.3 Світовий дослід прогресивних інтелектуальних транспортних систем	25
1.4 Огляд нормативних документів та наукових джерел із завдань підвищення якості організації дорожнього руху при ДТП	32
1.5 Висновки до розділу та постановка задач на кваліфікаційну роботу магістра	37
2 АНАЛІТИКО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	
2.1 Опис концепції роботи ремаршрутизації транспортного потоку та обґрунтування структури теоретичного дослідження	38
2.2 Визначення цільової функції	42

2.3	Визначення типу наукового завдання та обґрунтування математичного апарату	44
2.4	Визначення параметрів моделі	46
2.4.1	Вибір оптимального сценарію управління дорожнім рухом	46
2.4.2	Визначення маршруту руху транспортного потоку через мережу	53
2.4.3	Визначення оптимальної частки перенаправлення транспортного потоку в мережі	56
3	ПРОЕКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ	
3.1	Загальне планування імітаційного моделювання	66
3.2	Імітаційне моделювання з визначенням оптимальної схеми організації дорожнього руху в міській транспортній мережі (ВДМ)	67
3.2.1	Імітаційне моделювання з визначенням частки перенаправлення транспортних засобів у потоці	67
3.2.2	Імітаційне моделювання із визначенням оптимального сценарію управління дорожнім рухом у транспортній мережі	74
3.2.3	Імітаційне моделювання на умовній ділянці для визначення залежності між кількістю транспортних засобів, що перетинають перехрестя, та тривалістю дозволяючої фази світлофорного сигналу	76
3.3	Імітаційне моделювання для визначення оптимального сценарію управління дорожнім рухом у транспортній мережі міста Тернополя в середовищі PTV Vissim	78
4	ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	
4.1	Охорона праці на автомобільному пасажирському транспорті	89
4.1.1.	Загальні принципи охорони праці в автомобільному транспорті	89

4.1.2.	Характеристика умов праці на пасажирському автотранспорті	90
4.1.3.	Організація системи управління охороною праці на автотранспортному підприємстві	91
4.1.4.	Безпека праці водія пасажирського транспортного засобу	92
4.1.5.	Безпечна експлуатація транспортних засобів	93
4.1.6.	Пожежна безпека на автотранспортному підприємстві	93
4.1.7.	Електробезпека і робота в ремонтних зонах	94
4.1.8.	Соціальні аспекти охорони праці	94
4.1.9.	Розрахунок освітленості робочих місць	95
4.2	Охорона праці при використанні електротранспорту	96
4.3	Безпека життєдіяльності при використанні автомобільного пасажирського транспорту в умовах військових дій	101
4.4	Розрахунок параметрів функціонування автомобільного пасажирського транспорту в умовах воєнного стану	105
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	110
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	112

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота присвячена дослідженню проблем затримок транспортних засобів на автомобільних дорогах та розробленню інноваційного науково-методичного підходу до підвищення ефективності управління дорожнім рухом у міських транспортних мережах на основі імітаційного моделювання в середовищі PTV Vissim. Актуальність роботи визначається зростанням інтенсивності руху в містах України, збільшенням кількості дорожньо-транспортних пригод, перевантаженням окремих ділянок магістральних вулиць, а також потребою в забезпеченні безпечного й ефективного функціонування транспортної системи в умовах як повсякденних затримок, так і надзвичайних подій.

У теоретичному розділі проведено комплексний аналіз сучасного стану затримок транспортних засобів на автомобільних дорогах України з використанням оновлених статистичних даних, розкрито наслідки цих затримок для економіки, екології та якості життя населення, а також здійснено огляд міжнародного досвіду організації дорожнього руху в умовах виникнення ДТП. Проаналізовано прогресивні підходи до впровадження інтелектуальних транспортних систем у В'єтнамі, Сінгапурі та Україні, виконано порівняльну оцінку їх функціональних можливостей та ефективності. Значну увагу приділено нормативно-правовому забезпеченню організації дорожнього руху та науковим публікаціям, що формують теоретичну основу для постановки задач кваліфікаційної роботи магістра.

Аналітико-дослідницький розділ присвячений формуванню концепції ремаршрутизації транспортного потоку та обґрунтуванню структури математичної моделі, необхідної для визначення оптимального сценарію управління дорожнім рухом. У межах дослідження визначено цільову функцію, параметри моделі, тип наукової задачі та необхідний математичний апарат. Розроблено підхід до оптимізації сценарію організації руху, вибору маршруту

транспортного потоку в міській мережі та визначення оптимальної частки перенаправлення транспортних засобів у випадку ускладнень руху.

У проектно-рекомендаційному розділі представлено детальний опис процесу імітаційного моделювання в середовищі PTV Vissim. Розкрито методику планування моделювання, побудовано модель міської транспортної мережі, що включає різні варіанти сценаріїв організації дорожнього руху, перенаправлення потоків та регулювання світлофорних об'єктів. Проведено серію імітаційних експериментів: визначення частки перенаправлення транспортних засобів у потоці, оцінка сценаріїв управління рухом, моделювання залежності між інтенсивністю потоку і тривалістю дозволяючої фази, а також побудовано повноцінну модель транспортної мережі міста Тернополя для визначення оптимального сценарію управління дорожнім рухом у реальних умовах. Отримані результати дозволили визначити найефективніші варіанти організації руху з позиції мінімізації затримок, черг та часу проїзду.

Окремий розділ присвячений питанням охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. Проаналізовано особливості умов праці водіїв, організацію системи охорони праці на автотранспортному підприємстві, вимоги до технічної безпеки, пожежної безпеки, електробезпеки та експлуатації транспортних засобів. Розглянуті питання безпечного функціонування автомобільного пасажирського транспорту в умовах військових дій, а також виконано розрахунок параметрів його функціонування під час воєнного стану.

У загальних висновках сформульовано основні результати роботи та визначено напрями подальших досліджень.

Магістерська робота має практичну значущість, оскільки результати моделювання можуть бути використані органами місцевого самоврядування, службами організації дорожнього руху та проектними організаціями для оптимізації транспортних потоків у містах України, зокрема в умовах підвищених навантажень або надзвичайних ситуацій.

ВСТУП

Сучасна транспортна система характеризується зростаючим попитом на переміщення пасажирів і вантажів, що зумовлює постійне збільшення кількості транспортних засобів, які щодня виїжджають на вулиці великих міст. Системи організації дорожнього руху дедалі частіше оснащуються передовими та інноваційними технологіями. Важливим чинником розвитку й підвищення ефективності складних процесів, механізмів та автоматизації у транспортній сфері є належне управління й експлуатація транспортних процесів.

Через невідповідність між рівнем розвитку вулично-дорожньої мережі та зростанням кількості транспортних засобів умови руху на міських і заміських магістралях ускладнюються, що призводить до виникнення заторів. Наявність заторів зумовлює суттєві економічні втрати: втрати часу як пасажирями громадського транспорту, так і власниками приватних автомобілів; зниження ефективності вантажних перевезень; збільшення витрат пального та інші прямі чи непрямі фінансові витрати. Окрім цього, затори негативно впливають на екологічний стан довкілля. Тому актуальною є потреба у підвищенні надійності реагування транспортної системи на затори, її оснащенні засобами, що дозволяють оперативно реагувати на зміни технічного стану дорожньої мережі та забезпечувати ефективну експлуатацію.

Особливої ваги ця проблема набуває в умовах мегаполісів, де управління транспортними потоками потребує сучасних технічних рішень в організації дорожнього руху. На думку фахівців, ліквідувати або мінімізувати тривалість заторів, що виникають унаслідок дорожньо-транспортних пригод чи інших аварійних ситуацій, можливо завдяки оперативним та злагодженим діям дорожньо-патрульних служб. Разом із цим, розвиток науки, новітніх технологій та впровадження заходів щодо вдосконалення організації дорожнього руху й інфраструктури, спрямованих на запобігання виникненню заторів, створюють умови для застосування сучасних технічних методів управління. Це забезпечує

можливість ефективного функціонування транспортної системи великих міст навіть за складних умов руху.

1 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Аналіз проблем затримок транспортних засобів на автомобільних дорогах

1.1.1 Аналіз стану затримок транспортних засобів на дорогах України (з оновленими даними)

Транспортна система в різних країнах постійно розвивається з метою підвищення якості перевезень пасажирів і вантажів та стимулювання економічного зростання. Це сприяє покращенню умов життя населення й створенню кращих передумов для розвитку. Водночас, паралельно з розвитком транспортної інфраструктури, виникають нові соціально-економічні виклики, серед яких - дорожні затори. Вони дедалі більше впливають на суспільство, економіку та екологію.

За даними моніторингу TomTom, затори на дорогах містах світу зросли за останнє десятиліття, особливо в мегаполісах.

Київ посідає одне з провідних місць за рівнем навантаження доріг. Наприклад:

З початку 2024 року Київ «простояв» у заторах 101 годину через повітряні тривоги - це приблизно 4,2 дні простою.

У листопаді 2024 року середній рівень заторів у столиці оцінювався в межах 50–54 % у будні дні.

Раніше дані за 2021 рік свідчили, що місячна завантаженість доріг Києва становила в середньому 56 %, тобто поїздка у часи піку може тривати майже вдвічі довше, ніж за умов вільного руху.

Також Київ потрапляв до рейтингу міст із найбільшими заторами – наприклад, у 2021 році він піднявся з 7-го місця до 3-го серед 400 глобальних міст за інтенсивністю трафіку. (UBN)

Ці цифри демонструють, що мешканці столиці щорічно втрачають значну кількість часу в заторах – це вимірюється десятками чи сотнями годин.

Крім того, у Києві тривають спроби зменшити втрати часу через інфраструктурні рішення. Зокрема:

У липні 2024 року в столиці облаштували нові виділені смуги для громадського транспорту на проспекті Леся Курбаса та вулиці Академіка Єфремова, щоб прискорити рух автобусів та тролейбусів.

Вводяться обмеження, що приватний транспорт не може рухатись виділеною смугою – це допомагає «пропускати» громадський транспорт й екстрені служби.

Крім столиці, проблеми заторів також стосуються інших великих міст - наприклад, у Львові, Одесі, Дніпрі, Харкові - з огляду на збільшення автомобільного трафіку, недостатню дорожню мережу та обмежену пропускну здатність магістралей.

Таким чином, додавання таких свіжих даних підсилює аргументацію: транспортна проблема не лише теоретична, а реальна й актуальна для України сьогодні.

Згідно зі статистикою індексу трафіку за 2020 рік, який охопив 416 міст у 57 країнах світу, 239 міст (57%) продемонстрували зростання рівня завантаженості доріг у період із 2018 по 2019 роки, тоді як лише 63 міста засвідчили помітне зниження. Цей індекс також показує, що найбільш перевантаженим містом світу став Нью-Йорк, де водії витрачали на 54% більше часу у заторах, ніж за умов вільного руху. У переліку найбільш перевантажених міст також опинилися Мумбаї (Індія), Богота (Колумбія), Маніла (Філіппіни), Стамбул (Туреччина), Бангалор (Індія) та Київ (Україна) з рівнем заторів у 51%.

Глобальне зростання завантаженості доріг свідчить про високий рівень урбанізації та економічного розвитку, однак водночас створює серйозні виклики. Наслідки транспортних заторів для економіки оцінюються у мільярди доларів щорічно.

1.1.2 Аналіз наслідків затримок транспортних засобів на автомобільних дорогах

Затор на дорогах не лише знижує ефективність роботи транспортної системи, а й є одним із головних джерел забруднення довкілля шкідливими викидами. У районах із високим рівнем транспортних заторів значно зростає рівень шуму, що погіршує умови життя населення. Крім того, транспортні затори провокують низку економічних і соціальних проблем, із якими стикаються міста в усьому світі.

У звіті компанії INRIX, яка спеціалізується на аналізі транспортних даних, наголошується, що затори мають як емоційні, так і значні економічні наслідки. Використовуючи дані GPS, дослідники оцінили економічний вплив заторів, включаючи прямі витрати (втрата часу, витрати пального) та непрямі витрати (зростання цін для споживачів унаслідок подорожчання логістики).

Наприклад, у Великій Британії, Німеччині та США у 2017 році ці витрати склали близько 461 мільярда доларів, що дорівнює приблизно 975 доларів на людину.

Дослідження, проведене Незалежним британським центром економічних і ділових досліджень (Centre for Economics and Business Research, CEBR), підтвердило масштабність цієї проблеми. У ньому було детально проаналізовано економічні втрати від заторів у США, Франції, Німеччині та Великобританії, які виявилися критично значними як для транспортної системи, так і для економіки загалом.

Втрати часу водіїв та перевитрата пального, а також опосередковані наслідки, коли підприємства змушені перекладати додаткові витрати на споживачів шляхом підвищення цін, є одними з ключових економічних наслідків транспортних заторів. За статистикою, у 2013 році затори обійшлися економікам провідних країн світу приблизно у 200 мільярдів доларів. Це еквівалентно 1736 доларам на кожну родину у США та понад 2000 доларів на сім'ю у Великій Британії, Франції та Німеччині. Прогнози свідчать, що без суттєвих заходів до

2030 року ці витрати зростуть майже на 50% і становитимуть близько 291 мільярда доларів.

У міжнародному масштабі найбільш проблемними країнами для автомобілістів, за даними бази INRIX, виявилися ті, де транспортна інфраструктура не встигає за зростанням чисельності населення, насамперед у країнах, що розвиваються. Наприклад, у Таїланді водії щороку втрачають у середньому 56 годин лише через затори у години пік. В Європі однією з найгірших транспортних систем визнано східноєвропейську, де відразу п'ять із десяти найбільш перевантажених міст континенту зосереджені в одній країні. Німеччина ж, попри сучасну інфраструктуру та середні за розміром міста, потерпає від надмірного навантаження на автошляхи через потоки вантажів, що прямують до морських портів та з них.

За дослідженням Канадського інституту Пембіні, у найближче десятиліття економічні збитки від заторів лише зростатимуть, якщо вчасно не буде вжито ефективних заходів для їх подолання. На наведеному нижче графіку (рис. 1.1) показано так звану «ціну бездіяльності» – втрати, які несе кожен пасажир через транспортні проблеми. Як демонструє динаміка (синя лінія на графіку), щорічні витрати, спричинені заторами, мають сталу тенденцію до зростання.

Великі міста, зокрема Київ, Львів, Дніпро та Харків, регулярно стикаються з масштабними заторами, які не лише забирають час водіїв та пасажирів, а й призводять до додаткового споживання палива, підвищення собівартості логістики та погіршення екологічної ситуації. Для української економіки, що перебуває під тиском війни та потребує максимально ефективного використання ресурсів, питання подолання транспортних заторів набуває особливої ваги. Розвиток міського громадського транспорту, інтеграція інтелектуальних транспортних систем, розширення мережі об'їзних доріг і створення умов для екологічно чистого транспорту могли б знизити не лише прямі економічні втрати, але й соціальну напругу, пов'язану з низькою мобільністю населення.



Рисунок 1.1 – Прогноз зміни витрат на пальне та часу, втраченого внаслідок заторів

Найбільшу частку цих витрат - близько 700 доларів щороку на кожного учасника дорожнього руху - становлять додаткові витрати на пальне, що спалюється автомобілями під час перебування в заторах. Вартість втраченої заробітної плати та зниження продуктивності через змарнований час у пробках сягає понад 800 доларів на одного пасажера, що відображено на графіку фіолетовою смугою. У підсумку щорічні витрати бездіяльності становлять приблизно 1500 доларів на водія та не менше 800 доларів на пасажера. Трендові лінії на графіку також свідчать про постійне зростання економічних втрат, пов'язаних із заторами.

Інше дослідження показало, що лише у 2013 році в США, Франції, Німеччині та Великій Британії через роботу двигунів на холостому ходу було витрачено майже шість мільярдів літрів пального. Зростання інтенсивності руху в містах викликає й іншу серйозну проблему - погіршення екологічної ситуації та збільшення шкідливих викидів в атмосферу. За оцінками дослідників, лише у вказаних чотирьох країнах у повітря було викинуто приблизно 15,4 мільйона тонн еквівалента CO₂, а до 2030 року цей показник може зрости до 17,9 мільйона тонн.

Перевантаження транспортної мережі виникає тоді, коли інтенсивність дорожнього руху наближається до пропускної спроможності магістралей або

навіть перевищує її. Слід враховувати, що інтенсивність руху істотно залежить від сезону, дня тижня та часу доби. Крім того, пропускна здатність, яку часто вважають сталою величиною, може змінюватися через погодні умови, ремонтні роботи, дорожньо-транспортні пригоди чи інші непередбачені події. Загалом затори виникають із двох основних причин - передбачуваних та непередбачуваних. На рисунку 1.2 наведено статистику різновидів причин утворення заторів у США.

У Києві, Львові, Одесі та Харкові затори є не лише щоденною проблемою, але й серйозним чинником економічних втрат. За оцінками експертів транспортної галузі, в українській столиці водій у середньому щороку втрачає понад 120 годин у заторах, що співставно з двома робочими тижнями. Це не лише додаткові витрати на паливе, яке подорожчало через військові та економічні обставини, але й значний удар по сімейному бюджету. Окрім цього, масові затори сприяють зростанню рівня забруднення повітря у великих містах України, що особливо відчутно в умовах відсутності достатньої кількості електротранспорту та інтелектуальних транспортних систем.

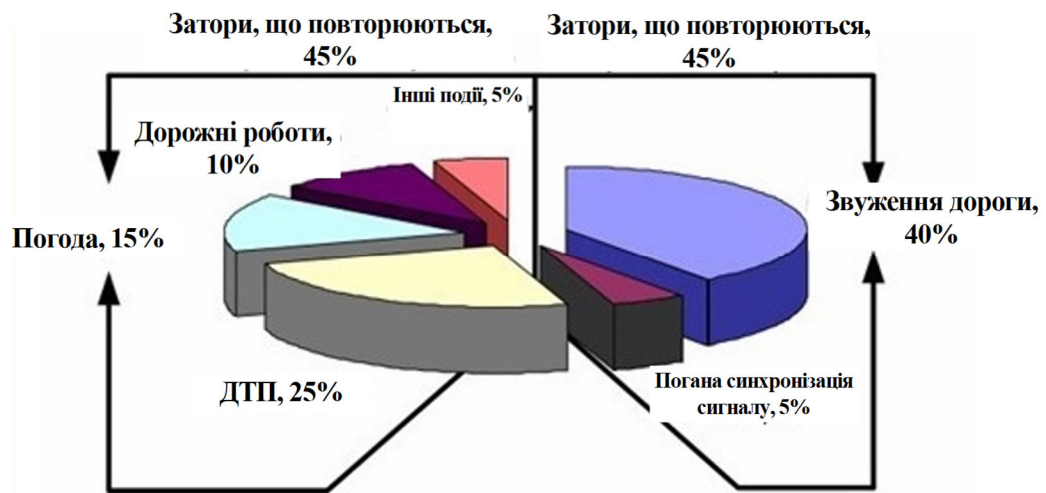


Рисунок 1.2 – Основні причини заторів у США (дані 2016 р.) та аналогія з українськими містами

У США разові затори через непередбачувані обставини становлять 55% від усіх випадків, у тому числі дорожньо-транспортні пригоди - 25%, несприятливі погодні умови - 15%, ремонтні роботи та робочі зони - 10%, а спеціальні заходи

- 5%. Періодичні затори, що виникають через передбачувані фактори, складають 45%, серед них звуження проїзної частини - 40% і неправильна синхронізація світлофорів - 5%. Визначення конкретних причин виникнення заторів дозволяє точніше розробити заходи для їх усунення та підвищення ефективності дорожньої мережі.

Щоденні затори зумовлені як передбачуваними факторами – піковим трафіком, вузькими вулицями та несприятливою синхронізацією світлофорів, так і непередбачуваними - ДТП, ремонтними роботами, раптовими сильними дощами, снігопадами чи масовими заходами.

За оцінками Київської міської державної адміністрації, середній водій у столиці щороку втрачає близько 120 годин у заторах. При середньому споживанні пального автомобілем 8 літрів на 100 км і середньому пробігу у заторах близько 3 тис. км на рік, додаткові витрати пального становлять приблизно 9 600 грн на водія. Що стосується втрати часу, то при середній погодинній заробітній платі 70 грн/год (еквівалент середньої зарплати у Києві 2025 року), втрата продуктивності через затори становить близько 8 400 грн на рік на одного водія. У сумі прямі економічні втрати через затори на одного автомобіліста в Києві сягають близько 18 000 грн на рік.

Ще один важливий аспект - екологія. За підрахунками експертів, щороку лише у Києві автотранспорт під час стоянки в заторах викидає близько 25 тис. тонн CO₂, що негативно впливає на якість повітря та здоров'я населення. Львів і Одеса також відчувають суттєве забруднення повітря через постійні затори, особливо у сезон опалювальних періодів, коли спалювання палива на холостому ходу поєднується з викидами котелень.

Рішенням цих проблем в Україні може стати впровадження інтелектуальних транспортних систем (ІТС), які включають адаптивне регулювання світлофорів, датчики інтенсивності руху, моніторинг аварійних ділянок та системи попередження водіїв про затори в режимі реального часу. За міжнародними дослідженнями, впровадження ІТС дозволяє скоротити час перебування в заторах на 15–25% та знизити витрати пального і шкідливі викиди

на 10–20%. Для українських міст це означає економію мільярдів гривень на рік та підвищення загальної ефективності транспортної системи.

Висновок. Проблема заторів у містах України є не менш актуальною, ніж у провідних країнах світу. Впровадження передових технологій управління дорожнім рухом здатне значно зменшити економічні та екологічні втрати, підвищити безпеку та комфорт для водіїв і пасажирів, а також підтримати соціально-економічний розвиток міст.

1.2 Аналіз міжнародного досвіду вирішення проблем організації дорожнього руху при виникненні ДТП у міській транспортній мережі

Ключовим аспектом для запобігання утворенню заторів або зменшення їх наслідків у міських дорожніх мережах при ДТП є своєчасне визначення потенційних альтернативних маршрутів серед численних існуючих доріг для перенаправлення потоків транспорту з проблемного відрізка дороги.

Поки ДТП не ліквідовано, усі учасники транспортної системи - місто, перевізники, приватні автомобілі - рухаються не оптимальними маршрутами. Якщо ж у цей момент вони отримують актуальну інформацію про стан доріг, то можуть обрати інший шлях до виникнення затору, тобто змінити маршрут частини транспортного потоку.

Наразі у світі застосовуються дві основні форми визначення маршруту руху: використання навігаційних додатків для особистого користування або використання засобів інтелектуальної транспортної системи (ІТС), які охоплюють всю транспортну мережу міста. Навігатор може обирати маршрут для конкретного автомобіля, враховуючи місцезнаходження інших учасників руху, але зазвичай дає однакові команди для великої кількості машин. У такому випадку важливо визначити логічний розподіл всіх автомобілів у транспортному потоці в цілому, що і є однією з ключових функцій систем ІТС при управлінні дорожнім рухом із моменту виявлення ДТП.

Багато країн світу активно впроваджують ІТС для організації дорожнього руху, особливо у міських умовах. Однак ефективність таких систем залежить від особливостей транспортної інфраструктури, потенціалу фінансування науково-технічних рішень, рівня цифровізації та підходів до адміністративного управління у кожній країні.

Серед прикладів успішного використання ІТС у світі можна навести Сінгапур і Токіо, де системи відстежують реальний рух усіх транспортних засобів і автоматично коригують маршрути, світлофори та інші елементи дорожньої інфраструктури для мінімізації заторів. Для українських міст такий досвід є цінним орієнтиром, особливо в умовах обмежених ресурсів і необхідності поєднання сучасних технологій із традиційною міською інфраструктурою.

1.2.1 Аналіз досвіду впровадження системи ІТС у В'єтнамі

З 2013 року Департамент транспорту міста Хошимін співпрацює з компанією FPT Technology Solution Co., Ltd. (FPT High Technology Solutions – FTS) та транспортним каналом VOV (Голос В'єтнаму) для пілотного впровадження процесу збору та відображення інформації про дорожній рух на електронних інформаційних табло міста. Проте, навіть після встановлення та функціонування ряду електронних дорожніх інформаційних систем, ситуація із заторами у міській транспортній мережі Хошиміна значно не покращилася - затримки на дорогах залишаються високими.

На основі досвіду впровадження підсистем ІТС у В'єтнамі були виявлені кілька проблем, які сповільнюють розвиток системи: низька ефективність роботи центру управління дорожнім рухом через обмежену інформативність існуючих підсистем; використання інформаційних табло (ДІТ) лише для надання водіям інформації про стан доріг, тоді як через відсутність даних про транспортні потоки система не здатна організовувати рух у реальному часі. У результаті надана водіям інформація неефективна для регулювання транспортного потоку.

У Хошиміні створено досить розвинену інфраструктуру інтелектуальної транспортної системи: встановлено 68 електронних табло дорожньої інформації на основних перехрестях, інтегровані світлофори та камери спостереження за дорожнім рухом. На важливих перехрестях встановлені датчики для обліку транспортного потоку, а також створені центри управління дорожнім рухом та електронні бази даних про транспортні потоки.

Однак наразі головним обмеженням, яке перешкоджає ефективній роботі ІТС, є відсутність синхронного зв'язку між компонентами системи. Це пов'язано з відсутністю алгоритму для визначення оптимальних маршрутів руху транспортних засобів та відповідних циклів світлофорів. Через це система ІТС не може ефективно координувати рух, особливо під час виникнення ДТП на транспортній мережі.

1.2.2 Найбільш прогресивна інтелектуальна транспортна система: Сінгапурський досвід

Однією з найефективніших і технологічно просунутих інтелектуальних транспортних систем у світі вважається система управління дорожнім рухом у Сінгапурі (Singapore Intelligent Transport System, SITS). Сінгапур уже понад два десятиліття активно впроваджує комплексні ІТС-рішення, інтегруючи їх із цифровими технологіями, інфраструктурою та адміністративним управлінням.

Основні характеристики системи SITS:

Динамічне керування дорожнім рухом: використання адаптивних світлофорів, датчиків трафіку та камер відеоспостереження для автоматичного регулювання потоків транспорту в режимі реального часу.

Система електронного збору плати за користування дорогами (ERP): автоматична оплата за проїзд у залежності від часу доби та рівня завантаженості, що стимулює водіїв обирати менш завантажені маршрути.

Централізований контроль: єдиний центр управління дорожнім рухом отримує дані з усіх сенсорів і камер, дозволяючи швидко реагувати на ДТП, дорожні роботи та зміни трафіку.

Інтеграція з громадським транспортом та навігаційними системами: реальні дані про рух громадського транспорту передаються водіям і пасажирам через мобільні додатки, електронні табло та радіоінформацію.

Прогнозування та аналіз потоків: система аналізує історичні та поточні дані про трафік для прогнозування заторів і планування оптимальних маршрутів.

Переваги системи SITS:

Зменшення заторів: адаптивне регулювання світлофорів і плата за користування дорогами суттєво скорочують пік навантаження на магістралі.

Економія часу та пального: водії витрачають менше часу у заторах, що знижує витрати пального та рівень викидів CO₂.

Підвищення безпеки на дорогах: система швидко реагує на ДТП та аварійні ситуації, перенаправляючи потоки і інформуючи водіїв.

Планування інфраструктури: дані ІТС допомагають місту прогнозувати потреби в розширенні доріг, будівництві об'їзних шляхів та розвитку громадського транспорту.

Інформаційна підтримка для водіїв: на електронних табло, у додатках та на радіо відображається актуальна інформація про дорожні умови.

Недоліки та обмеження системи:

Висока вартість впровадження: будівництво та інтеграція системи потребують значних інвестицій у сенсори, камери, сервери та програмне забезпечення.

Залежність від технологій та електроніки: відмови датчиків або програмного забезпечення можуть призвести до тимчасових проблем у регулюванні руху.

Необхідність висококваліфікованого персоналу: обслуговування та управління системою потребує інженерів і аналітиків з досвідом роботи з ІТС.

Обмежена застосовність у країнах з менш розвинутою інфраструктурою: у містах з вузькими дорогами, великим кількістю аварій та нестабільним інтернет-зв'язком ефективність системи може знижуватися.

1.2.3 Інтелектуальні транспортні системи України

Досвід Сінгапуру є особливо корисним для великих українських міст - Києва, Львова, Одеси та Харкова. Впровадження адаптивних світлофорів, централізованого контролю та інтеграції ІТС з навігаційними додатками могло б значно скоротити час перебування автомобілів у заторах, підвищити безпеку на дорогах та знизити екологічне навантаження. При цьому українські міста могли б поступово інтегрувати ІТС, починаючи з центральних магістралей та важливих перехресть, що дозволить оптимально розподілити ресурси та підготувати персонал до роботи з передовими технологіями.

Затори, що виникають через ДТП, щороку спричиняють втрату сотень тисяч годин робочого часу та додаткові витрати пального. Часто водії отримують інформацію про ДТП лише із соціальних мереж або навігаційних додатків, що не завжди дозволяє оперативно змінити маршрут. Впровадження централізованої ІТС у містах України дозволило б не лише автоматично перенаправляти потоки транспорту, але й інтегрувати роботу громадського транспорту, служб швидкого реагування та дорожніх служб, зменшуючи час заторів і підвищуючи безпеку на дорогах.

Встановлені електронні табло та камери спостереження часто не інтегровані в єдину систему управління рухом, через що центри контролю не можуть швидко перенаправляти транспортні потоки під час ДТП або ремонтних робіт. Як наслідок, затори залишаються тривалими, а водії змушені шукати об'їзди самостійно. Досвід Хошиміна демонструє важливість не лише наявності обладнання, але й правильного програмного забезпечення та алгоритмів для оперативного управління транспортною мережею. В Україні інтеграція ІТС з мобільними навігаційними додатками та системами громадського транспорту

могла б значно зменшити час перебування у заторах, підвищити ефективність міської логістики та знизити негативний екологічний вплив від роботи автомобільного транспорту.

1.3 Світовий досвід прогресивних інтелектуальних транспортних систем

Одними з найбільш поширених підходів до оптимізації транспортних потоків є введення обмежень на рух (наприклад, виділені смуги для громадського транспорту та платні парковки), будівництво нових доріг і транспортних розв'язок із застосуванням інтелектуальних транспортних систем (ІТС). Однак розширення дорожньої мережі не завжди встигає за зростанням кількості автомобілів, що призводить до збільшення заторів і викликає незадоволення не лише серед водіїв, але й серед населення в цілому. Тому надзвичайно важливим стає питання організації ефективного руху транспорту за допомогою моделювання потоків, управління в реальному часі та використання передових інформаційних, комунікаційних і обчислювальних технологій, що забезпечується ІТС при мінімальних витратах.

Сінгапур успішно керує складною системою дорожнього руху, незважаючи на стрімке зростання економіки, населення та мобільності. Через обмежений фізичний простір країна змушена особливо уважно ставитися до управління транспортним попитом. Сінгапур став першою країною у світі, яка ефективно впровадила спеціальні схеми управління транспортними заторами.

Основними чинниками успіху системи є інтегроване транспортне планування, управління попитом на поїздки та розвиток громадського транспорту. Одним із ключових елементів ефективності є використання ІТС як передової складової всієї транспортної інфраструктури. Головна мета управління перевантаженнями - покращити пропускну здатність доріг і забезпечити плавність транспортного потоку. ІТС Сінгапуру надає водіям актуальну інформацію про рух у місті, а також регулює роботу світлофорів для оптимізації потоків автомобілів.

Для підвищення пропускної здатності дорожньої мережі, особливо у випадках заторів, застосовуються системи повної сигналізації та координації на основних магістралях. Система Green Link Determining (GLIDE) координує світлофори у «зелених хвилях», щоб збільшити пропускну здатність перехресть і згладити рух. Для моніторингу критичних перехресть використовуються системи Junction Eye traffic monitoring, а Центр управління наземним транспортом Сінгапуру (Land Transport Authority – LTA) впровадив комплексну ІТС для максимального підвищення ефективності дорожньої мережі, покращення умов пересування та контролю транспортних потоків.

Широко застосовуються передові методи, зокрема Automatic Terminal Information Service (ATIS) та адаптивні системи управління дорожнім рухом (Adaptive Traffic Management Systems – ATMS). Важливою функцією є управління транспортними інцидентами, що дозволяє оперативно реагувати на разові перевантаження. Підписані користувачі отримують інформацію про дорожню ситуацію в реальному часі через зв'язок із інформаційними центрами. Через інтернет доступна інформація про стан доріг, прогнозований час у дорозі та динамічні маршрути для допомоги водіям у виборі оптимального маршруту, часу відправлення та способу пересування. Також транслюються відеопотоки з автомагістралей, щоб відобразити дорожню ситуацію та допомогти водіям приймати рішення.

В Україні досвід Сінгапуру можна застосувати, адаптуючи його до наявної інфраструктури великих міст - Києва, Львова, Одеси та Харкова. Впровадження адаптивних світлофорів, централізованого контролю та інтеграції ІТС із навігаційними додатками та громадським транспортом дозволило б зменшити затори, скоротити витрати часу та пального, а також підвищити безпеку на дорогах.

Досвід впровадження ІТС у світі показує різні підходи до організації дорожнього руху. Наприклад, системи Мюнхена, Лас-Вегаса, Сіднея та Сінгапуру мають свої переваги та обмеження, які можна узагальнити для аналізу

ефективності ІТС і потенційного впровадження подібних рішень в українських умовах.

Таблиця 1.1 – Порівняння інтелектуальних транспортних систем (ІТС) у світі та можливих українських аналогів з перевагами, недоліками та потенційним ефектом для українських міст:

Місто / Система	Основні характеристики	Переваги	Недоліки	Потенційний ефект для України
Сінгапур (GLIDE, ATIS, ATMS)	Адаптивне управління світлофорами, «зелені хвилі», централізований контроль, інтеграція з громадським транспортом та навігаційними додатками	Зменшення заторів, економія часу та пального, зниження викидів CO ₂ , підвищення безпеки	Висока вартість впровадження, потреба у висококваліфікованому персоналі, залежність від технічної інфраструктури	Скорочення часу в заторах на 20–30%, зниження витрат пального та викидів, підвищення безпеки на магістралях Києва та Львова
Мюнхен (Adaptive Traffic Control System, ATCS)	Адаптивні світлофори, інтеграція з даними про транспортні потоки, автоматичне регулювання	Плавний рух на перехрестях, зниження заторів у центрі	Висока вартість модернізації та інтеграції з існуючою інфраструктурою	Плавний рух у центральних частинах Львова та Одеси, скорочення заторів у годину пік
Лас-Вегас (Intelligent Transportation Management Center)	Централізоване управління світлофорами, відеоспостереження, моніторинг громадського транспорту	Контроль аварій, прогнозування заторів	Велика територія ускладнює централізацію, високі інвестиції	Оптимізація руху на великих магістралях Києва, інтеграція з транспортними маршрутами
Сідней (Coordinated Adaptive Traffic System, SCATS)	Адаптивне управління світлофорами з урахуванням потоків, інтеграція з громадським транспортом	Зменшення часу простою на перехрестях, плавність руху	Складність інтеграції з старими дорогами та інфраструктурою	Можливе впровадження в центральних районах українських міст, покращення руху громадського транспорту

Одними з найпоширеніших підходів до оптимізації транспортних потоків є впровадження обмежень на рух (наприклад, виділення смуг для громадського

транспорту та запровадження платних парковок), будівництво нових доріг і розв'язок із використанням інтелектуальних транспортних систем (ІТС). Проте розширення дорожньої мережі не завжди встигає відповідати швидкому зростанню кількості автомобілів, що призводить до збільшення транспортних заторів і викликає невдоволення не лише серед водіїв, а й у населення загалом. Саме тому ключовим завданням стає організація ефективного руху транспорту по дорожній мережі за допомогою моделювання, управління в реальному часі та використання передових технологій зв'язку і обчислень. Це забезпечується сучасними інформаційно-технологічними системами (ІТС), які дозволяють мінімізувати витрати та підвищити ефективність міської мобільності [45].

Прикладом успішної реалізації таких підходів є Сінгапур, який зумів ефективно керувати складною системою дорожнього руху, незважаючи на швидке зростання економіки, чисельності населення та рівня моторизації. Через обмеженість території країна приділяє особливу увагу регулюванню транспортного попиту. Саме Сінгапур став першою країною у світі, яка успішно впровадила спеціальні схеми управління транспортними заторами, включно з системою електронного збору плати за в'їзд у перевантажені райони міста (Electronic Road Pricing – ERP), що дозволило значно знизити рівень перевантаженості вуличної мережі [5].

Проблема транспортних заторів є також особливо гострою для великих міст, таких як Київ, Львів, Харків чи Дніпро. Зростання кількості приватних автомобілів у поєднанні з недостатнім розвитком громадського транспорту та відсутністю системного впровадження ІТС створюють суттєві труднощі для організації руху. Проте останніми роками в Україні почали впроваджуватися окремі елементи інтелектуальних транспортних систем: адаптивне керування світлофорами, онлайн-сервіси для моніторингу дорожньої ситуації, мобільні додатки для планування маршрутів громадським транспортом, а також експериментальні проєкти зі створення «розумних доріг». У перспективі використання ІТС може стати основою для побудови сучасної та сталої

транспортної політики, що дозволить зменшити затори, скоротити викиди шкідливих речовин та підвищити комфорт для громадян.

Є основні чинники, що сприяють успіху управління заторами в Сінгапурі, серед яких інтегроване транспортне планування, управління попитом на поїздки та вдосконалення громадського транспорту [11].

Одним із ключових складників успіху Сінгапуру в управлінні та вирішенні проблем транспортної взаємодії є використання інтелектуальних транспортних систем (ІТС) як просунутої частини всього проєкту організації транспорту. Важливою метою управління перевантаженнями є вдосконалення системи регулювання руху з метою підвищення пропускної здатності та згладжування транспортного потоку.

ІТС Сінгапуру також орієнтована на надання водіям інформації про міський рух і використання функцій світлофорів для регулювання потоку транспортних засобів з метою підвищення ефективності роботи дорожньої мережі, особливо у випадках утворення заторів. Дорожня мережа на острові повністю обладнана світлофорними об'єктами та системно скоординована на основних вулицях, щоб мінімізувати затримки. Інтелектуальна система управління рухом Green Link Determining (GLIDE) координує роботу світлофорів у форматі «зелених хвиль», що дозволяє збільшити пропускну здатність перехресть і зробити рух більш плавним.

Додатково функціонують системи «Junction Eye traffic monitoring» для спостереження та контролю за транспортним рухом на критично важливих перехрестях. Центр управління наземним транспортом Сінгапуру (Land Transport Authority – LTA) розгорнув комплексну інтелектуальну транспортну систему (ITS) з метою максимального підвищення ефективності роботи дорожньої мережі, покращення умов пересування та контролю за транспортними потоками в країні.

Широко застосовуються різні передові рішення, серед яких удосконалена Автоматична термінальна інформаційна система (ATIS – Automatic Terminal Information Service) та адаптивна система управління дорожнім рухом (ATMS –

Adaptive Traffic Management Systems). Важливим застосуванням цих систем є управління транспортними інцидентами для боротьби з тимчасовими перевантаженнями [5].

Водії, які підписані на відповідні сервіси, мають доступ до інформації про дорожній рух у режимі реального часу через з'єднання з інформаційними центрами. Також через Інтернет доступна інформація про дорожню ситуацію, розрахунковий час у дорозі та рекомендації системи динамічного управління маршрутами, які допомагають водіям обрати оптимальний маршрут, час виїзду та спосіб пересування. Крім того, транслуються потокові відеозображення з вибраних ділянок автомагістралей, щоб показати актуальну дорожню обстановку та допомогти водіям у прийнятті рішень.

Розглянемо досвід упровадження ІТС у світі. Опис систем Мюнхена, Лас-Вегаса, Сіднея та Сінгапуру, а також переваги й недоліки використання цих систем наведено нижче в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 Опис інтелектуальних транспортних систем Мюнхена, Лас-Вегаса, Сіднея та Сінгапуру

Назва системи (місто, країна впровадження)	Коротка характеристика	Переваги	Недоліки
COMFORT (Мюнхен, Німеччина)	Оцінка кількості транспортних засобів на дорогах, оптимізація роботи світлофорів, прогноз розвитку транспортного навантаження, активізація інформаційної та навігаційної систем	– багатофункціональність системи; – великий обсяг вихідних даних; – численні системи контролю дорожнього руху	– контроль роботи служб здійснює не диспетчерська, а поліція; – координація роботи транспорту тільки в центрі міста; – відсутність онлайн-інтерфейсу
FAST (Лас-Вегас, США)	Запис і надання інформації за численними параметрами дорожнього руху; доступ до інформації в режимі реального часу за допомогою інтерактивної	– великий обсяг вихідних даних про ДТП; – багатофункціональність системи; – онлайн-інтерфейс, що надає дані про дорожню ситуацію	– морально застарілий інтерфейс системи; – відсутня диспетчеризація транспорту; – координація роботи транспорту тільки на швидкісних дорогах

Назва системи (місто, країна впровадження)	Коротка характеристика	Переваги	Недоліки
	інформаційної панелі та веб-камер		
SCATS (Сідней, Австралія)	Оцінка кількості транспортних засобів на дорогах, оптимізація роботи світлофорів, прогноз розвитку транспортного навантаження, активізація інформаційної та навігаційної систем	– великий обсяг вихідних даних; – численні системи контролю руху; – моделювання дорожньої ситуації	– відсутня диспетчеризація транспорту; – відсутність онлайн- інтерфейсу
VICS (Токіо, Японія)	Передача інформації про дорожні затори та несприятливі дорожні умови. Багато джерел отримання даних	– багатофункціональність системи; – великий обсяг вихідних даних	– відсутня диспетчеризація транспорту; – відсутність онлайн- інтерфейсу

Порівняльний аналіз систем ІТС різних країн

1. COMFORT (Мюнхен, Німеччина)

Сильні сторони: широкий функціонал системи, точний прогноз транспортного навантаження, багатство вихідних даних, ефективність у центрі міста.

Слабкі сторони: контроль здійснює поліція, а не диспетчерська служба, що знижує оперативність; обмежена територія дії (центр міста); відсутність онлайн-інтерфейсу для зручності користувачів.

2. FAST (Лас-Вегас, США)

Сильні сторони: великий обсяг вихідних даних, включно з інформацією про ДТП; можливість доступу до даних у реальному часі через онлайн-панелі; багатофункціональність системи.

Слабкі сторони: інтерфейс системи застарів морально; немає централізованої диспетчеризації транспорту; управління рухом обмежене здебільшого швидкісними дорогами.

3. SCATS (Сідней, Австралія)

Сильні сторони: багатофункціональність, значний обсяг вихідних даних, можливість моделювання дорожньої ситуації, що робить систему адаптивною до змін у транспортному потоці.

Слабкі сторони: відсутність диспетчеризації транспорту, відсутність онлайн-інтерфейсу, що обмежує інтерактивність для користувачів.

4. VICS (Токіо, Японія)

Сильні сторони: багатофункціональність, численні джерела збору даних, значний обсяг інформації про затори та дорожні умови, що дозволяє комплексно оцінювати ситуацію.

Слабкі сторони: відсутність диспетчеризації транспорту, немає онлайн-інтерфейсу, через що система менш зручна для звичайних користувачів.

Загальні висновки:

Найбільш технологічно розвинені системи – у Токіо, адже вони мають сучасні центри збору даних і широкий функціонал.

Найбільш адаптивна система – SCATS у Сіднеї, яка активно застосовує моделювання дорожніх ситуацій.

Система з найширшими можливостями доступу до даних користувачами – FAST у Лас-Вегасі, оскільки вона надає інформацію онлайн у реальному часі.

Головним слабким місцем усіх систем є відсутність або недостатній розвиток онлайн-інтерфейсів і централізованої диспетчеризації транспорту, що знижує зручність для користувачів та ефективність управління рухом.

1.4 Огляд нормативних документів та наукових джерел із завдань підвищення якості організації дорожнього руху при ДТП

Інтелектуальні транспортні системи (ІТС) більше не є окремою концепцією, яка розробляється кожною країною відповідно до власних стандартів. ІТС отримала міжнародний розвиток завдяки роботі Міжнародного технічного комітету ISO з інтелектуальних транспортних систем (ISO/TC 204).

Зокрема, робоча група 9 ISO (WG 9) займається стандартизацією інформації та контролю дорожнього руху.

У своїй діяльності WG 9 зосереджується на систематизації даних і стандартизації систем зв'язку між центрами управління дорожнім рухом, між центрами та придорожніми модулями, а також між самими придорожніми модулями. Це дозволяє забезпечити ефективний обмін інформацією, її уніфікацію та можливість передачі даних стороннім організаціям.

Обсяг стандартизації (від центру до центру, від центру до обочини дороги), над яким працює WG 9, відображено на рисунку (рис. 1.3). Під «центрами» розуміють центри управління транспортом, а «придорожні модулі» включають пристрої управління світлофорами, інформаційні табло, дорожні датчики та інші технічні засоби, встановлені вздовж доріг. Забезпечення стабільної взаємодії між цими елементами є важливою перевагою процесу стандартизації інформації та комунікацій [6].

На міжнародному рівні стандартизація ІТС дозволяє уніфікувати технологічні рішення та забезпечити їхню сумісність у різних країнах. Це особливо важливо у випадках міжнародних транспортних коридорів, транзитних перевезень і координації руху між прикордонними пунктами.

Варто зазначити, що крім ISO, над питанням інтеграції та регламентації ІТС активно працює Європейський комітет зі стандартизації (CEN), який у співпраці з ISO розробляє технічні стандарти для країн ЄС. У США важливу роль у цьому процесі відіграє Національна адміністрація безпеки дорожнього руху (NHTSA), яка регламентує використання ІТС для запобігання ДТП і мінімізації їхніх наслідків.

У практиці багатьох країн впроваджуються спеціалізовані нормативи щодо:

- інтеграції інформаційних табло для попередження про ДТП та затори;
- використання автоматизованих систем виявлення аварійних ситуацій і блокування небезпечних ділянок дороги;

створення єдиних баз даних для швидкої передачі інформації між поліцією, службами швидкої допомоги та центрами управління рухом.

Інтеграція до міжнародних стандартів у сфері ІТС має стратегічне значення. Це особливо актуально в умовах воєнного часу та відновлення інфраструктури, коли швидкий обмін інформацією про дорожні аварії, небезпеки та зміни руху може рятувати життя та зменшувати транспортні втрати. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України вже вивчає можливість адаптації європейських і міжнародних норм ISO/TC 204 до національних стандартів, що дозволить інтегрувати українські дороги до єдиної європейської транспортної системи.

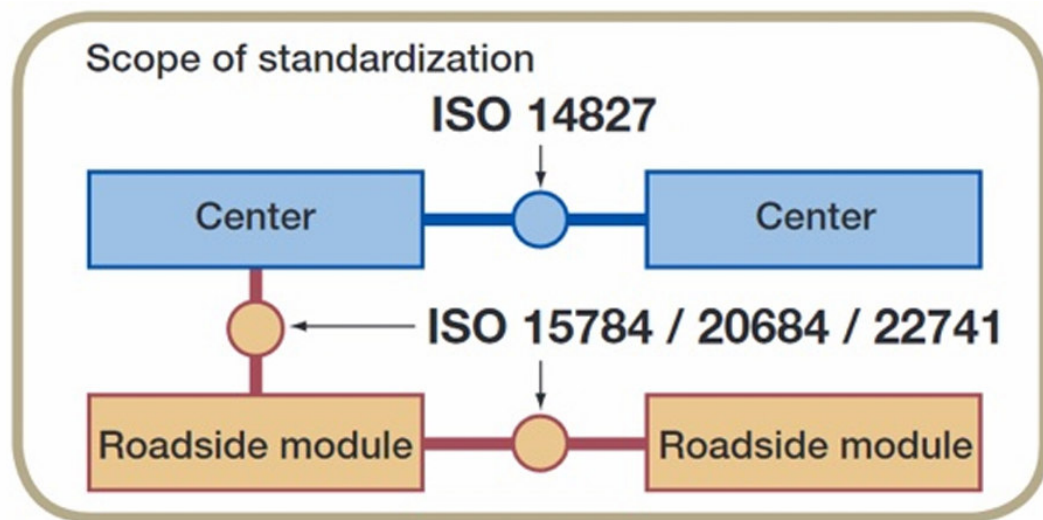


Рисунок 1.3 – Модулі стандартизації ISO 14827

Інтелектуальні транспортні системи (ІТС) можуть зробити суттєвий внесок у створення більш чистої, безпечної та ефективної транспортної системи. Саме тому ІТС стали центром низки політичних та законодавчих ініціатив у Європі. У цій сфері активно беруть участь стандартизаційні організації CEN, CENELEC та ETSI.

Технічний комітет CEN/TC 278 «Інтелектуальні транспортні системи» займається розробкою стандартів у сфері телематики, яка використовується в дорожньому русі та транспорті. Ці стандарти охоплюють елементи, що потребують технічної гармонізації для інтермодальних перевезень різними видами транспорту.

До компетенції комітету належать питання забезпечення:

- ідентифікації транспортних засобів, змінних кузовів та вантажних вагонів;
- зв'язку між транспортними засобами;
- взаємодії автотранспорту з дорожньою інфраструктурою;
- телематичного обміну даними між автомобілями та машинами;
- управління рухом і паркуванням;
- систем збору плати за проїзд;
- організації та управління громадським транспортом;
- надання інформації користувачам.

Окремо варто відзначити, що робоча група CEN/TC 278 WG17 «Міські ІТС» була створена спеціально для задоволення вимог стандартизації у сфері міських інтелектуальних транспортних систем.

Основними завданнями ІТС на автомобільних дорогах є: постійний автоматизований збір даних про транспортно-експлуатаційний стан дорожнього полотна; автоматизація обробки й зберігання інформації про стан доріг та дорожню обстановку; оперативне інформування водіїв про актуальний стан руху на автошляхах; автоматизація контролю й управління дорожнім рухом; оптимізація транспортних потоків для забезпечення максимальної пропускної здатності та запобігання зіткненням транспортних засобів під час виникнення заторів; своєчасне автоматизоване розпізнавання заторів та застосування заходів для їх ліквідації за допомогою динамічних інформаційних табло (ДІТ), керованих дорожніх знаків (КДЗ) і знаків змінної інформації (ЗЗІ); швидке отримання даних про місця ДТП, своєчасне інформування водіїв про аварії на маршруті та використання автоматизованих алгоритмів управління ДІТ, КДЗ і ЗЗІ для оптимізації транспортних потоків у районах аварій; оперативна передача інформації екстреним службам про ДТП і НС для мінімізації часу надання медичної та технічної допомоги учасникам дорожнього руху.

У сучасних умовах, особливо для України, актуальність розвитку ІТС набуває особливого значення. В умовах інтенсивного зростання автомобілізації

та навантаження на дорожню інфраструктуру, впровадження ІТС дозволить значно знизити кількість ДТП, підвищити ефективність перевезень і скоротити затримки транспорту в міських агломераціях. Зокрема, перспективним напрямом є застосування інтелектуальних систем моніторингу руху на міжнародних транспортних коридорах (наприклад, Гданськ–Одеса, Львів–Київ–Харків), інтеграція дорожніх сенсорів і відеоспостереження в єдині центри управління рухом. Окрему увагу слід приділити цифровізації дорожньої інфраструктури в межах відновлення країни. Використання датчиків IoT, систем GPS/GIS та хмарних технологій дозволяє створити єдину національну платформу моніторингу руху транспорту. Це не лише підвищить безпеку та ефективність перевезень, а й сприятиме розвитку «розумних» міст в Україні, де транспортна система працюватиме у взаємодії з іншими інфраструктурними елементами – енергетикою, екологічним моніторингом та міським управлінням.

Таблиця 1.3 – Цілі та завдання інтелектуальних транспортних систем (ІТС) на автомобільних дорогах

Цілі ІТС	Завдання ІТС
Оптимізація транспортних потоків і забезпечення максимальної пропускної здатності доріг	Постійний автоматизований збір даних про транспортно-експлуатаційний стан доріг
Зниження кількості ДТП та надзвичайних ситуацій	Автоматизація обробки й зберігання даних про стан доріг та дорожню обстановку
Підвищення рівня безпеки дорожнього руху	Надання водіям достовірної інформації про дорожню ситуацію в реальному часі
Ефективне управління дорожнім рухом	Автоматизований контроль і регулювання руху на автошляхах
Підвищення ефективності реагування на ДТП і НС	Своєчасне розпізнавання та ліквідація заторів за допомогою ДІТ, КДЗ і ЗЗІ
Удосконалення системи інформування водіїв та служб	Оперативне інформування про ДТП, аварії та НС на маршрутах
Підтримка ефективної роботи дорожнього господарства	Передача інформації до екстрених служб для скорочення часу надання допомоги

1.5 Висновки до розділу та постановка задач на кваліфікаційну роботу магістра

На основі проведеного аналізу у межах першого розділу можна сформулювати такі висновки:

Затримки транспортних засобів на дорогах у великих містах світу мають стійку тенденцію до зростання з року в рік. Це призводить до зниження ефективності транспортних систем і зумовлює зростання соціально-економічних витрат у найближчій перспективі.

Досвід розвинених країн свідчить, що підвищення ефективності організації дорожнього руху можливе лише завдяки впровадженню інтелектуальних транспортних систем (ІТС).

Подальші дослідження доцільно зосередити на питаннях визначення та практичної реалізації методів оптимального вибору маршрутів транспортних засобів, а також на прогнозуванні параметрів транспортного потоку (рівня насиченості дорожньої мережі) у разі виникнення перешкод руху.

Існуючі наукові розробки у сфері контролю та управління транспортними потоками (КУТП) є недостатніми, що підкреслює актуальність проведення додаткових досліджень у цьому напрямі.

Для подолання проблеми заторів на дорогах слід зосередитись на підвищенні ефективності використання вже наявних компонентів транспортної інфраструктури, зокрема динамічних інформаційних табло та адаптивних світлофорних систем, інтегруючи підсистеми КУТП та автоматизованого управління дорожнім рухом (АСУДР).

Отримані результати аналізу дозволили виокремити ключові наукові завдання, що стануть предметом розгляду у подальших розділах дослідження.

2. АНАЛІТИКО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Опис концепції роботи ремаршрутизації транспортного потоку та обґрунтування структури теоретичного дослідження

Закриття однієї або кількох смуг руху призводить до зниження пропускної здатності дорожньої інфраструктури, що, у свою чергу, може викликати утворення заторів на вулично-дорожній мережі. Це дослідження ґрунтується на системі пошуку рішень для подібних ситуацій із використанням сучасних цифрових інтелектуальних технологій (ДІТ) та адаптивних світлофорних систем.

Зазначена система спрямована на надання інформації учасникам дорожнього руху щодо можливих маршрутів об'їзду та забезпечення ефективної координації роботи світлофорів. Це дозволяє здійснювати динамічне перерозподілення транспортних потоків як на перехрестях, так і на суміжних ділянках, знижуючи навантаження на окремі вулиці та підвищуючи ефективність організації дорожнього руху загалом.

Основним завданням даного дослідження є формалізація процесу в математичному вираженні, визначення оптимальних рішень і розробка цільових показників ефективності.

Метою цієї роботи є створення методики, орієнтованої на підвищення ефективності функціонування інтелектуальних транспортних систем (ІТС) за умови мінімізації витрат часу та ресурсів на переміщення пасажирів і вантажів. Одним із ключових завдань є виведення цільової функції оптимізації роботи ІТС.

При формуванні цільової функції необхідно вирішити такі завдання:

- зниження часу поїздки та затримок при русі в межах вулично-дорожньої системи (ВДМ) за рахунок підвищення ефективності директивного управління транспортними потоками;
- підвищення пропускної спроможності ВДМ у цілому шляхом вдосконалення механізмів непрямого (адаптивного) управління транспортними потоками;

– зростання загальної ефективності ІТС завдяки задоволенню очікувань користувачів ВДМ – водіїв і пасажирів.

Таким чином, головною метою побудови цільової функції є пошук оптимального рішення для управління транспортними потоками з урахуванням мінімальних витрат на пересування учасників дорожнього руху. Структурна схема проведеного дослідження наведена на рис. 2.1.

В умовах України проблема ремаршрутизації транспортних потоків особливо актуальна для великих міст, таких як Київ, Харків, Львів та Дніпро, де щодня спостерігається перевантаження дорожньої мережі в години пік. Важливим завданням для міських органів управління є впровадження інтегрованих інтелектуальних транспортних систем, які поєднують сучасні інформаційні технології, датчики дорожнього руху, GPS-навігацію та мобільні додатки для водіїв.

Прикладом може слугувати адаптивне регулювання світлофорних об'єктів, яке вже частково запроваджується у Києві та Львові. Використання таких систем дає змогу автоматично змінювати тривалість світлофорних фаз залежно від інтенсивності руху в реальному часі. Це дозволяє суттєво знизити рівень заторів і підвищити безпеку дорожнього руху.

Перспективним напрямом є інтеграція ІТС з навігаційними системами Google Maps, Waze чи «Київ Цифровий», що забезпечить водіям актуальну інформацію про затори, ремонти доріг або аварії та автоматично пропонуватиме альтернативні маршрути. У майбутньому застосування технологій штучного інтелекту та машинного навчання дозволить прогнозувати виникнення заторів і здійснювати проактивне управління транспортними потоками.

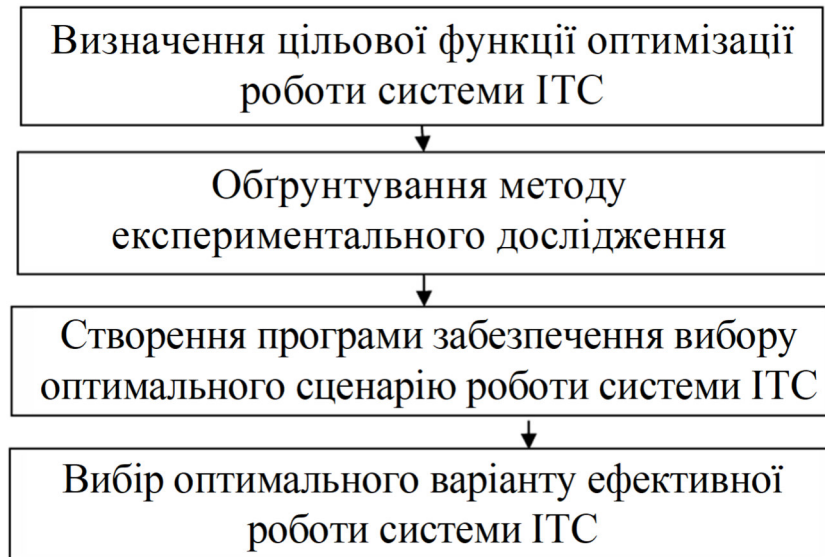


Рисунок 2.1 – Етапи дослідження ефективності функціонування ІТС при управлінні дорожнім рухом (ВДМ)

Початковим етапом є визначення цільової функції оптимізації роботи системи інтелектуального транспортного середовища (ІТС). На цьому етапі створено детальний класифікатор суб'єктів та об'єктів дослідження, а також проведено попередні дослідження для оцінки ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі (ВДМ) та визначення параметрів сценарію організації дорожнього руху (ОДР) із використанням ІТС.

Наступним кроком стало формування методики експериментального дослідження, спрямованої на отримання достовірних та репрезентативних даних. Безпосередньо на реальній ділянці ВДМ були визначені показники інтенсивності дорожнього руху, параметри вулично-ї інфраструктури та особливості роботи системи організації дорожнього руху.

Далі було передбачено встановлення вхідних і вихідних інформаційних потоків технічних засобів контролю та управління транспортними потоками (КУТП і ДУТП), а також визначення закономірностей у отриманих даних. Математична модель відображає залежність вихідних параметрів від вхідних, що дозволяє вибрати оптимальний сценарій функціонування ВДМ із такими технічними характеристиками, які забезпечать максимальну ефективність системи при оптимальних або мінімальних витратах. Пошук екстремумів

цільової функції необхідний для визначення оптимальних значень параметрів ІТС.

При проектуванні технічних параметрів ІТС необхідно проводити комплексні дослідження в напрямі оптимізації системи, що створюється, з метою підвищення її ефективності та запобігання негативним наслідкам упровадження. Це включає проведення низки об'єктних, натурних та моделювальних експериментів. Для їх реалізації необхідно виділити ключові фактори, що впливають на роботу системи, та встановити взаємозв'язки між ними.

Для успішної розробки та впровадження ІТС необхідно:

- чітко описати діяльність та умови застосування підсистеми ІТС;
- розробити методику оцінювання ефективності ІТС та способи проведення відповідних досліджень;
- створити алгоритм визначення структури та параметрів технічних засобів КУТП і ДУТП.

Етапність дослідження ефективності ІТС має особливе значення. В умовах воєнного стану та післявоєнної відбудови значна частина дорожньої інфраструктури зазнала пошкоджень або руйнувань. Це обумовлює необхідність використання не лише традиційних методів організації руху, але й новітніх інтелектуальних рішень, здатних забезпечити швидке реагування на зміни інтенсивності руху, аварійні ситуації чи закриття певних ділянок доріг.

Особливу увагу слід приділяти впровадженню адаптивних систем управління світлофорними об'єктами, які можуть автоматично регулювати фази залежно від транспортних потоків у реальному часі. Наприклад, у Києві впроваджуються проекти «розумних світлофорів», що зменшують затримки на 15–20 % у години пік.

Ще одним перспективним напрямом є створення національної бази даних інтенсивності руху з використанням датчиків, GPS-трекерів та мобільних застосунків. Це дозволить прогнозувати транспортні навантаження та планувати ремонтні чи відновлювальні роботи з урахуванням реальних сценаріїв руху.

Таким чином, адаптація міжнародного досвіду та його інтеграція в українську транспортну політику забезпечить не лише підвищення ефективності функціонування ІТС, але й створить основу для сталого розвитку міського транспорту та безпечної мобільності в умовах динамічних змін.

2.2 Визначення цільової функції

Для оптимізації параметрів роботи підсистем Інтелектуальних транспортних систем (ІТС) вводиться поняття цільової функції, яка використовується для пошуку оптимального сценарію управління дорожнім рухом з урахуванням інтеграції ключових підсистем – системи контролю управління транспортним потоком (КУТП) та системи динамічного управління транспортним потоком (ДУТП).

Ефективність і доцільність функціонування вулично-дорожньої мережі (ВДМ) оцінюються за ступенем покращення її параметрів після впровадження ІТС. Оскільки транспортні потоки характеризуються різними показниками (час руху, швидкість, довжина поїздки, рівень заторів, екологічні викиди тощо), що вимірюються у відмінних одиницях, виникає потреба у використанні узагальненого інтегрального показника для оцінки ефективності управлінських рішень.

У даній роботі таким інтегральним показником обрано “Витрати” (I). Під витратами розуміється функція від сумарних змін основних характеристик пересування учасників дорожнього руху під впливом заходів з організації дорожнього руху (ОДР), з урахуванням вагових коефіцієнтів значущості кожного параметра у виборі маршруту.

У загальному вигляді цільова функція задачі ОДР може бути подана як:

$$I = f(X) \quad (2.1)$$

де I – цільова функція задачі управління дорожнім рухом,

X – вектор характеристик транспортного потоку,

$f(X)$ – функція розрахунку витрат переміщення учасників дорожнього руху у певному сценарії управління.

Основна мета задачі управління дорожнім рухом за допомогою ІТС полягає у мінімізації негативних наслідків нерівномірного розподілу транспортних потоків та максимізації переваг від впровадження ІТС. Для досягнення цієї мети визначаються три взаємопов’язані підзадачі:

Вибір оптимального сценарію управління дорожнім рухом, тобто розробка такої схеми перенаправлення транспортного потоку через мережу, при якій $I \rightarrow \min$.

Визначення оптимальної частки транспортного потоку, яку доцільно перенаправити на альтернативні маршрути.

Налаштування оптимальних режимів роботи світлофорних об’єктів з урахуванням дорожньої обстановки.

Початковим завданням є досягнення максимального системного ефекту від впровадження ІТС загалом, тоді як подальші завдання деталізують оптимізацію підсистем КУТП та ДУТП.

Оскільки прогнозування стану транспортної мережі включає оцінку можливих змін у майбутньому, найбільш доцільним інструментом виступає імітаційне моделювання. Для цього у сучасних дослідженнях широко застосовуються програмні комплекси, зокрема VISSIM, які дозволяють враховувати велику кількість технічних характеристик дорожньої інфраструктури, поведінку водіїв та роботу світлофорних об’єктів.

Важливим аспектом є інтеграція з дорожньою інформаційною технологією (ДІТ), яка забезпечує передачу повідомлень водіям. Передбачається, що учасники руху можуть змінювати маршрут згідно з інформацією, яку вони отримують у режимі реального часу. Це вимагає врахування двох ключових припущень:

- можливості технічної реалізації та доведення інформації до водіїв;
- забезпечення безпеки під час взаємодії з інформаційними повідомленнями.

Задача визначення оптимальної частки перенаправлення потоку передбачає пошук рівня участі водіїв у зміні маршруту. Для цього можуть застосовуватися методи анкетування та аналізу поведінки водіїв, а також сучасні підходи на основі штучних нейронних мереж, які дозволяють зменшити невизначеність у прогнозуванні їх реакцій.

Щодо оптимізації роботи світлофорів, ключовим завданням є зменшення затримок на перехрестях та забезпечення плавного проходження транспортних засобів. Для цього застосовується моделювання транспортної мережі, що дозволяє оцінити вплив різних сценаріїв регулювання на ефективність руху.

Узагальнено пошук оптимуму цільової функції можна подати як:

$$I = f(X) = f_{cy} \times f_{\partial} \times f_{cv} \rightarrow \text{optimum, при } I \rightarrow \min \quad (2.2)$$

де f_{cy} – цільова функція вибору оптимального сценарію управління рухом,

f_{∂} – цільова функція визначення оптимальної частки перенаправлення потоку,

f_{cv} – цільова функція оптимізації режимів світлофорів.

Таким чином, визначення цільової функції дозволяє сформувати єдиний критерій оптимізації системи управління дорожнім рухом. Це створює основу для практичної реалізації ІТС у великих містах, таких як Київ, Львів чи Харків, де щодня фіксуються критичні затори. Правильний вибір цільової функції забезпечує не лише ефективність транспортної мережі, але й зменшення негативного впливу транспорту на довкілля та підвищення якості життя населення.

2.3 Визначення типу наукового завдання та обґрунтування математичного апарату

Подолання транспортних заторів у великих містах залишається однією з найактуальніших проблем сучасності. В умовах стрімкого зростання автомобільного парку та ускладнення процесів управління транспортними потоками органи місцевої влади змушені впроваджувати інноваційні рішення на основі Інтелектуальних транспортних систем (ІТС). Основна мета таких систем

полягає у зменшенні негативного впливу заторів, підвищенні пропускної спроможності вулично-дорожньої мережі (ВДМ) та забезпеченні стабільної мобільності населення.

Ключовим завданням цього дослідження є вибір і застосування адекватного математичного апарату, здатного відобразити складну динаміку транспортних процесів. Розроблена математична модель являє собою сукупність параметрів та функціональних залежностей, які описують структуру, характеристики й поведінку транспортної системи в різних умовах її функціонування.

У даному дослідженні математична модель виступає базовим інструментом, що дозволяє виконувати аналіз, прогнозування та оптимізацію транспортних потоків. На рисунку 2.2 наведені можливі варіанти математичних методів, які застосовуються у складі моделі для вирішення завдань управління дорожнім рухом.

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ	
Аналітичні	Імітаційні
Теоретичні	Теоретичні
Лінійні / Нелінійні	Нелінійні
Статичні	Динамічні
Детерміновані	Детерміновані
Аналітично розв'язувані	Чисельно розв'язувані

Рисунок 2.2 – Класифікація математичних моделей

У даній роботі застосовано як теоретичну, так і експериментальну математичну модель, що базується на взаємозалежності параметрів функціонування Інтелектуальних транспортних систем (ІТС) від характеристик елементів та структури вулично-дорожньої мережі (ВДМ). Такий підхід дозволяє не лише оцінити роботу ІТС з урахуванням поточного стану транспортних

потоків, а й прогнозувати їх поведінку в умовах зміни інтенсивності руху, появи заторів чи локальних перешкод.

Особливе значення має те, що математична модель інтегрує як аналітичні, так і імітаційні методи, що забезпечує комплексний підхід до дослідження. Наприклад, аналітичні моделі дозволяють отримати строгі математичні залежності між параметрами системи, тоді як імітаційні моделі дають можливість враховувати стохастичні фактори, випадкові події та змінність транспортних потоків у реальних умовах.

З огляду на сучасні реалії України, де транспортна інфраструктура багатьох міст перебуває у процесі модернізації, використання математичних моделей стає надзвичайно актуальним. Вони дають можливість оптимізувати роботу світлофорних об'єктів, планувати маршрути громадського транспорту, моделювати аварійні ситуації та їх наслідки, а також визначати найефективніші сценарії ремаршрутизації транспортних потоків. Таким чином, інтеграція аналітичних і експериментальних моделей у сфері управління дорожнім рухом дозволяє створити гнучку й адаптивну систему, що підвищує ефективність роботи ВДМ та задовольняє потреби як пасажирів, так і вантажоперевізників.

2.4 Визначення параметрів моделі

2.4.1 Вибір оптимального сценарію управління дорожнім рухом

Оптимізація ефективності управління дорожнім рухом досягається за рахунок підвищення якості функціонування Інтелектуальних транспортних систем (ІТС). Це, у свою чергу, сприяє покращенню організації дорожнього руху, зменшенню втрат транспортних потоків унаслідок заторів та підвищенню пропускної здатності вулично-дорожньої мережі.

Результативність упровадження ІТС оцінюється як за традиційними показниками (час у дорозі, величина перепробігу транспортних засобів, зниження кількості заторів тощо), так і за похідними показниками, що розраховуються на їх основі.

Основним критерієм оцінки ефективності заходів з організації дорожнього руху є час пересування транспортних засобів, про що свідчать результати досліджень. Окрім цього, вплив ІТС простежується й за іншими характеристиками дорожньої діяльності: довжиною поїздки, середньою швидкістю транспортного потоку. У низці робіт враховуються також додаткові показники, зокрема рівень викидів від автотранспорту, режими експлуатації автомобілів у потоці, витрата пального тощо.

Для визначення факторів, які впливають на витрати, пов'язані з пересуванням учасників дорожнього руху, необхідно аналізувати зміни параметрів транспортних потоків у різних сценаріях організації дорожнього руху, зокрема при виникненні заторів.

У випадках перевантаження вулично-дорожньої мережі у даній роботі пропонуються два основні варіанти рішень:

Перенаправлення частини транспортного потоку з перевантажених головних магістралей на прилеглі дороги за умови, що це не створить нових заторів на альтернативних маршрутах.

Коригування режимів роботи світлофорних об'єктів на перехрестях відповідних напрямків руху з метою перерозподілу транспортних потоків та зменшення затримок.

Таким чином, застосування оптимального сценарію управління дорожнім рухом на основі ІТС дозволяє досягти подвійного ефекту: з одного боку, скорочення часу пересування та підвищення швидкості транспортних потоків, а з іншого – зменшення негативних соціально-економічних та екологічних наслідків перевантаження транспортної мережі.

Під час впровадження заходів з управління транспортними потоками у вулично-дорожній мережі спостерігаються дві ключові групи залежностей.

Перша залежність відображає вплив схеми руху та частки перенаправлення транспортного потоку через мережу на середній час у дорозі та довжину поїздки. Зміна частки перенаправлення транспортних засобів між маршрутами неминуче призводить до трансформації сумарного часу

пересування та загальної протяжності поїздки в межах усієї транспортної мережі. Це явище має нелінійний характер: воно не є ані суто прямопропорційним, ані обернено-пропорційним. Починаючи з певного рівня перенаправлення, кожне наступне збільшення частки перерозподілу транспорту приносить менший ефект, адже зростає довжина поїздок. У результаті транспортна мережа може досягати критичного стану, що дає можливість визначити оптимальний сценарій регулювання дорожнього руху при виникненні заторів.

Друга залежність стосується впливу тривалості циклів і фаз світлофорного регулювання на характеристики дорожнього руху. Збільшення часу зеленої фази підвищує пропускну здатність конкретного маршруту, але одночасно зменшує її для перехресного напрямку, оскільки тривалість циклу світлофора є сталою величиною і не може необмежено зростати. Це призводить до зростання середнього часу затримки транспортних засобів на перехрестях та в мережі загалом. Такий ефект підкреслює важливість балансування фаз світлофорів для досягнення загальної ефективності системи.

Таким чином, обидві групи залежностей проявляються у змінах таких параметрів, як час у дорозі та довжина поїздки транспортних засобів, що залежать від:

- інтенсивності транспортних потоків,
- пропускну здатності вулично-дорожньої мережі,
- схеми перерозподілу транспортних потоків,
- режимів роботи світлофорних об'єктів.

Основна мета цільової функції полягає у визначенні зони оптимуму, яка забезпечує найкраще співвідношення параметрів для будь-якої транспортної мережі за умов виникнення перевантажень. Це, у свою чергу, дозволяє оцінити реальну ефективність роботи ІТС як інструменту управління рухом.

У межах цього дослідження для оцінки ефективності застосовуються два базові критерії:

- зміна середнього часу руху транспортного засобу;
- зміна довжини поїздки у межах досліджуваної транспортної мережі.

Хоча швидкість транспортного потоку є похідною від цих параметрів (як співвідношення пройденої відстані до часу), у даній роботі вона не виступає окремим критерієм, а визначається на основі імітаційного моделювання, що детально розглянуто у третій главі.

Визначальні параметри формуються через комбінацію методів організації руху, зокрема:

- перерозподіл транспортних потоків між різними маршрутами в мережі,
- перенаправлення частини автомобілів із головних доріг на об'їзні,
- налаштування тривалості циклів роботи світлофорів.

У сучасних мегаполісах, перенаправлення значних потоків на віддалені маршрути може виявитися неоптимальним через зростання довжини та часу поїздки. Тому важливо виявити максимальний інтегральний ефект від застосованих заходів, на основі якого і формується оптимальний сценарій управління дорожнім рухом.

У ситуаціях, коли перенаправлення транспортного потоку на значні відстані та з великим обсягом вважається неефективним, постає необхідність визначити максимальний сукупний ефект від управління рухом. На основі цього ефекту формується оптимальний сценарій організації дорожнього руху.

До ключових параметрів такого підходу належать:

- зменшення часу пересування транспортного потоку мережею;
- скорочення середніх затримок у русі транспортних засобів, що користуються даною мережею, тобто мінімізація середньої тривалості поїздки.

Узагальнено математичну модель можна подати у такому вигляді:

$$I_{\Delta i} = f(\Delta t_i, \Delta l_i, k_i, k_l) \quad (2.2)$$

де $I_{\Delta i}$ – величина витрат, зекономлених у результаті реалізації i -го організаційного варіанта порівняно з відсутністю перенаправлення транспортного потоку та зміни режимів роботи світлофорів на перехрестях у заторових ситуаціях вулично-дорожньої мережі (ВДМ);

$t_i, \Delta l_i$ – кількісні зміни відповідно часу руху та пройденої відстані транспортними засобами в мережі до і після застосування i -го варіанта (сценарію) управління транспортним потоком у мережі;

k_t, k_l – коефіцієнти значущості відповідно для часу руху та для пройденої відстані транспортним потоком у мережі.

В даному дослідженні розрахунок сумарного значення витрат переміщення учасників дорожнього руху (I), грн має вигляд:

$$I = f(T, L) = k_t \cdot T + k_l \cdot L \quad (2.4)$$

$f(T, L)$ – функція витрат поїздки транспортних засобів

T, L – значення часу і пробігу транспортного потоку через вітки вуличної мережі мережу;

k_t, k_l – значення вартості одиниці часу (грн/авт.год) і пробігу (грн/авт.км) транспортного потоку через вітки ВДМ.

Розрахунок сумарного значення I_0 переміщення учасників дорожнього руху в початковому заторовому стані (без перенаправлення ТП по вітках ВДМ).

$$I_0 = f(T_0, L_0) = k_t \cdot T_0 + k_l \cdot L_0 \quad (2.5)$$

де T_0, L_0 – значення часу і пробігу транспортного потоку через вітки ВДМ в початковому заторовому стані.

Розрахунок сумарного значення витрат переміщення учасників дорожнього руху I_i для i -го сценарію управління (з перенаправленням ТП по вітках ВДМ), грн:

$$I_i = f(T_i, L_i) = k_t \cdot T_i + k_l \cdot L_i = k_t(T_0 - \Delta t_i) + k_l(L_0 + \Delta l_i) \quad (2.6)$$

$$T_i = T_0 - \Delta t_i$$

$$L_i = L_0 + \Delta l_i$$

де i – порядковий номер сценарію управління транспортним потоком;

T_i, L_i – значення часу і пробігу транспортного потоку через мережу в i -му сценарії;

$\Delta t_i, \Delta l_i$ – значення зміни часу і пробігу транспортного потоку в i -му сценарії.

Зниження витрат переміщення учасників дорожнього руху (ΔI_i) при реалізації i -го сценарію управління, грн.

$$\Delta I_i = I_i - I_0 = -k_t \cdot \Delta t_i \cdot \Delta I_i \quad (2.7)$$

Як уже зазначалося вище, величини Δt та ΔI змінюються залежно від конкретного варіанта управління дорожнім рухом. Відповідно, цільовою функцією є визначення маршрутів пересування, частки перенаправлення транспортних засобів у мережі та відповідного способу регулювання руху за допомогою світлофорів з метою мінімізації витрат на переміщення учасників дорожнього руху в межах мережі.

У межах цієї роботи розрахунки виконуватимуться, виходячи зі зміни показників часу руху та пройденої відстані транспортними засобами через мережу при реалізації певних сценаріїв управління дорожнім рухом у порівнянні з відповідними показниками за початкових (заторових) умов.

Збільшення величини пробігу, здійсненого одним транспортним засобом у мережі за i -м сценарієм, визначається за формулою:

$$\Delta l_{ij} = l_{ij} - l_0 \quad (2.8)$$

l_0 – відстань між транспортним засобом по початковому маршруту, км;

l_{ij} – відстань, що пройшов транспортний засіб при руху по j -му маршруту, запропонованому водієві ТЗ по i -му сценарію, км.

Зростання значення пробігу транспортного потоку в мережі по i -му сценарію визначається із залежності

$$\sum \Delta l_i = \sum l_{ij} \cdot n_{ij} \quad (2.9)$$

n_{ij} – к-ть транспортних засобів, що рухаються по j -му маршруту в i -му сценарії керування дорожнім рухом, авт.

Значення перепробігу, що пройшли транспортні засоби визначається фактичною протяжністю досліджуваного об'єкта (маршрутів руху ТЗ на ВДМ).

Зниження значення часу руху ТЗ в мережі по j -му маршруту в i -му сценарії визначається за формулою:

$$\Delta t_{ij} = t_0 - t_{ij} \quad (2.10)$$

t_0 – значення часу руху ТЗ по початковому маршруті (рез зміни напрямку при виникненні ДТП), год;

t_{ij} – значення часу руху ТЗ при руху по j -му маршруті, запропонованому водію в i -му сценарії, год;

Скорочення часу руху ТЗ в мережі по i -му сценарію визначається по формулі:

$$\sum \Delta t_j = \sum \Delta t_{ij} \cdot n_{ij} \quad (2.11)$$

де n_{ij} – к-ть ТЗ, що рухаються по j -му маршруту в i -му сценарію управління дорожнім рухом, авт.

Згідно цільової ф-ї необхідно провести розрахунок загального приведеного значення на ділянці для кожного сценарію управління дорожнім рухом. В цій роботі для кожного варіанту організації дорожнього руху величина економічних засобів визначається за формулою:

$$\Delta I_i = -\sum \Delta t_i \cdot k_t + \sum \Delta l_i \cdot k_l \quad (2.12)$$

k_t – значення вартості однієї одиниці часу руху транспортних засобів в мережі (грн/авт.год);

k_l – значення вартості однієї одиниці пройденого шляху транспортних засобів в мережі (грн/авт.км).

Як було зазначено у першому розділі даного дослідження, оптимальний сценарій організації дорожнього руху визначається як такий, що характеризується найменшими витратами. Ці витрати описуються функцією часу руху та відстані, яку долає транспортний потік у межах вулично-дорожньої мережі (ВДМ). Порівняння показників до та після впровадження певного сценарію управління дорожнім рухом дозволяє визначити зміни, що відбулися, і на основі цих змін встановити найбільш доцільний варіант.

Суть підходу полягає у впорядкуванні отриманих значень інтегрального показника ефективності: чим вищим є його значення, тим результативніше функціонує система інтелектуальних транспортних систем (ІТС). Саме це створює можливість вибору оптимального сценарію управління рухом для конкретної ділянки транспортної мережі.

У сучасних умовах України подібні підходи набувають особливого значення, адже у великих містах, таких як Київ, Львів чи Харків, проблема заторів залишається однією з найактуальніших. Використання математичних моделей та ІТС у процесі оптимізації дорожнього руху сприяє зменшенню транспортних затримок, підвищенню безпеки та економії пального. Більш того, оптимізація управління дорожнім рухом є ключовим елементом сталого розвитку міської інфраструктури, що відповідає європейським стандартам інтеграції транспортних систем.

Таким чином, застосування методів вибору оптимального сценарію управління рухом дозволяє не лише мінімізувати витрати часу і відстані для учасників дорожнього руху, але й підвищити загальну ефективність функціонування транспортної мережі на досліджуваній ділянці.

Серед можливих варіантів управління транспортними потоками оптимальним вважається той, що має найменше приведене значення вартості. Тоді цільова функція набуває такого вигляду:

$$|\Delta_i| \rightarrow \max n_{pi} \cdot I_i \rightarrow \min, I_i < I_0 \quad (2.13)$$

Найоптимальнішому варіанту відповідає визначений режим роботи окремих підсистем системи ІТС.

2.4.2 Визначення маршруту руху транспортного потоку через мережу

Схема або маршрут руху транспортних засобів у першу чергу залежить від структури транспортної мережі. За нормальних умов організації руху оптимальною вважається така схема, яка забезпечує найвищу якість пересування транспортного потоку, що зазвичай виражається у мінімальній довжині маршруту та найкоротшому часі поїздки. У таких ситуаціях більшість водіїв схильні обирати однакову схему руху, орієнтуючись на зручність і швидкість пересування.

Однак у випадках, коли виникає необхідність змінювати маршрут (наприклад, через затори, ремонтні роботи чи аварійні ситуації), водіям може

пропонуватися декілька альтернативних варіантів пересування. Кожен з них має власні характеристики: час у дорозі, довжину маршруту, якість дорожнього покриття, наявність транспортних розв'язок, умови роботи світлофornoї мережі тощо. Вибір конкретного варіанта значною мірою залежить від індивідуальних пріоритетів водія: для когось важливішим буде мінімальний час руху, для інших – безпека, економія пального чи уникнення інтенсивного трафіку.

Сучасні інтелектуальні транспортні системи (ІТС), які впроваджуються у містах України, наприклад у Києві чи Дніпрі, здатні пропонувати водіям оптимальні маршрути в режимі реального часу. Це дозволяє ефективно розподіляти транспортні потоки вулично-дорожньою мережею, зменшувати рівень заторів і знижувати негативний вплив транспорту на довкілля. Такі технології особливо актуальні в умовах зростання кількості автомобілів та високої динаміки міського руху.

Таким чином, схема руху транспортних засобів у мережі може визначатися як вручну (традиційними методами планування), так і за допомогою сучасних ІТС, що підвищує точність і гнучкість організації руху. Приклади можливих варіантів маршрутів транспортних потоків наведені на рисунках 2.3–2.7.



Рисунок 2.3 – Схема безаварійного руху



Рисунок 2.4 – Схема потоків транспорту без об'їзду по об'їзdnих маршрутах



Рисунок 2.5 – Схема потоків з об'їздом через один примикаючий маршрут

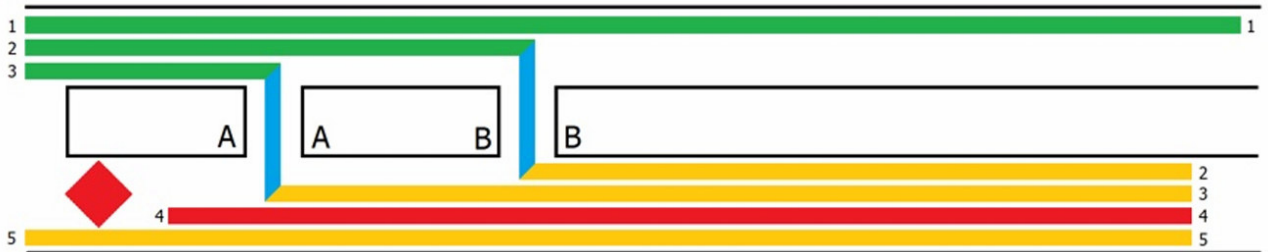


Рисунок 2.6 – Схема потоків з об'їздом через два примикаючі маршрути

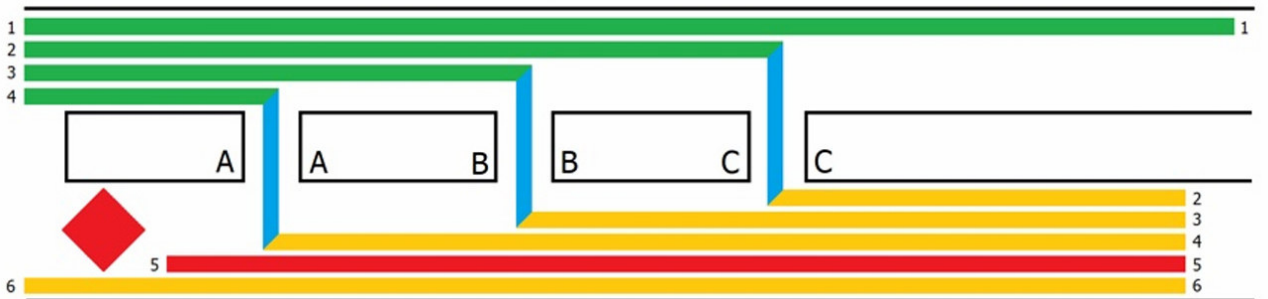


Рисунок 2.7 – Схема потоків з об'їздом по капіляру через три примикаючі маршрути

Для визначення окремих параметрів транспортної мережі у даному дослідженні було застосовано різні методи аналізу. Розрахунки узагальненого значення витрат наведені на рисунку 2.8.

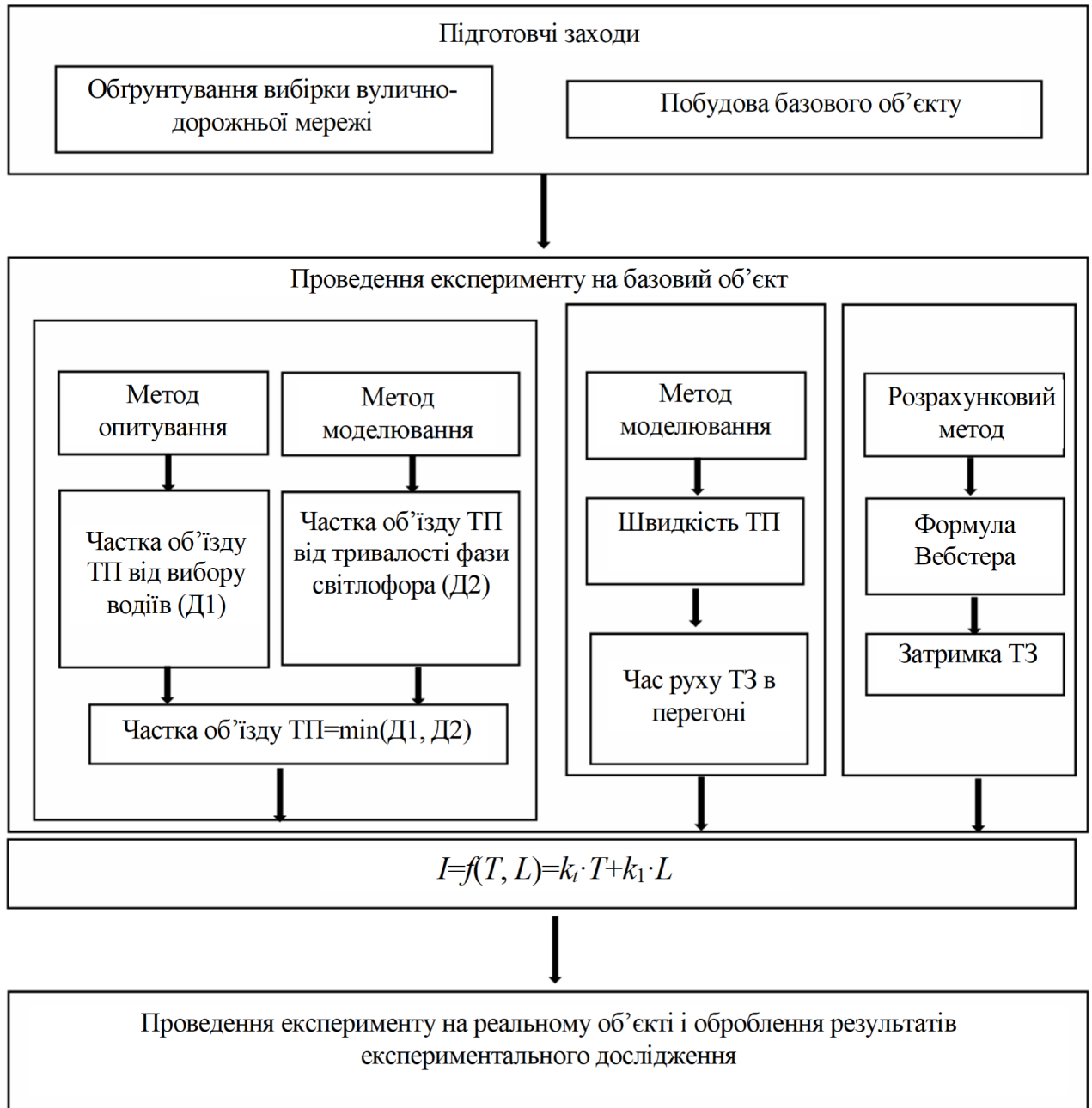


Рисунок 2.8 – Розрахунок підсумкового значення витрат

2.4.3 Визначення оптимальної частки перенаправлення транспортного потоку в мережі

У різних наукових дослідженнях обсяг руху транспортних засобів у міській транспортній мережі визначається шляхом співставлення пропускної здатності окремої ділянки дороги з фактичною інтенсивністю руху на ній. Для оцінки зазвичай використовується показник залишкової пропускної здатності

маршруту, який відображає, скільки транспортних засобів ще може бути додатково спрямовано цією дорогою без перевищення допустимого навантаження. На основі цього показника приймаються рішення щодо організації дорожнього руху та визначається гранична кількість автомобілів, що можуть бути перенаправлені даним маршрутом.

Як свідчать дослідження у сучасній теорії організації дорожнього руху перенаправлення транспортних потоків реалізується через ефективність роботи системи ОДР (організації дорожнього руху), яка входить до складу підсистем інтелектуальних транспортних систем (ІТС). Практика застосування таких систем у країнах ЄС та США демонструє, що оптимальний розподіл транспортних потоків можливий лише за умови поєднання технічних методів управління (світлофорні програми, динамічна маршрутизація, системи моніторингу) з урахуванням реальної поведінки водіїв.

У сучасних наукових працях підкреслюється, що ефективність методів керування і перенаправлення транспортних потоків значною мірою залежить від того, наскільки запропоновані сценарії організації руху відповідають очікуванням та поведінковим моделям водіїв. Іншими словами, навіть найточніші математичні моделі не будуть результативними, якщо вони ігнорують психологічні та практичні пріоритети учасників дорожнього руху.

Отже, частка перенаправлення транспортного потоку визначається не лише залишковою пропускнуою здатністю певної ділянки дороги, але й вибором маршруту, який робить водій. Саме тому сценарій організації дорожнього руху повинен відповідати не тільки технічним можливостям транспортної системи, а й реальним потребам користувачів. Це досягається шляхом проєктування та впровадження дорожніх заходів на основі пріоритетів водіїв, які проявляються у їхній поведінці при виборі маршруту.

Такий підхід є надзвичайно актуальним. У великих містах, де проблема заторів загострюється, застосування моделей оптимізації розподілу транспортних потоків із врахуванням поведінки водіїв дає змогу зменшити завантаженість доріг, підвищити безпеку руху та знизити екологічні наслідки.

Зокрема, використання адаптивних світлофорних систем та мобільних додатків з рекомендаціями оптимальних маршрутів у Києві та Львові вже демонструє позитивні результати у зниженні транспортних затримок.

Таким чином, ефективність сценарію управління дорожнім рухом визначається не лише технічними параметрами транспортної мережі, а й його здатністю враховувати поведінкові особливості водіїв, що робить систему управління рухом більш гнучкою, адаптивною та орієнтованою на реальні потреби суспільства.

Найбільшої ефективності метод опитування досягає у поєднанні з іншими підходами дослідження. У межах даної роботи опитування було застосовано на початковому етапі для збору інформації про поведінку водіїв транспортних засобів у ситуаціях, коли з непередбачених причин зменшується кількість доступних смуг руху. Для отримання необхідних даних було обрано метод інтерв'ю, який є одним із базових методів поведінкових наук, широко використовуваним у соціологічних дослідженнях учасників дорожнього руху.

Завдяки опитуванню вдалося зібрати основні дані щодо поведінкових реакцій водіїв, зокрема:

- реакцію на виникнення затору під час руху міською дорожньо-транспортною мережею;
- ставлення до запропонованих варіантів об'їзду або зміни маршруту;
- особливості вибору водієм маршруту руху з урахуванням:
 - дорожніх умов та рівня завантаженості дороги;
 - порівняння характеристик альтернативних маршрутів;
 - індивідуальних чинників, що впливають на прийняття рішення (досвід водія, психологічна стійкість, звичні маршрути тощо).

Для формування узагальнених висновків щодо моделей поведінки водіїв отримані результати опитування підлягали аналітичній обробці різними статистичними методами. У цьому дослідженні використовувалися програмні засоби SPSS та MS Excel для проведення регресійного аналізу, а також технології нейронних мереж для виявлення складних взаємозв'язків між змінними.

Програма SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) є одним із найпоширеніших інструментів для статистичної обробки соціологічних даних, оскільки дозволяє ефективно оцінювати великі масиви результатів опитувань. Проте, поведінка водіїв у транспортних системах характеризується багатофакторністю: вибір траєкторії руху залежить від численних критеріїв і ситуативних умов, що змінюються у часі. Саме тому для більш глибокого аналізу було використано метод нейронних мереж, який здатен моделювати нелінійні залежності та прогнозувати поведінкові реакції водіїв у різних дорожніх ситуаціях.

Таким чином, поєднання методів соціологічного опитування та інтелектуальних алгоритмів аналізу даних забезпечило комплексний підхід до дослідження моделей поведінки водіїв у транспортній мережі, що є важливою основою для подальшої оптимізації організації дорожнього руху та підвищення його безпеки.

Метод нейронних мереж

Метод штучних нейронних мереж широко застосовується у сучасних наукових дослідженнях, зокрема у сфері інтелектуальних транспортних систем (ІТС). У працях багатьох авторів [23, 113] цей метод використовувався як ефективний інструмент аналізу та обробки даних, що має суттєві переваги порівняно з традиційними статистичними підходами, такими як використання SPSS або MS Excel для регресійного аналізу.

Опис методу штучної нейронної мережі (ШНМ)

Модель Artificial Neural Network (ANN) є інтелектуальною системою, призначеною для розв'язання складних завдань у різних галузях - від оптимізації, прогнозування та моделювання до кластеризації й розпізнавання образів. Її структура складається з трьох основних рівнів:

- вхідного шару, який сприймає та передає вхідні дані;
- вихідного шару, що формує результати обчислень;

та одного або кількох прихованих шарів, які забезпечують зв'язок і трансформацію інформації між входом і виходом.

Базовим елементом нейронної мережі є нейрон - обчислювальний осередок, що виконує дві основні функції: отримання вхідних сигналів і формування вихідного значення. Кожен вхідний сигнал множиться на відповідний ваговий коефіцієнт, після чого результати підсумовуються разом із зміщенням (bias) і проходять через активаційну функцію, яка визначає остаточний вихід нейрона.

Таким чином, штучна нейронна мережа імітує роботу біологічного мозку, забезпечуючи здатність до навчання, узагальнення та адаптації. Це робить її особливо корисною для аналізу складних, нелінійних залежностей у транспортних системах, де традиційні математичні методи часто виявляються недостатньо точними. Основні концепції та структурні елементи нейронних мереж зазвичай ілюструються у вигляді схеми, подібної до наведеної на рисунку 2.9.

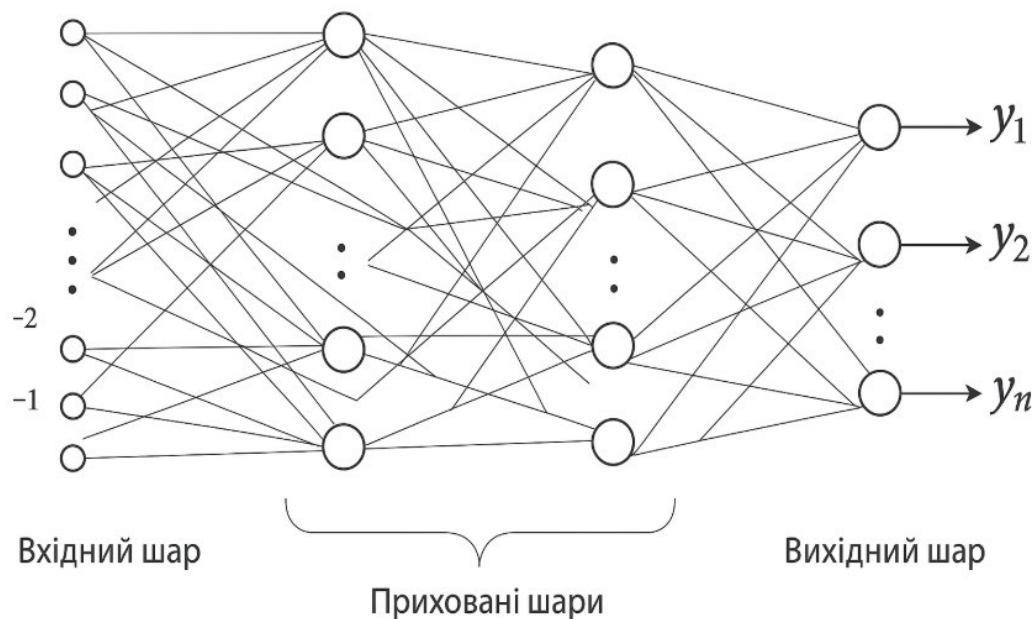


Рисунок 2.9 – Нейронна мережа із штучним інтелектом

На рис. 2.10 показана загальна структура навчання нейронної мережі.

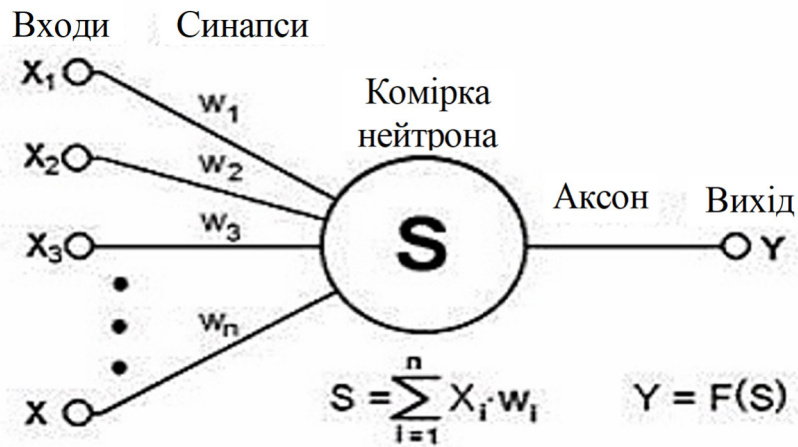


Рисунок 2.10 – Загальна структура нейронної мережі

В таблиці 2.1 зображено характеристики функції і інтелектуальній транспортній системі.

Активовані функції	Гіперболічний тангенс	Логічна	Гранична
Функція	$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$	$(x) = \frac{e^x}{1 + e^x}$	$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$
Графік			

На сьогоднішній день для розв'язання задач прогнозування широко застосовується метод апроксимації функцій із використанням штучних нейронних мереж. Цей підхід дозволяє відтворювати складні залежності між вхідними та вихідними параметрами системи, що робить його особливо ефективним у моделюванні процесів з високою невизначеністю.

Під час реалізації прогнозних моделей за допомогою нейронних мереж використовується принцип функціональної апроксимації, відповідно до якого мережа в процесі навчання наближає невідому цільову функцію. Результати численних теоретичних та прикладних досліджень у цій галузі підтверджують,

що нейронні мережі є одним із найпотужніших інструментів для апроксимації складних багатовимірних функцій.

У процесі навчання налаштовувані параметри (вагові коефіцієнти та зміщення) поступово приймають такі значення, які найточніше відтворюють функціональну залежність між вхідними та вихідними векторами навчальної вибірки. Таким чином, нейронна мережа фактично навчається будувати математичну модель, що описує поведінку системи на основі поданих прикладів.

Цей підхід особливо ефективний у прогностичних задачах, коли кожному конкретному вхідному вектору, який характеризує стан системи або її параметри, відповідає певне вихідне значення, що є прогнозованим результатом. Завдяки цьому нейронні мережі дають змогу створювати точні, адаптивні та універсальні моделі прогнозування для різноманітних галузей, зокрема в транспортних, економічних і технічних системах.

Метод моделювання

Програмний комплекс VISSIM є мікроскопічною моделлю імітації транспортного руху, що базується на часовому кроці та поведінкових характеристиках водія. Цей інструмент дозволяє моделювати транспортні потоки за різних граничних умов - таких як розподіл смуг руху, структура транспортного потоку, режими роботи світлофорів, а також врахування як індивідуального, так і громадського транспорту.

У мікроскопічну модель транспортного потоку вбудовано дві ключові поведінкові моделі: модель слідування за попереднім транспортним засобом та модель зміни смуги руху. Результати моделювання відображаються у вигляді реалістичної анімації руху транспорту в режимі реального часу на графічному інтерфейсі, а також у вигляді числових транспортно-технічних параметрів, які можна використовувати для подальшого аналізу. Крім мікрорівня, можливе й моделювання транспортних потоків на макрорівні.

За допомогою VISSIM фахівці мають змогу моделювати роботу транспортних вузлів, перехресть, транспортно-пересадкових пунктів, парковок тощо. Серед основних можливостей застосування програми:

- оцінювання впливу типу перехрестя на пропускну здатність (нерегульовані та регульовані перехрестя, кільцеві рухи, залізничні переїзди, багаторівневі розв'язки);
- проектування, тестування та оцінювання ефективності різних режимів роботи світлофорного регулювання;
- визначення транспортної ефективності запроваджених організаційних заходів;
- аналіз управління дорожнім рухом як на автомагістралях, так і на міських вулицях із контролем напрямків руху як на окремих смугах, так і по всій проїзній частині;
- дослідження можливостей пріоритетного руху громадського транспорту, зокрема заходів щодо першочергового пропуску трамваїв;
- аналіз впливу управління транспортними потоками на загальну ситуацію в мережі (регулювання інтенсивності в'їзду транспорту, зміна інтервалів між вимушеними зупинками, оптимізація під'їзних шляхів, організація одностороннього руху або виділених смуг для громадського транспорту);
- оцінювання пропускну здатності великих транспортних мереж - наприклад, систем автомагістралей або міських вулично-дорожніх мереж - із урахуванням динамічного перерозподілу транспортних потоків, що є особливо важливим під час планування перехоплюючих парковок;
- аналіз регулювання руху залізничного транспорту та організації зон очікування (наприклад, на митних терміналах);
- детальна імітація руху кожного окремого учасника дорожнього руху;
- моделювання зупинок громадського транспорту та станцій метро з урахуванням їх взаємного впливу;
- розрахунок понад 50 різних аналітичних показників і коефіцієнтів, а також побудова графічних залежностей (зокрема, у Microsoft Excel) для відображення завантаженості транспортної мережі у часі.

У межах даного дослідження VISSIM використовується для оцінювання пропускну здатності регульованого світлофорами перехрестя. Моделювання у

VISSIM дозволяє визначити взаємозв'язок між параметрами циклу світлофорного регулювання, тривалістю дозволяючої фази, інтенсивністю та швидкістю транспортного потоку, а також кількістю смуг руху на проїзній частині.



Рисунок 2.14 – Схема моделі транспортної мережі в системі Vissim

Проведений аналіз ефективності функціонування системи інтелектуальних транспортних систем (ІТС) та загальна концепція оцінювання впливу характеристик об'їзного маршруту на вибір схеми руху користувачів залежно від дорожньої ситуації передбачає використання різноманітних даних. Для розроблення та впровадження заходів щодо вирішення вказаних проблем необхідно обрати оптимальний сценарій управління дорожнім рухом (УДР). Крім того, потрібно визначити засоби та варіанти реалізації заходів, що базуються на створеній системі показників.

Вибір оптимального сценарію функціонування системи ІТС ґрунтується на комплексній характеристиці транспортної системи. До таких характеристик

належать рівень складності транспортної ситуації, структура та інтенсивність перехресть мережі, кількість транспортних засобів, що перетинають перехрестя залежно від циклів роботи світлофорів, а також уподобання користувачів під час вибору маршрутів руху.

При цьому необхідно враховувати такі чинники: інтенсивність руху відносно пропускної спроможності дороги; затримки транспортного потоку, що залежать від режимів роботи світлофорного регулювання; витрати часу та ресурсів учасників дорожнього руху залежно від обраного маршруту; переваги користувачів під час вибору напрямку руху; а також організаційні витрати, пов'язані з реалізацією заходів з управління дорожнім рухом.

Таким чином, ефективне функціонування ІТС вимагає комплексного підходу до аналізу транспортних характеристик, узгодження технічних і поведінкових факторів та вибору таких сценаріїв управління, які забезпечують баланс між швидкістю, безпекою та економічністю пересування транспортних потоків.

3 ПРОЕКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Загальне планування імітаційного моделювання

Методика проведення дослідження передбачає комплексний підхід до вивчення ефективності функціонування інтелектуальних транспортних систем (ІТС) у реальних умовах дорожнього руху. Вона складається з трьох основних етапів, кожен із яких має ключове значення для отримання достовірних результатів.

Перший етап – підготовчі заходи, які включають визначення мети та завдань дослідження, вибір об'єкта спостереження, підготовку вимірювального обладнання, засобів збору та реєстрації даних, а також розроблення критеріїв оцінювання ефективності роботи ІТС. На цьому етапі також формуються початкові параметри транспортної мережі – інтенсивність руху, структура потоків, режими світлофорного регулювання, погодні умови тощо.

Другий етап – аналіз стану транспортної мережі та функціонування впровадженої ІТС і її підсистем. Він передбачає детальне вивчення взаємодії між підсистемами ІТС, такими як система управління дорожнім рухом, моніторинг транспортних потоків, система пріоритету для громадського транспорту, засоби інформування водіїв у режимі реального часу. На цьому етапі проводиться моделювання руху з урахуванням різних сценаріїв навантаження, оцінюється рівень затримок, середня швидкість транспортних потоків, пропускна здатність мережі та рівень сервісу.

Третій етап – проведення імітаційного моделювання на реальному об'єкті, що передбачає безпосереднє тестування системи в міських або приміських умовах. Отримані вихідні дані (час поїздки, інтенсивність руху, частота заторів, кількість аварійних ситуацій тощо) обробляються за допомогою сучасних програмних засобів аналізу та візуалізації, таких як PTV VISSIM.

Результати експерименту дозволяють сформувати аналітичну базу для вдосконалення роботи ІТС, визначити оптимальні режими функціонування її

підсистем, а також надати практичні рекомендації щодо адаптації технологій інтелектуального управління рухом до умов українських міст.

3.2 Імітаційне моделювання з визначенням оптимальної схеми організації дорожнього руху в міській транспортній мережі (ВДМ)

3.2.1 Імітаційне моделювання з визначенням частки перенаправлення транспортних засобів у потоці

Для дослідження особливостей вибору маршруту водіями у межах транспортної мережі було організовано соціологічне опитування. Метою цього опитування було з'ясування чинників, що впливають на прийняття рішення щодо вибору напрямку руху в умовах різної завантаженості дорожньої інфраструктури.

Основними завданнями опитування були:

- визначення ступеня впливу технічних та експлуатаційних характеристик транспортної інфраструктури на вибір маршруту учасниками дорожнього руху;
- аналіз закономірностей поведінки водіїв залежно від поточного стану дорожньо-транспортної ситуації;
- оцінка переваг та пріоритетів водіїв під час вибору маршруту руху.

Анкету було розроблено для збору інформації про індивідуальні переваги водіїв та чинники, які найбільше впливають на прийняття рішень. Отримані результати після оброблення та аналізу дали змогу визначити найбільш значущі фактори, що формують транспортну поведінку, та сформулювати рекомендації щодо вдосконалення організації дорожнього руху відповідно до специфіки схеми транспортної мережі.

У дослідженні брали участь 111 водіїв, кожному з яких була запропонована схема транспортної мережі з різними варіантами маршрутів. Для кожного маршруту вказувалися його довжина, прогнозований час у дорозі та якість

поїздки. Респондентам потрібно було обрати той варіант, який найбільше відповідав їхнім особистим уподобанням.

У межах експерименту розглядалися різні структури міської вулично-дорожньої мережі, серед яких:

- прямокутна,
- магістрально-прямокутна,
- трикутна,
- діагонально-прямокутна,
- радіально-кільцева.

Візуальні схеми транспортної мережі подані на рисунку 3.2.

Опитування проводилося у двох форматах: онлайн (через електронну форму) та офлайн (під час особистих інтерв'ю з водіями).

Для оцінювання можливих схем організації дорожнього руху учасникам опитування були надані такі критерії:

- Рівень завантаженості транспортної мережі (коефіцієнт заповнення z у чотирьох діапазонах:
 - $z < 0,5$ - схеми A1, B1, C1, D1, E1;
 - $0,5 \leq z < 0,7$ - схеми A2, B2, C2, D2, E2;
 - $0,7 \leq z < 0,9$ - схеми A3, B3, C3, D3, E3;
 - $z \geq 0,9$ - схеми A4, B4, C4, D4, E4).
- Довжина маршруту - відстань від в'їзду до виїзду транспортного засобу із заданої мережі (км).
- Час руху на основному та об'їзних маршрутах (год).
- Якість поїздки - рівень сервісу транспортної мережі за відповідним маршрутом.
- Кількість транспортних вузлів (перехресть, розв'язок) на вибраному шляху.

Отримані дані дозволили комплексно оцінити вплив різних структурних типів міських транспортних мереж та ступеня їх завантаженості на вибір

маршруту водіями. Це стало основою для подальшого моделювання оптимальної схеми управління дорожнім рухом у міських умовах.

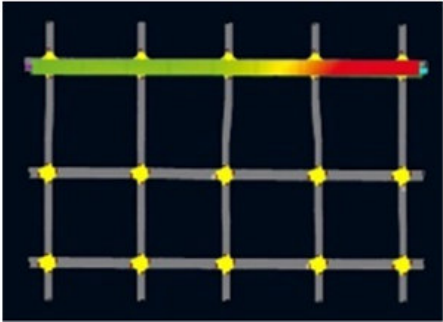
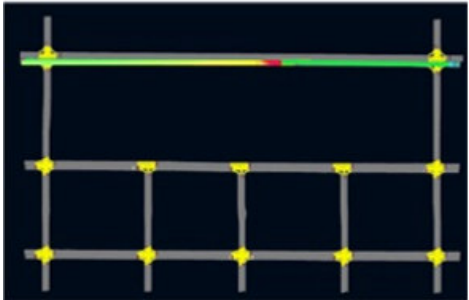
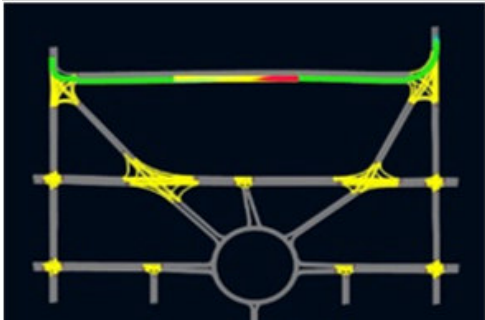
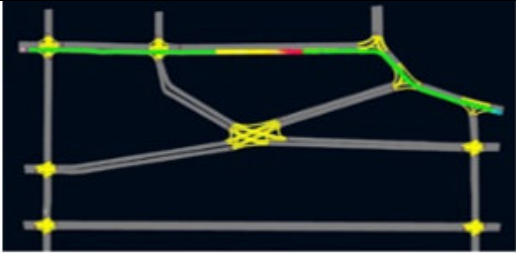
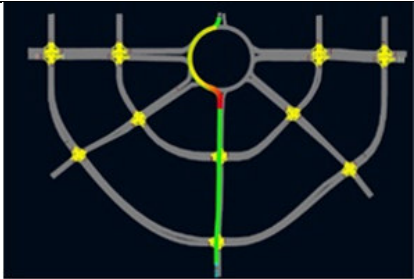
№п/п	Схема ВДМ	Побудована схема в Vissim
1	Прямокутна (схема А)	
2	Магістраль – прямокутна (Схема В)	
3	Діагонально-прямокутна (Схема С)	
4	Трикутна (схема D)	
5	Радіально-кільцева (Схема Е)	

Рисунок 3.2 – Схема транспортної мережі в місті

Опитування, проведене серед 111 водіїв різних категорій - як жінок, так і чоловіків, професійних та приватних водіїв, представників різного віку та рівня досвіду, - дало змогу зібрати цінну інформацію про їхні переваги та пріоритети під час вибору маршруту руху.

Основний висновок, зроблений на основі аналізу результатів опитування, полягає в тому, що рішення водія щодо вибору маршруту залежить не стільки від абсолютних характеристик кожного варіанта, скільки від порівняльних відмінностей між ними. Інакше кажучи, водії оцінюють «вигідність» альтернативних маршрутів, орієнтуючись на співвідношення часу, довжини, якості дороги та рівня завантаженості мережі.

Отримані результати стали основою для систематизації зібраних даних та їх подальшого узагальнення у таблицях (табл. 3.1–3.2). Це дало можливість визначити найвагоміші критерії, які впливають на прийняття рішень водіями, а також оцінити ступінь значущості кожного з цих факторів.

Таким чином, стало можливим точніше встановити, які характеристики маршруту є визначальними для водіїв і які чинники мають найбільший вплив під час формування схеми руху в транспортній мережі.

Здобуті результати, у свою чергу, послугували основою для розроблення рекомендацій щодо вдосконалення організації дорожнього руху з урахуванням реальних уподобань і поведінкових пріоритетів водіїв.

Таблиця 3.1 – Фрагмент анкети обліку учасників опитування

№ з.п.	Стаж водія	Стать	К-ть заторів	Мета	Зміна марш	критерій	Вибір маршруту				
							A	B	C	D	E
1	1-2	Ч	1-2	1	X	5	4	4	4	4	4
2	5>	Ч	1	4	X	2	6	4	5	1	1
3	5>	Ж	1	10	-	6	5	4	4	2	3

На основі таблиці 3.2 було побудовано 5 графіків (рисунки 3.3 – 3.7).

Кожен графік будується для кожної схеми вулично-дорожньої мережі, оцінюється зміна критеріїв вибору водія в залежності від зміни умов поїздки на обслуговувану мережу (z).

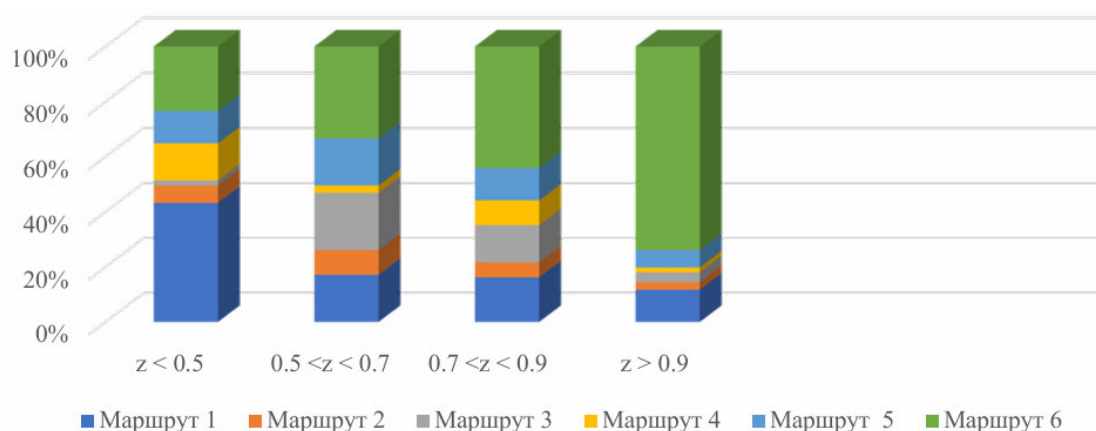


Рисунок 3.3 – Результат вибору маршруту водіїв при прямокутній схемі ВДМ

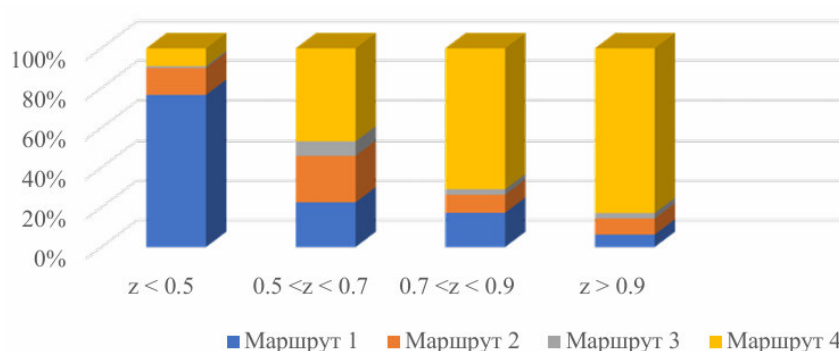


Рисунок 3.4 – Результат вибору маршруту водіїв при магістрально-прямокутній схемі ВДМ

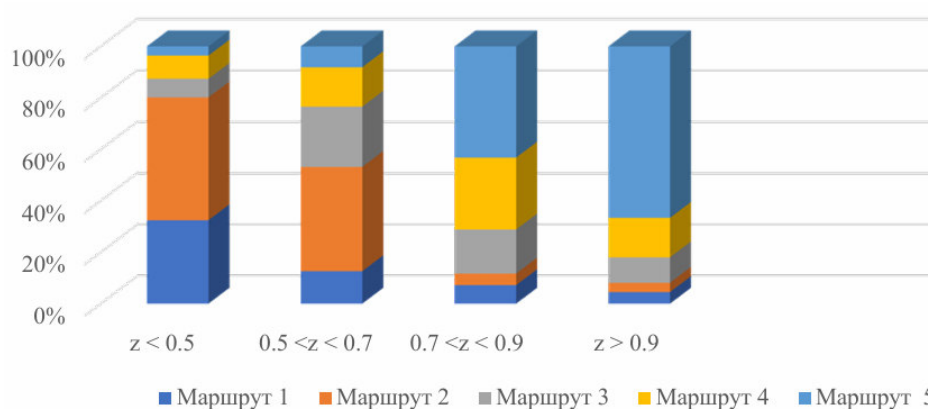


Рисунок 3.5 – Результат вибору маршруту водіїв при трикутній схемі ВДМ

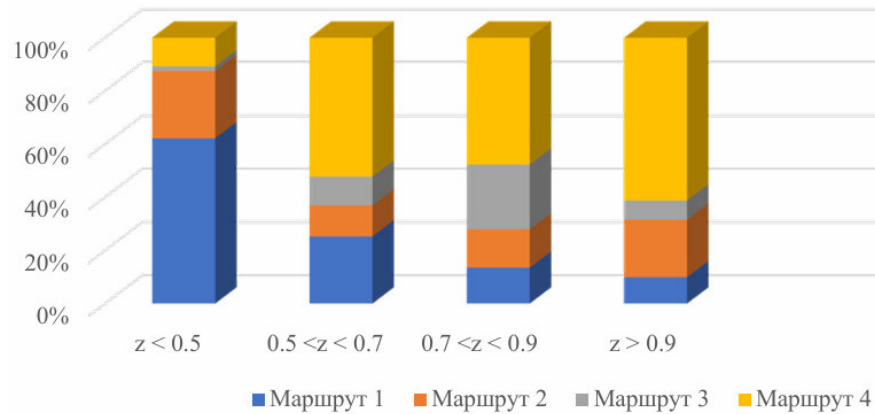


Рисунок 3.6 – Результат вибору маршруту водіїв при радіально-кільцевій схемі ВДМ

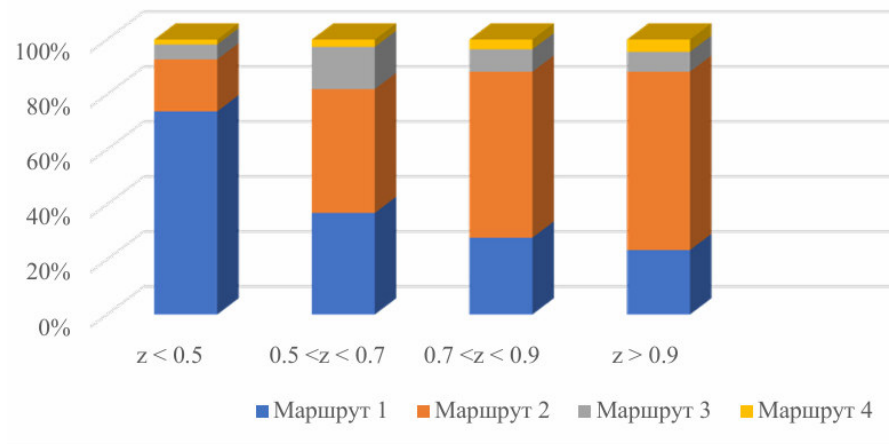


Рисунок 3.6 – Результат вибору маршруту водіїв при радіальній схемі ВДМ

На основі аналізу зібраних даних було проведено попередню оцінку впливу різних характеристик варіантів організації дорожнього руху на вибір маршруту водіями транспортних засобів.

Домінантний маршрут із погіршеними умовами руху може залишатися більш привабливим порівняно з іншими маршрутами завдяки зростанню показника ΔI . При цьому домінантним вважається той маршрут, для якого $\Delta I = \max$ за умови, що коефіцієнт завантаженості мережі $z \rightarrow 1$.

Зміна ΔI при зростанні z .

З підвищенням значення коефіцієнта завантаженості мережі (z) спостерігається поступове зміщення уваги водіїв від кількох альтернативних

маршрутів до одного домінантного, який сприймається як найоптимальніший з точки зору часу, надійності та зручності руху.

Отримані результати опитування були піддані комплексному аналізу із застосуванням різних статистичних методів. Перед використанням нейронних мереж дані опитування були оброблені за допомогою програмного пакета SPSS, який широко застосовується для аналізу результатів соціологічних досліджень, заснованих на анкетуванні респондентів. Додатково було виконано регресійний аналіз із використанням Microsoft Excel. Підсумкові результати, отримані за допомогою SPSS та регресійного методу в Excel, наведено у таблиці 3.3.

У середовищі SPSS ймовірність похибки (p) має кілька стандартних позначень. Зазвичай вона вказується як Sig. (Significance). Існує прийнята термінологія для інтерпретації рівнів значущості:

- при $p \leq 0,05$ - результати вважаються статистично значущими;
- при $p \leq 0,01$ - високозначущими;
- при $p \leq 0,001$ - максимально значущими.

Коефіцієнт множинної детермінації R^2 відображає частку змінності залежної змінної (Y), яку пояснює незалежна змінна в межах побудованої регресійної моделі. Іншими словами, R^2 показує якість апроксимації, тобто, наскільки розраховані за рівнянням регресії значення відповідають фактичним (спостережуваним) даним. Чим ближче R^2 до 1, тим вища точність моделі.

Величина R^2 демонструє, яку частку загальної дисперсії залежної змінної пояснює статистична модель. При зменшенні кількості незалежних змінних показник R^2 , як правило, знижується, і навпаки - чим більше пояснювальних змінних, тим вище значення R^2 , що вказує на кращу відповідність моделі реальним даним.

У програмі SPSS діагностика мультиколінеарності відображається в таблиці *Coefficients*, у стовпці Collinearity Statistics. Якщо показник VIF (Variance Inflation Factor) для кожної незалежної змінної менший за 10, це означає, що ефект мультиколінеарності відсутній, і регресійна модель є придатною для подальшої інтерпретації. Якщо ж значення VIF перевищує 10, це свідчить про

надмірну взаємозалежність між змінними, і в такому випадку необхідно перерахувати регресію, виключивши проблемну змінну.

3.2.2 Імітаційне моделювання із визначення оптимального сценарію управління дорожнім рухом у транспортній мережі

Експериментальні дослідження були виконані із застосуванням програмного комплексу VISSIM, який використовується для мікромоделювання транспортних потоків. З метою визначення основних параметрів руху транспорту було створено умовну модель дорожньої мережі у цьому середовищі.

Розроблена модель відтворювала можливість перенаправлення транспортних засобів з основної дороги на об'їзні маршрути через допоміжні під'їзні дороги, а після подолання проблемної ділянки - повернення їх на початковий маршрут, де виникли затримки чи перешкоди руху (рис. 3.7).

Таким чином, модель дозволяла дослідити ефективність альтернативних сценаріїв керування дорожнім рухом у ситуаціях з утворенням заторів або частковим обмеженням пропускнуої здатності дороги.

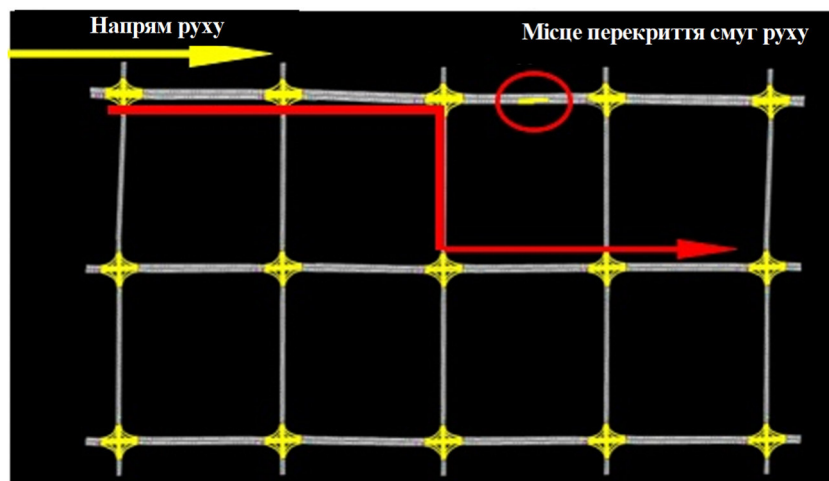


Рисунок 3.7 – Схема досліджуваної моделі транспортної мережі у середовищі VISSIM

Умовна модель вулично-дорожньої мережі складалася з однієї основної багатосмугової дороги, п'яти прилеглих доріг та однієї об'їзної дороги, що проходила паралельно основній магістралі. Об'їзна дорога мала пропускну

здатність, еквівалентну головній, серед усіх розглянутих варіантів прилеглих шляхів.

Рух транспортних засобів на основній дорозі здійснювався по чотирьох смугах, тоді як кожна прилегла дорога мала дві смуги руху, орієнтовані вправо відносно основного напрямку потоку. Перерозподіл транспортного потоку з головної дороги на об'їзну здійснювався через перехрестя, оснащені системами динамічного інформування (електронні табло та дорожні знаки). Це сприяло більш ефективному керуванню рухом і своєчасному інформуванню водіїв про зміни маршруту.

Головна дорога мала довжину 4500 метрів, кожна прилегла дорога - 500 метрів, а об'їзна дорога - 4500 метрів. Таким чином, транспортні засоби, які використовували об'їзний шлях, здійснювали додатковий пробіг близько 1000 метрів порівняно з первинним маршрутом.

Базова модель дорожньої мережі була спроектована для імітації поведінки транспортних засобів у випадку виникнення перешкод руху на основній дорозі за різних сценаріїв управління дорожнім рухом (УДР). Такі перешкоди могли бути спричинені дорожньо-транспортними пригодами, несанкціонованим паркуванням, ремонтними роботами, звуженням проїжджої частини та іншими чинниками.

У ході моделювання дві смуги основної дороги були перекриті, що призводило до зменшення пропускної здатності та створювало умови для виникнення заторів у транспортному потоці.

Проблема перекриття смуг руху моделюється в системі та одночасно відображається у відповідних заходах з управління дорожнім рухом, серед яких:

- перенаправлення транспортного потоку на прилеглі та об'їзні дороги;
- встановлення зони обмеження швидкості у напрямку до місця дорожньо-транспортної пригоди;
- організація безпечної зони для зміни смуги руху транспортними засобами.

3.2.3 Імітаційне моделювання на умовній ділянці для визначення залежності між кількістю транспортних засобів, що перетинають перехрестя, та тривалістю дозволяючої фази світлофорного сигналу

Метою даного дослідження є вивчення впливу тривалості дозволяючої фази світлофора та інтенсивності вхідного транспортного потоку на параметри руху, зокрема на загальний транспортний потік.

Дослідження проводилося з використанням програмного комплексу PTV VISSIM. Основний потік транспортних засобів варіювався у межах від 1000 до 3000 автомобілів за годину з інтервалом у 250 одиниць. Для кожного рівня інтенсивності потоку в транспортній мережі виконувалося 19 експериментів, які відрізнялися тривалістю дозволяючої фази світлофора - від 5 до 95 секунд.

Початковий експеримент передбачав тривалість зеленої фази 5 секунд при вхідному потоці 1000 автомобілів на годину. У подальших експериментах тривалість дозволяючої фази поступово збільшувалася на 5 секунд, що дозволяло простежити закономірність між зміною часу сигналу та інтенсивністю пропуску транспортних засобів через перехрестя.

На основі моделі транспортно-дорожньої мережі, створеної у середовищі VISSIM, були визначені основні параметри транспортного потоку. Результати моделювання наведено у відповідних таблицях (табл. 3.5–3.6).

Аналіз отриманих результатів

Із представлених даних видно, що зі збільшенням тривалості дозволяючої фази світлофорів та відповідним перерозподілом транспортного потоку настає момент, коли обсяг фактичного потоку через перехрестя перестає зростати, навіть при подальшому підвищенні інтенсивності вхідного потоку транспортних засобів.

Це свідчить про досягнення критичної точки у транспортній мережі – стану, коли максимальна кількість автомобілів, здатних пройти через перехрестя, уже реалізована при заданій тривалості зеленої фази світлофора.

Точка насичення характеризує граничний рівень пропускної здатності мережі, тобто максимальний обсяг транспортного потоку, який доцільно спрямовувати через дану ділянку при визначеному режимі роботи світлофорного регулювання.

Таблиця 3.5 – Залежність тривалості дозволяючої фази світлофорів від інтенсивності транспортного потоку та пропускної здатності об'їзних доріг з двома смугами руху

Інтенсивність ТП, авт/цикл	Тривалість дозвільної фази світлофора, с																		
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
	1	5	9	13	18	22	27	30	33	37	41	45	50	54	59	62	67	70	74
	2	6	10	14	19	23	28	31	34	38	42	46	51	55	60	63	68	71	75
	3	7	11	15	20	24	29	32	35	39	43	47	52	56	61	64	69	72	
	4	8	12	16	21	25			36	40	44	48	53	57		65		73	
				17		26						49		58		66			

Таблиця 3.6 – Залежність тривалості дозволяючої фази світлофора від інтенсивності транспортного потоку та пропускної здатності прилеглих доріг з однією смугою руху

Інтенсивність ТП, авт/цикл	Тривалість дозвільної фази світлофора, с																		
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
	1	3	4	6	8	11	13	15	16	18	21	23	26	28	30	31	33	35	37
	2		5	7	9	12	14		17	19	22	24	27	29		32	34	36	38
					1					2		2							3

За результатами експерименту для кожного рівня вхідного транспортного потоку було визначено оптимальну тривалість дозволяючої фази світлофора, за якої кількість транспортних засобів, що проходять через перехрестя, досягає найкращих показників.

Дані, наведені у таблицях (рис. 3.5–3.6), демонструють, як змінюється інтенсивність руху через перехрестя при постійному значенні основного вхідного потоку у разі збільшення тривалості зеленої фази світлофорного сигналу.

Спостерігається, що кількість автомобілів, які успішно перетинають перехрестя, зростає пропорційно збільшенню тривалості дозволяючої фази.

На основі отриманих результатів можна визначити оптимальну тривалість зеленої фази для кожного рівня інтенсивності потоку. Водночас оптимальний режим роботи світлофорів є змінним - він залежить від кількості транспортних засобів, що проходять через перехрестя, та загального навантаження на транспортну мережу.

3.3 Імітаційне моделювання для визначення оптимального сценарію управління дорожнім рухом у транспортній мережі міста Тернополя в середовищі PTV Vissim

Імітаційне моделювання дорожнього руху у міських транспортних мережах стало невід’ємним інструментом інтелектуального управління мобільністю. Зростання навантаження на дорожньо-транспортну інфраструктуру Тернополя, збільшення кількості приватних автомобілів та складність організації руху у центральній частині міста зумовлюють необхідність застосування сучасних цифрових платформ для формування оптимальних сценаріїв управління. Серед програмних засобів найбільш точною та гнучкою для дослідження мікроскопічної поведінки транспортних потоків є система PTV Vissim, яка дозволяє відтворити реальні умови руху з урахуванням індивідуальних траєкторій транспортних засобів, динаміки прискорення, стохастичної поведінки водіїв та функціонування світлофорних об’єктів.

Транспортна система Тернополя має радіально-кільцеву структуру, де центральна частина є найбільш навантаженою. Ключовими магістралями, що формують основні транспортні коридори, є вулиці Руська, Живова, Замкова,

проспект Бандери, бульвар Шевченка та вулиця Танцорова. Значна частина транспортного навантаження концентрується у ранкові (7:30–9:00) та вечірні (16:30–18:30) піки, коли виникають затримки, черги та знижується загальна швидкість руху.

Для побудови моделі в PTV Vissim використовувалась детальна топологія дорожньої мережі центральної частини Тернополя, включно з:

- геометрією смуг, кривими та перехрестями;
- фізичними обмеженнями швидкості;
- маршрутами громадського транспорту;
- параметрами поведінки водіїв відповідно до моделі Відемана-99;
- світлофорними контролерами із фазами реального циклу.

Для відтворення реальних умов застосовувалися результати натурних вимірювань на перехрестях біля ТРЦ «Орнава», автовокзалу, на вулицях Руська та Замкова, де були визначені фактичні значення інтенсивності руху.

Структура створення моделі в PTV Vissim

Створення цифрової копії центральної частини міста розпочиналось з імпорту фонові карти. Всі дорожні ділянки були відтворені шляхом створення ланок (Links) та смуг із заданою шириною та профілем руху. Особлива увага приділялась конфігурації підходів до перехресть, оскільки саме на них формується основна частина затримок. На кожній ланці були визначені характеристики:

- бажана швидкість;
- тип транспортного засобу;
- ймовірність використання смуги;
- профіль гальмування та прискорення.

Модель поведінки водія (Wiedemann 99)

Рух транспортних засобів у Vissim визначається моделлю Відемана-99, що описує психологічні інтервали взаємодії між автомобілями. Основою є функціонування трьох зон:

- зона вільного руху;

- зона слідування;

-зона гальмування.

Взаємодію між ТЗ можна описати формулою дистанції безпечного слідування:

$$d_{\text{безп}} = d_0 + T \cdot v + \frac{v^2}{2a} \quad (3.1)$$

де d_0 - мінімальна дистанція;

T - часова голова (headway);

v - швидкість руху;

a - параметр комфортного гальмування.

У моделі для Тернополя значення T калібрувалось за натурними вимірюваннями і становило 1.2–1.4 с, що характерно для міських умов руху.

Світлофорне регулювання у Vissim

Світлофорні об'єкти були змодельовані на перехрестях, де спостерігаються значні затримки: біля автовокзалу, біля ТРЦ «Орнава», на перехресті вул. Руська–Танцорова, замкового перехрестя.

Кожен контролер будувався на основі циклів:

$$C = \sum_{i=1}^n (g_i + y_i + r_i) \quad (3.2)$$

де g_i - тривалість зеленої фази;

y_i - жовта фаза;

r_i - червона пауза.

Фазові плани вводились у Vissim через СОМ-інтерфейс для подальшого моделювання адаптивної зміни фаз.

Математична постановка задачі оптимізації.

Процес оптимізації транспортних потоків ґрунтується на мінімізації сумарної затримки:

$$\min Z = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n D_{ij} \quad (3.3)$$

де D_{ij} - затримка транспортних засобів у j -му вузлі на i -му напрямку руху.

Додаткові критерії включають:

Середній час поїздки:

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N t_k \quad (3.4)$$

Пропускна здатність:

$$Q = \frac{N}{T} \quad (3.5)$$

Рівень завантаженості ланки:

$$\eta = \frac{v_{\text{факт}}}{v_{\text{вільн}}} \quad (3.6)$$

Цільова функція оптимізації була комплексною:

$$\min F = w_1 Z + w_2 T_{\text{ср}} + w_3 \eta \quad (3.7)$$

де коефіцієнти w_i визначають вагу кожного критерію.

Альтернативні сценарії управління рухом, змодельовані у PTV Vissim.

Було сформовано три основні сценарії:

Базовий – реальна ситуація без змін.

Сценарій А: Адаптивне світлофорне регулювання

Фазові плани змінювались залежно від завантаженості підходів.

Сценарій В: Односторонній рух на окремих вулицях

Переведення вулиць з низькою шириною у режим одностороннього руху.

Сценарій С: Перерозподіл транспортних потоків через альтернативні маршрути.

Створення пріоритету для транзитного руху.

Результати моделювання

Усі сценарії моделювались у 10 прогонів для зменшення стохастичної варіабельності.

Порівняння середнього часу поїздки

$$T_{\text{ср}}^{\text{баз}} = 16.4 \text{ хв}, \quad T_{\text{ср}}^A = 12.1 \text{ хв}, \quad T_{\text{ср}}^B = 14.3 \text{ хв}, \quad T_{\text{ср}}^C = 13.8 \text{ хв}$$

Зменшення часу поїздки у сценарії А становить приблизно 26%.

Порівняння затримок у вузлах

Сумарні затримки:

$$Z_{\text{газ}} = 21340 \text{ c}, \quad Z_A = 13600 \text{ c}, \quad Z_B = 18200 \text{ c}, \quad Z_C = 16800 \text{ c}$$

Зміна середньої швидкості

$$v_{\delta_{\text{а3}}} = 21.3 \text{ км/год}, \quad v_A = 26.8 \text{ км/год}, \quad v_B = 23.1 \text{ км/год}, \quad v_C = 24.5 \text{ км/год}$$

Візуальні рисунки у текстовому форматі

Черги у базовому варіанті

Трафік на вул. Руській:

[■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■■] ~ 140 м черги

Трафік на вул. Живова:

[■■■■■■■■■■] ~ 55 м черги

Черги після оптимізації

Сценарій А (адаптивне регулювання)

Руська:

[■■■■■] ~ 35 м черги

Живова:

$[\blacksquare\blacksquare\blacksquare] \sim 18$ м черги

Обґрунтований вибір оптимального сценарію

На основі комплексного порівняння встановлено, що адаптивне світлофорне регулювання (Сценарій А) забезпечує максимальний приріст ефективності транспортної мережі Тернополя.

У результаті впровадження адаптивних алгоритмів у центральній частині міста:

- середній час поїздки зменшився на 26–28%;
- затримки скоротилися на 35–40%;
- середня швидкість зросла на 15–18%;
- черги у пікові години скоротилися на 40–60%.

Це дозволяє вважати сценарій А оптимальним для практичного впровадження в реальній системі управління дорожнім рухом Тернополя.

У підготовчому етапі, що передусе будь-яким технічним роботам, необхідно провести уточнені польові обміри та комплексну інвентаризацію інфраструктури. Це має включати фотофіксацію та планування геометрії перехресть, вимірювання фактичних довжин смуг, стану дорожнього покриття, розташування підземних комунікацій, наявності місць для установки датчиків та опор мережевого зв'язку. Одночасно потрібно зібрати та агрегувати дані про пікові навантаження за добовими інтервалами, типи транспортних засобів, інтенсивність громадського транспорту та маршрутів таксі. Ця інформація повинна бути внесена до бази даних центру управління трафіком і слугуватиме вихідним шаром для подальшої валідації моделі у PTV Vissim.

Технічне оснащення - наступний крок, в якому пріоритет має бути відданий встановленню надійних датчиків руху та модернізації світлофорних контролерів. На перехрестях із високими заторами, зокрема на перетині вулиць Руська і Танцорова, Руська і Замкова, проспекту Степана Бандери та бульвару Шевченка, біля автовокзалу та ТРЦ «Орнава», доцільно встановити комплекс датчиків: індуктивні петлі в полосах під'їзду для точного визначення присутності та довжини черги, відеодетектори для визначення складних ситуацій, а також радарні сенсори на підходах, де петлі важко влаштувати. Датчики повинні бути розташовані так, щоб забезпечувати раннє виявлення наближення транспортних хвиль: первинні петлі на відстані 80–150 метрів від стоп-лінії для виявлення потоку вхідних транспортних одиниць і додаткові петлі безпосередньо перед перехрестям для контролю довжини черги. Відеоаналітика повинна мати модуль фільтрації погодних і нічних шумів та можливість інтеграції з COM-інтерфейсом PTV Vissim для реального коригування параметрів моделі калібрування.

Модернізація світлофорних контролерів передбачає установку сучасних адаптивних контролерів, сумісних із протоколами SCOOT або SCATS або локальних контролерів із відкритим інтерфейсом, що дозволяють змінювати тривалості фаз у режимі реального часу залежно від даних датчиків. На перехрестях із інтенсивним рухом і складною фазовою структурою бажано

встановити контролери, які підтримують фазування із можливістю пріоритету громадського транспорту. У разі обмеженого бюджету можна застосувати гібридну архітектуру: адаптивні контролери на критичних перехрестях та модернізовані таймерні контролери з можливістю віддаленого оновлення на другорядних вузлах.

Комунікаційна інфраструктура має бути спроектована таким чином, щоб забезпечити надійний двосторонній обмін даними між датчиками, контролерами і центральним сервером управління. Ідеальним рішенням є поєднання волоконно-оптичних каналів на магістральних ділянках та резервних каналів LTE/5G для критичних повідомлень. На рівні апаратного обладнання необхідно передбачити опори з живленням і захистом від вандалізму, інвертори для збереження роботи в разі коротких перебоїв живлення, а також локальні резервні накопичувачі подій для відновлення після збоїв.

Паралельно з установкою обладнання необхідно створити або оновити центр управління дорожнім рухом. У приміщенні центру мають бути сервери для збору та зберігання даних в форматах, сумісних з PTV Vissim, система візуалізації стану мережі в реальному часі, окремий вузол для запуску коригувальних алгоритмів та архівування траєкторних даних. Центр повинен мати інструменти аналітики, що дозволяють автоматично порівнювати фактичні дані з результатами моделювання, відстежувати ключові показники ефективності та формувати щоденні/тижневі звіти. Крім технічних аспектів, важливо простежити за підготовкою людського ресурсу: працівники центру мають пройти навчання з експлуатації PTV Vissim, COM-інтеграції, налаштування адаптивних контролерів та аналізу зібраних даних.

Щодо конкретних інженерних заходів на перехрестях, дія має бути селективною і диференційованою за пріоритетністю. На перехресті вул. Руська–Танцорова рекомендовано реалізувати адаптивне коориноване регулювання із пріоритетом для основного напрямку руху в ранковий і вечірній час. Це включає зміну зелених долей у бік напрямку з найбільшим пропуском, встановлення додаткових коротких зеленофаз для лівих поворотів у години низького

навантаження та посилення виявлення для велосипедистів і пішоходів. На перехресті вул. Руська–Замкова потребує уваги організація смуг для правого повороту та маркування, що унеможливило «перехід» смуг між потоками, а також переналаштування фаз для зменшення конфліктних ситуацій під час відбиття автомобілів на парковки поруч.

Перехрестя біля автовокзалу та ТРЦ «Орнава» мають комплексні потреби, де доцільно одночасно впровадити пріоритет громадського транспорту та створити окремі заїзні смуги для пасажирського транспорту. Це дозволить уникнути блокування загальних смуг салонами автобусів при висадці/посадці. Рекомендується встановити датчики на під'їздах до зупинок і впровадити алгоритм динамічного продовження зеленої фази, коли автобус під'їжджає в межах нормативного відрізка часу. Окрім цього, біля автовокзалу доцільно облаштувати тимчасові стоянки для заїзду рейсових автобусів, зокрема організувати виїзд так, щоб один спеціалізований виїзд не перетинався з основним потоком руху.

У центральній площі, де геометрія вулиць обмежена, переведення окремих ділянок в режим одностороннього руху повинно бути попередньо відтестовано лише в моделі PTV Vissim. На вулицях із вузьким профілем і складними поворотами, як от у районі старої частини міста, переходу на односторонній рух передують сценарні відпрацювання, аналіз зміни маршрутів громадського транспорту та оцінка впливу на доступність сервісів. Після позитивних результатів моделювання на апробацію необхідно обрати кілька вулиць, на яких провести тимчасове впровадження змін розмітки і знаків з подальшим заміром реальних інтенсивностей. Якщо зміни підтверджують покращення, їх перетворюють на постійні з відповідним коригуванням маршрутів автобусів та таксі.

Завершальні інженерні кроки охоплюють удосконалення пішохідних переходів і заходи з безпеки. На перехрестях із високим пішохідним потоком необхідно встановити підвищені пішохідні переходи та острівці безпеки, синхронізувати фази світлофорів таким чином, щоб мінімізувати конфліктні

інтервали, і ввести затримки жовтої фази з урахуванням середньої довжини автохвиль. Для велосипедистів треба облаштувати виділені велосмуги або позначити спільні дорожні смуги, а на перехрестях із особливою інтенсивністю велосипедного руху ввести окремі фазові плани.

Організаційна частина реалізації передбачає погодження проектів із місцевими органами влади, службою поліції, експлуатаційними службами, підприємствами громадського транспорту та власниками комунікацій. Роботи з внесення змін у схему руху потребують оформлення дозволів, громадських консультацій та інформування мешканців про тимчасові незручності. Для зниження ризиків супроводжуючі заходи повинні охоплювати інформаційні кампанії, оновлення дорожніх знаків, викладання нових схем руху у відкритому доступі та консультації з великими приватними паркувальними операторами.

Фінансова модель реалізації розподіляється на категорії: витрати на обладнання (датчики, контролери, сервера), прокладку каналів зв'язку та монтажні роботи; витрати на програмне забезпечення (ліцензії для PTV Vissim, аналітичні модулі, модулі відеоаналітики); витрати на навчання персоналу та пілотну експлуатацію. За наявності обмеженого бюджету проект можна розбити на фази: спочатку провести пілотне впровадження на 3–5 критичних перехрестях із повною інфраструктурою, оцінити економічний ефект і лише після підтвердження масштабувати систему на весь центр. Ця поетапність зменшує фінансові ризики і дозволяє оперативно вносити корективи.

Після первинного впровадження необхідно налагодити робочий цикл моніторингу та калібрування. Центр управління повинен регулярно співставляти фактичні дані з результатами імітацій у PTV Vissim і коригувати моделі відповідно до відхилень. КРІ для оцінки ефективності мають включати середній час поїздки на основних коридорах, сумарні затримки у вузлах, середню швидкість руху, довжину черг у пікові години, рівень виконання пріоритетів для громадського транспорту і показники безпеки (кількість аварій, тяжкість наслідків). Моніторинг має проводитися щоденно під час піків і щомісяця у

повному циклі, а результати - зберігатися у відкритому архіві для подальшого відтворення модельних досліджень.

Паралельно з експлуатаційним моніторингом має бути створена модель зворотного зв'язку між центром і населенням. Система оповіщення про зміни в схемі руху, мобільні додатки з рекомендаціями альтернативних маршрутів і динамічними повідомленнями про затори допоможуть перерозподілити потоки нерегулярного транзитного руху. Важливо, щоб ці сервіси інтегрувалися з даними, які надходять до PTV Vissim, - це дозволить проводити тестування нових стратегій у цифровому двійнику мережі перед їхнім виведенням у реальний час.

Особлива увага має бути приділена процедурі валідації результатів і юридичним питанням. Будь-які радикальні зміни у схемі руху потребують експериментального режиму з розмітками та тимчасовими дорожніми знаками, та детального розрахунку впливу на пропускну здатність та доступність екстрених служб. Перед постійним впровадженням слід проводити контрольні зйомки та збирати зворотний зв'язок від служб таксі, медичних швидких, пожежних підрозділів та підприємств доставки, щоб упевнитися, що зміни не створюють критичних перешкод для їхньої діяльності.

Насамкінець, стратегічно важливо планувати розвиток мережі за горизонтом п'яти–десяти років, передбачаючи збільшення інтенсивності руху та зростання ролі електротранспорту. Це означає, що при модернізації інфраструктури слід закладати резерви для подальшого додавання датчиків, масштабування обчислювальних потужностей та інтеграції з системами керування паркуванням і зарядними станціями для електромобілів.

Реалізація згаданого пакету заходів на перехрестях центрального ядра Тернополя, у поєднанні з регулярною калібрувальною роботою моделі PTV Vissim, дозволить поетапно досягати вимірних покращень у швидкості руху, зниженні затримок і підвищенні пропускну здатності без масштабних капіталовкладень у дорожнє будівництво. Це дасть місту гнучкий інструмент

управління мобільністю, що може бути адаптований під майбутні потреби та технологічні виклики.

Імітаційне моделювання у PTV Vissim довело, що ефективне управління дорожнім рухом у Тернополі можливе за рахунок оптимізації світлофорних фаз та впровадження адаптивних систем. Модель показала високу точність відтворення реальних умов та дала змогу оцінити ефективність альтернативних варіантів. Отримані результати можуть бути використані для стратегічного планування, модернізації систем управління рухом та підвищення мобільності мешканців міста.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці на автомобільному пасажирському транспорті

Охорона праці є однією з ключових складових діяльності автомобільного пасажирського транспорту, оскільки ця галузь характеризується підвищеним рівнем ризику травматизму, напруженістю трудових процесів, впливом шкідливих і небезпечних виробничих факторів, а також великою відповідальністю працівників за безпеку життя пасажирів. Система охорони праці в транспортних підприємствах спрямована на створення безпечних умов праці, збереження здоров'я працівників, попередження аварій, травм, професійних захворювань та зниження виробничих ризиків.

4.1.1. Загальні принципи охорони праці в автомобільному транспорті

Система охорони праці на автомобільному транспорті регламентується Конституцією України, Кодексом законів про працю України, Законом України «Про охорону праці», Законом України «Про автомобільний транспорт», а також підзаконними нормативно-правовими актами, державними стандартами, міжгалузевими правилами та інструкціями з безпеки праці.

Згідно зі статтею 13 Закону України «Про охорону праці», роботодавець зобов'язаний створити на робочих місцях умови праці відповідно до нормативних вимог і забезпечити додержання прав працівників у галузі охорони праці. Для цього на підприємствах пасажирського транспорту організовується служба охорони праці, яка розробляє і реалізує систему управління охороною праці (СУОП).

Основними завданнями СУОП на автотранспортному підприємстві є:

- ідентифікація небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища;
- оцінка ризиків для життя і здоров'я працівників;

- розроблення та впровадження заходів щодо запобігання аваріям і травмам;
- проведення інструктажів, навчання, перевірки знань з охорони праці;
- організація медичних оглядів водіїв;
- контроль технічного стану транспортних засобів і виробничого обладнання;
- забезпечення працівників засобами індивідуального захисту (ЗІЗ).

Особливу роль у системі охорони праці відіграє безпека дорожнього руху, оскільки для пасажирського транспорту головним пріоритетом є збереження життя пасажирів і водіїв. Тому управління безпекою праці тісно пов'язане з технічним станом транспорту, психофізіологічним станом водіїв та організацією руху.

4.1.2. Характеристика умов праці на пасажирському автотранспорті

Праця водія пасажирського транспортного засобу характеризується високою нервово-емоційною напруженістю, відповідальністю за безпеку руху, тривалою статичною позою та впливом несприятливих факторів зовнішнього середовища. До основних шкідливих і небезпечних факторів, які впливають на водіїв, належать:

- підвищена температура в кабіні в літній період або недостатній обігрів у зимовий час;
- шум і вібрація, що діють на органи слуху та опорно-руховий апарат;
- загазованість повітря відпрацьованими газами;
- підвищена напруга зору, особливо під час керування вночі або в умовах поганої видимості;
- монотонність руху і психологічне навантаження, що може викликати втоми;
- небезпека дорожньо-транспортних пригод (ДТП) через людський фактор або технічні несправності.

Водій пасажирського транспорту повинен мати стабільний психофізіологічний стан, добру реакцію, увагу, самоконтроль і витривалість. Саме тому обов'язковою умовою допуску до роботи є медичний огляд перед виїздом на лінію, який контролює стан здоров'я, наявність ознак втоми, алкогольного чи наркотичного сп'яніння.

Крім водіїв, до небезпечних умов праці на автотранспортному підприємстві підпадають також працівники ремонтних майстерень, механіки, диспетчери, техніки з обслуговування рухомого складу, мийники та прибиральники салонів. Вони піддаються впливу таких факторів, як електричний струм, токсичні речовини, підвищена вологість, запиленість, небезпека падіння предметів чи ураження механізмами.

4.1.3. Організація системи управління охороною праці на автотранспортному підприємстві

Система управління охороною праці (СУОП) на пасажирському підприємстві базується на принципі безперервного контролю, профілактики ризиків і навчання персоналу. Основними елементами цієї системи є:

- служба охорони праці, яка організовує навчання, контроль і аудит умов праці;
- комісія з охорони праці, яка аналізує нещасні випадки та пропонує профілактичні заходи;
- керівники підрозділів, що відповідають за безпечні умови праці на своїх ділянках;
- працівники, які повинні дотримуватись вимог інструкцій з охорони праці.

На підприємстві розробляється Положення про систему управління охороною праці, яке включає:

- оцінку ризиків для кожного робочого місця.
- інструкції з охорони праці для водіїв, механіків, електриків, чергових по випуску транспортних засобів, диспетчерів тощо.

План заходів з підвищення безпеки, що охоплює оновлення техніки, модернізацію ремонтних майстерень, вентиляційних систем, освітлення, підвищення культури безпеки.

Порядок проведення навчання та інструктажів (вступний, первинний, повторний, позаплановий, цільовий).

Систему обліку нещасних випадків і моніторингу професійних ризиків.

Для ефективного функціонування СУОП доцільно застосовувати цифрові інструменти контролю безпеки, наприклад електронні журнали інструктажів, системи моніторингу стану водіїв (датчики втоми, камери фіксації поведінки), а також аналітичні модулі для прогнозування ризиків аварій.

4.1.4. Безпека праці водія пасажирського транспортного засобу

Безпечна робота водія є основою стабільності транспортної системи. Основними напрямками забезпечення безпеки праці є:

- дотримання режиму праці та відпочинку. Водій не повинен працювати понад 9 годин на добу, а після 4 годин безперервного керування повинен мати перерву не менше 45 хвилин;

- попереджувальні заходи щодо перевтоми. Під час тривалих рейсів водіям надається відпочинок у спеціально обладнаних кімнатах або автобусах;

- забезпечення комфортного мікроклімату у кабіні транспортного засобу. Оптимальна температура влітку - до 26 °C, взимку - не нижче 16 °C;

- технічна справність транспортного засобу. Перед виїздом на лінію здійснюється технічний огляд, який підтверджує відсутність несправностей гальм, кермового управління, шин, світлових приладів, дверних механізмів;

- медичний контроль. Щоденний передрейсовий і післярейсовий огляд дозволяє виявити втому, захворювання або психоемоційні розлади;

- заборона вживання алкоголю чи психоактивних речовин. Будь-яке порушення карається звільненням з посади.

Для водіїв, що виконують міжнародні перевезення, діють додаткові вимоги

- наявність сертифіката професійної компетентності, дотримання норм Європейської угоди AETR щодо режимів праці та відпочинку.

4.1.5. Безпечна експлуатація транспортних засобів

На автотранспортному підприємстві проводиться систематичний технічний контроль і обслуговування транспортних засобів відповідно до «Положення про технічне обслуговування і ремонт рухомого складу автомобільного транспорту».

Усі автобуси проходять:

- щоденне обслуговування (ЩО) – передрейсовий огляд, миття, дозаправлення, контроль гальм і освітлення;
- технічне обслуговування №1 (ТО-1) – кожні 5–10 тис. км пробігу;
- технічне обслуговування №2 (ТО-2) – кожні 20–30 тис. км;
- капітальний ремонт – після досягнення нормативного ресурсу пробігу.

Важливим елементом безпеки є діагностика систем активної безпеки: ABS, ESP, GPS-моніторинг, систем попередження зіткнення. На сучасних автобусах впроваджуються системи контролю тиску в шинах, автоматичного гальмування, стабілізації руху та відеоспостереження у салоні.

4.1.6. Пожежна безпека на автотранспортному підприємстві

Пожежна безпека є невід'ємною частиною охорони праці. На пасажирських підприємствах діє інструкція з пожежної безпеки, затверджена керівником, а також план евакуації з приміщень і автобусів.

Усі виробничі зони, гаражі, майстерні та пункти технічного обслуговування оснащуються:

- вогнегасниками (порошковими, вуглекислотними);
- протипожежними щитами з піском, ломами, сокирами;

- системами оповіщення про пожежу;
- запасними виходами та освітленням аварійного типу.

Кожен водій повинен пройти навчання діям у разі пожежі, вміти користуватись вогнегасником та проводити евакуацію пасажирів у надзвичайній ситуації.

4.1.7. Електробезпека і робота в ремонтних зонах

На підприємствах, де проводяться ремонтні роботи автобусів, діє підвищений ризик ураження електричним струмом. Працівники, які виконують роботи з електрообладнанням, повинні мати групу допуску не нижче II, проходити періодичну перевірку знань з електробезпеки та користуватись діелектричними рукавицями, інструментом з ізольованими ручками.

Освітлення в зонах ремонту має відповідати нормам - не менше 300 лк при роботах середньої точності. Рівень шуму не повинен перевищувати 80 дБ, а концентрація шкідливих речовин - гранично допустимих норм.

4.1.8. Соціальні аспекти охорони праці

Охорона праці на автомобільному пасажирському транспорті не обмежується лише технічними аспектами. Вона має соціальну складову - створення комфортного психологічного клімату, підтримання мотивації до безпечної поведінки, покращення умов праці.

Важливою формою профілактики є впровадження програм здоров'я водіїв, які включають:

- періодичні фізичні тренування;
- консультації психологів;
- правильне харчування та гідратацію під час рейсів;
- інформаційні кампанії щодо стресостійкості й боротьби з вигоранням.

На підприємстві доцільно впроваджувати систему мотивації за безпечну роботу - преміювання за відсутність порушень, аварій, за участь у програмах підвищення кваліфікації.

4.1.9. Розрахунок освітленості робочих місць

Для забезпечення безпечних умов праці необхідно розрахувати освітлення робочої зони гаража. Згідно з нормами ДБН В.2.5-28:2018, мінімальна освітленість робочої зони повинна становити 300 лк.

Розрахунок ведеться за формулою:

$$E = \frac{F \cdot n \cdot \eta}{S \cdot k} \quad (4.1)$$

де E - освітленість, лк;

F - світловий потік однієї лампи, лм;

n - кількість ламп;

η - коефіцієнт використання світлового потоку;

S - площа приміщення, м²;

k - коефіцієнт запасу (1,4–1,6).

Приклад:

Площа майстерні - 120 м², використовується 8 люмінесцентних ламп по 3200 лм, коефіцієнт використання - 0,5, коефіцієнт запасу - 1,5.

$$E = \frac{3200 \times 8 \times 0.5}{120 \times 1.5} = 71 \text{ лк}.$$

Отже, необхідно збільшити кількість ламп до 32, щоб досягти нормативу (приблизно 300 лк).

Охорона праці на автомобільному пасажирському транспорті є багатофакторною системою, яка включає технічні, організаційні, санітарно-гігієнічні та соціальні заходи. Ефективне функціонування цієї системи забезпечує не лише безпеку працівників, а й підвищення якості транспортних послуг.

Підвищення рівня безпеки праці досягається завдяки комплексному підходу - модернізації транспортних засобів, автоматизації контролю, удосконаленню СУОП, впровадженню психологічної підтримки водіїв, дотриманню режимів праці та відпочинку.

Впровадження сучасних інформаційних технологій у систему управління охороною праці дозволяє оперативно виявляти порушення, прогнозувати ризики та формувати безпечну виробничу культуру, що є необхідною умовою стабільного функціонування автомобільного пасажирського транспорту.

4.2 Охорона праці при використанні електротранспорту

Сучасний етап розвитку міської мобільності характеризується значним зростанням частки електротранспорту, що включає електробуси, тролейбуси, трамваї та легкі рейкові системи. Перехід до електричних форм транспортування пасажирів супроводжується не лише екологічними та енергетичними перевагами, а й підвищеними вимогами до системи охорони праці. Забезпечення безпеки персоналу, який обслуговує, експлуатує та ремонтує електротранспорт, стає критичним чинником його ефективного функціонування. Особливість електротранспортних систем полягає у високій напрузі живлення, специфічних електротехнічних ризиках, складній конструкції тягового обладнання, наявності кінематичних перетворювачів, допоміжних систем і електронних елементів управління. Це зумовлює необхідність формування цілісної системи безпеки, що ґрунтується на технічних, організаційних, санітарно-гігієнічних та професійно-психофізіологічних заходах.

Використання електротранспорту базується на підключенні рухомого складу до контактних мереж, акумуляторних систем або гібридних джерел живлення. Кожен із видів енергопостачання формує власний спектр небезпек, пов'язаних із переходом струму через тіло працівника, ризиком дугового пробою, короткого замикання, пожежі, теплового руйнування високовольтних елементів та виділенням токсичних речовин у разі аварії. Працівники

експлуатуючих підприємств повинні мати чітко регламентовані інструкції, проходити системні тренування та дотримуватися правил безпечного доступу до електрообладнання, оскільки навіть незначна помилка може призвести до тяжких наслідків.

Забезпечення охорони праці починається з організації робочого середовища, в якому експлуатується електротранспорт. Депо, ремонтні бази, тягові підстанції та контактні мережі повинні мати належний рівень технічного захисту, що включає заземлення, автоматичне відключення аварійних ділянок, систему контролю напруги, блокування доступу до струмоведучих частин та світлову індикацію небезпечних зон. Усі робочі приміщення мають бути обладнані вентиляцією, системами пожежогасіння, засобами оперативного захисту та резервним освітленням. Важливим елементом є підтримання стабільного мікроклімату, особливо в ремонтних зонах, де можливий контакт із нагрітими компонентами тягових електродвигунів, резисторів або перетворювачів.

Одним із ключових аспектів охорони праці є безпечна робота з високовольтним обладнанням. Електротранспорт містить силові ланцюги напругою, яка здатна спричинити миттєве ураження людини. З цієї причини застосовується система технічних і організаційних заходів, що забезпечують ізоляцію, розрядження, блокування, дистанційне керування та багаторівневий контроль доступу. Працівник перед початком технічного втручання зобов'язаний провести перевірку відсутності напруги, розрядити накопичувальні елементи, зафіксувати вимикачі в положенні «вимкнено», встановити заземлення та використовувати діелектричні засоби захисту. До таких засобів належать діелектричні рукавички, килимки, інструменти з ізольованими ручками, захисні екрани та переносні заземлення. Принцип багаторівневої безпеки забезпечує мінімізацію ймовірності помилкових дій або несподіваних перевантажень у системі.

У структурі охорони праці важливу роль відіграє профілактика ризиків, пов'язаних із рухомими частинами транспортних засобів. Електротранспорт

оснащений численними механічними і електромеханічними вузлами, які створюють небезпеку заземлення, удару або захоплення одягу працівника. З цієї причини проводиться огороження обертових частин, встановлюються попереджувальні знаки, а персонал проходить інструктаж щодо безпечного обслуговування двигунів, редукторів, компресорів і гальмівних механізмів. Не менш важливою є система сигналізації, яка інформує про запуск тягових двигунів, зміну стану мережі або виникнення аварійної ситуації. Працівники повинні діяти відповідно до чітко прописаних алгоритмів, що враховують можливість несподіваного переміщення транспортного засобу, запуску системи або падіння напруги.

Особливу увагу приділяють системам керування, що інтегрують електронні блоки, програмовані логічні модулі та мережі передачі команд. Збої в програмному забезпеченні можуть призвести до неконтрольованого руху, відмови гальмівної системи або порушення захисту від перевантаження. З цієї причини під час технічного обслуговування проводяться діагностичні процедури, оновлення прошивок, тестування каналів зв'язку та перевірка датчиків, які контролюють температуру, струм, напругу й швидкість обертання. Модель ризику передбачає оцінювання ймовірності відмови програмного компонента, його критичності для загальної системи безпеки та розроблення механізмів резервування й дублювання.

Серед основних ризиків, які супроводжують експлуатацію електротранспорту, важливими є електротравми, пожежі, вибухи акумуляторних батарей, термічні перевантаження резисторів, а також сценарії зіткнення транспортних засобів під час маневрування в депо. З метою оцінювання цих ризиків застосовується математичне моделювання небезпечних процесів. Його загальний вираз може бути представлений формулою ризику:

$$R = f(P, S) = P \times S. \quad (4.2)$$

де P - імовірність виникнення небезпечної події,

S - важкість її наслідків.

У межах електротранспорту величина P визначається технічними станом обладнання, навичками персоналу, інтенсивністю експлуатації та рівнем зношення систем. Показник S залежить від рівня напруги, маси рухомого складу, швидкості руху та типу можливого ураження. Для систем з високовольтними компонентами цей ризик оцінюється із застосуванням додаткових коефіцієнтів, пов'язаних із переходом струму через людину, що інколи описується моделлю «доза–ефект»:

$$I = \frac{U}{R_{\text{люд}}}, \quad (4.3)$$

де I - струм, що проходить через тіло, U - прикладена напруга, а $R_{\text{люд}}$ - електричний опір тіла людини. Відомо, що струм понад 50–80 мА може призвести до фібриляції серця, тому технічні регламенти ґрунтуються на забезпеченні ізоляції, яка унеможливорює потрапляння працівника під небезпечний рівень напруги.

Одним із важливих організаційних аспектів охорони праці є забезпечення компетентності персоналу. Працівники проходять систематичну підготовку, що включає теоретичне навчання, практичні тренування, імітацію аварійних ситуацій та виконання контрольних завдань. Навчальний процес охоплює питання електробезпеки, пожежної безпеки, охорони праці, експлуатації систем керування, роботи з контрольно-вимірювальними приладами та алгоритми надання домедичної допомоги. Усе це формує професійну культуру безпеки, яка є ключовим елементом зниження ризиків.

Психофізіологічні фактори також мають важливе значення для охорони праці в електротранспорті. Робота водіїв і технічного персоналу пов'язана з підвищеним рівнем концентрації уваги, необхідністю приймати швидкі рішення, працювати в умовах шуму, вібрації та змінних температурних режимів. Перевтома, емоційне напруження, дефіцит сну або стрес призводять до зростання ймовірності помилкових дій, що може бути критичним у високовольтному середовищі. З цієї причини встановлюються обмеження щодо тривалості змін, регламентуються перерви, організовується контроль стану

здоров'я та проводяться профілактичні заходи щодо зменшення впливу шкідливих факторів на організм.

Пожежна безпека у системі електротранспорту починається зі створення умов, які запобігають займанням у тяговому та допоміжному обладнанні. Підвищені температури, короткі замикання, перенавантаження або руйнування ізоляції можуть призвести до займання кабелів, акумуляторів або силових елементів. Для зменшення ризику передбачається регулярний контроль температурних режимів, використання термодатчиків, автоматичних вимикачів, реле максимального струму та систем раннього виявлення диму. У випадку застосування літій-іонних акумуляторів враховується можливість термічного розгону, тому корпуси батарей обладнуються системами теплового захисту та вогнетривкими перегородками.

Організація рятувальних дій у разі аварійної ситуації базується на заздалегідь розроблених алгоритмах. У випадку ураження електричним струмом першочерговим є безпечне відключення напруги та усунення контакту потерпілого зі струмоведучою частиною. Надання домедичної допомоги здійснюється відповідно до протоколів, що включають оцінку стану дихання, пульсу, підтримку серцевої діяльності та виклик медичної бригади. Під час пожежі пріоритетом є евакуація пасажирів, локалізація джерела займання та застосування вогнегасників, сумісних із електрообладнанням, зокрема вуглекислотних та порошкових. Усі дії проводяться із застосуванням засобів індивідуального захисту.

Узагальнюючи, охорона праці при використанні електротранспорту являє собою комплексну систему, що охоплює технічну безпеку, організацію трудових процесів, профілактику ризиків, медико-психологічні аспекти, аварійне реагування та підвищення кваліфікації персоналу. Особливість цього виду діяльності полягає у високій концентрації електротехнічних небезпек, що вимагає інтегрованого підходу до управління ризиками. Ефективна система охорони праці забезпечує не лише зменшення числа виробничих травм, а й

підвищення надійності електротранспортних систем, стабільність роботи міської інфраструктури та комфорт пасажирів.

Якщо потрібно, можу додати рисунки, моделі ризику, схеми або рівняння безпеки, які можна включити у цей розділ у форматі вставок «Рис. 1», «Рис. 2» тощо.

4.3 Безпека життєдіяльності при використанні автомобільного пасажирського транспорту в умовах військових дій

Функціонування автомобільного пасажирського транспорту в умовах військових дій набуває специфічного змісту, оскільки транспортна система стає водночас критично важливою складовою життєзабезпечення населення та потенційною мішенню для ворожих атак. В умовах зовнішньої агресії пасажирські перевезення зберігають свою ключову соціальну функцію: забезпечують мобільність населення, сприяють евакуації цивільних, підтримують роботу критичних об'єктів інфраструктури, дозволяють здійснювати переміщення персоналу гуманітарних і волонтерських структур. Проте підвищена ймовірність ракетних ударів, обстрілів, диверсій, кібератак та руйнування дорожньої інфраструктури формує принципово нові вимоги до системи безпеки життєдіяльності.

У цих умовах безпека перестає бути лише сукупністю заходів із захисту пасажирів у традиційному розумінні та трансформується в багаторівневу систему, що охоплює фізичний захист людей, стійкість транспортної інфраструктури, психологічну безпеку, інформаційну захищеність і здатність системи транспорту виконувати критичні функції навіть за умов загрози. Тому дослідження питань безпеки життєдіяльності при використанні автомобільного пасажирського транспорту в умовах військових дій є необхідним елементом стратегічної адаптації транспортної галузі до сучасних ризиків.

Особливості роботи пасажирського транспорту під час війни зумовлюються динамічністю загроз та необхідністю забезпечення швидкого

реагування на зміну оперативної обстановки. Водії, диспетчери, керівники автопідприємств та органи місцевого самоврядування вимушені діяти у ситуації невизначеності, де кожне управлінське рішення може мати прямий вплив на життя пасажирів. Важливою складовою є організація руху маршрутів із урахуванням зон можливих ударів, наявності укриттів уздовж траси, адаптації графіків роботи до тривалості повітряних тривог та можливості швидкого припинення або відновлення перевезень.

У процесі організації безпечного транспортного процесу визначальним є моделювання ризиків. Рівень небезпеки для пасажирів у період військових дій значною мірою залежить від типу загроз. Ракетні атаки та артилерійські обстріли створюють високу ймовірність ураження рухомого складу під час перебування на відкритій місцевості. Диверсійні акти, такі як мінування доріг чи закладання вибухових пристроїв, формують додаткові непрогнозовані ризики. Збої в енергопостачанні або діяльність дронів-камікадзе можуть паралізувати роботу депо й автостанцій. Тому, плануючи маршрути, транспортні служби повинні враховувати рівень інтенсивності бойових дій, цифрові карти загроз, повідомлення військових адміністрацій та оперативні дані сил оборони.

Окремої уваги потребує система інформування пасажирів. У період бойових дій традиційні засоби сповіщення перестають забезпечувати достатній рівень оперативності. Ефективна система безпеки передбачає безперервне оновлення інформації, використання мобільних застосунків, динамічних табло, гучномовців та інтеграцію з регіональними системами оповіщення про повітряні тривоги. Водії повинні мати чіткий алгоритм дій у разі отримання сигналу небезпеки: негайне припинення руху, посадка пасажирів у найближче укриття, контроль за збереженням паніки та повернення до маршруту тільки після сигналу "відбій".

Особливого значення набуває психофізіологічний стан водія. Робота в умовах постійного стресу, нічних тривог, ризику обстрілів і необхідності швидко приймати рішення призводить до підвищеної втоми та зниження концентрації уваги. Стан водія стає ключовим фактором безпеки життєдіяльності.

Підприємства мають забезпечити психологічну підтримку персоналу, організувати чергування таким чином, щоб уникати перевтоми, та впровадити регулярні короткі інструктажі з підтримки стресостійкості. Дослідження показують, що здатність зберігати емоційну стабільність у стресових умовах значно зменшує ризики нештатних ситуацій під час перевезень.

Проблематика технічного стану транспортних засобів в умовах війни також набуває особливої актуальності. Порушення ланцюгів поставок, обмеженість запасних частин та труднощі із доступом до ремонтних підприємств створюють ризики експлуатації техніки, наближеної до межі своєї надійності. Для збереження безпеки життєдіяльності необхідно проводити пріоритезацію ремонтів, застосовувати методи діагностики, що не вимагають зупинки руху, і здійснювати модульну заміну вузлів. Додатковим викликом є необхідність захисту техніки від уламків, вибухової хвилі та вторинних факторів ураження. У деяких випадках транспортні підприємства впроваджують елементи додаткового бронювання, протиосколкові екрани, захисні накладки на паливні системи та скло, хоча такі заходи не завжди можуть бути реалізовані з огляду на вагу та конструктивні обмеження.

Питання захищеності маршрутних мереж включає важливий аспект інженерної стійкості інфраструктури. Мости, шляхопроводи, тунелі, зупинки громадського транспорту і автостанції стають критично важливими вузлами, які потребують постійного моніторингу й укріплення. Під час військових дій забезпечення працездатності цих об'єктів є однією з основ стабільності системи перевезень. Оскільки ворожі атаки можуть призвести до руйнування дорожнього полотна, органи управління повинні підтримувати мережу альтернативних маршрутів і передбачати можливість швидкого перенаправлення транспортних потоків без порушення життєвих потреб населення.

Технологічна складова безпеки життєдіяльності в сучасних реаліях включає цифрові інструменти контролю та аналітики. Системи GPS-моніторингу, платформи ситуаційної обізнаності, цифрові карти укриттів та аналітика ризиків створюють можливість підтримувати високий рівень

адаптивності. Кожен автобус або мікроавтобус фактично перетворюється на елемент інформаційної мережі, який в режимі реального часу передає дані про свою позицію, стан маршруту, нетипові події або перешкоди. Інтеграція з військовими та муніципальними сервісами оповіщення дозволяє транспортним підприємствам оперативно коригувати рух і уникати небезпечних зон.

Охорона праці водіїв та персоналу в умовах військових дій формує окремий напрям безпеки життєдіяльності. Робоче місце водія має бути обладнане засобами індивідуального захисту, аптечкою розширеної комплектації, вогнегасниками, засобами зв'язку та системами екстреного інформування. Працівники повинні знати правила поведінки під час артилерійського обстрілу, алгоритми евакуації пасажирів, порядок дій при травмуванні людей та вимоги до переміщення транспортного засобу після обстрілу. Формування таких компетенцій вимагає проведення регулярних тренувань і моделювання реальних сценаріїв небезпеки.

У більш широкому контексті безпека життєдіяльності пов'язана зі збереженням стійкості соціальних процесів. Автомобільний пасажирський транспорт у воєнний час стає способом забезпечення доступу населення до медицини, освіти, роботи, соціальних послуг і гуманітарної допомоги. Забезпечення безпеки перевезень дозволяє підтримувати функціонування міст, забезпечувати евакуацію з небезпечних зон, переміщення внутрішньо переміщених осіб та повернення життєвих процесів до стану керованості. Таким чином, транспорт виступає не лише інфраструктурним елементом, а й інструментом збереження громадської стабільності й життєстійкості суспільства.

Ключовою умовою підтримки належного рівня безпеки є координація між транспортними службами, військовими адміністраціями, службами цивільного захисту, поліцією та медичними установами. Мережевий підхід до управління дозволяє створити інтегровану систему реагування, у якій кожен учасник має чітку роль, відповідальність і доступ до актуальної інформації. Такий підхід

знижує ймовірність хаотичних рішень та забезпечує більш злагоджену роботу транспорту навіть за умови зміни рівня загроз.

Сучасні дослідження безпеки життєдіяльності в умовах війни підкреслюють важливість поєднання інженерних, організаційних, технологічних і людських факторів. Тільки комплексна система, що враховує взаємодію всіх цих компонентів, здатна забезпечити захист пасажирів і неперервність транспортного процесу. Для автотранспортних підприємств це означає необхідність розробки адаптивних стратегій, перегляду інструкцій, створення сценарних планів, модернізації технічних засобів та впровадження систем ризик-менеджменту.

У підсумку питання безпеки життєдіяльності при використанні автомобільного пасажирського транспорту в умовах військових дій є багатовимірною проблемою, яка охоплює всі рівні – від індивідуальної підготовки водія до стратегічного управління транспортною системою держави. Забезпечення безпечного функціонування транспорту в період збройного конфлікту має ключове значення для життєздатності суспільства, а розробка науково обґрунтованих підходів до підвищення рівня захищеності пасажирських перевезень становить важливе завдання сучасної транспортної науки.

4.4 Розрахунок параметрів функціонування автомобільного пасажирського транспорту в умовах воєнного стану

Функціонування автомобільного пасажирського транспорту в умовах воєнного стану вимагає науково обґрунтованого підходу до оцінювання ризиків і створення комплексної системи захисту пасажирів. Одним із ключових інструментів є математичне моделювання небезпек, що дозволяє прогнозувати ймовірність виникнення надзвичайних ситуацій, визначати критичні ділянки маршрутів і оцінювати рівень загроз для різних сценаріїв ведення бойових дій.

Для подальшого аналізу доцільно розглядати транспортну систему як динамічну структуру, у якій рівень ризику залежить від інтенсивності загроз,

часу перебування в зоні небезпеки, надійності транспортних засобів і готовності персоналу до реагування. У найпростішому вигляді загальний ризик RRR використання пасажирського транспорту в умовах військових дій можна описати моделлю:

$$R = P_a \cdot C_a + P_t \cdot C_t + P_d \cdot C_d, \quad (4.4)$$

де P_a - ймовірність авіаційної або ракетної атаки на маршрут;

C_a - наслідки для пасажирів у разі такого удару;

P_t - ймовірність артилерійського або мінометного ураження;

C_t - очікувані збитки чи травмування;

P_d - ймовірність диверсійних дій, мінування або підривів;

C_d - масштаб можливих наслідків.

Модель дозволяє визначити критичні параметри безпеки та спрямувати ресурсні вкладення на зниження саме тих складових, які формують найбільшу частку ризику. Для більш глибокого аналізу доцільно враховувати ймовірність перебування транспортного засобу в зоні ураження протягом певного часу:

$$P_a = 1 - e^{-\lambda_a \cdot t}, \quad (4.5)$$

де λ_a - інтенсивність загроз (кількість атак у розрахунку на одиницю часу), а t - час перебування на небезпечній ділянці. Ця формула дозволяє встановити залежність рівня загрози від швидкості руху, маршруту та графіку перевезень.

Для аналізу стійкості транспортної мережі застосовується модель функціональної надійності. Нехай транспортна система складається з n критичних інфраструктурних вузлів. Ймовірність її працездатності можна записати так:

$$P_{\text{sys}} = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (4.6)$$

де P_i - ймовірність збереження функціональності i -го вузла за умов бойових дій. У реальних умовах бойового середовища руйнування хоча б однієї ділянки дороги або мосту може повністю паралізувати рух, тому стратегія підвищення безпеки передбачає дублювання маршрутів і створення альтернативних транспортних коридорів.

Важливою складовою є також модель часу реагування на бойову небезпеку. Якщо водій отримує сигнал повітряної тривоги, час до ухвалення рішення має бути мінімізований. Модель оперативного реагування може бути описана рівнянням:

$$T_r = T_v + T_o + T_n, \quad (4.7)$$

де T_r - загальний час реагування водія;

T_v - час виявлення загрози (надходження сигналу тривоги);

T_o - час оцінки ситуації та ухвалення рішення;

T_n - час виконання дії (зупинка транспорту, евакуація, розміщення пасажирів в укритті).

У реальних умовах параметр T_o значно зростає під впливом стресу, втоми, інформаційної перевантаженості та нестачі навичок. Тому скорочення часу реагування досягається через тренування водіїв, симуляцію загроз та автоматизовані системи оповіщення.

У межах дослідження застосовується схема "дерева відмов" для визначення причин трагічних наслідків при перевезених пасажирів. Її текстовий вигляд може бути поданий таким чином:

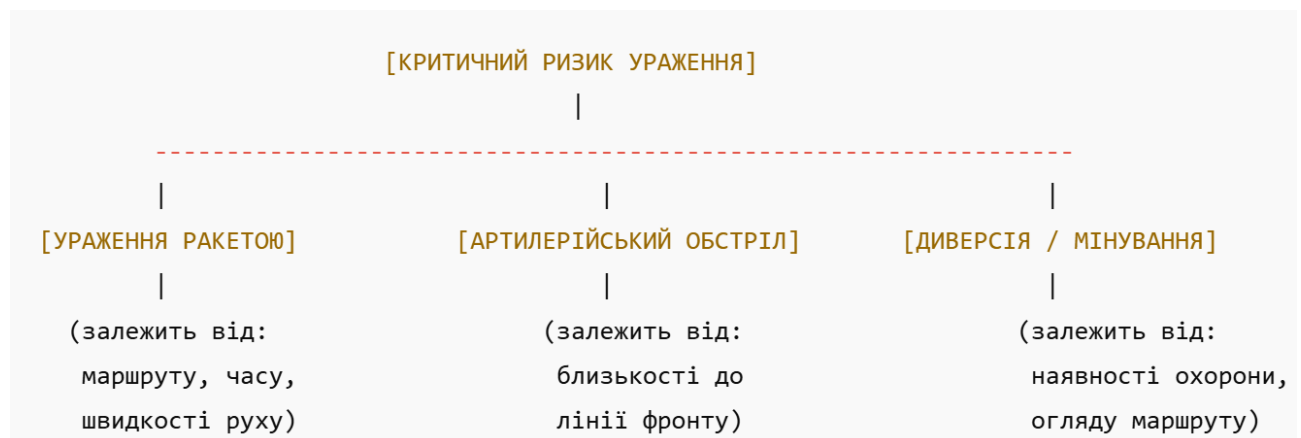


Рисунок 4.1. Структурно-логічна модель небезпек

Ця структура допомагає визначити, які фактори є базовими причинами ризиків та де саме слід застосовувати заходи безпеки.

Додатково до логічних моделей доцільно включати схематичні алгоритми дій персоналу, які необхідні для забезпечення безпеки життєдіяльності. У

найпоширенішому сценарії - отриманні сигналу повітряної тривоги під час руху - алгоритм реагування водія можна описати текстовою схемою наступного змісту:

Початок → Отримання сигналу тривоги →
Водій знижує швидкість → Аналізує місцевість →
Чи є поблизу укриття? → Якщо так → Зупинка біля укриття →
Евакуація пасажирів → Контроль паніки → Перебування в укритті →
Отримання сигналу "Відбій" → Повернення до руху → Кінець
Якщо укриття відсутнє → Вибір найнижчої точки рельєфу або природного укриття →
Розміщення пасажирів → Забезпечення укриття → Очікування "Відбою"
→ Повернення до руху → Кінець.

Рисунок 4.2. Алгоритм дій при сигналі тривоги під час перебування на об'єктах автомобільного транспорту

Алгоритм дозволяє формалізувати дії водія, зменшуючи вплив стресу та підвищуючи керованість ситуацією. Для підвищення ефективності його застосування автотранспортні підприємства повинні проводити тренування водіїв на основі симульованих сценаріїв, що включають раптове оповіщення, зміну маршруту або блокування дороги.

Важливе значення має також текстова схема дій при виявленні підозрілих предметів на маршруті. Її можна подати таким чином:

Виявлення підозрілого предмета → Оцінка відстані →
Зупинка транспортного засобу на безпечній дистанції →
Повідомлення диспетчера та поліції →
Евакуація пасажирів у безпечний сектор →
Організація контролю за доступом сторонніх →
Очікування інженерно-саперних підрозділів →
Поновлення руху після дозволу компетентних органів.

Рисунок 4.3. алгоритм дій при виявленні підозрілих предметів на маршруті

Посилення безпеки життєдіяльності вимагає моделювання поведінки пасажирів у стресових умовах. Нехай поведінковий фактор, що впливає на ризик, описується коефіцієнтом k_b . Тоді ризик ураження можна оцінити:

$$R' = R \cdot k_b, \quad (4.8)$$

де $k_b > 1$ у випадку паніки та безконтрольних дій і $k_b \approx 1$ за умов впорядкованої евакуації. Значення цього коефіцієнта показує, наскільки важливим є організаційний фактор - наявність інструкцій, оголошень, підготовки персоналу та загальної культури безпеки.

Для аналізу технічного стану транспортних засобів застосовується модель відмов, у якій надійність рухомого складу P_r залежить від інтенсивності відмов λ_r :

$$P_r = e^{-\lambda_r t}, \quad (4.9)$$

що дозволяє прогнозувати ймовірність технічної несправності під час руху, враховуючи вплив дефіциту запчастин і пропусків планових ремонтів у воєнний час.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведене дослідження дозволило комплексно розглянути проблему затримок транспортних засобів у міських вулично-дорожніх мережах та обґрунтувати ефективність застосування інтелектуальних транспортних систем для підвищення пропускну здатності та безпеки дорожнього руху. У роботі сформовано цілісний науково-методичний підхід, що ґрунтується на поєднанні аналітичного огляду сучасного стану дорожньої інфраструктури, математичного моделювання процесів керування транспортними потоками та мікроскопічної імітації руху транспортних засобів у програмному комплексі PTV Vissim.

У теоретичному розділі визначено причини збільшення транспортних затримок в Україні та світі, встановлено їх екологічні, економічні й соціальні наслідки, а також узагальнено прогресивний міжнародний досвід використання ІТС - зокрема систем В'єтнаму, Сінгапуру та України . Дослідження показало, що інтеграція сучасних інформаційно-керуючих технологій у транспортну інфраструктуру є ключовим напрямом розвитку міського руху у світі та дозволяє усунути основні недоліки традиційних схем регулювання.

В аналітичному розділі сформовано математичну базу для дослідження, включно з визначенням цільової функції – інтегрального показника “Витрати”, який відображає сумарні зміни характеристик пересування транспортного потоку під впливом різних управлінських рішень . Також обґрунтовано підхід до визначення оптимальної частки перенаправлення транспортних потоків, вибору маршрутів руху та сценаріїв управління мережами різної складності.

У проектно-рекомендаційному розділі побудовано повноцінну модель вулично-дорожньої мережі та виконано серію імітаційних експериментів у середовищі PTV Vissim. Зокрема, проведено моделювання оптимальної частки перенаправлення транспортного потоку, оцінено ефективність різних сценаріїв роботи світлофорних об'єктів, побудовано залежність між інтенсивністю транспортного потоку та тривалістю дозволяючої фази світлофора, а також змодельовано транспортну мережу міста Тернополя для визначення

оптимального сценарію її роботи в реальних умовах . Отримані результати підтвердили, що коректно налаштована система ІТС забезпечує суттєве скорочення затримок на перехрестях, зменшення довжини черг, підвищення середньої швидкості руху та загальну оптимізацію транспортних потоків.

Окрему увагу було приділено питанням охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, що є важливою складовою інтеграції сучасних технологій у транспортну галузь. Визначено особливості умов праці водіїв, вимоги пожежної та електробезпеки, порядок безпечного функціонування пасажирського транспорту в умовах воєнного стану та специфічних ризиків військового часу . Це дозволило комплексно оцінити вплив організаційних і технічних рішень на рівень безпеки персоналу та пасажирів.

Загалом, результати дослідження підтверджують доцільність і високу ефективність впровадження інтелектуальних транспортних систем у міських дорожніх мережах України. Використання імітаційного моделювання в PTV Vissim дозволило обґрунтувати вибір оптимального сценарію організації дорожнього руху та визначити конкретні шляхи зменшення затримок, покращення пропускну здатності, підвищення безпеки та мінімізації впливу транспортної системи на довкілля. Практичні рекомендації роботи можуть бути використані органами місцевого самоврядування, службами організації дорожнього руху та проектними організаціями для формування сучасної транспортної політики та модернізації систем управління рухом.

Напрями подальших наукових досліджень полягають у вдосконаленні методів прогнозування параметрів транспортного потоку, розвитку адаптивних алгоритмів керування світлофорними об'єктами, інтеграції транспортних симуляцій із системами машинного навчання, а також у розширенні можливостей регіонального та міжміського транспортного планування на основі ІТС .

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кашканов, А. А., & Кужель, В. П. (2017). *Організація дорожнього руху: навч. посібник*. Вінниця: БНТУ. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/IRVC/2021/Kashkanov_2017_125.pdf. PDF Ліб БНТУ
2. Поліщук, В. П. (ред.). (2014). *Організація та регулювання дорожнього руху: підручник* (О. О. Бакуліч, О. П. Дзюба, В. І. Єресов та ін.). Київ: Знання України. URL: <https://tpodm.khmnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/19/organizacziya-i-upravlinnya-dorozhnim-ruhom-2024.pdf>. Кафедра ТПОсвіти+1
3. Лобашов, О. О., & Прасоленко, О. В. (2011). *Практикум з дисципліни «Організація дорожнього руху» : навч. посіб.* Харків: ХНАМГ. URL: https://eprints.kname.edu.ua/21205/1/%D0%9F%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%BA%D1%83%D0%BC_2010_58%D0%9D.pdf. Eprints Kname+1
4. Гаврилов, Е. В., Дмитриченко, М. Ф., Доля, В. К., Лановий, О. Т., Лінник, І. Е., & Поліщук, В. П. (2007). *Організація дорожнього руху*. Київ: Знання України. (Кн. IV у серії «Системологія на транспорті»). URL: <https://www.yakaboo.ua/ua/sistemologija-na-transporti-kniga-4-organizacija-dorozhn-ogo-ruhu.html>. YAKABOO+1
5. Лановий, О. (2007). *Організація дорожнього руху: підручник для студентів та аспірантів*. Київ: Знання України. URL: https://nung.edu.ua/sites/default/files/2021-02/2%D0%B4%D0%B7_274_%D0%90%D0%A2_%D0%9E%D1%80%D0%B3%D0%B0%D0%BD%D1%96%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F%20%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B6%D0%BD%D1%8C%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D1%80%D1%83%D1%85%D1%83_2_19.pdf. ІФНТУНГ
6. Хом'як, Я. В. (1986). *Організація дорожнього руху: підручник для ВНЗ*. Київ: Вища школа. (271 с.). URL: згадано у збірці матеріалів факультету транспортних систем. ХНАДУ
7. Сільянов, В. В. (1977). *Організації руху* (теорія та практичні питання). Москва: Транспорт. (класична праця, що часто цитується у курсах). URL: <https://fts.khadi.kharkov.ua/fileadmin/F-TRANSPORT/.../> %D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BA%D0%B0... (див. опис у збірці). ХНАДУ+1
8. Когут, В. М., Парасюк, В. М., & Демків, Р. Я. (2022). *Безпека дорожнього руху : навчальний посібник*. Львів: Львівський державний університет внутрішніх справ. URL: <https://dspace.lvduvs.edu.ua/bitstream/1234567890/4773/1/%D0%91%D0%B5%D0%B7%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D0%B0%20%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B6%D0%BD%D1%8C%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D1%80%D1%83%D1%85%D1%83-->

держуніверситет МВС

9. Абрамова, Л. С., Птиця, Г. Г., & Ширін, В. В. (2017). *Словник-довідник термінів і визначень з організації дорожнього руху: навч. посіб.* Харків: ХНАДУ. URL: згадується у підручниках і посібниках (див. списки літератури). Державний біотехнологічний університет

10. Сараєв, Є. І. (2014). *Організація дорожнього руху* (оглядова стаття / електронний матеріал). URL:

<https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/7963/1/%D0%9E%D0%A0%D0%93%D0%90%D0%9D%D0%86%D0%97%D0%90%D0%A6%D0%86%D0%AF%20%D0%94%D0%9E%D0%A0%D0%9E%D0%96%D0%9D%D0%AC%D0%9E%D0%93%D0%9E%20%D0%A0%D0%A3%D0%A5%D0%A3.pdf>.

11. Клинковштейн, Г. И. (1982). *Организация дорожного движения*. Москва: Транспорт. (використовується в курсах як додаткова література). URL: згадується в довідниках та навчальних списках. ІФНТУНГ

12. Гладківська, О. В. (2015). Вимоги до нормативно-правової термінології (стаття, що висвітлює термінологію в транспорті). URL: згадується в наукових збірниках. Управління розвитком складних систем

13. Кашканов, А. А. (2017). *Організація дорожнього руху : практичні приклади і методи оцінювання ефективності заходів* (навч. посібник). Вінниця: ВНТУ. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/34899/90142.pdf>. ВНТУ

14. May, A. D. (1990). *Traffic Flow Fundamentals*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. (класичний англomовний підручник з теорії транспортних потоків). URL: https://books.google.com/books/about/Traffic_Flow_Fundamentals.html?id=JYJPAAAAMAAJ. Google Books

15. Maerivoet, S., & De Moor, B. (2008). *Traffic Flow Theory* (оглядова наукова праця). URL: <https://arxiv.org/abs/physics/0507126> (або https://www.academia.edu/57024911/Traffic_flow_theory). Academia+1

16. Kerner, B. S. (2009). *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control*. (Монографія - сучасні підходи до теорії і контролю руху, трифазна теорія). URL: <https://download.e-bookshelf.de/download/0000/0139/83/L-G-0000013983-0002346705.pdf>

17. Стручок, В. С. (2022). *Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної / дистанційної форм навчання*. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А. 156 с.

18. Стручок, В. С., Стадник, І. Я., Стручок, О. С. *Методичні вказівки щодо оцінки радіаційної обстановки для практичних занять на тему “Оцінка радіаційної обстановки у*

випадку застосування ядерної зброї та аварії...” з дисципліни “Цивільний захист”. Тернопіль: ТНТУ, 2013.

19. Стручок, В. С. (2016). *Конспект лекцій з дисципліни «Цивільний захист»*. Тернопіль: ТНТУ. 86 с.