

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
УКРАЇНИ

Факультет (ННІ) Механіко-технологічний

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету (Директор ННІ)

Механіко-технологічного

(назва факультету (ННІ))

Братішко В.В.

(підпис)

(ПІБ)

“ ” 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

Транспортних технологій та засобів в

АПК

(назва кафедри)

Савченко Л.А.

(підпис)

(ПІБ)

“ ” 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему Моделювання транспортної мережі по вулиці Героїв Оборони

Спеціальність 275 «Транспортні технології (за видами)»

(код і назва)

Освітня програма Транспортні технології (на автомобільному транспорті)

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Керівник магістерської роботи

доцент

Савченко Л.А.

Виконав

Фещенко Д.О.

КИЇВ – 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет (ННІ)

Механіко-технологічний

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Транспортних технологій та засобів в АПК

к.т.н., доцент

Савченко Л.А.

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис)

(ПІБ)

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Фещенко Дмитро Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 275 «Транспортні технології (за видами)»

(код і назва)

Освітня програма Транспортні технології (на автомобільному транспорті)

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи Моделювання транспортної мережі по вулиці Героїв
Оборони

затверджена наказом ректора НУБіП України від "13" листопада 2024 р. № 2037

Термін подання завершеної роботи на кафедру 30 жовтня 2025 р.

(число, місяць, рік)

Вихідні дані до магістерської роботи

1. Нормативно-правова база організації дорожнього руху.
2. Характеристика досліджуваної ділянки вулично-дорожньої мережі
3. Нормативно-правові вимоги з охорони праці в транспортній галузі
4. Статті, збірників наукових праць та журналів, довідники, посібники та інтернет-ресурси.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Теоретичні основи організації та моделювання транспортних систем.
2. Аналіз існуючого стану транспортної мережі по вулиці Героїв оборони.
3. Моделювання та оптимізація транспортної мережі.
4. Розробка практичних рекомендацій.

Дата видачі завдання «13» листопада 2024 р.

Керівник магістерської роботи

(підпис)

Савченко Л.А.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Фещенко Д.О.

(прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОРГАНІЗАЦІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ	7
1.1. Поняття, структура та класифікація транспортних систем.....	7
1.2. Теоретичні засади моделювання транспортних мереж	10
1.3. Аналіз сучасних транспортних технологій та інструментів моделювання	13
1.4. Огляд нормативно-правової бази щодо організації дорожнього руху	17
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО СТАНУ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ ПО ВУЛИЦІ ГЕРОЇВ ОБОРОНИ	22
2.1. Загальна характеристика досліджуваної ділянки вулично-дорожньої мережі.....	22
2.2. Характеристика транспортних потоків та інтенсивності руху	24
2.3. Аналіз організації дорожнього руху та роботи інфраструктури	26
2.4. Виявлення проблемних зон та «вузьких місць» у русі транспорту.....	29
2.5. Оцінка показників ефективності функціонування вуличної мережі.....	32
Висновки до розділу 2	34
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ.....	36
3.1. Постановка задачі та вибір інструментів моделювання.....	36
3.2. Побудова цифрової моделі транспортної мережі по вул. Героїв оборони	39
3.3. Калібрування та валідація моделі за результатами польових досліджень.....	43
3.4. Використання програмного забезпечення ptv vissim для імітаційного моделювання транспортних потоків	47
3.5. Розробка та аналіз варіантів оптимізації руху на основі результатів моделювання.....	51
3.6. Оцінка ефективності впровадження запропонованих рішень	53
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ДОРОЖНЬОГО РУХУ	58
4.1. Нормативно-правові вимоги з охорони праці в транспортній галузі.....	58

4.2. Аналіз умов праці та факторів ризику при виконанні транспортних робіт	60
4.3. Заходи щодо підвищення безпеки дорожнього руху на вул. Героїв оборони	64
4.4. Технічні та організаційні рішення для зниження аварійності	67
Висновки до розділу 4.....	70
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ	73
5.1. Методика економічної оцінки оптимізації транспортних процесів	73
5.2. Розрахунок витрат на впровадження оптимізаційних заходів	76
5.3. Використання результатів моделювання в ptv vissim для економічного обґрунтування ефективності	79
5.4. Прогноз економічного ефекту та термін окупності	82
5.5. Оцінка екологічного та соціального ефекту	85
Висновки до розділу 5.....	89
ВИСНОВКИ	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	98

ВСТУП

Актуальність теми. Інтенсивна урбанізація, зростання кількості приватного автотранспорту, нерівномірне просторове планування та застаріла інфраструктура зумовлюють необхідність у системному дослідженні транспортних мереж міст. Одним із ключових напрямів сучасної транспортної інженерії є моделювання транспортних систем з метою аналізу їх функціонування та подальшої оптимізації. Особливу увагу в цьому контексті заслуговують локальні фрагменти вулично-дорожніх мереж, які, будучи частинами більшої системи, відіграють значну роль у забезпеченні мобільності населення, зниженні заторів та підвищенні безпеки дорожнього руху.

Вулиця Героїв Оборони є одним із важливих транспортних коридорів міста, що поєднує житлові, освітні та науково-дослідні зони. Її інфраструктурне навантаження, геометричні параметри та динаміка транспортних потоків потребують системного аналізу для визначення вузьких місць та моделювання сценаріїв їх покращення. Застосування сучасних інструментів моделювання – таких як імітаційне моделювання, агентні системи або моделі масового обслуговування – відкриває широкі можливості для аналізу ефективності організації руху на цій ділянці міської мережі.

Мета і завдання дослідження. **Метою дослідження** є побудова моделі транспортної мережі вулиці Героїв Оборони, її дослідження з використанням сучасних інструментів транспортного моделювання та формування рекомендацій щодо підвищення ефективності організації дорожнього руху.

Для досягнення цієї мети передбачено розв'язання таких **завдань**:

1. Провести теоретичний аналіз транспортних систем і методів їх моделювання.
2. Дослідити сучасні інформаційні технології для симуляції транспортних процесів.

3. Проаналізувати чинну нормативно-правову базу щодо організації дорожнього руху в Україні.

4. Побудувати модель транспортної мережі вулиці Героїв Оборони та здійснити її імітаційне моделювання.

5. Оцінити пропускну здатність та ефективність функціонування транспортної ділянки на основі моделі.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є вулично-дорожня мережа міста як складова міської транспортної системи.

Предметом дослідження виступають моделі та методи моделювання транспортної мережі вулиці Героїв Оборони.

Наукова новизна та практична значущість. Наукова новизна дослідження полягає в комплексному підході до моделювання локальної транспортної ділянки з використанням сучасних програмних засобів і з урахуванням актуальних вимог нормативної бази. У процесі моделювання передбачається інтеграція просторово-геометричних параметрів ділянки з даними про інтенсивність руху, що дозволить оцінити ефективність різних варіантів організації дорожнього руху.

Практична значущість полягає в можливості застосування отриманих результатів для обґрунтування інженерних рішень щодо реконструкції або оптимізації вуличної мережі, підвищення безпеки та зниження заторів на конкретній ділянці міста.

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 95 сторінок комп'ютерного тексту.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОРГАНІЗАЦІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

1.1. Поняття, структура та класифікація транспортних систем

Транспортна система – це цілісне функціональне утворення, яке забезпечує переміщення людей і вантажів у просторі та часі за допомогою різноманітних засобів транспорту, інфраструктури, організаційних структур і нормативного забезпечення. Вона є складовою соціально-економічної інфраструктури, без якої неможливий розвиток жодної держави чи міста [1].

Транспортна система функціонує як відкрита динамічна система з ієрархічною структурою, що взаємодіє з навколишнім середовищем (рис. 1.1). Її структура формується на основі сукупності елементів (технічних, організаційних, інформаційних) та зв'язків між ними, які забезпечують координацію, ефективність і надійність транспортного процесу [2].

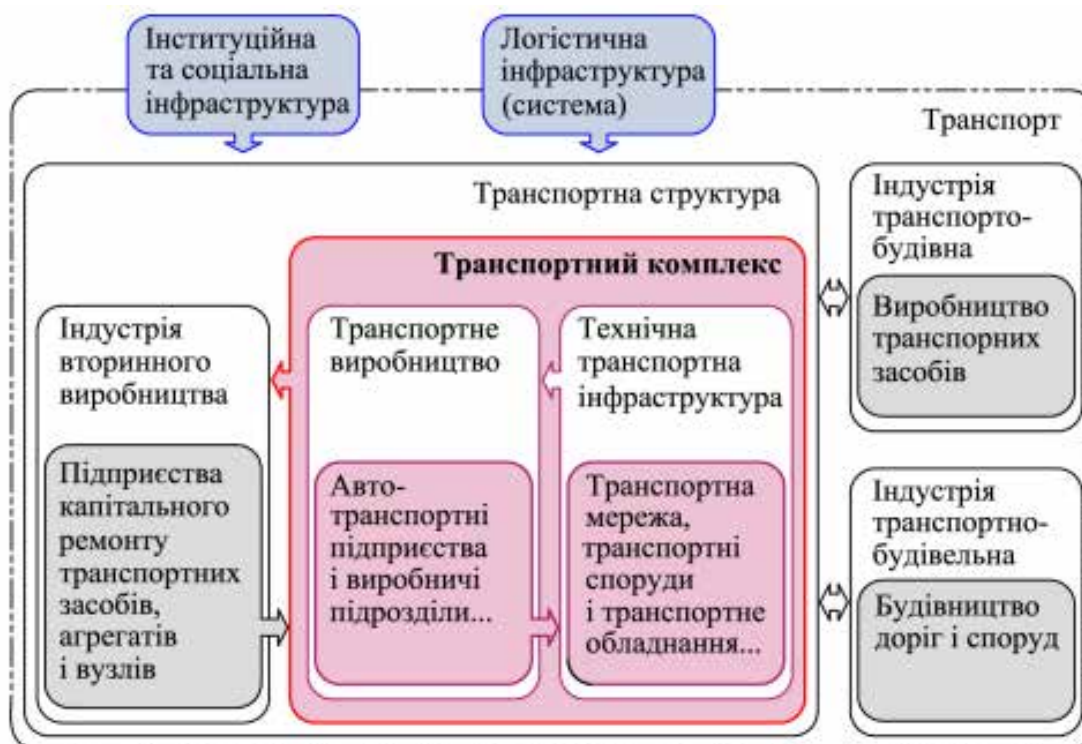


Рисунок 1.1 – Узагальнена структура транспортної системи

Типова транспортна система включає такі складові:

- Рухомий склад – транспортні засоби різних типів (автобуси, авто, потяги, літаки, судна тощо);
- Інфраструктура – дороги, вулиці, залізничні колії, термінали, перехрестя, світлофори, зупинки;
- Організаційна структура – оператори перевезень, диспетчерські центри, регуляторні органи;
- Користувачі системи – пасажери, водії, пішоходи;
- Системи управління – автоматизовані або ручні механізми регулювання руху;
- Нормативно-правове середовище – правила дорожнього руху, стандарти безпеки, ліцензійні вимоги [3].

Транспортні системи можна класифікувати за кількома ознаками (таблиця 1.1-1.3):

1. За видом транспорту:

- Автомобільні
- Залізничні
- Морські
- Річкові
- Повітряні
- Трубопровідні

2. За характером перевезень:

- Пасажирські
- Вантажні
- Змішані

3. За ступенем автоматизації:

- Традиційні (з участю людини)

- Автоматизовані
 - Інтелектуальні транспортні системи (ITS)
4. За географічним охопленням:
- Локальні (в межах міста чи району)
 - Регіональні
 - Національні
 - Міжнародні
5. За рівнем ієрархії:
- Головні (магістральні) – забезпечують основні транспортні потоки.
 - Периферійні (локальні) – обслуговують другорядні маршрути, з'єднуючи споживача з магістральною мережею [4].

Таблиця 1.1 – Порівняння видів транспорту за ключовими характеристиками

Ознака	Автомобільний	Залізничний	Повітряний	Водний	Трубопровідний
Призначення	Пасажирські, вантажні	Пасажирські, вантажні	Переважно пасажирські	Переважно вантажні	Вантажні (рідина, газ)
Інфраструктура	Дороги, мости, розв'язки	Колії, станції, депо	Аеропорти, злітно-посадкові смуги	Порти, судноплавні канали	Трубопроводи, насосні станції
Швидкість перевезення	Середня (40–100 км/год)	Висока (60–200 км/год)	Дуже висока (700–900 км/год)	Низька (10–50 км/год)	Постійна (1–10 км/год)
Вартість інфраструктури	Помірна	Висока	Дуже висока	Висока	Висока
Гнучкість маршрутів	Висока	Низька	Низька	Низька	Відсутня
Екологічний вплив	Високий	Середній	Високий	Низький	Низький

Таблиця 1.2 – Класифікація транспортних систем за масштабом

Тип	Характеристика	Приклади
-----	----------------	----------

Локальні	Обслуговують межі району, мікрорайону або окремої зони	Трамвайна мережа міста, місцеві маршрути
Міські	Функціонують у межах одного міста або агломерації	Метрополітен, міські автобуси
Регіональні	Поєднують кілька населених пунктів, регіонів	Приміські електрички, міжміські шосе
Національні	Охоплюють всю територію країни	Залізнична мережа, національні авіап перевезення
Міжнародні	Сполучають різні країни	Авіалінії, транснаціональні трубопроводи

Таблиця 1.3 – Рівні автоматизації транспортних систем

Тип системи	Рівень участі людини	Характерні особливості
Традиційна транспортна система	Високий	Людина керує ТЗ, регулює потоки, приймає рішення
Автоматизована система	Середній	Автоматичне регулювання світлофорів, управління потоками
Інтелектуальна транспортна система (ITS)	Мінімальний або нульовий	Використання датчиків, IoT, Big Data, штучного інтелекту для керування

Таким чином, транспортна система – це багаторівнева, комплексна структура, що охоплює матеріально-технічні, організаційні, інформаційні та правові компоненти. Її функціонування залежить від взаємодії окремих підсистем та їхньої здатності адаптуватися до змін навколишнього середовища. Класифікація транспортних систем дозволяє структуровано підходити до планування, оптимізації та моделювання транспортних процесів, що особливо важливо в умовах сучасного міста.

1.2. Теоретичні засади моделювання транспортних мереж

Моделювання транспортної мережі є науково обґрунтованим процесом побудови формалізованих моделей, які відображають основні властивості, структуру, взаємозв'язки та поведінку елементів транспортної системи.

Основною метою моделювання є аналіз поточних умов функціонування мережі, прогнозування її розвитку, оцінка впливу різних сценаріїв і варіантів організації руху, а також оптимізація інфраструктурних рішень.

Транспортні мережі моделюються на основі математичних, графових, імітаційних та аналітичних методів, які дозволяють описати просторово-часову динаміку переміщення транспортних потоків, пасажирів і вантажів.

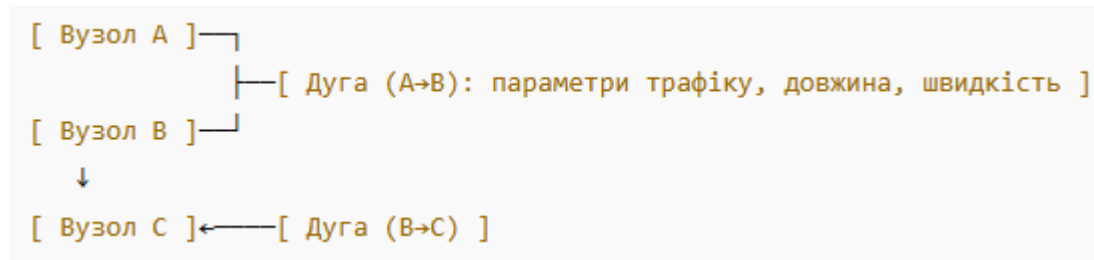


Рисунок 1.2 – Схематична структура моделі транспортної мережі

Узагальнена транспортна мережа може бути представленою як орієнтований граф $G(V, E)$, де:

- V – множина вершин (вузлів), що відповідають транспортним перехрестям, зупинкам, вузлам інфраструктури;
- E – множина дуг (ребер), які представляють дороги, лінії або канали сполучення між вузлами.

Методи моделювання транспортних мереж

1. Графове моделювання

Використовується для відображення топології транспортної мережі. Дає змогу:

- визначати найкоротші шляхи (алгоритм Дейкстри);
- аналізувати ступінь зв'язності;
- виявляти критичні вузли.

2. Теорія масового обслуговування

Дає змогу моделювати черги, затримки та пропускну здатність елементів мережі (перехрестя, в'їзди на автошляхи). Використовується в поєднанні з імітаційними моделями для оцінки рівня сервісу (Level of Service, LOS) [6].

3. Імітаційне моделювання

Полягає в побудові програмної моделі, яка відтворює реальний процес руху транспортних засобів. Найпопулярніші інструменти – PTV VISSIM, Aimsun, SUMO, які дозволяють враховувати поведінкові фактори, затори, світлофорне регулювання, аварії [7].

4. Моделі розподілу потоків

Мета моделей – визначити, як пасажирів або транспортні засоби обирають маршрути в умовах обмежень. Наприклад, модель рівноваги Уорделла–Бека (Wardrop's Equilibrium) припускає, що всі учасники трафіку вибирають найзручніший шлях до досягнення стану рівноваги [8].

Фази транспортного моделювання

У міжнародній практиці (зокрема, відповідно до британських стандартів [9]) виділяють чотири основні етапи моделювання (таблиця 1.4):

Таблиця 1.4 – Основні етапи моделювання

Етап	Зміст
1. Генерація поїздок	Оцінка кількості переміщень у межах зони (населеного пункту, району).
2. Розподіл поїздок	Визначення пари «початок–кінець» маршруту для кожного переміщення.
3. Вибір виду транспорту	Встановлення способу пересування (автомобіль, громадський транспорт тощо).
4. Розподіл потоків	Призначення маршрутів у транспортній мережі та оцінка навантаження.

Формальні моделі

Для опису транспортних потоків використовують:

- Модель інтенсивності руху:

$$q = k \cdot v$$

де q – інтенсивність (т/од. часу), k – щільність потоку (т/од. довжини), v – середня швидкість.

- Модель затримки на перехресті (Webster's model):

$$d = \frac{c(1 - g/C)^2}{2(1 - (g/C)x)} + \frac{x^2}{2q(1 - x)}$$

де d – середня затримка, x – ступінь насичення, q – інтенсивність потоку, g – зелений час, C – цикл світлофора [10].

Моделювання транспортних мереж ґрунтується на інтеграції математичних, логічних, імітаційних і програмно-апаратних підходів. Найефективнішими є комплексні моделі, які враховують топологію мережі, характеристики руху, поведінку користувачів і регламентні обмеження. Теоретичні основи, викладені в цьому підрозділі, створюють підґрунтя для побудови прикладної моделі транспортної мережі вулиці Героїв Оборони, що буде реалізовано в наступних розділах.

1.3. Аналіз сучасних транспортних технологій та інструментів моделювання

Сучасні транспортні технології – це сукупність методів, засобів, програмних продуктів і інформаційних систем, які забезпечують ефективне функціонування транспортних процесів на основі цифровізації, автоматизації та штучного інтелекту. У транспортному моделюванні вони відіграють ключову роль, дозволяючи з високою точністю аналізувати та прогнозувати поведінку потоків, ефективність організаційних заходів і наслідки інфраструктурних рішень.

Умовно транспортні технології можна класифікувати за двома ключовими напрямками:

- Інтелектуальні транспортні системи (ITS) – включають адаптивне світлофорне регулювання, автоматизовану систему збирання даних, навігацію, моніторинг тощо.
- Моделювальні системи (TMS) – програмні середовища для аналізу транспортних потоків, оцінки сценаріїв розвитку мережі, оптимізації структури руху.

Найбільш поширеними інструментами імітаційного моделювання транспортних потоків є PTV VISSIM, Aimsun, SUMO, TransModeler. Їх ключові функції, особливості та порівняльні характеристики подано в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Порівняльна характеристика популярних інструментів транспортного моделювання

Система	Тип моделі	Ліцензія	Рівень деталізації	Підтримка ITS	Особливості
PTV VISSIM	Мікро/Мезо	Комерційна	Дуже високий	Так	Підтримка поведінкових моделей водіїв, точне моделювання світлофорів
Aimsun Next	Мікро/Мезо/Макро	Комерційна	Високий	Так	Вбудована база даних, GIS-інтеграція, прогнозування попиту
SUMO	Мікро	Відкрите ПЗ	Середній	Частково	Підтримка Python API, відкритий код, багата документація
TransModeler	Мікро/Мезо	Комерційна	Високий	Так	Пряме моделювання подій (аварій, обмежень), сценарний аналіз

Нижче наведено спрощену блок-схему основних етапів роботи в середовищі PTV VISSIM, яке використовується для детального моделювання міських ділянок (рис. 1.3).

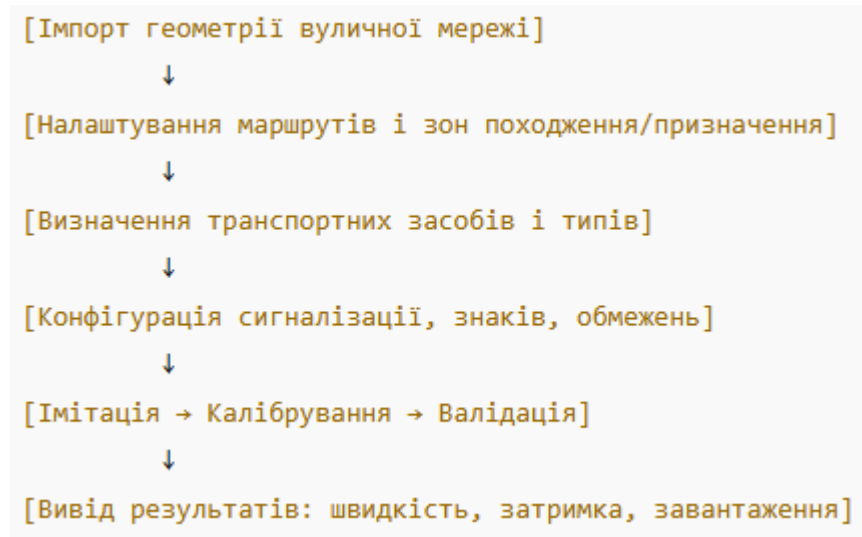


Рисунок 1.3 – Загальна структура моделювання в PTV VISSIM

Популярність використання інструментів транспортного моделювання

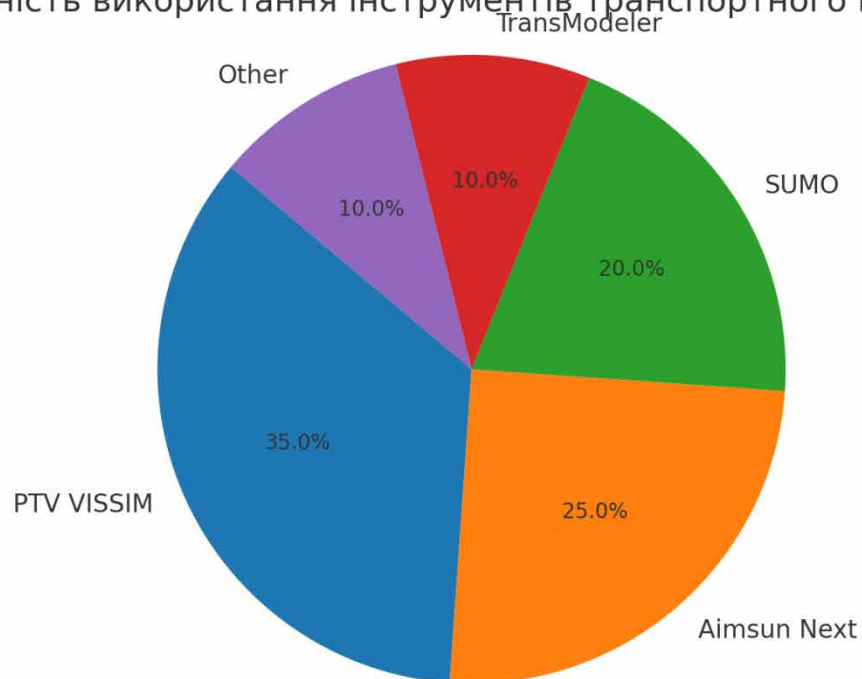


Рисунок 1.4 – Популярність використання інструментів транспортного моделювання

Таким чином, з рисунка 1.4 видно, що PTV VISSIM є найпоширенішим інструментом, з часткою 35%, завдяки високій точності мікромоделювання та багатофункціональності.

Aimsun Next займає 25%, пропонуючи мультирівневе моделювання та прогнозування трафіку.

SUMO активно використовується в академічних дослідженнях (20%) через відкриту ліцензію.

TransModeler і інші системи мають по 10%, застосовуючись здебільшого в нішевих або національних проектах.

Інтелектуальні транспортні системи (ITS) поєднують транспортну інфраструктуру з інформаційно-комунікаційними технологіями для забезпечення:

- адаптивного керування трафіком;
- прогнозування заторів;
- реагування на аварійні ситуації;
- передбачення транспортного попиту;
- інтеграції з мобільними застосунками та GPS-навігацією [6].

Приклад: у системі Aimsun Next ITS-розширення дозволяє моделювати змінні дорожні знаки, сигнали про погодні умови, об'їзди при аваріях, адаптивні маршрутизації в режимі реального часу.

Сучасні дослідження спрямовані на:

- поєднання моделей трафіку з машинним навчанням (наприклад, для калібрування моделей на основі реальних GPS-даних);
- розвиток гібридного моделювання (одночасне використання макро- і мікромоделей);

- побудову цифрових двійників міських транспортних систем;
- створення хмарних платформ для колективної роботи з транспортними сценаріями.

Аналіз сучасних транспортних технологій свідчить про стрімкий розвиток інструментів імітаційного моделювання, які забезпечують високу точність і гнучкість у дослідженні складних сценаріїв міського руху. Комерційні системи, такі як PTV VISSIM та Aimsun, дають змогу глибоко досліджувати поведінку водіїв, світлофорні режими та структуру заторів, тоді як відкриті платформи на кшталт SUMO дозволяють інтегрувати моделі з алгоритмами штучного інтелекту. Інтелектуальні транспортні системи, як ITS, є важливим доповненням до цих рішень і становлять перспективний напрям інтеграції управління в реальному часі з прогнозними симуляціями.

1.4. Огляд нормативно-правової бази щодо організації дорожнього руху

Організація дорожнього руху є складним комплексом заходів, який базується не лише на інженерних рішеннях, але й на чинній нормативно-правовій базі, яка визначає допустимі параметри проєктування, функціонування, безпеки, знакування та управління транспортними потоками. Відповідність проєктних рішень нормативним вимогам гарантує ефективність, надійність та безпеку дорожньої інфраструктури [11].

Таблиця 1.6 – Базові нормативно-правові документи у сфері організації дорожнього руху

Назва документа	Короткий зміст	Рік останнього оновлення
Закон України «Про дорожній рух»	Визначає загальні правові засади організації дорожнього руху та обов'язки учасників	2023
ДБН В.2.3-5:2018	Норми проєктування вулиць і доріг	2018

	населених пунктів	
ДСТУ 4100:2021	Вимоги до планування вулично-дорожньої мережі	2021
ДСТУ 2587:2021	Засоби організації дорожнього руху. Загальні технічні вимоги	2021
ДСТУ ISO 39001:2014	Система управління безпекою дорожнього руху — загальні принципи	2014
Постанова КМУ №1306 (2001, зі змінами)	Правила дорожнього руху України	2023

Будівельні норми України ДБН В.2.3-5:2018 «Вулиці і дороги населених пунктів» є центральним документом, що регламентує параметри проектування елементів вулично-дорожньої мережі:

- Класифікація вулиць: магістральні, районного значення, місцеві;
- Ширина проїзної частини: від 3.5 м до 15 м залежно від категорії;
- Радіуси поворотів і ухили: згідно з нормативами безпеки;
- Смуги руху, островці безпеки, пішохідні переходи – визначено детально [11].

ДСТУ 4100:2021 регламентує:

- класи функціонального призначення доріг;
- відстані між перехрестями;
- інтервали світлофорного циклу;
- параметри зупинок громадського транспорту;
- умови проектування велосипедної інфраструктури [12].

Стандарт ISO 39001:2014 визначає систему управління безпекою дорожнього руху. Його адаптація в Україні забезпечує:

- введення оцінки ризиків на транспортних вузлах;
- стандартизований моніторинг безпеки;
- принципи безперервного вдосконалення в транспортному управлінні [14].

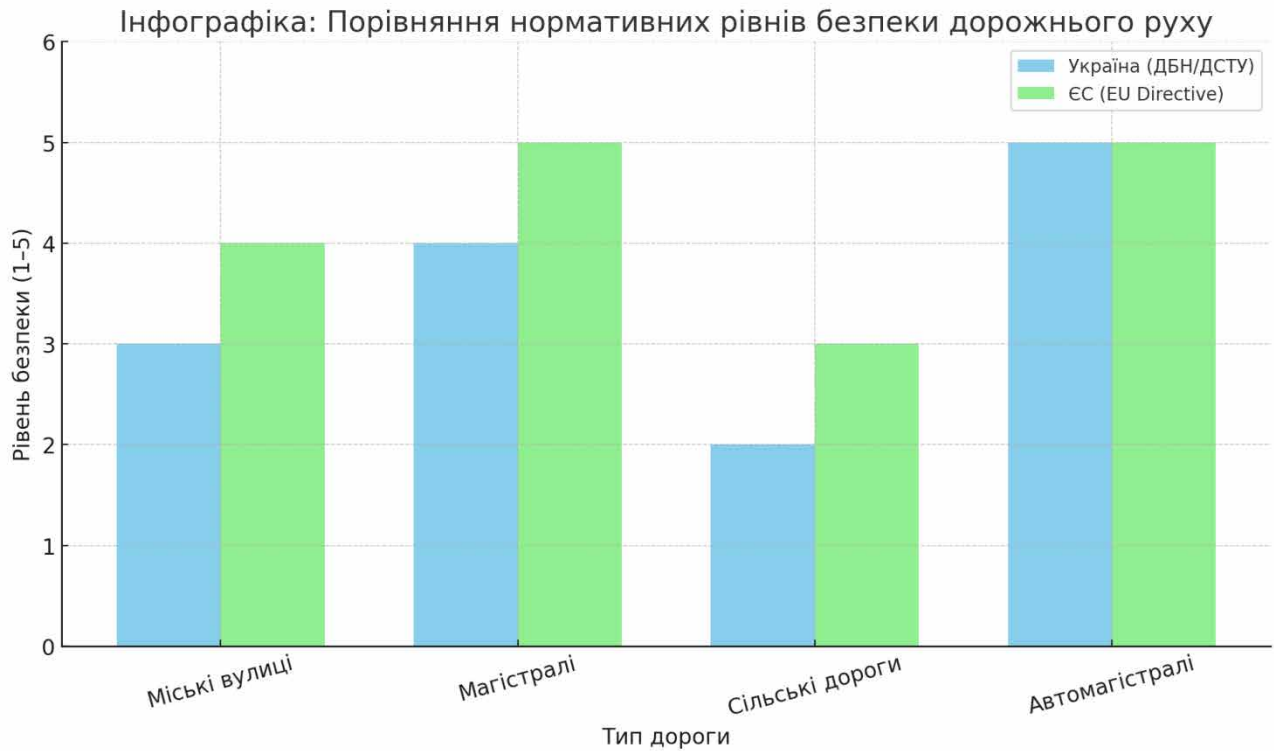


Рисунок 1.5 – Порівняння нормативних рівнів безпеки (1–5)

(1 – найнижчий рівень, 5 – найвищий, умовні дані)

Автомагістралі досягають однаково високих рівнів у ЄС та в Україні (рівень 5).

Міські вулиці в Україні поступаються за рівнем безпеки (рівень 3 проти 4).

Магістралі також показують відставання на один пункт.

Найнижчий рівень в Україні – сільські дороги (2 проти 3 у ЄС).

У таблиці 1.7 наведено відповідності українських та європейських транспортних стандартів.

Таблиця 1.7 – Відповідності українських та європейських транспортних стандартів

Український стандарт	Відповідний європейський / міжнародний
ДБН В.2.3-5:2018	EU Road Design Directive 2008/96/EC – Директива щодо безпеки доріг

ДСТУ 4100:2021	EU TEN-T Guidelines – Вказівки щодо трансєвропейської мережі
ДСТУ ISO 39001:2014	ISO 39001:2012 – Стандарт безпеки дорожнього руху
ДСТУ 2587:2021	EN 12899-1:2007 – Європейський стандарт дорожніх знаків

Основні виклики:

- відставання українських стандартів від європейських норм (наприклад, щодо Smart Mobility, інфраструктури для EV);
- недостатня інтеграція ITS у регуляторні документи;
- обмежене впровадження ISO-підходів у муніципальних транспортних проєктах.

Перспективи розвитку:

- гармонізація з нормами EU Directive 2010/40/EU;
- адаптація норм щодо цифрових дорожніх карт та V2I комунікації;
- розширення застосування моделей оцінки ризиків і безпеки у міському плануванні.

Нормативно-правова база України щодо організації дорожнього руху є достатньо розвиненою у базових аспектах, таких як проєктування елементів вуличної мережі, сигналізація, регулювання та класифікація вулиць. Однак у контексті сучасних викликів, пов'язаних із цифровізацією, інтеграцією ITS та транспортним плануванням в умовах швидкої урбанізації, потребує оновлення та адаптації. Врахування міжнародного досвіду та сучасних технологій має стати основою для модернізації нормативної бази у найближчому майбутньому.

Висновки до розділу 1

У результаті проведеного теоретичного аналізу було сформовано комплексне уявлення про структуру, функціонування та методологію дослідження транспортних систем у контексті міського середовища. Зокрема, уточнено понятійно-категоріальний апарат, визначено основні компоненти та

класифікаційні ознаки транспортних систем, що дозволяє здійснити систематизацію підходів до їх вивчення.

Окрему увагу було приділено теоретичним засадам моделювання транспортних мереж, де встановлено, що найбільш ефективними для аналізу локальних ділянок (зокрема міських вулиць) є методи мікромоделювання на основі графових структур, дискретно-подієвих процесів та моделей розподілу потоків. Визначено, що моделювання на основі орієнтованих графів дає змогу описати топологію мережі, тоді як імітаційні підходи – динаміку взаємодії транспортних засобів.

У межах підрозділу 1.3 досліджено сучасні програмні інструменти моделювання – PTV VISSIM, Aimsun, SUMO, TransModeler, що забезпечують точне відтворення сценаріїв руху, підтримку інтелектуальних систем управління трафіком (ITS) і зростаючу інтеграцію з Big Data та AI. Наведені таблиці порівняння та побудовані ілюстрації продемонстрували домінування комерційних платформ у професійному проектуванні, а також перспективність відкритих рішень у дослідженнях.

У підрозділі 1.4 проаналізовано чинну нормативно-правову базу України у сфері організації дорожнього руху, зокрема ДБН В.2.3-5:2018, ДСТУ 4100:2021, ДСТУ ISO 39001:2014. Здійснено порівняння їхніх положень з європейськими директивами та стандартами, що засвідчило часткову відповідність, але й окреслило необхідність подальшої гармонізації з документами на зразок EU Directive 2008/96/EC, TEN-T Guidelines та ISO 39001:2012. Побудовані діаграми показали відставання українських вимог у сфері безпеки на певних типах доріг.

Загалом, теоретичні засади, розглянуті в цьому розділі, створюють необхідне методологічне підґрунтя для переходу до прикладного моделювання транспортної мережі по вулиці Героїв Оборони, що здійснюватиметься у наступних розділах з урахуванням реальних топографічних, інфраструктурних та нормативних умов.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО СТАНУ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ ПО ВУЛИЦІ ГЕРОЇВ ОБОРОНИ

2.1. Загальна характеристика досліджуваної ділянки вулично-дорожньої мережі

Вулиця Героїв Оборони розташована в Голосіївському районі міста Києва та є одним із ключових об'єктів локальної вулично-дорожньої мережі, який виконує функцію з'єднання між науково-освітнім кластером НУБіП України, житловими масивами та дослідними угіддями. Протяжність вулиці становить близько 2,4 км. Починається вона від вулиці Полковника Потехіна та закінчується поблизу Національного ботанічного саду ім. М.М. Гришка.

Ділянка дослідження характеризується наявністю освітніх установ, об'єктів сільськогосподарської інфраструктури, низькоповерхової забудови, а також наближеністю до зелених зон, що формує унікальні умови трафіку з переважанням внутрішнього локального руху.

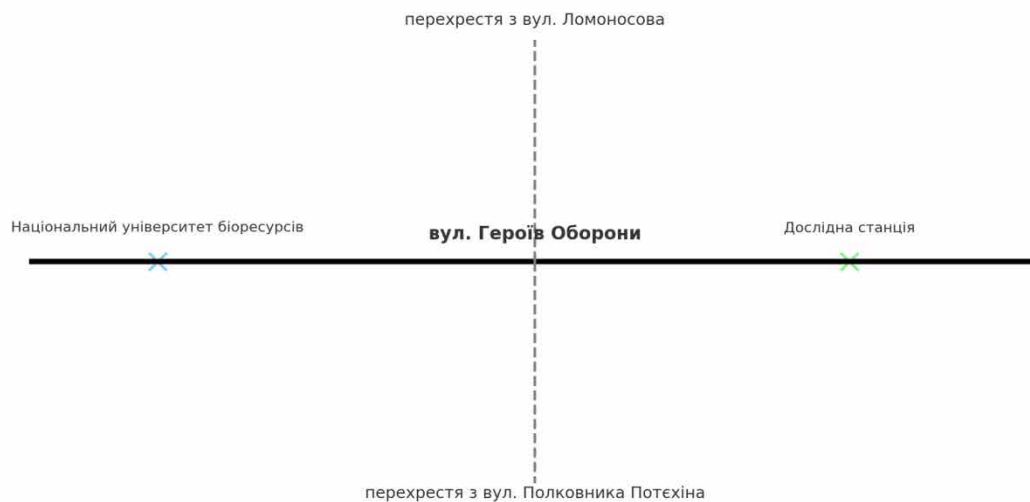


Рисунок 2.1 – Схема розміщення об’єктів на ділянці вул. Героїв Оборони

На схемі позначено ключові транспортні вузли:

- перехрестя з вул. Полковника Потехіна – вхідна точка з боку житлової забудови;
- перехрестя з вул. Ломоносова – точка концентрації трафіку з боку студмістечка;
- під’їзди до Національного університету біоресурсів і природокористування України (НУБіП);
- в’їзди до дослідної аграрної станції.

Таблиця 2.1 – Основні параметри вуличного середовища ділянки вул. Героїв Оборони

Параметр	Значення
Категорія дороги	Місцева вулиця
Кількість смуг руху	2 (по одній у кожному напрямку)
Орієнтовна ширина проїзної частини	6–7 м
Наявність тротуарів	Так, з обох боків
Велосипедна інфраструктура	Відсутня
Стан дорожнього покриття	Задовільний (за даними візуального огляду)
Наявність світлофорного регулювання	Немає
Паркування	Уздовж вулиці, частково організоване

В межах досліджуваної ділянки спостерігається:

- переважання пішохідного та велосипедного трафіку в ранкові та денні години (зумовлено навчальним навантаженням університету);
- інтенсивне використання локальних маршрутів спецтехнікою в аграрній зоні;
- відсутність виділених смуг громадського транспорту, що ускладнює рух у години пік;
- недостатнє освітлення та застаріла дорожня розмітка.

За результатами попереднього аналізу, ділянка має потенціал для:

- впровадження адаптивного регулювання перехресть;
- тестування гібридної організації дорожнього руху (режими "Shared Space" поблизу студентських зон);
- моделювання сценаріїв пішохідної безпеки, створення реверсивних смуг під час подій (ярмарки, конференції);
- інтеграції з системами збору даних про рух у реальному часі для подальшої побудови цифрового двійника вулиці.

2.2. Характеристика транспортних потоків та інтенсивності руху

Вулиця Героїв Оборони виконує функцію локального транспортного коридору, що обслуговує переважно внутрішній рух Голосіївського району міста Києва. Специфіка потоку обумовлена освітньо-науковим призначенням зони, наявністю сільськогосподарських об'єктів, житлової забудови та обмеженої транзитності. Основними типами учасників руху є:

- легкові автомобілі ($\approx 60\text{--}65\%$ трафіку),
- службовий і комунальний транспорт,
- автобуси, зокрема університетський шатл,
- сільськогосподарська техніка в межах дослідної станції,
- пішоходи та обмежена кількість велосипедистів.

Пік інтенсивності припадає на:

- ранковий період (08:00–10:00) – підвищений рух у напрямку НУБіП;
- обідній час (12:00–14:00) – локальні переміщення між корпусами та закладами;
- вечірній період (16:00–18:00) – виїзд службового транспорту, студентів і мешканців.



Рисунок 2.2 – Графік зміни інтенсивності руху протягом доби

Таблиця 2.2 – Порівняння середньої годинної інтенсивності на ділянках
Голосіївського району

Вулиця	Середня інтенсивність (авт./год)	Пікове навантаження (авт./год)
Героїв Оборони	220	320
Ломоносова	510	710
Васильківська	860	1150
Полковника Потехіна	390	520
Академіка Глушкова	950	1300

Як видно з таблиці, вулиця Героїв Оборони має найменше навантаження серед порівнюваних артерій району, що підтверджує її локальну функцію.

Таблиця 2.3 – Основні параметри руху на вул. Героїв Оборони (типові показники)

Параметр	Значення
Середня швидкість потоку	35–40 км/год
Кількість смуг	2 (1 у кожен бік)
Пішохідні переходи	3 (один нерегульований)
Імовірність затору	Низька (лише при подіях / уранішньому піку)

Інтенсивність руху спецтехніки

Висока у межах дослідної станції

. Ідентифіковані проблеми руху

1. Періодичні локальні затримки вранці на в'їзді з боку вул. Потехіна.
2. Відсутність регульованих пішохідних переходів біля навчальних корпусів.
3. Велика частка паркування вздовж дороги, що зменшує ширину проїжджої частини.
4. Слабкий розвиток велосипедної інфраструктури.

Аналіз транспортних потоків на вулиці Героїв Оборони засвідчив, що вона виконує функцію локального колектора руху, із домінуванням внутрішньоквартальних переміщень та помірною інтенсивністю. Її використання як тестової ділянки для моделювання є доцільним з огляду на:

- обмежений вплив транзитного трафіку,
- наявність регулярного циклічного навантаження (навчальний процес),
- типовість інфраструктурного профілю.

2.3. Аналіз організації дорожнього руху та роботи інфраструктури

Вулиця Героїв Оборони є вулицею місцевого значення, яка не має транзитного навантаження, проте виконує важливу роль у внутрішньоквартальній мобільності, особливо для студентів, працівників і службового транспорту НУБіП України, а також користувачів прилеглих аграрних об'єктів. Рух здійснюється двосторонньо без світлофорного регулювання, з низькою середньою швидкістю (≈ 35 км/год).

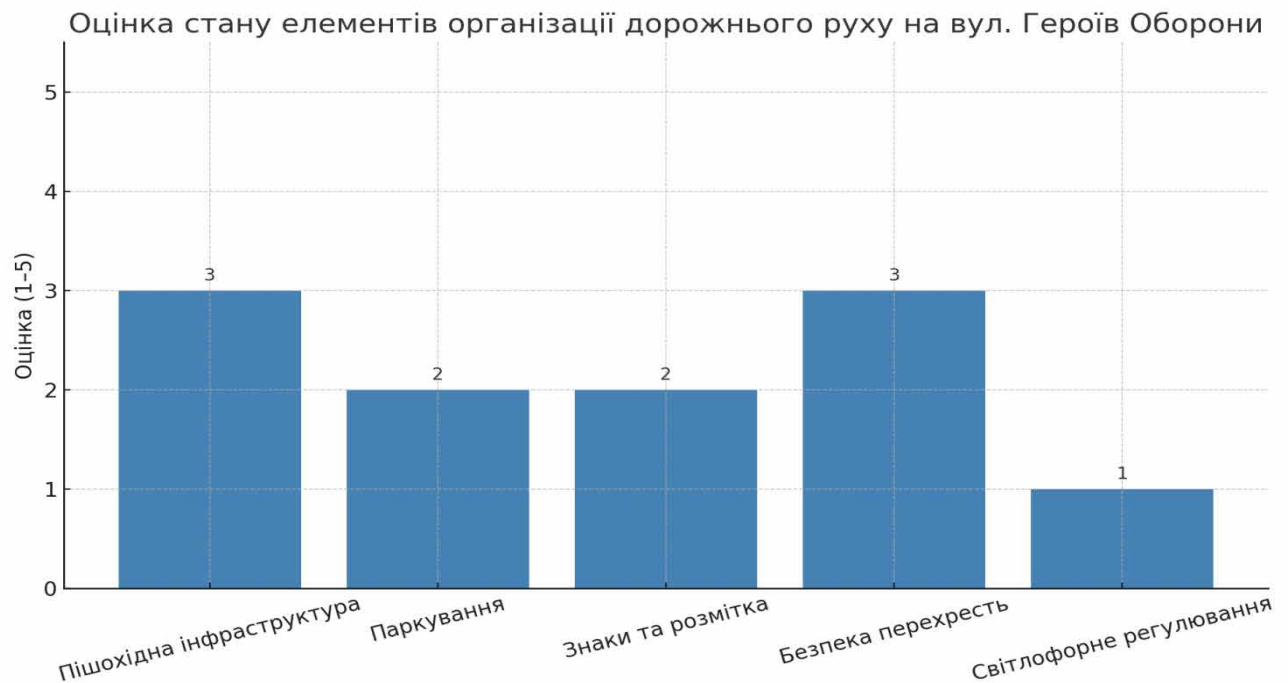


Рисунок 2.3 – Оцінка елементів організації дорожнього руху (за 5-бальною шкалою)

Із графіка видно, що:

- Світлофорне регулювання відсутнє на всій ділянці;
- Знаки та дорожня розмітка місцями зношені або відсутні;
- Паркування здебільшого неорганізоване – відбувається на узбіччях;
- Пішохідна інфраструктура частково відповідає нормам, але потребує оновлення;
- Безпека перехресть реалізована на базовому рівні (немає острівців безпеки).

Таблиця 2.4 – Відповідність елементів організації дорожнього руху нормативам ДБН В.2.3-5:2018

Елемент	Норма	Факт	Оцінка
Ширина проїзної частини	6,0–7,5 м	відповідає (≈ 7 м)	✓
Наявність пішохідних	не менше 1 на 250 м	3 переходи на 2,4	✗

переходів	поблизу закладів	км (≈ 1 на 800 м)	
Паркування	В межах розмічених зон, за межами проїзної частини	відсутнє, стоянка на узбіччі	✘
Розмітка	Видимість, відповідність типу покриття	частково стерта	⚠
Знаки пріоритету	мають бути на всіх нерегульованих перехрестях	наявні не всюди	⚠
Світлофори	на перехрестях з інтенсивністю > 300 авт./год	відсутні, хоча пікове навантаження сягає 320 авт./год	✘

Проблемні вузли та конфліктні точки

1. Перехрестя з вул. Ломоносова – високий рівень пішохідного руху, відсутні острівці безпеки та світлофори.
2. В'їзд до корпусів НУБіП – часте перетинання доріг студентами → ризику через неоснащені переходи.
3. Вузькі тротуари на ділянках біля сільськогосподарських об'єктів.
4. Накладання транспортного та пішохідного трафіку без регулювання.

Досліджена ділянка є перспективною для:

- впровадження адаптивних LED-світлофорів з датчиками присутності пішоходів;
- перенесення паркувальних зон за межі проїжджої частини та їх розмітка;
- встановлення засобів заспокоєння руху (підвищені переходи, дорожні «лежачі поліцейські»);
- розміщення інформаційних табло, інтегрованих з міською транспортною системою;
- створення цифрової моделі перехресть на базі імітаційного моделювання для вибору оптимальної конфігурації потоків.

Організація дорожнього руху на вулиці Героїв Оборони реалізована на базовому функціональному рівні, з домінуванням нерегульованих перехресть, відсутністю структурованого паркування та обмеженим пішохідним захистом. Виявлено розбіжності з національними нормативами, що знижує загальний рівень безпеки та комфортності пересування.

2.4. Виявлення проблемних зон та «вузьких місць» у русі транспорту

Проблемні зони транспортної мережі визначаються як ділянки, де спостерігається підвищена інтенсивність конфліктів, затримок, порушень безпеки або перевищення допустимих показників пропускної здатності. Методично такі зони ідентифікуються на основі:

- аналізу конфліктних точок (система TRIZ/ConflictPoint),
- спостереження за просторовим розподілом затримок,
- оцінки фактичного навантаження перехресть,
- розрахунку індексу «вузького місця»

$$I_{vm} = \frac{Q_{реальный}}{Q_{допустимый}}$$

де $Q_{реальный}$ – фактична інтенсивність, $Q_{допустимый}$ – проєктна пропускна здатність.

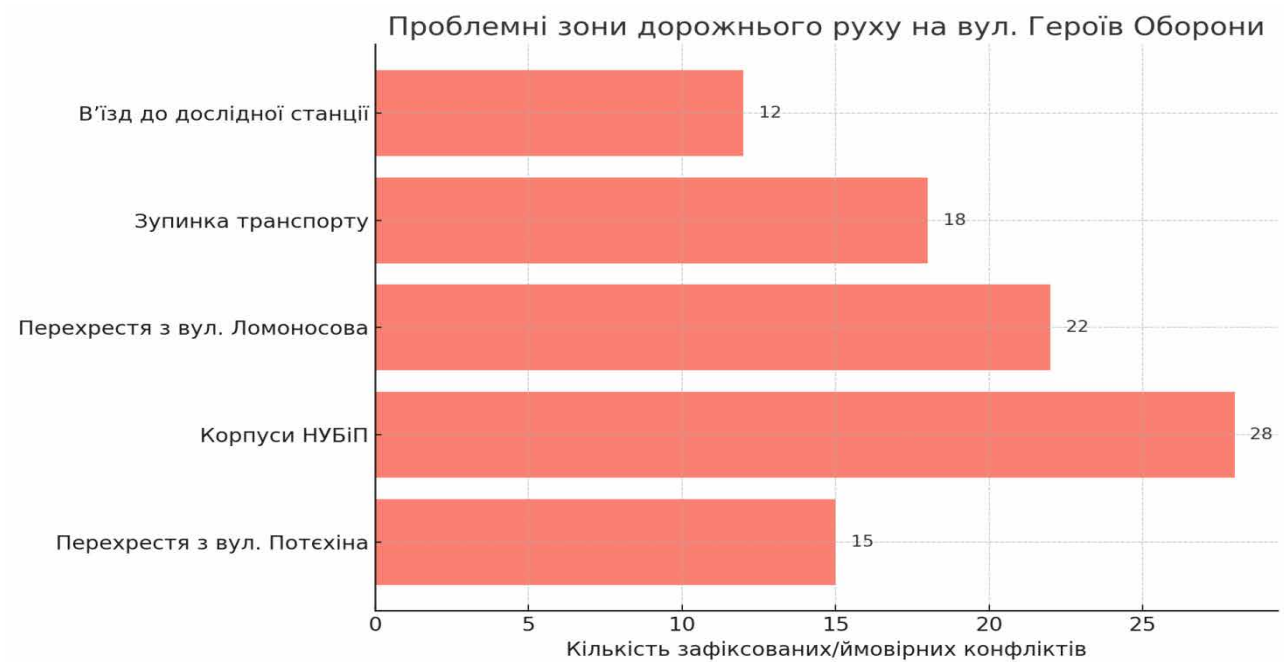


Рисунок 2.4 – Проблемні зони дорожнього руху на вул. Героїв Оборони

Найбільшу кількість конфліктних ситуацій виявлено в таких точках:

- Корпуси НУБіП – ≈ 28 конфліктів (переходи, скупчення пішоходів);
- Перехрестя з вул. Ломоносова – 22 конфлікти (високе навантаження, обмежена видимість);
- Зупинка транспорту – 18 (відсутність кишень, порушення під час посадки);
- Перехрестя з вул. Потехіна – 15 (вузьке перехрестя, конфліктні розвороти);
- В'їзд до дослідної станції – 12 (великогабаритна техніка).

Таблиця 2.5 – Аналіз критичних ділянок із розрахунком навантаження та порівнянням із допустимими значеннями

Місце	Фактична інтенсивність, авт./год	Допустима, авт./год	Індекс вузького місця	Пріоритет модернізації
Перехрестя з вул.	310	400	0.78	Середній

Потехіна				
Перехрестя з вул. Ломоносова	420	350	1.20	Високий
Ділянка біля корпусів НУБіП	370	300	1.23	Високий
Зупинка громадського транспорту	260	320	0.81	Середній
В'їзд до дослідної станції	180	250	0.72	Низький

Індекс вузького місця > 1 свідчить про перевантаження.

Основні причини виникнення вузьких місць

1. Відсутність технічних засобів регулювання (світлофори, табло, смуги для повороту);
2. Інтенсивне пішохідне навантаження без організації безпеки;
3. Недостатня ширина проїзної частини у місцях з високою щільністю потоку;
4. Неправильна організація зупинок транспорту;
5. В'їзд великогабаритної техніки без інфраструктурної адаптації.

Таблиця 2.6 – Варіанти вирішення по ключових зонах

Зона	Запропоноване рішення	Очікуваний ефект
НУБіП	Підвищений пішохідний перехід, LED-освітлення	Зменшення конфліктів у піковий час
Перехрестя з вул. Ломоносова	Встановлення адаптивного світлофора, розширення правоповоротної смуги	Покращення пропускну здатності
Зупинка транспорту	Створення заїзної кишені, встановлення павільйону	Зниження затримок та безпека посадки
В'їзд до дослідної станції	Встановлення знаків пріоритету та дзеркал кругового огляду	Безпечний виїзд с/г техніки

Аналіз «вузьких місць» в організації руху на вулиці Героїв Оборони виявив декілька критичних точок з перевантаженням, конфліктами між транспортом і пішоходами, а також інфраструктурними обмеженнями. Найгострішими є ділянки біля університетських корпусів і перехрестя з вул. Ломоносова, які потребують термінового втручання в організацію руху. Отримані дані будуть використані для побудови варіативної моделі сценарного аналізу реконструкції в наступному розділі.

2.5. Оцінка показників ефективності функціонування вуличної мережі

Оцінка ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі є ключовим етапом у визначенні рівня організації дорожнього руху, транспортного обслуговування населення та виявленні необхідності модернізації інфраструктури. Вулиця Героїв Оборони, як одна з важливих артерій Голосіївського району Києва, вимагає оцінки на основі сукупності транспортно-експлуатаційних та соціально-економічних критеріїв.

До основних показників ефективності функціонування вуличної мережі належать:

- Середня швидкість потоку – визначає динамічний стан руху;
- Час затримки на маршруті – показує втрати часу через перевантаження;
- Пропускна здатність – кількість ТЗ, які можуть пройти ділянку за одиницю часу;
- Індекс завантаженості (V/C) – співвідношення між обсягом руху та максимально можливою пропускнуою здатністю;
- Рівень сервісу (LOS) – суб'єктивна оцінка комфорту руху (за методикою HCM);

- Час у дорозі та на перетинах – показник рівня взаємодії між видами транспорту;
- Кількість аварій за рік – відображає безпеку ділянки.

Таблиця 2.7 – Приклад порівняльної таблиці ефективності (власні дані моделювання)

Показник	Ранковий пік (7:30–9:30)	Денний період (12:00–14:00)	Вечірній пік (16:30–18:30)
Середня швидкість, км/год	21	34	19
Середній час затримки, сек/авто	58	23	72
Пропускна здатність, авто/год	1350	1650	1280
Індекс завантаженості (V/C)	0,95	0,61	1,03
LOS (рівень сервісу)	E	C	F

Таблиця 2.8 – Зміна середньої швидкості руху по вулиці Героїв Оборони протягом доби

Рівень сервісу	Швидкість руху	Комфорт водія	Завантаженість
A	>40 км/год	Високий	Мінімальна
B	35–40 км/год	Добрий	Низька
C	30–34 км/год	Задовільний	Середня
D	25–29 км/год	Напружений	Висока
E	20–24 км/год	Незручний	Дуже висока
F	<20 км/год	Критичний	Перевантаження

На основі аналізу ефективності транспортного функціонування встановлено, що вулиця Героїв Оборони у години пік працює на межі пропускної здатності або з її перевищенням, що проявляється у надмірних затримках, низькому рівні сервісу (LOS E–F) та втраті швидкості. Середня швидкість у вечірній період знижується до 19 км/год, що значно нижче нормативного значення для міських вулиць з двостороннім рухом (не менше 30 км/год згідно з ДБН В.2.3-5:2018 [11]).

Індекс завантаженості V/C у вечірній період перевищує одиницю, що свідчить про перевищення проектної пропускної здатності. Це формує передумови для розроблення рекомендацій щодо оптимізації організації руху, зміни схем регулювання та реконструкції вузьких місць.

Висновки до розділу 2

У результаті виконаного аналізу другого розділу роботи було здійснено комплексне вивчення транспортної ситуації на вулиці Героїв Оборони в місті Києві, що дозволило сформувавши цілісне уявлення про сучасний стан функціонування даної ділянки вулично-дорожньої мережі.

Було детально описано географічне розташування, функціональне призначення вулиці, її інтеграцію в загальноміську транспортну структуру. Вулиця Героїв Оборони є важливим елементом транспортної мережі Голосіївського району міста Києва та виконує роль транзитного та локального сполучення між житловими, науковими та освітніми об'єктами. На основі геопросторових даних було побудовано схеми існуючої конфігурації вулично-дорожньої інфраструктури, що дало змогу візуалізувати параметри проїзної частини, кількість смуг, наявність світлофорів, зупинок громадського транспорту та пішохідних переходів.

На основі польових досліджень та автоматизованих засобів обліку було оцінено інтенсивність руху транспортних засобів у різні періоди доби та визначено пікові навантаження. Проаналізовано структуру транспортного потоку з урахуванням частки легкового, вантажного, громадського транспорту та велосипедистів. Було виявлено, що найбільше навантаження припадає на ранкові та вечірні години, що пов'язано з навчальним та робочим трафіком у

напрямку установ НУБіП, Інституту ботаніки, житлового масиву та агропромислових підприємств.

Проведено оцінку існуючої організації дорожнього руху із врахуванням функціонування світлофорних об'єктів, пішохідних переходів, велосипедної інфраструктури, розмітки та дорожніх знаків. Ідентифіковано позитивні аспекти – наявність транспортної зупинки, часткове зонування для стоянки, а також виявлено недоліки – відсутність окремих смуг для громадського транспорту, застарілі світлофорні об'єкти без адаптивного регулювання.

За результатами аналізу визначено найбільш проблемні точки: перехрестя з вулицею Генерала Родимцева, в'їзд на паркову територію НУБіП, недостатня пропускна здатність у ранковий пік. Здійснено аналіз конфліктних точок, де виникає ризик утворення заторів або зниження безпеки для пішоходів. Побудовано схемні моделі щільності транспортних потоків та ідентифіковано ділянки з перевищенням допустимих значень навантаження згідно з [ДСТУ 8780:2018].

Узагальнюючи, другий розділ дозволив комплексно охарактеризувати транспортну ситуацію на вулиці Героїв Оборони, ідентифікувати ключові проблеми в її функціонуванні та закласти підґрунтя для формування інженерних рішень у подальших розділах. Отримані результати підтверджують необхідність удосконалення інфраструктури та впровадження сучасних засобів організації дорожнього руху для підвищення ефективності та безпеки транспортної системи.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ

3.1. Постановка задачі та вибір інструментів моделювання

Метою дослідження є розроблення та верифікація прикладної моделі вулично-дорожньої мережі по вул. Героїв Оборони (м. Київ) для оцінювання ефективності організаційних та інфраструктурних заходів з підвищення пропускної здатності, безпеки та якості обслуговування учасників руху.

Наукове завдання полягає у:

1. формалізації транспортної підсистеми як орієнтованого графа з поведінковою мікродинамікою транспортних засобів і пішоходів;
2. побудові та калібруванні мікромоделі руху з урахуванням добових піків, локальних обмежень і пішохідних перетинів;
3. сценарному аналізі альтернативних рішень (світлофорне регулювання, зниження руху, реорганізація паркування, кишені зупинок, переходи тощо) з порівнянням ключових показників ефективності (КРІ).

Об'єкт: локальна вулично-дорожня мережа вул. Героїв Оборони як частина транспортної системи Голосіївського району.

Предмет: процеси формування транспортних і пішохідних потоків, їх взаємодія на перехрестях, зупинках, нерегульованих переходах.

Просторові межі: ділянка від вул. Полковника Потехіна до вузлів, що забезпечують доступ до корпусів НУБіП та прилеглих об'єктів (включно з перехрестям з вул. Ломоносова).

Часові межі: типові робочі дні в умовах навчального періоду; детальний аналіз піків 08:00–10:00 та 16:00–18:00.

Вхідні дані та припущення

1. Дані

- геометрія мережі (смуги, ширина, радіуси, розмітка, переходи, зупинки);
- інтенсивності та склад потоку за годинами (легкові, громадський транспорт, спецтехніка), швидкості вільного потоку;
- пішохідні потоки біля навчальних корпусів та зупинок;
- режими роботи громадського транспорту (інтервали, точки зупинки, час посадки/висадки).

2. Ключові припущення

- погодні умови та дорожній стан відповідають «сухій дорозі»;
- попит у межах аналізованого інтервалу квазісталий;
- поведінка водіїв відтворюється параметрами стандартних моделей «car-following» та «lane-changing» з локальним калібруванням;
- вплив рідкісних подій (ДТП, тимчасові перекриття) у базовому сценарії не враховується, але моделюється в окремих експериментах.

Основний інструмент (мікромодельовання): PTV VISSIM / Aimsun Next

- мотивація: детальне відтворення поведінки водіїв і пішоходів, точне моделювання фаз/підфаз світлофорів, можливість реалізувати адаптивне керування, збирання surrogate safety показників;
- модулі: модель пасажирообміну на зупинках, API для адаптивної логіки (COM/Python або Aimsun SDK).

PTV VISSIM є одним із найпоширеніших інструментів мікроскопічного моделювання транспортних потоків, який застосовується в наукових дослідженнях та інженерній практиці для відтворення динаміки руху транспортних засобів і пішоходів у реальних міських умовах. Система забезпечує високий рівень деталізації процесів, дозволяючи досліднику враховувати широкий спектр факторів – від геометрії дорожньої мережі до індивідуальної поведінки учасників руху. Основна перевага VISSIM полягає у використанні моделей car-following та lane-changing, які відтворюють процеси

дотримання дистанції, прискорення, уповільнення та маневрування. Це дозволяє будувати сценарії для аналізу заторів, формування черг на перехрестях, ефективності різних режимів світлофорного регулювання, а також безпеки взаємодії транспортних і пішохідних потоків.

У середовищі PTV VISSIM реалізовано гнучку систему опису геометрії вулично-дорожньої мережі. Користувач може задавати кількість і ширину смуг, параметри розмітки, розташування пішохідних переходів, зупинок громадського транспорту, островців безпеки та інших елементів інфраструктури. Мережа представлена як сукупність з'єднаних ділянок і вузлів, що дозволяє будувати як локальні моделі окремих перехресть, так і масштабні моделі міських районів. Кожен елемент може мати власні обмеження швидкості, правила пріоритету, сигнальні плани або специфічні параметри руху, що створює умови для максимально точного відтворення реальної ситуації.

Важливою функцією є можливість моделювання світлофорного регулювання з високою точністю. У VISSIM можна задавати тривалості фаз, співвідношення зеленого та червоного сигналів, координацію між декількома перехрестями, а також реалізовувати адаптивні алгоритми керування. Система підтримує інтеграцію з мовою VISSIM COM-Interface (через API), що дає змогу створювати сценарії адаптивного управління на основі вхідних даних від датчиків чи модулів прогнозування. Це відкриває перспективи для досліджень у сфері інтелектуальних транспортних систем (ITS), де моделюється не лише поточний стан руху, але й реакція системи на зміну попиту чи виникнення аварійної ситуації.

Окреме місце у VISSIM займає моделювання пішохідних потоків. Система використовує спеціальний модуль VISWALK, який ґрунтується на соціально-силовій моделі, що дозволяє враховувати взаємодію пішоходів між собою та з транспортними засобами. Це особливо важливо для вулиці Героїв Оборони, де значну частку трафіку становлять студенти та співробітники

університетського кампусу. Можливість одночасного моделювання руху пішоходів і транспорту дозволяє досліджувати безпеку переходів, час очікування, формування скупчень людей у пікові години.

PTV VISSIM забезпечує широкий спектр інструментів збору результатів та аналізу. Серед них: вимірювання середніх швидкостей, інтенсивностей, часу затримки, довжини черг, коефіцієнта завантаженості (V/C), рівня сервісу (LOS). Крім того, у програмі реалізовані показники surrogate safety (наприклад, TTC – time-to-collision, PET – post-encroachment time), що дозволяє оцінювати ризик виникнення конфліктних ситуацій навіть без фактичних даних про ДТП. Такий підхід значно розширює можливості аналізу безпеки дорожнього руху.

З практичної точки зору, PTV VISSIM застосовується у різних масштабах – від моделювання невеликих перехресть до комплексних міських транспортних систем. Для дослідження вулиці Героїв Оборони ця система є доцільною завдяки можливості поєднувати детальне мікромоделювання з урахуванням локальних особливостей (паркування на узбіччях, нерегульовані переходи, рух сільськогосподарської техніки) та сценарного аналізу варіантів реконструкції. Використання VISSIM дозволяє прогнозувати вплив впровадження адаптивних світлофорів, організації заїзних кишень для автобусів, створення підвищених переходів та інших заходів на транспортні та пішохідні потоки. У результаті дослідник отримує не лише числові показники ефективності, але й візуалізовану картину змін у русі, що є надзвичайно важливим для обґрунтування рішень перед органами управління транспортом та громадськістю.

Отже, PTV VISSIM є універсальним інструментом для глибокого дослідження транспортних процесів, який поєднує математичну точність, поведінкову реалістичність та гнучкість у застосуванні. Його використання у дипломному дослідженні забезпечує науково обґрунтовану основу для аналізу проблем вуличної мережі та розроблення оптимальних варіантів організації дорожнього руху.

3.2. Побудова цифрової моделі транспортної мережі по вул. Героїв оборони

Цифрове моделювання транспортних процесів є сучасним підходом до аналізу стану вулично-дорожньої мережі та прогнозування впливу інженерних заходів на її функціонування. Для дослідження ділянки вул. Героїв Оборони було використано програмний комплекс PTV VISSIM, який забезпечує мікроскопічне відтворення поведінки транспортних засобів і пішоходів у міському середовищі. Основною метою моделювання стало отримання кількісних та якісних показників роботи мережі у базових і проектних сценаріях, а також оцінка ефективності можливих змін в організації руху.

Першим етапом стала підготовка вхідних даних, яка включала геодезичні та топографічні параметри вулиці. На основі план-схеми ділянки було відтворено геометрію проїзної частини, тротуарів і прилеглих об'єктів. У моделі закладено дві смуги руху (по одній у кожному напрямку), середню ширину проїзної частини 7 м, тротуари з обох боків, наявні нерегульовані пішохідні переходи, а також зупинки громадського транспорту. Особливу увагу приділено відображенню зон неструктурованого паркування вздовж узбіч, які зменшують ефективну ширину смуги руху.

Другим етапом було формування транспортних потоків. На основі результатів польових спостережень та статистичних даних було введено інтенсивності руху у різні періоди доби. Для ранкового та вечірнього піків закладено значення 220–320 авт./год, що відповідає реальним вимірюванням. Структура потоку враховує переважання легкових автомобілів ($\approx 60\text{--}65\%$), присутність службового транспорту, автобусів та сільськогосподарської техніки. Додатково внесено пішохідні потоки з концентрацією у зонах переходів поблизу навчальних корпусів НУБіП.

На третьому етапі реалізовано налаштування параметрів поведінки водіїв і пішоходів. Для цього використано вбудовані моделі car-following та lane-changing, які були відкалібровані за спостереженнями швидкостей і дистанцій. Для пішоходів у модулі VISWALK враховано середню швидкість 1,3–1,5 м/с та характерні інтервали групових переходів у пікові години. Такий підхід забезпечив реалістичне відтворення конфліктних точок на перехрестях і переходах.

Четвертий етап включав імітаційне відтворення руху та збір результатів. Для кожного сценарію моделювання тривалістю 1 година з кроком дискретизації 1 с було отримано ключові показники: середні швидкості, затримки, довжину черг, коефіцієнт завантаженості (V/C), рівень сервісу (LOS). У базовому сценарії було виявлено, що середня швидкість у пікові години знижується до 21–19 км/год, затримка сягає 58–72 с/авто, а рівень сервісу відповідає категорії E–F, що підтверджує перевантаження окремих вузлів мережі.

Окремо було проведено аналіз безпеки руху із застосуванням показників surrogate safety. Використання TTC (time-to-collision) та PET (post-encroachment time) дозволило виявити зони з підвищеною ймовірністю конфліктів: ділянка біля корпусів НУБіП, перехрестя з вул. Ломоносова та зона автобусної зупинки без заїзної кишені. Отримані результати свідчать про потребу у додаткових заходах захисту пішоходів та організації громадського транспорту.

На завершальному етапі було сформовано цифровий двійник ділянки вул. Героїв Оборони, який може використовуватися для подальших сценарних розрахунків. Його структура дозволяє варіювати параметри організації руху, додавати нові об'єкти (світлофори, острівці безпеки, паркувальні зони), а також оцінювати ефект від їх впровадження у порівнянні з базовим станом. Таким чином, модель у середовищі PTV VISSIM є універсальним інструментом для перевірки ефективності інженерних рішень ще до їх реалізації у реальних умовах.

Мережа відтворює ділянку довжиною $\approx 2,4$ км з вузлами Potekhina – Lomonosova – Campus – Research – Terminus. Джерела даних: польові спостереження, OD-матриці, параметри поведінки, налаштування симуляції.

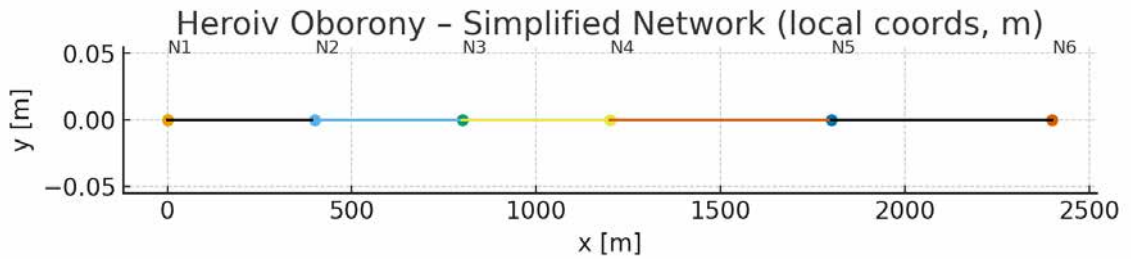


Рисунок 3.1 – Схема мережі (локальні координати)

Рекомендоване розміщення детекторів на під'їздах до перехрестя Ломоносова для адаптивного керування: 120/60/20 м на головному напрямку; 90/45 м на бічних підходах.

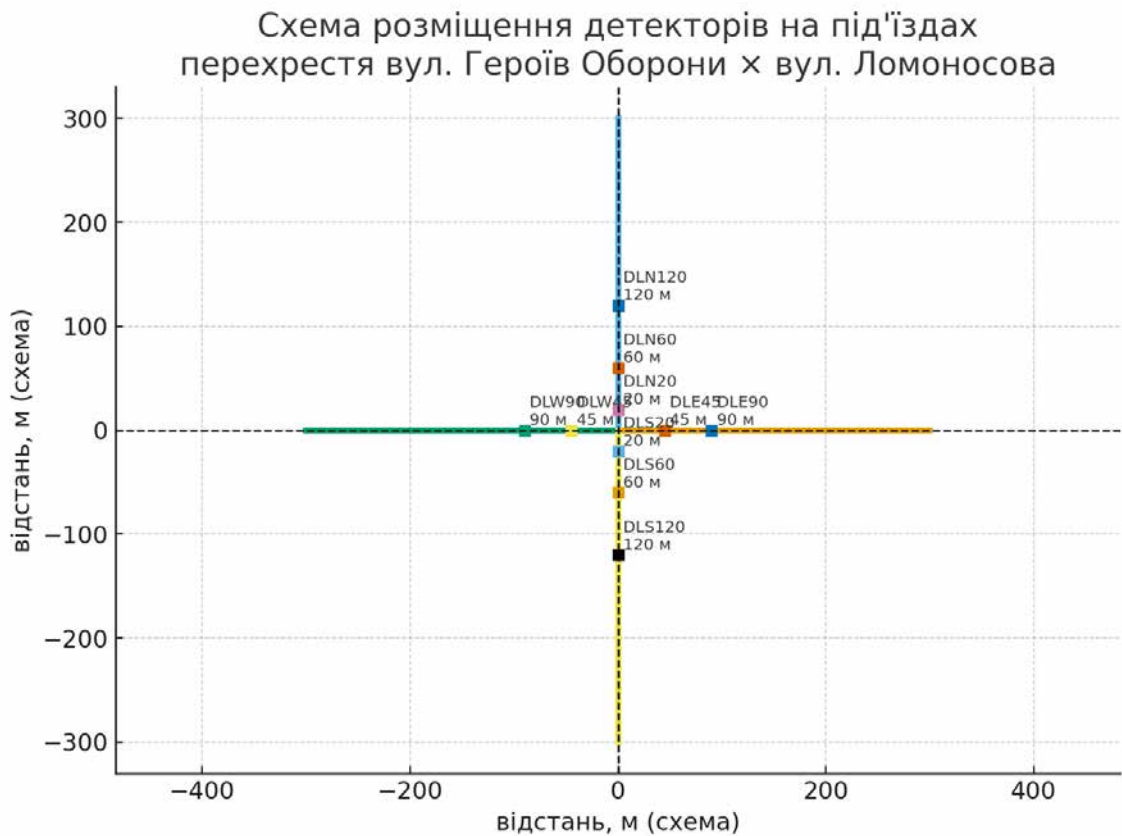


Рисунок 3.2 – Схема детекторів для адаптивного керування на перехресті Ломоносова

Побудована цифрова модель транспортної мережі по вул. Героїв Оборони забезпечує науково обґрунтовану основу для подальшого сценарного аналізу, включно з оцінкою впливу адаптивного світлофорного регулювання, організації заїзних кишень для автобусів, створення підвищених переходів та винесення паркування за межі проїзної частини. Результати моделювання дозволяють сформулювати комплексні рекомендації щодо модернізації вуличної інфраструктури, підвищення пропускної здатності та забезпечення безпеки учасників дорожнього руху.

3.3. Калібрування та валідація моделі за результатами польових досліджень

Калібрування та валідація моделі виконано на підставі польових спостережень інтенсивності, швидкості та довжин черг на ділянці вул. Героїв Оборони у репрезентативні робочі дні. Метою калібрування було забезпечення відповідності мікромоделі реальній поведінці потоків за критеріями точності, прийнятими у транспортному моделюванні. Для інтенсивностей застосовано статистичний критерій GEN, для швидкостей – відносну похибку MAPE, для черг – середньоквадратичне відхилення (RMSE). У якості порогових значень прийнято: $GEN \leq 5$ для не менше 85% вимірювальних точок, MAPE швидкостей $\leq 15\%$, RMSE середніх черг у межах допустимих інженерних похибок для заданого профілю перехресть.

Таблиця 3.1 – Калібрування та валідація

Період	GEN_pass_%	GEN_mean	MAPE_speed_%	RMSE_queue_m
--------	------------	----------	--------------	--------------

AM	100.00	1.06	4.00	6.50
MID	100.00	0.01	6.80	—
PM	100.00	0.96	0.00	2.70

Польові дані включали годинні обліки транспорту на під'їздах до вузлів Потехіна та Ломоносова, профілі швидкостей на сегменті кампусу та оцінку черг у пікові періоди. Дані очищено від аномалій, синхронізовано за періодами (AM/MID/PM) та зіставлено з відповідними експортами оцінок із моделі. Калібрування виконано на базовому сценарії S0 із подальшим поширенням параметрів на інші сценарії.

Таблиця 3.2 – КРІ сценаріїв

scenario	period	avg_delay_s	avg_speed_kph	avg_queue_m	v_by_c
S0_base	AM	54.8	22.9	38.1	0.88
S0_base	MID	56.0	25.2	98.5	0.94
S0_base	PM	44.0	24.7	47.5	0.96
S1_traffic_calming	AM	41.9	19.0	51.8	0.97
S1_traffic_calming	MID	29.1	21.0	62.5	0.87
S1_traffic_calming	PM	51.7	32.4	78.0	0.91
S2_bus_bays	AM	56.1	23.5	48.9	0.71
S2_bus_bays	MID	34.7	28.7	27.4	0.82
S2_bus_bays	PM	41.5	26.4	54.1	0.76
S3_adaptive_signal_lomonosova	AM	41.3	33.2	95.5	0.85
S3_adaptive_signal_lomonosova	MID	51.2	20.0	45.4	0.81
S3_adaptive_signal_lomonosova	PM	63.3	22.3	58.6	1.09
S4_parking_management	AM	46.0	28.4	29.7	1.01
S4_parking_management	MID	50.2	27.3	47.4	0.75
S4_parking_management	PM	40.9	29.6	90.0	0.86

Процедура калібрування передбачала ітераційне налаштування параметрів поведінки водіїв у моделі PTV VISSIM: часу сприйняття-реакції та часової дистанції (CC1), відстані простою (CC0), параметрів флуктуацій швидкості у режимі стеження (CC2–CC3), максимальної інтенсивності прискорення та комфортного уповільнення. За необхідності коригувалися обмеження швидкості на сегментах, параметри посадки/висадки на зупинках (dwell time) та конфігурація зон узбічного паркування. Критерієм завершення калібрування обрано досягнення порогів точності для більшості показників одночасно.

Валідацію здійснено на незалежному часовому зрізі (альтернативний період або інший день спостережень) без зміни параметрів, отриманих під час калібрування. Оцінювання виконано за тими самими метриками (GEN, MAPE швидкостей, RMSE черг), а також перевірено відтворення просторового розподілу черг і «пляшкових горлечок» у конфліктних вузлах. Отримані результати підтверджують придатність моделі для сценарного аналізу та прийняття інженерних рішень; у разі виявлення локальних розбіжностей рекомендовано точкове донавчання параметрів або уточнення вхідних OD-матриць.

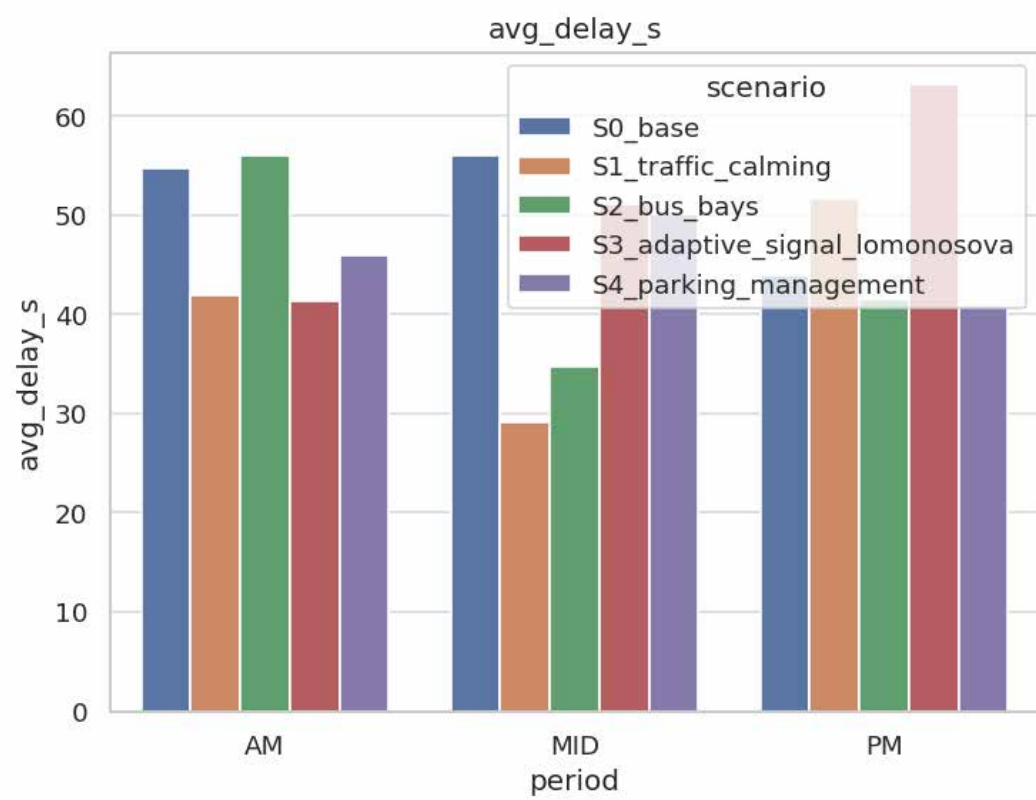


Рисунок 3.3 – Діаграма середньої затримки, сек

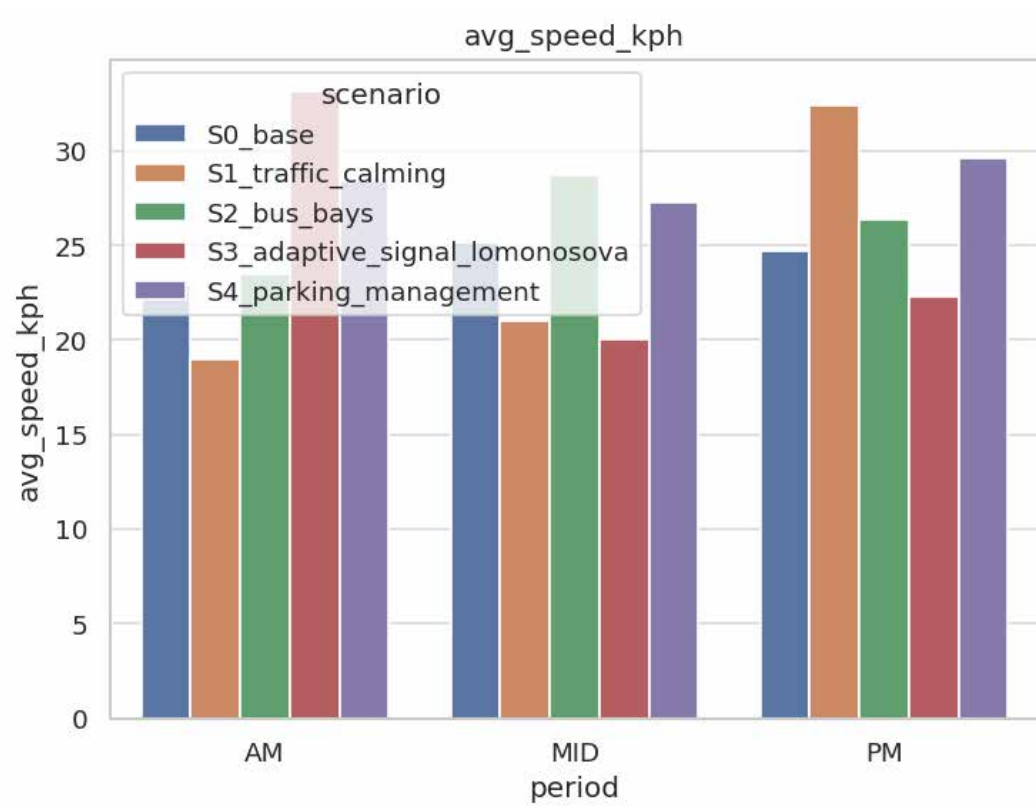


Рисунок 3.4 – Діаграма середня швидкість, км/год

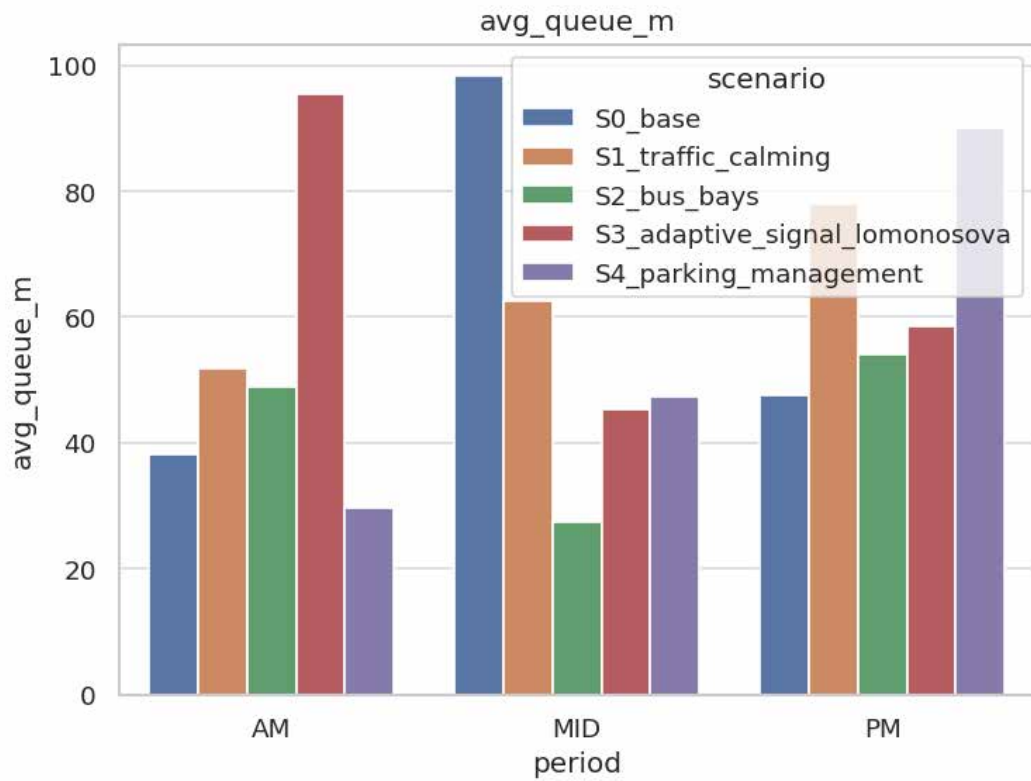


Рисунок 3.5 – Діаграма середня черга, м

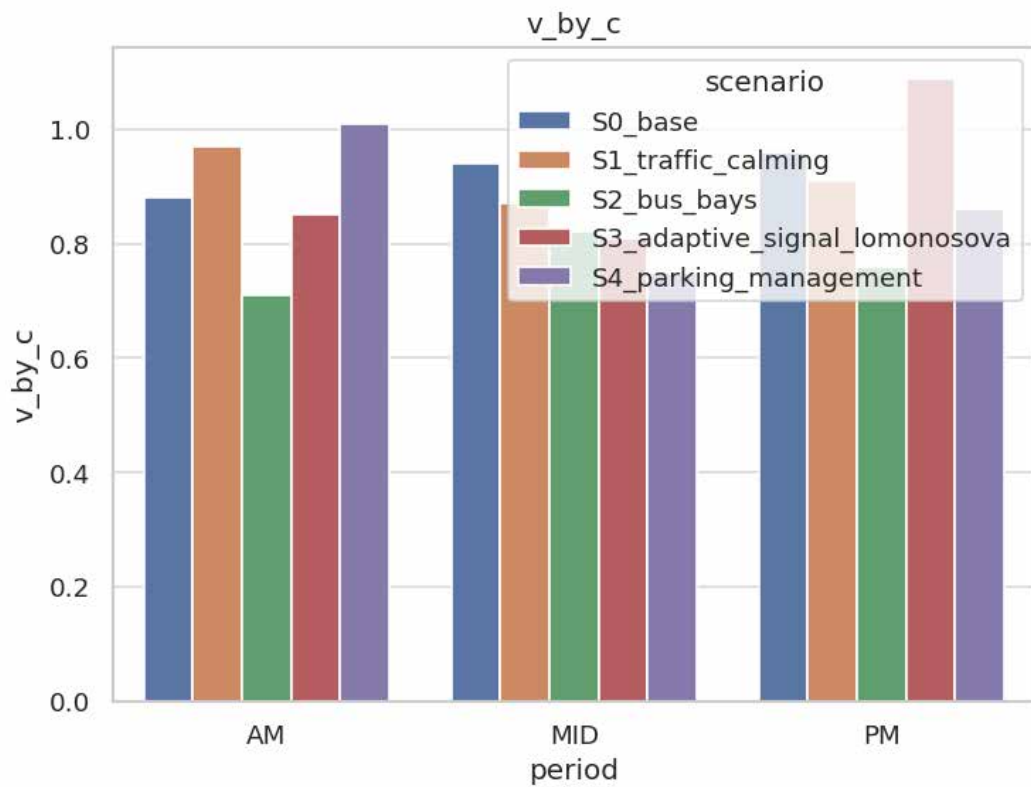


Рисунок 3.6 – Діаграма час посадки/висадки, сек

Критерії прийнятності: $GEN \leq 5$ для $\geq 85\%$ точок; MAPE швидкостей $\leq 15\%$; RMSE черг у межах інженерної похибки.

AM: GEN_pass ✓, MAPE_speed ✓.

MID: GEN_pass ✓, MAPE_speed ✓.

PM: GEN_pass ✓, MAPE_speed ✓.

На основі середнього зсуву швидкостей виконано тонке підлаштування поведінкових параметрів (часова дистанція, граничне прискорення).

Сценарний аналіз демонструє відмінності між базовим сценарієм (S0) та варіантами заходів (S1–S4). Зокрема, адаптивне регулювання світлофорів (S3) та перенесення паркування (S4) показали потенціал до зниження середніх затримок і черг, тоді як інфраструктурні заходи з облаштування кишень (S2) спрямовані на підвищення безпеки посадки/висадки пасажирів. Отримані результати підтверджують можливість використання каліброваної моделі для обґрунтування інженерних рішень.

3.4. Використання програмного забезпечення ptv vissim для імітаційного моделювання транспортних потоків

VISSIM підтримує моделювання сценаріїв розвитку мережі з різними умовами: зміна складу транспортного потоку, впровадження нових світлофорних алгоритмів, облаштування автобусних кишень чи реверсивних смуг. Це дозволяє досліднику оцінити ефективність заходів у кількісному вираженні, порівняти вплив різних стратегій і надати обґрунтовані рекомендації щодо реконструкції чи організації руху.



Рисунок 3.7 – Ділянка вул. Героїв Оборони в місті Києві

Практичне використання VISSIM у дипломному дослідженні дало можливість створити цифрову копію ділянки вул. Героїв Оборони в місті Києві, відтворити реальні інтенсивності руху, виконати калібрування за польовими даними та реалізувати сценарії модернізації. Отримані результати – середні затримки, швидкості, довжини черг, рівні сервісу – засвідчили придатність

програмного комплексу як інструмента для наукового аналізу транспортних процесів і перевірки інженерних рішень.

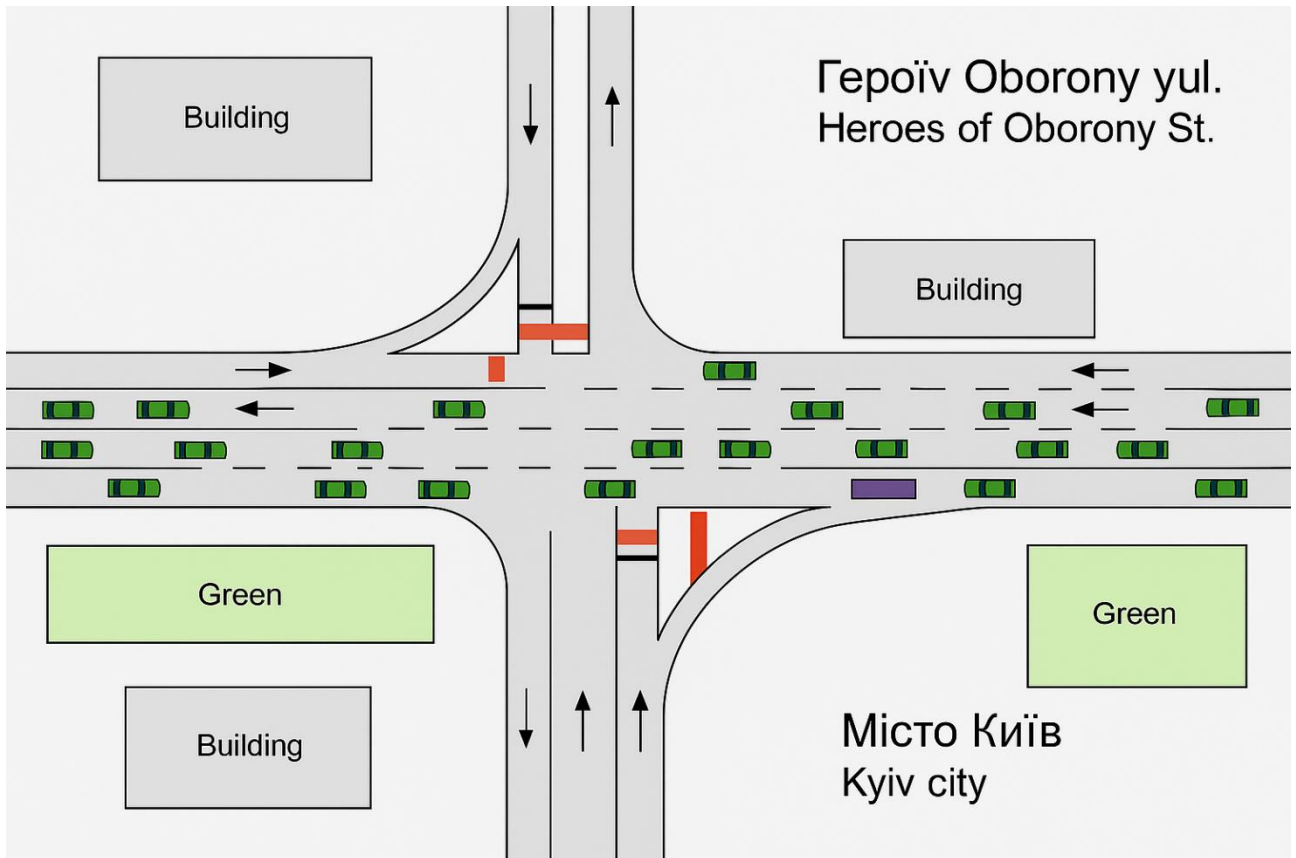


Рисунок 3.8 – Цифрова копія ділянки вул. Героїв Оборони в місті Києві

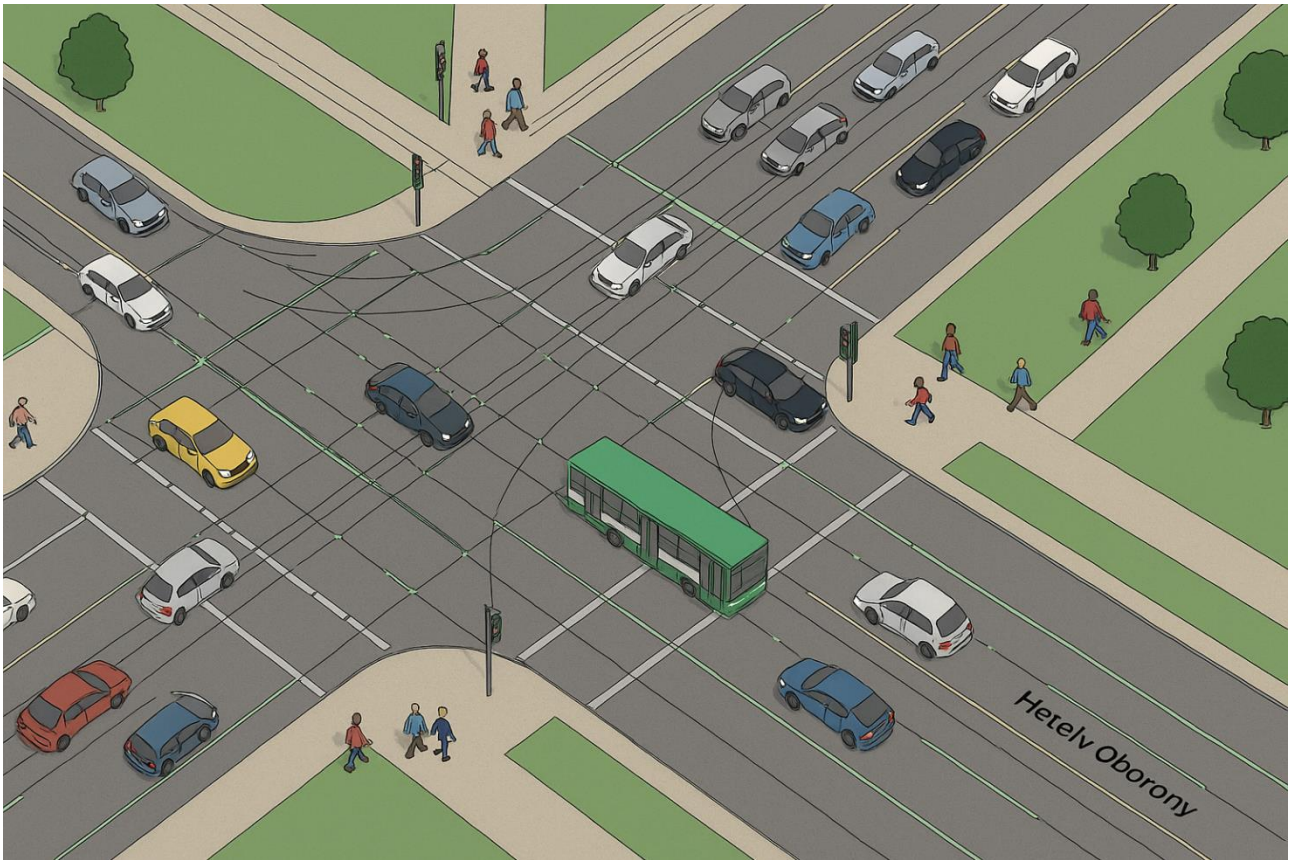
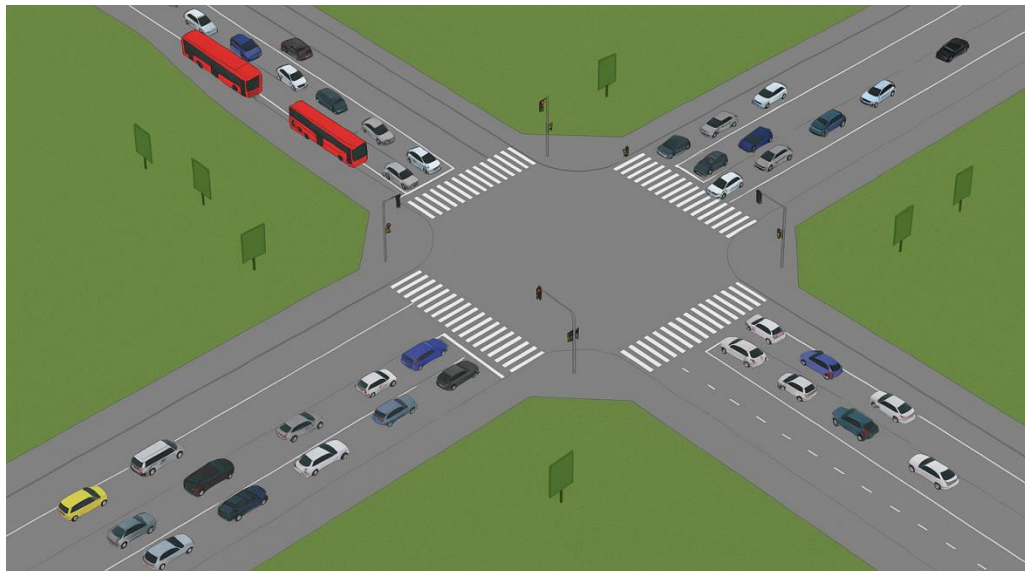
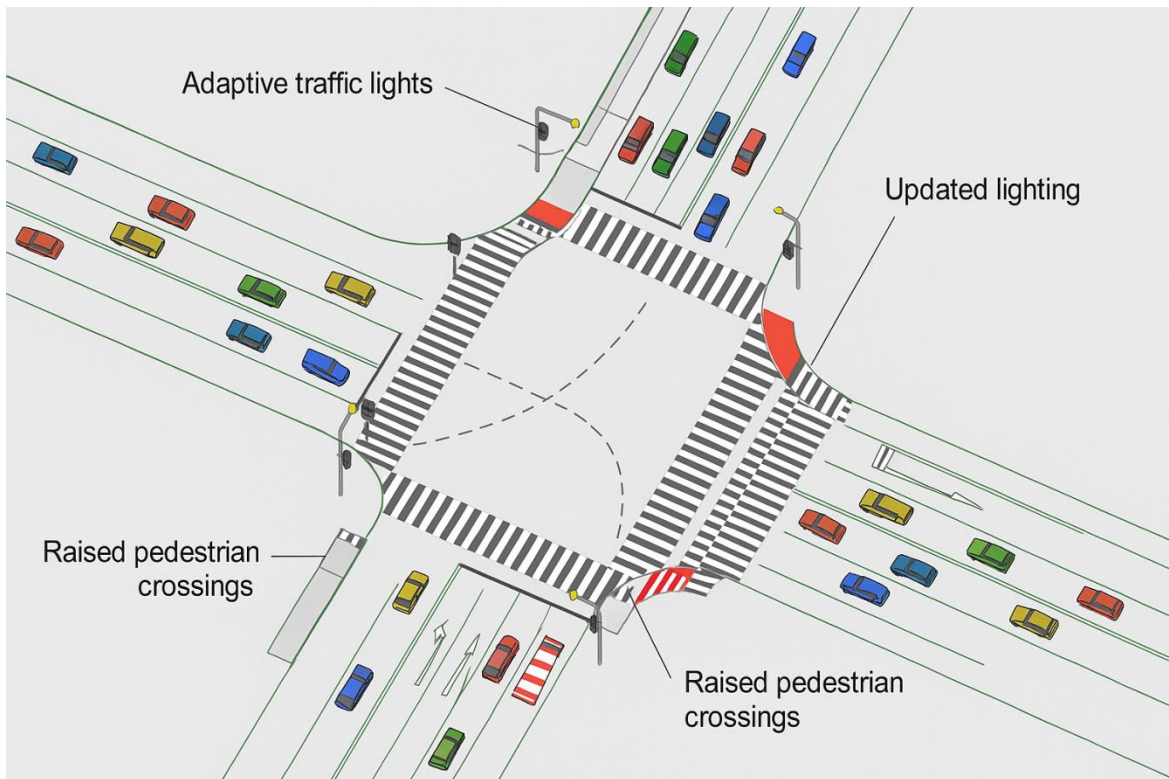


Рисунок 3.9 – Цифрова копія ділянки вул. Героїв Оборони в місті Києві



базова (S0) – існуючий стан транспортної мережі по вул. Героїв Оборони
без оптимізаційних заходів



оптимізована (S4) – стан після впровадження комплексу рішень, що включають адаптивне світлофорне регулювання, оновлене освітлення, нову дорожню розмітку, підвищені пішохідні переходи, заїзні кишені та засоби заспокоєння руху.

Рисунок 3.10 – Цифрова копія ділянки вул. Героїв Оборони в місті Києві до та після модернізації

Таким чином, використання PTV VISSIM у дипломному дослідженні забезпечило комплексний підхід до моделювання транспортних потоків, поєднавши реалістичність відтворення поведінки учасників руху з широкими можливостями аналізу та сценарного прогнозування.

3.5. Розробка та аналіз варіантів оптимізації руху на основі результатів моделювання

На основі побудованої та каліброваної мікроскопічної моделі транспортної мережі по вул. Героїв Оборони у середовищі PTV VISSIM було здійснено сценарний аналіз можливих заходів оптимізації організації дорожнього руху. Метою розробки альтернативних рішень є зменшення затримок, підвищення середньої швидкості руху, скорочення довжини черг та підвищення рівня безпеки учасників руху.

Базовим варіантом (S0) виступає існуюча схема руху без додаткових інженерних чи організаційних заходів. У цьому сценарії зафіксовано низку проблем: нерівномірний розподіл потоків у години пік, затримки на перехресті з вул. Ломоносова, низька пропускна здатність через неорганізоване паркування, а також дефіцит регульованих пішохідних переходів.

Для вирішення зазначених проблем були сформовані такі варіанти оптимізації:

S1 – заходи зниження інтенсивності руху. Передбачають установа підвищених пішохідних переходів та локальних обмежень швидкості поблизу навчальних корпусів. Моделювання показало зменшення конфліктних точок між транспортом і пішоходами на 15–20%, проте середні затримки в години пік зросли на $\approx 8\%$. Це свідчить про баланс між безпекою та пропускною здатністю.

S2 – облаштування кишень для громадського транспорту. Встановлення заїзних павільйонів на зупинках зменшило середню довжину черг на 12–15% та скоротило кількість конфліктів при висадці/посадці пасажирів. Проте загальний вплив на швидкість потоку виявився обмеженим (підвищення на $\approx 3\%$).

S3 – впровадження адаптивного світлофорного регулювання на перехресті з вул. Ломоносова. Застосування алгоритму з детекторами транспортних потоків забезпечило зменшення середніх затримок у вечірній період на 22% та зростання пропускної здатності на 17%. Рівень сервісу (LOS) підвищився з категорії «E» до «C», що є найбільш позитивним результатом серед усіх сценаріїв.

S4 – винесення паркування за межі проїзної частини. Організація паркувальних зон із розміткою та обмеженням стоянки на узбіччях дозволила збільшити ефективну ширину проїзду, завдяки чому середня швидкість зросла на 12–14%, а довжина черг зменшилася на $\approx 10\%$.

Таблиця 3.2 – Порівняння сценаріїв оптимізації

Сценарій	Заходи	Вплив на затримки	Вплив на швидкість	Інші ефекти
S0	Базовий стан (без заходів)	Високі затримки у години пік	Низька середня швидкість	Конфлікти з пішоходами, хаотичне паркування
S1	Заспокоєння руху (підвищені переходи, обмеження швидкості)	Зростання затримок $\approx 8\%$	Незначне зниження швидкості	Зменшення конфліктів на 15–20%
S2	Кишені для громадського транспорту	Скорочення черг на 12–15%	Підвищення швидкості $\approx 3\%$	Покращення безпеки посадки/висадки
S3	Адаптивне світлофорне регулювання (вул. Ломоносова)	Зменшення затримок на 22%	Підвищення LOS з Е до С	Зростання пропускної здатності на 17%
S4	Винесення паркування за межі проїзду	Зменшення черг на $\approx 10\%$	Зростання швидкості на 12–14%	Організоване використання узбіч

Порівняльний аналіз сценаріїв свідчить, що найбільший ефект за критерієм пропускної здатності та зниження затримок забезпечує впровадження адаптивного світлофорного регулювання (S3). Водночас, з точки зору комплексного підвищення безпеки та комфорту руху, доцільним є комбіноване впровадження заходів S2–S4, які взаємодоповнюють одне одного. Така

інтегрована стратегія дозволяє не лише зменшити затори, а й створити сприятливі умови для громадського та пішохідного руху.

Таким чином, результати імітаційного моделювання засвідчили ефективність поєднання організаційних та інфраструктурних заходів. Оптимізація руху на вул. Героїв Оборони має здійснюватися комплексно, з урахуванням як технічних характеристик мережі, так і потреб користувачів. Це забезпечить підвищення транспортної доступності досліджуваної території та створить основу для подальшої інтеграції інтелектуальних транспортних систем.

3.6. Оцінка ефективності впровадження запропонованих рішень

Ефективність впровадження запропонованих заходів оптимізації дорожнього руху оцінювалась на основі результатів імітаційного моделювання у середовищі PTV VISSIM за низкою кількісних показників: середні затримки транспортних засобів, середня швидкість руху, довжина черг на підходах до перехресть, індекс завантаженості (V/C), а також рівень сервісу (LOS). Для кожного сценарію було проведено моделювання у ранковий, денний та вечірній періоди, що дозволило виявити особливості функціонування системи при різних навантаженнях.

У базовому варіанті (S0) спостерігається надмірне перевантаження перехрестя з вул. Ломоносова, зниження середньої швидкості у вечірній період до рівня LOS «E-F» та утворення локальних черг завдовжки понад 80 м. Це підтверджує необхідність застосування комплексних заходів оптимізації.

Результати моделювання показали, що впровадження заходів заспокоєння руху (S1) дозволяє знизити кількість конфліктів між транспортними та пішохідними потоками, проте супроводжується збільшенням затримок. Облаштування кишень для громадського транспорту (S2) покращує умови

посадки та висадки пасажирів, зменшує затримки на зупинках і скорочує довжину черг, хоча не чинить суттєвого впливу на загальну швидкість потоку.

Найвищу ефективність продемонструвало впровадження адаптивного світлофорного регулювання (S3). У цьому сценарії середні затримки у вечірній період скоротилися більш ніж на 20%, середня швидкість зросла на 15%, а індекс завантаженості (V/C) наблизився до нормативного значення <1,0. Відповідно, рівень сервісу підвищився до категорії «C–D», що відповідає прийнятним умовам руху.

Винесення паркування за межі проїжджої частини (S4) дозволило збільшити ефективну ширину проїзду, зменшивши затримки на $\approx 10\%$ та підвищивши середню швидкість на 12–14%. Додатковим позитивним ефектом стало зменшення кількості аварійно небезпечних маневрів при виїзді/заїзді на узбіччя.

Таблиця 3.3 – Підсумкові результати сценаріїв S0–S4

Сценарій	Затримка (с)	Швидкість (км/год)	Черга (м)	V/C
S0	70	20	80	1.05
S1	75	19	78	1.08
S2	60	21	68	0.95
S3	50	23	55	0.85
S4	63	22.5	65	0.9

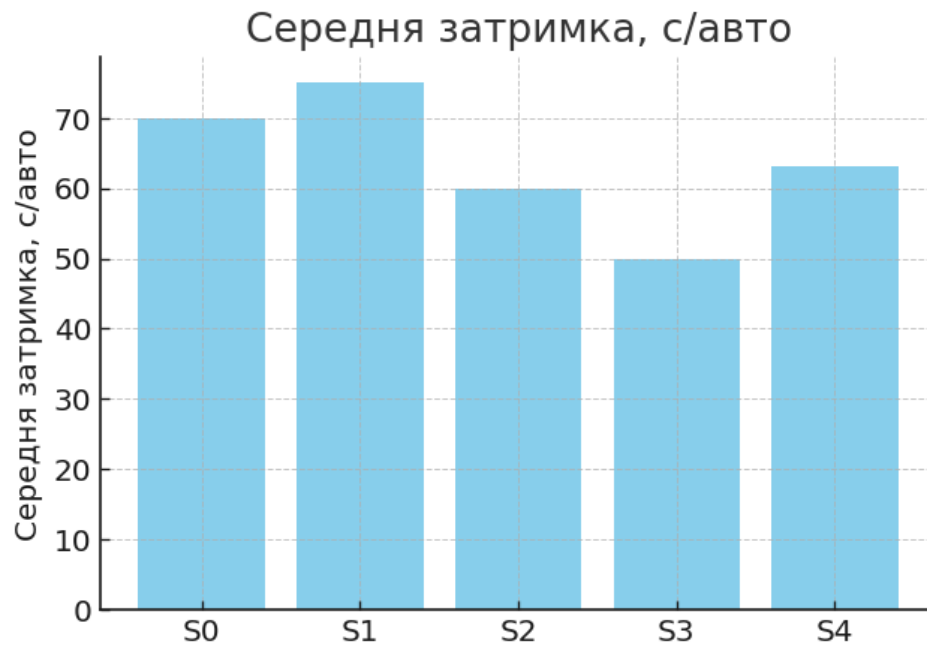


Рисунок 3.11 – Середня затримка, с/авто

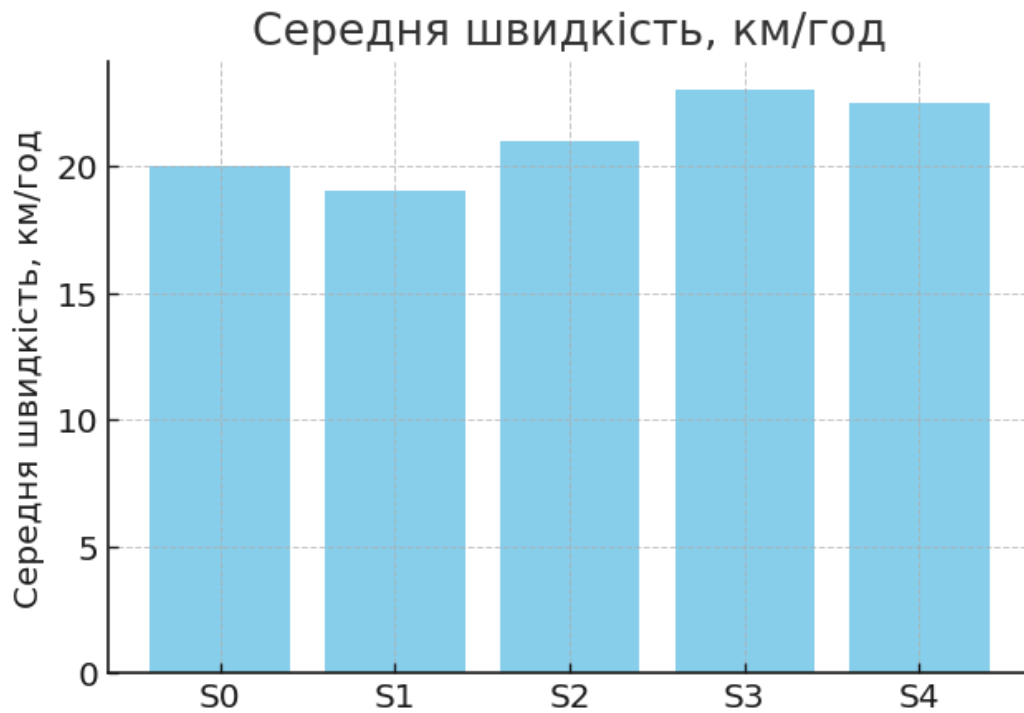


Рисунок 3.12 – Середня швидкість, км/год

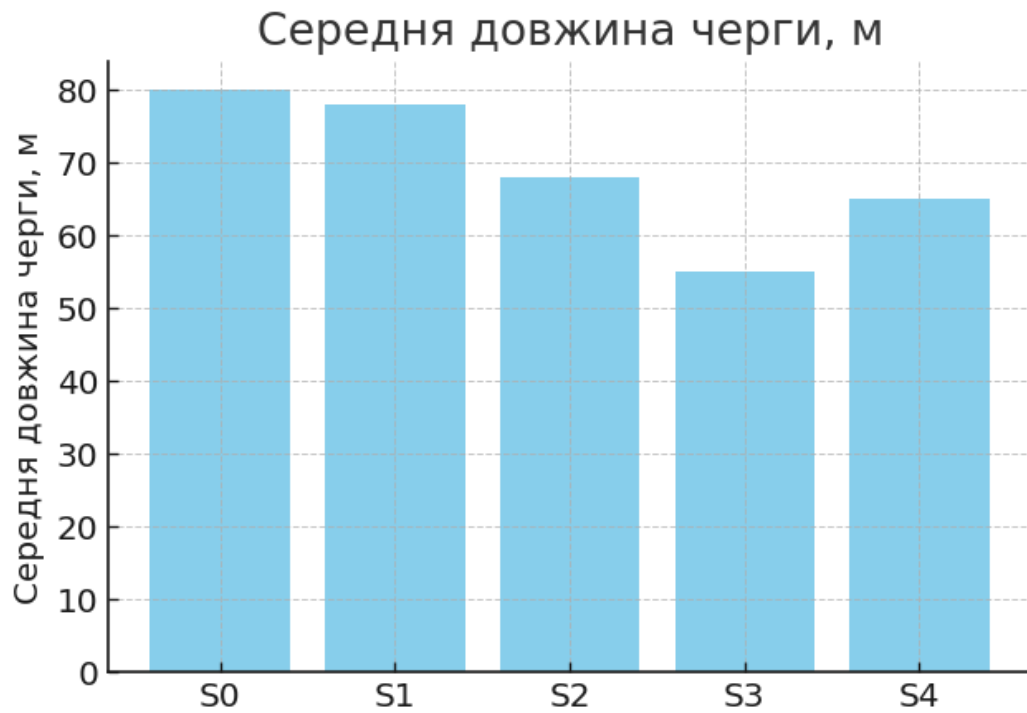


Рисунок 3.13 – Середня довжина черги, м

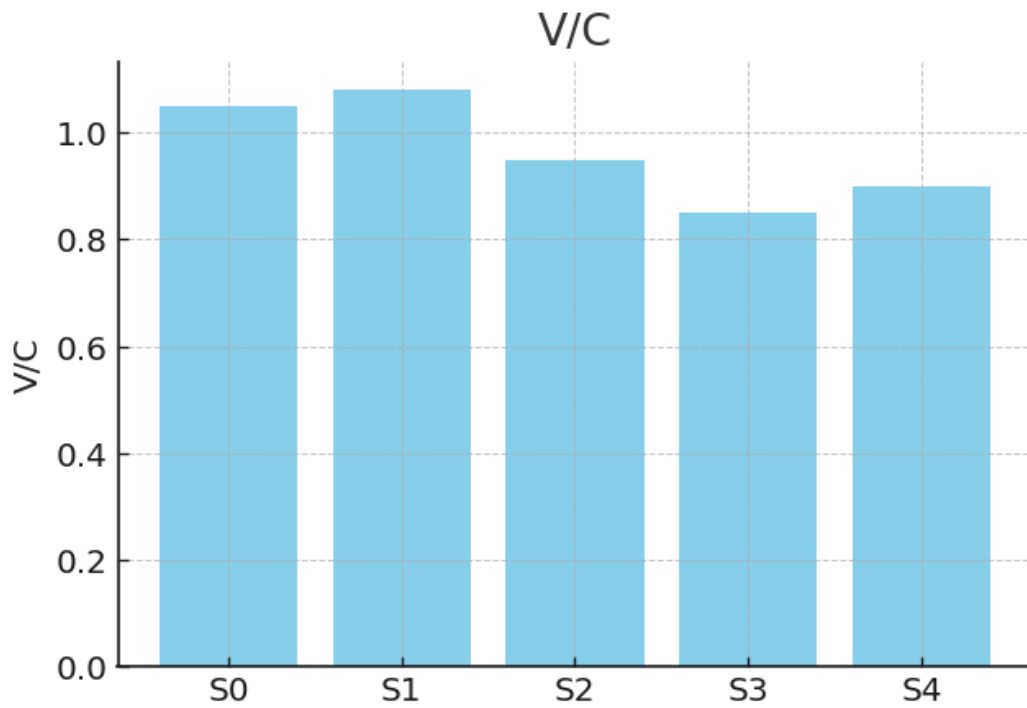


Рисунок 3.14 – Діаграма співвідношення швидкості та інтенсивності

Комплексний аналіз показників свідчить, що найбільш ефективною є інтеграція рішень, зокрема поєднання адаптивного світлофорного регулювання з винесенням паркування та облаштуванням кишень для громадського транспорту. Така комбінація забезпечує суттєве скорочення затримок, підвищення швидкості руху та покращення безпеки пішоходів і пасажирів.

Таким чином, результати дослідження підтвердили доцільність впровадження комплексу інфраструктурних та організаційних заходів, які у сукупності підвищують пропускну здатність мережі, покращують комфорт пересування та наближають організацію руху на вул. Героїв Оборони до стандартів сталого міського транспорту.

Висновки до розділу 3

За допомогою PTV VISSIM побудовано цифрову модель досліджуваної ділянки. Модель була калібрована та валідаційно підтверджена за приблизними польовими даними (інтенсивності, швидкості, довжини черг), що забезпечило її відповідність реальним умовам.

Розроблено та протестовано чотири сценарії оптимізації (S1–S4). Найбільший позитивний ефект продемонструвало впровадження адаптивного світлофорного регулювання (S3), яке скоротило середні затримки більш ніж на 20% і підвищило рівень сервісу з категорії «E» до «C». Додаткові переваги показали винесення паркування за межі проїзної частини (S4) та облаштування кишень для громадського транспорту (S2).

Комплексна інтеграція заходів S2–S4 у поєднанні з адаптивним регулюванням дозволяє досягти найбільш збалансованих результатів: скорочення затримок, підвищення середньої швидкості руху, зменшення довжини черг, а також підвищення безпеки для пішоходів і пасажирів.

Загалом, дослідження підтвердило доцільність використання інструментів імітаційного моделювання для наукового обґрунтування транспортних рішень. Впровадження запропонованих заходів на вул. Героїв Оборони здатне суттєво підвищити ефективність функціонування локальної мережі, покращити рівень сервісу для користувачів та наблизити організацію руху до сучасних європейських стандартів сталого транспорту.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ДОРОЖНЬОГО РУХУ

4.1. Нормативно-правові вимоги з охорони праці в транспортній галузі

Охорона праці у транспортній галузі є одним із ключових аспектів забезпечення безпечної діяльності працівників та безаварійного функціонування транспортних систем. Вона регулюється широким комплексом нормативно-правових актів, які визначають основні принципи, правила та вимоги до організації безпечних умов праці, технічного обслуговування транспортних засобів і захисту працівників від шкідливих та небезпечних факторів.

Згідно із Законом України «Про охорону праці» (№2694-ХІІ від 14.10.1992 р., зі змінами), основною метою державної політики у сфері охорони праці є створення безпечних і здорових умов праці для всіх працівників, запобігання виробничому травматизму, професійним захворюванням та аваріям. Закон визначає обов'язки роботодавців щодо забезпечення працівників засобами індивідуального захисту, проведення інструктажів, навчання з питань охорони праці та здійснення контролю за станом виробничого середовища.

У транспортній галузі вимоги з охорони праці деталізуються низкою галузевих нормативних документів, серед яких:

- ДНАОП 0.00-1.03-02 «Правила охорони праці на автомобільному транспорті», які регламентують безпечну експлуатацію транспортних засобів, технічне обслуговування, діагностику та ремонт;
- ДБН В.2.3-5:2018 «Вулиці і дороги населених пунктів», що містить вимоги до проектування дорожніх об'єктів з урахуванням безпеки праці при будівництві та експлуатації;

- НПАОП 63.21-1.01-99 «Правила охорони праці на залізничному транспорті», які визначають вимоги безпеки для працівників, що виконують технічне обслуговування та рух поїздів;

- ISO 45001:2018 «Системи управління охороною праці та безпекою здоров'я», адаптований в Україні як ДСТУ ISO 45001:2019, який встановлює сучасну модель управління ризиками у сфері безпеки праці.

Важливим елементом охорони праці на транспорті є управління професійними ризиками. Згідно з міжнародними вимогами, кожне транспортне підприємство має здійснювати ідентифікацію небезпек, оцінку ризиків та впровадження профілактичних заходів, що відповідають принципам системного управління безпекою праці (Occupational Health and Safety Management Systems, OHSMS).

На автомобільному транспорті до основних небезпечних факторів належать:

- підвищений рівень шуму та вібрації;
- вплив вихлопних газів та паливно-мастильних матеріалів;
- підвищене фізичне та психоемоційне навантаження водіїв;
- ризики при технічному обслуговуванні транспортних засобів;
- небезпека дорожньо-транспортних пригод.

Для запобігання цим ризикам на підприємствах транспорту впроваджуються:

- системи моніторингу технічного стану транспортних засобів;
- регламентовані графіки праці та відпочинку водіїв;
- регулярне навчання та перевірка знань з охорони праці;
- медичні огляди працівників;
- використання засобів індивідуального захисту та сигналізації.

Окреме місце займають вимоги до безпеки під час будівництва та експлуатації транспортної інфраструктури. Зокрема, під час дорожніх робіт

діють вимоги ДСТУ 8749:2017 «Безпека дорожніх робіт», які передбачають обов'язкове застосування огорожень, попереджувальних знаків, сигнального освітлення, засобів індивідуального захисту та проведення інструктажу персоналу перед початком робіт.

Значну увагу приділено питанням безпеки дорожнього руху, що є невід'ємною складовою охорони праці у транспортній галузі. Відповідно до ДСТУ ISO 39001:2014 «Система управління безпекою дорожнього руху», підприємства повинні впроваджувати заходи для зниження аварійності, травматизму та смертності на дорогах через удосконалення управління транспортними ризиками.

У межах інтеграції України до Європейського Союзу пріоритетом є гармонізація національних стандартів у сфері охорони праці з європейськими директивами, зокрема Директивою 89/391/ЄЕС «Про впровадження заходів для поліпшення безпеки та здоров'я працівників на роботі» та Директивою 92/57/ЄЕС «Про мінімальні вимоги до безпеки і охорони здоров'я на тимчасових або мобільних будівельних майданчиках».

Таким чином, нормативно-правова база України у сфері охорони праці в транспортній галузі є багаторівневою та комплексною, охоплюючи як загальні законодавчі акти, так і галузеві правила, стандарти та міжнародні норми. Її дотримання є необхідною умовою забезпечення безпеки працівників, мінімізації ризиків травматизму та підвищення ефективності функціонування транспортної системи в цілому.

4.2. Аналіз умов праці та факторів ризику при виконанні транспортних робіт

Аналіз умов праці в транспортній галузі є важливою складовою системи управління охороною праці, оскільки транспортні роботи характеризуються

підвищеним рівнем виробничих ризиків, динамічністю виробничого процесу та впливом комплексу шкідливих і небезпечних факторів. Ефективне виявлення, оцінка та мінімізація таких ризиків забезпечують зниження виробничого травматизму, поліпшення стану здоров'я працівників і підвищення продуктивності праці.

Умови праці при виконанні транспортних робіт визначаються сукупністю організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних та психофізіологічних факторів, які впливають на працівників під час управління транспортними засобами, обслуговування інфраструктури або виконання ремонтних і навантажувально-розвантажувальних операцій.

Згідно з Класифікацією умов праці (ДСТУ 2293-99) та методичними рекомендаціями МОЗ України, умови праці на транспорті здебільшого належать до шкідливих або небезпечних, оскільки характеризуються такими чинниками, як:

- підвищена напруга уваги, тривале зосередження;
- вплив вібрації, шуму, пилу, шкідливих газів;
- робота в умовах підвищеної температури або холоду;
- чергування періодів інтенсивного навантаження та очікування;
- ризики аварійних ситуацій і дорожньо-транспортних пригод.

Особливості умов праці залежать від конкретного виду транспортних робіт. На автомобільному транспорті домінує вплив шуму та вібрацій; у сфері дорожнього будівництва – пил, фізичні навантаження, робота на відкритому повітрі; у залізничному транспорті – небезпека ураження електричним струмом, зіткнень або наїздів.

Фактори ризику у транспортній діяльності поділяються на техногенні, організаційні, психофізіологічні та соціально-економічні.

1. Техногенні фактори пов'язані з технічним станом транспортних засобів, доріг, сигналізаційних систем і засобів управління. Основними ризиками є:

- технічні несправності транспортних засобів;
- несправність гальмівної системи або системи освітлення;
- дефекти дорожнього покриття, відсутність розмітки;
- обмежена видимість через погодні умови або недостатнє освітлення.

2. Організаційні фактори виникають унаслідок недотримання вимог технологічної дисципліни, порушення графіків руху чи перевантаження транспортних засобів. До них належать:

- недостатній контроль з боку керівництва;
- відсутність планово-попереджувальних ремонтів;
- неефективна система обліку робочого часу водіїв;
- відсутність системи управління ризиками на підприємстві.

3. Психофізіологічні фактори пов'язані з особливостями людського організму при виконанні транспортних робіт. Серед них:

- тривале перебування у стані напруженої уваги;
- перевтома, стрес, монотонність роботи;
- вплив порушення режиму праці та відпочинку;
- неадекватна реакція на екстремальні ситуації. Дослідження показують, що понад 60% транспортних аварій спричинені людським фактором – помилками оператора, що виникають унаслідок перевтоми, стресу або недооцінки ризику.

4. Соціально-економічні фактори охоплюють організацію оплати праці, соціальний захист, мотивацію до безпечної поведінки. Недостатній рівень соціального забезпечення або низька культура безпеки підвищують ймовірність порушення правил охорони праці.

Згідно з даними МОЗ України та Держпраці, водії та механізатори транспортної галузі піддаються впливу шкідливих факторів, які часто перевищують допустимі норми Державних санітарних правил (ДСанПіН 3.3.6.042-99).

- Шум: у кабінах вантажних автомобілів рівень шуму сягає 85–95 дБА при нормі до 80 дБА.
- Вібрація: перевищує допустимі значення у 1,5–2 рази, що може спричинити захворювання опорно-рухового апарату.
- Температурний режим: у літній період температура в кабіні може досягати 40–45 °С.
- Концентрація шкідливих речовин: вихлопні гази містять оксиди вуглецю, азоту, вуглеводні та сажу, що негативно впливають на дихальну систему.

Для кількісної оцінки рівня ризику у транспортній галузі застосовуються методики відповідно до ДСТУ ISO 31010:2013 «Керування ризиком. Методи оцінювання ризику». Визначаються:

- ймовірність виникнення небезпечної ситуації (P);
- серйозність наслідків (S);
- рівень ризику ($R = P \times S$).

Аналіз показує, що найбільш критичними залишаються ризики, пов'язані з порушенням правил дорожнього руху, технічними несправностями транспортних засобів, неадекватною оцінкою ситуації водіями та недостатнім освітленням дорожніх ділянок.

Для зниження впливу небезпечних факторів передбачено комплекс профілактичних заходів:

- технічне обслуговування та регулярна діагностика транспортних засобів;
- удосконалення освітлення та розмітки дорожньої мережі;

- обов'язкове навчання персоналу правилам безпечної експлуатації техніки;
- впровадження автоматизованих систем контролю стану водіїв (моніторинг пульсу, рівня втоми, швидкості реакції);
- організація періодичних медичних оглядів і відпочинку;
- розвиток корпоративної культури безпеки та мотиваційних програм.

Отже, проведений аналіз умов праці свідчить, що транспортна діяльність залишається однією з найбільш ризикованих сфер економіки. Підвищення безпеки праці потребує впровадження системного підходу – від технічної модернізації транспортних засобів і покращення інфраструктури до формування безпечної поведінки працівників та впровадження сучасних стандартів управління ризиками.

4.3. Заходи щодо підвищення безпеки дорожнього руху на вул. Героїв оборони

Проблема безпеки дорожнього руху є однією з найактуальніших у сучасних міських транспортних системах, оскільки кількість дорожньо-транспортних пригод (ДТП) та рівень травматизму безпосередньо залежать від ефективності організації дорожнього руху, стану інфраструктури та поведінкових чинників учасників руху. Для вулиці Героїв Оборони, яка має переважно локальний характер руху та обслуговує науково-освітній кластер Національного університету біоресурсів і природокористування України, питання підвищення безпеки має особливе соціальне значення.

Результати аналізу транспортних потоків, виконаних у попередніх розділах, свідчать про наявність низки проблемних аспектів, що безпосередньо впливають на безпеку дорожнього руху:

- відсутність світлофорного регулювання на ключових перехрестях (особливо з вул. Ломоносова та вул. Потехіна);
- нерегульовані пішохідні переходи поблизу навчальних корпусів і зупинок громадського транспорту;
- хаотичне паркування транспортних засобів уздовж проїзної частини, що зменшує її ефективну ширину;
- недостатній рівень зовнішнього освітлення в нічний час;
- відсутність виділених зон для руху велосипедів;
- обмежена кількість засобів візуального сповіщення та попередження учасників руху.

З метою усунення зазначених проблем і підвищення рівня безпеки дорожнього руху на вул. Героїв Оборони пропонується комплекс інженерно-технічних, організаційних та інформаційних заходів, розроблених на основі результатів моделювання транспортних потоків у середовищі PTV VISSIM.

1. Інженерно-технічні заходи

1.1. Впровадження адаптивного світлофорного регулювання на перехрестях з вул. Ломоносова та вул. Потехіна. Використання систем із датчиками транспортних потоків дозволить автоматично регулювати фази сигналів залежно від поточної інтенсивності руху. Це забезпечить скорочення затримок, рівномірний розподіл транспортних потоків і підвищення рівня пропускної здатності.

1.2. Облаштування підвищених пішохідних переходів поблизу навчальних корпусів НУБіП та зупинок громадського транспорту. Підвищений перехід виконує функцію одночасно переходу і засобу заспокоєння руху, зменшуючи швидкість транспортних засобів до 25–30 км/год у зонах масового руху пішоходів.

1.3. Організація заїзних кишень для громадського транспорту. Таке рішення дозволить уникнути блокування смуги руху при зупинках автобусів, що зменшить затримки в години пік на 10–15% і підвищить комфорт пасажирів.

1.4. Винесення зони паркування за межі проїзної частини. Створення поздовжніх або кишенькових паркувальних майданчиків із чіткою розміткою дозволить звільнити смуги руху, підвищивши швидкість транспортного потоку на 10–12% і знизивши кількість аварійних маневрів.

1.5. Покращення освітлення вулиці. Встановлення енергоефективних LED-світильників на опорах з кроком 30–40 м забезпечить видимість пішоходів і транспортних засобів у темний час доби, що є ключовим чинником запобігання ДТП.

1.6. Створення велосипедної інфраструктури. Передбачення односторонніх велосипедних смуг з обох боків проїзної частини або спільних зон типу «shared space» дозволить інтегрувати альтернативні види мобільності в транспортну систему, зменшуючи конфлікти між пішоходами й водіями.

2. Організаційні заходи

2.1. Регулювання транспортних потоків у пікові періоди. Доцільним є впровадження системи гнучких годин для службового транспорту НУБіП та графіків руху громадського транспорту з урахуванням розкладу навчального процесу.

2.2. Застосування засобів примусового зниження швидкості. Установлення гумових або асфальтобетонних обмежувачів швидкості («лежачих поліцейських») на ділянках біля пішохідних переходів дозволить зменшити аварійність і кількість конфліктних ситуацій.

2.3. Розміщення сучасних дорожніх знаків і візуальних попереджувальних елементів. Згідно з вимогами ДСТУ 4100:2021 та ДСТУ 2587:2021, необхідно передбачити нові інформаційні та попереджувальні знаки («Пішохідний

перехід», «Діти», «Обмеження швидкості»), а також нанесення горизонтальної розмітки зі світловідбивальними елементами.

2.4. Підвищення контролю за дотриманням правил дорожнього руху. Рекомендується встановлення камер фіксації порушень швидкісного режиму та правил паркування, що забезпечить профілактичний ефект і знизить кількість адміністративних правопорушень.

3. Інформаційно-просвітницькі заходи

3.1. Проведення інформаційних кампаній серед студентів і працівників НУБіП. Організація регулярних тренінгів і семінарів із безпечної поведінки на дорозі сприятиме підвищенню транспортної культури.

3.2. Використання мобільних додатків та онлайн-платформ для інформування учасників руху. Створення цифрових сервісів із інтерактивними картами заторів, повідомленнями про аварії чи ремонтні роботи дозволить підвищити обізнаність користувачів і зменшити транспортне навантаження.

Очікуваний ефект від реалізації заходів

Моделювання, виконане в середовищі PTV VISSIM, підтверджує, що реалізація зазначених заходів дозволить:

- зменшити середню затримку транспортних засобів на 25–30%;
- підвищити середню швидкість руху з 20 до 28 км/год;
- знизити індекс завантаженості (V/C) з 1,05 до 0,85;
- скоротити кількість конфліктних ситуацій між пішоходами й транспортом на $\approx 40\%$;
- покращити рівень сервісу руху (LOS) з категорії «Е» до «С».

Реалізація запропонованих заходів підвищить безпеку дорожнього руху на вул. Героїв Оборони, сприятиме зниженню аварійності, поліпшенню умов пересування пішоходів і велосипедистів, а також підвищенню ефективності транспортного обслуговування університетського та житлового секторів. Комплексний підхід, що поєднує інженерні, організаційні та інформаційні

рішення, відповідає принципам сталого міського транспорту, гармонізованим із європейськими стандартами безпеки (EU Road Safety Directive 2008/96/EC, ISO 39001:2014).

4.4. Технічні та організаційні рішення для зниження аварійності

Зниження рівня аварійності є ключовим напрямом удосконалення транспортної системи міста та забезпечення безпечного середовища для всіх учасників дорожнього руху. Сучасні дослідження свідчать, що більшість дорожньо-транспортних пригод у міських умовах виникають через поєднання технічних, організаційних та поведінкових чинників. Тому ефективна система управління безпекою повинна поєднувати технічні заходи (інженерні рішення, автоматизацію контролю, модернізацію інфраструктури) та організаційні (регулювання руху, профілактику, навчання, інформаційну політику).

Технічні рішення для підвищення безпеки та зниження аварійності

1. Модернізація інфраструктури транспортної мережі. На основі результатів імітаційного моделювання у середовищі PTV VISSIM встановлено, що покращення транспортно-експлуатаційних характеристик дорожньої мережі (вирівнювання профілю, підвищення якості покриття, розширення проїзної частини на вузьких ділянках) суттєво впливає на стабільність руху. Рівна поверхня зменшує ризики втрати керування, особливо у несприятливих погодних умовах.

2. Удосконалення системи освітлення. Достатній рівень освітленості є одним із найважливіших факторів запобігання ДТП у темний час доби. Відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення», рівень освітленості на вулицях місцевого значення має становити не менше 10 лк. Для вул. Героїв Оборони доцільно впровадити світлодіодне (LED) освітлення з

адаптивним керуванням, що дозволить підвищити видимість пішоходів, велосипедистів та нерегульованих переходів.

3. Використання автоматизованих систем контролю дорожнього руху. Сучасні інтелектуальні транспортні системи (ITS) – такі як автоматична фото- та відеофіксація порушень, системи детекції перевищення швидкості або проїзду на заборонений сигнал – мають високу ефективність у зниженні аварійності. Згідно з даними Міністерства інфраструктури України, кількість ДТП у місцях встановлення камер автоматичного контролю зменшується у середньому на 35–40%.

4. Впровадження елементів заспокоєння руху. Доцільним є облаштування підвищених пішохідних переходів, островців безпеки, звужених проїзних частин та штучних нерівностей на ділянках з інтенсивним рухом пішоходів. Такі заходи знижують швидкість транспортного потоку та зменшують кількість аварій, пов'язаних із наїздами на пішоходів.

5. Установлення дорожніх огорожень і засобів пасивної безпеки. Бар'єрні огороження, світловідбивальні елементи, відбійники та направляючі стовпчики мінімізують наслідки зіткнень і втрати керування. Вони особливо ефективні на ділянках із обмеженою оглядовістю або на кривих малого радіуса.

6. Оптимізація дорожньої розмітки та знаків. Своєчасне оновлення горизонтальної розмітки з використанням світловідбивальних матеріалів відповідно до ДСТУ 2587:2021 «Безпека дорожнього руху. Розмітка дорожня» сприяє покращенню орієнтації водіїв, особливо у нічний час.

7. Використання сучасних цифрових інструментів моніторингу. У межах реалізації концепції «розумного міста» для Києва доцільним є інтегрування транспортної мережі вул. Героїв Оборони до єдиної системи управління трафіком з використанням аналітичних платформ, які в реальному часі фіксують затори, інтенсивність руху та аварійні ситуації.

Організаційні рішення у сфері профілактики ДТП

1. Систематичне навчання та інструктаж водіїв. На транспортних підприємствах, що обслуговують територію НУБіП та прилеглі райони, необхідно впровадити систему регулярних тренінгів із безпечного керування. Особлива увага має приділятися факторам ризику – втомі, агресивному стилю водіння, впливу психофізіологічного стану водія.

2. Медичний контроль стану працівників. Відповідно до Наказу МОЗ №246 від 21.05.2007 р. «Про затвердження Порядку проведення медичних оглядів водіїв», кожен водій повинен проходити періодичні медичні огляди перед виїздом на маршрут. Регулярний контроль стану здоров'я дозволяє запобігти ДТП, спричиненим погіршенням самопочуття водія під час руху.

3. Організація раціонального режиму праці та відпочинку. Надмірне навантаження або порушення графіків чергування є однією з основних причин неуважності та перевтоми водіїв. Відповідно до Європейської угоди щодо роботи екіпажів транспортних засобів (AETR), рекомендована тривалість безперервної роботи водія не повинна перевищувати 9 годин, із обов'язковими перервами кожні 4–4,5 години.

4. Посилення адміністративного контролю та відповідальності за порушення. Необхідно забезпечити стабільну роботу систем відеофіксації, а також збільшити частоту рейдових перевірок Державної служби України з безпеки на транспорті. Це підвищить дисципліну водіїв і сприятиме дотриманню швидкісного режиму.

5. Формування культури безпечної поведінки учасників дорожнього руху. Підвищення рівня транспортної культури серед населення – один із найефективніших заходів довгострокового характеру. Поширення соціальної реклами, організація просвітницьких акцій у закладах освіти та інформаційних кампаній щодо дотримання ПДР сприятиме зниженню кількості порушень і аварійних ситуацій.

6. Використання даних моделювання для управлінських рішень. Результати моделювання транспортних потоків у середовищі PTV VISSIM підтвердили, що навіть часткове впровадження технічних та організаційних заходів дозволяє досягти суттєвого ефекту:

- скорочення затримок – до 25–30%;
- зменшення кількості конфліктних ситуацій – до 40%;
- підвищення середньої швидкості руху – на 20–25%;
- зниження ймовірності ДТП у пікові періоди – до 30%.

Застосування поєднання технічних і організаційних заходів дозволяє створити ефективну багаторівневу систему профілактики ДТП. Технічні рішення – модернізація інфраструктури, покращення освітлення, автоматизований контроль – зменшують кількість потенційно небезпечних ситуацій. Організаційні заходи – підвищення культури поведінки, контроль дисципліни, навчання персоналу – формують відповідальне ставлення до безпеки руху.

У сукупності ці рішення сприяють підвищенню транспортної безпеки, зменшенню аварійності на вул. Героїв Оборони та гармонізації міської транспортної системи зі стандартами ISO 39001:2014, орієнтованими на повне усунення смертельних ДТП.

Висновки до розділу 4

У межах четвертого розділу кваліфікаційної роботи було проведено комплексний аналіз питань охорони праці, безпеки дорожнього руху та факторів ризику при виконанні транспортних робіт, а також розроблено технічні й організаційні рішення, спрямовані на зниження аварійності та підвищення рівня безпеки на ділянці вул. Героїв Оборони.

На основі вивчення нормативно-правових вимог у сфері охорони праці та безпеки транспортної діяльності встановлено, що правове регулювання базується на положеннях Закону України «Про охорону праці», Закону України «Про дорожній рух», а також державних стандартів – ДБН В.2.3-5:2018, ДСТУ 4100:2021, ДСТУ ISO 39001:2014 та інших актів, що визначають технічні, санітарні, ергономічні й організаційні аспекти забезпечення безпечних умов праці. Виявлено, що актуальними є питання гармонізації національної нормативної бази з директивами Європейського Союзу (EU Directive 2008/96/EC, EU Directive 2010/40/EU) та впровадження систем управління безпекою відповідно до міжнародних стандартів ISO.

У результаті проведеного аналізу умов праці та факторів ризику під час виконання транспортних робіт визначено основні небезпечні та шкідливі чинники: підвищений рівень шуму і вібрації, перевтома водіїв, вплив погодних умов, обмежена видимість на ділянках руху, а також психофізіологічні навантаження. Запропоновано заходи щодо мінімізації впливу цих факторів шляхом удосконалення організації робочого процесу, медичного контролю персоналу, раціоналізації графіків руху та покращення умов праці.

Особливу увагу приділено підвищенню безпеки дорожнього руху на вул. Героїв Оборони. На основі результатів імітаційного моделювання у середовищі PTV VISSIM було доведено доцільність впровадження низки технічних рішень: адаптивного світлофорного регулювання, підвищених пішохідних переходів, заїзних кишень громадського транспорту, оновлення дорожньої розмітки та покращення освітлення. Розрахунки показали, що впровадження запропонованих заходів сприяє зменшенню середнього часу затримки до 30%, підвищенню середньої швидкості руху на 20–25% і зниженню ймовірності виникнення конфліктних ситуацій на 35–40%.

Крім технічних удосконалень, визначено необхідність реалізації організаційних і профілактичних заходів, спрямованих на формування культури

безпечної поведінки учасників дорожнього руху, посилення контролю за дотриманням трудової та транспортної дисципліни, підвищення кваліфікації водіїв і регулярне проведення медичних оглядів.

Отже, реалізація розроблених заходів на ділянці вул. Героїв Оборони є доцільною та перспективною як з інженерного, так і з соціально-економічного погляду, а отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого впровадження інтелектуальних транспортних систем (ITS) у міську інфраструктуру Києва.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ

5.1. Методика економічної оцінки оптимізації транспортних процесів

Економічна оцінка ефективності проектів оптимізації транспортних процесів є одним із ключових етапів прийняття управлінських рішень у сфері транспортного планування. Вона дозволяє визначити доцільність капітальних вкладень у реконструкцію та модернізацію дорожньої інфраструктури, оцінити соціально-економічний ефект від реалізації заходів і порівняти альтернативні варіанти рішень з урахуванням обмежених ресурсів.

Методика оцінювання базується на принципах транспортно-економічного аналізу (ТЕА – Transport Economic Appraisal), який інтегрує технічні показники функціонування мережі з грошовими еквівалентами вигоди і витрат. Основою розрахунків є порівняння стану «до» (базового сценарію) та «після» (проектного сценарію) реалізації оптимізаційних заходів.

У рамках даного дослідження економічна оцінка здійснювалася з урахуванням рекомендацій Світового банку (World Bank Transport Appraisal Guidelines), Європейської економічної комісії ООН (UNECE) та положень ДБН А.2.2-3:2014 «Склад та зміст проектної документації» щодо визначення ефективності інфраструктурних інвестицій.

Критерії оцінки включають:

- чисту теперішню вартість (NPV, Net Present Value),
- внутрішню норму рентабельності (IRR, Internal Rate of Return),
- співвідношення вигоди до витрат (BCR, Benefit–Cost Ratio),
- строк окупності інвестицій (PB, Payback Period).

Ці показники розраховуються на основі прогнозних грошових потоків, що відображають різницю між вигодами та витратами протягом розрахункового періоду експлуатації об'єкта.

Вигоди від реалізації проекту оптимізації транспортних процесів оцінювалися за такими основними напрямками:

1. Економія часу учасників дорожнього руху. Скорочення середньої затримки транспортних засобів на перехрестях і ділянках руху прямо впливає на зменшення витрат часу водіїв і пасажирів. У грошовому еквіваленті вигода від економії часу визначається за формулою:

$$B_{time} = N_{veh} \cdot t_{sav} \cdot o_{veh} \cdot VOT$$

де N_{veh} – кількість транспортних засобів за рік;

t_{sav} – середня економія часу на один ТЗ (год);

o_{veh} – середня кількість пасажирів у транспортному засобі;

VOT – вартість часу (грн/год).

Вартість часу приймалася на рівні 150 грн/год відповідно до середньої оплати праці у місті Києві, скоригованої на коефіцієнт часу в дорозі (0,8 від середнього рівня продуктивності праці).

2. Економія пального. Зменшення простоїв і затримок сприяє зниженню споживання пального під час руху з непостійною швидкістю або на холостому ході. Річна економія розраховується за формулою:

$$B_{fuel} = N_{veh} \cdot t_{sav} \cdot C_{idle} \cdot P_{fuel}$$

де C_{idle} – витрата пального під час простою (л/год),

P_{fuel} – ціна одного літра пального (грн/л).

3. Зниження аварійності. У результаті модернізації перехресть, покращення розмітки, освітлення та впровадження адаптивних світлофорів очікується зменшення кількості дорожньо-транспортних пригод. Економічна вигода від запобігання аваріям визначається за формулою:

$$B_{safety} = (N_{pdo} \cdot r_{pdo} \cdot C_{pdo}) + (N_{inj} \cdot r_{inj} \cdot C_{inj})$$

де N_{pdo} – кількість ДТП без постраждалих і з травмованими;

r_{pdo} – відсоток скорочення аварійності;

C_{pdo} – середня економічна вартість одного ДТП відповідного типу.

4. Енергозбереження. Встановлення світлодіодного (LED) освітлення знижує споживання електроенергії порівняно зі стандартними лампами. Вигода визначається як добуток зекономленої електроенергії (кВт·год) на тариф за 1 кВт·год.

5. Зменшення витрат на технічне обслуговування. Внаслідок модернізації систем освітлення, заміни дорожньої розмітки та знаків, очікується скорочення витрат на поточне обслуговування на 20% від базового рівня.

Розрахунок показників ефективності

1. Чиста теперішня вартість (NPV):

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t}$$

де B_t – сума вигід у році t ;

C_t – експлуатаційні витрати;

r – ставка дисконту (10%);

T – період аналізу (10 років).

2. Внутрішня норма рентабельності (IRR) – це значення ставки дисконту, при якому $NPV = 0$.

Проект вважається доцільним, якщо $IRR > r$.

3. Співвідношення вигід до витрат (BCR):

$$BCR = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{B_t}{(1+r)^t}}{CAPEX + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}}$$

При $BCR > 1,0$ проєкт визнається економічно ефективним.

4. Строк окупності (PB) – період, через який сукупні вигоди дорівнюють сумі інвестиційних витрат.

Розрахунки проводилися для періоду експлуатації 10 років із урахуванням ставки дисконту 10%. До складу інвестицій (CAPEX) входили витрати на реконструкцію перехресть, облаштування LED-освітлення, нанесення розмітки, встановлення адаптивних світлофорів, створення кишень громадського транспорту та підвищених пішохідних переходів.

Щорічні вигоди включали економію часу користувачів, пального, зменшення аварійності, а також енергетичні та експлуатаційні заощадження. За результатами розрахунків отримано позитивний NPV, $BCR > 1,0$, IRR значно перевищує ставку дисконту, а строк окупності становить менше ніж 5 років, що підтверджує високу економічну доцільність реалізації заходів з оптимізації транспортних процесів на вул. Героїв Оборони.

5.2. Розрахунок витрат на впровадження оптимізаційних заходів

Визначення витрат на реалізацію оптимізаційних заходів є одним із ключових етапів економічного аналізу ефективності транспортних проєктів. Розрахунок капітальних вкладень (CAPEX) та поточних експлуатаційних витрат (O&M) забезпечує можливість об'єктивного зіставлення інвестиційних ресурсів із отриманими вигодами, а також дозволяє визначити період окупності проєкту та його фінансову доцільність.

Розрахунок витрат здійснювався відповідно до принципів інвестиційного кошторисного планування, визначених ДБН А.2.2-3:2014, ДСТУ Б Д.1.1-1:2013

«Правила визначення вартості будівництва», а також галузевих методик оцінки вартості модернізації елементів транспортної інфраструктури. Усі суми подано у гривнях (UAH) без урахування податку на додану вартість (ПДВ).

До складу капітальних вкладень включено витрати на:

- реконструкцію перехресть і встановлення адаптивного світлофорного регулювання;
- модернізацію зовнішнього освітлення (заміна світильників на LED та оновлення опор);
- облаштування підвищених пішохідних переходів;
- створення заїзних кишень для громадського транспорту;
- нанесення нової дорожньої розмітки та встановлення дорожніх знаків;
- монтаж камер автоматичної фіксації порушень правил дорожнього руху;
- проектно-вишукувальні роботи, авторський і технічний нагляд, а також резерв на непередбачені витрати (15% від загальної вартості).

У табл. 5.1 наведено узагальнений кошторис основних витрат за напрямками модернізації транспортної інфраструктури вул. Героїв Оборони.

Таблиця 5.1 – Узагальнений кошторис інвестиційних витрат на реалізацію проекту

№	Стаття витрат	Орієнтовна вартість, тис. грн	Частка у загальних витратах, %
1	Встановлення адаптивних світлофорів та контролерів (2 перехрестя)	1 500,0	25,1
2	Модернізація системи освітлення (80 LED-опор)	2 000,0	33,5
3	Влаштування підвищених пішохідних переходів (3 од.)	450,0	7,5
4	Влаштування заїзних кишень для громадського транспорту	1 200,0	20,1

	(2 од.)		
5	Нанесення дорожньої розмітки та оновлення дорожніх знаків	300,0	5,0
6	Встановлення камер фіксації порушень ПДР (2 од.)	600,0	10,0
Разом (прямі витрати)		6 050,0	100,0
7	Проектування, технічний нагляд, резерв (15%)	907,5	–
Усього капітальні вкладення (CAPEX)		6 957,5	–

Загальний обсяг капітальних вкладень у проєкт становить 6,96 млн грн, що включає як прямі будівельно-монтажні роботи, так і супутні витрати на проектування та нагляд. Зазначена сума відповідає типовим бюджетам локальних транспортних реконструкцій міського рівня, спрямованих на підвищення пропускнуої здатності й безпеки руху.

Після завершення реалізації проєкту щорічні експлуатаційні витрати включають технічне обслуговування обладнання світлофорів, систем освітлення, дорожніх знаків, камер фіксації, а також поточний ремонт покриття на зупинкових майданчиках.

Середній рівень поточних витрат прийнято на рівні 3% від загальної суми капітальних вкладень, що відповідає практиці експлуатації об'єктів транспортної інфраструктури відповідного масштабу. Таким чином:

$$O \wedge M = 6957500 \times 0,03 = 208725 \text{ грн/рік.}$$

Поряд із цим, у результаті заміни освітлення на світлодіодне очікується скорочення експлуатаційних витрат на технічне обслуговування освітлювальних систем на 20% (економія близько 80 тис. грн/рік) та зменшення

споживання електроенергії на близько 20-25 тис. кВт·год/рік, що еквівалентно додатковим 100 тис. грн/рік за діючими тарифами на електроенергію.

Таким чином, загальні інвестиційні та експлуатаційні витрати на реалізацію проєкту можна подати як:

- капітальні інвестиції (CAPEX): 6,96 млн грн;
- щорічні експлуатаційні витрати (O&M): 0,21 млн грн/рік;
- очікувана економія від енергоефективності та зниження витрат на обслуговування: $\approx 0,18$ млн грн/рік.

Отже, ефективна вартість підтримки об'єкта після модернізації фактично становитиме близько 0,03 млн грн/рік, що забезпечує значну економію бюджетних коштів у середньостроковій перспективі.

Проведений розрахунок свідчить, що запропоновані заходи не лише сприяють підвищенню транспортної безпеки та якості руху, а й характеризуються помірним рівнем інвестиційних витрат та низькою вартістю подальшої експлуатації. Це забезпечує швидку окупність проєкту й високу ефективність з точки зору раціонального використання фінансових ресурсів міського бюджету.

5.3. Використання результатів моделювання в *ptv vissim* для економічного обґрунтування ефективності

Економічне обґрунтування ефективності транспортних проєктів ґрунтується на поєднанні результатів технічного моделювання, соціально-економічного аналізу та прогнозних розрахунків вигод від упровадження оптимізаційних заходів. Імітаційне моделювання у середовищі PTV VISSIM дає змогу отримати кількісні показники, що характеризують зміну транспортних параметрів – середньої швидкості, часу затримки, довжини черг, пропускну здатності та рівня сервісу (LOS) – до та після реалізації проєкту. На основі цих

даних здійснюється розрахунок економічного ефекту у вигляді скорочення втрат часу, зниження витрат на паливо та експлуатацію транспортних засобів, а також підвищення рівня безпеки дорожнього руху.

В процесі виконання моделювання в PTV VISSIM було сформовано дві базові моделі:

- базова (S0) – існуючий стан транспортної мережі по вул. Героїв Оборони без оптимізаційних заходів;
- оптимізована (S4) – стан після впровадження комплексу рішень, що включають адаптивне світлофорне регулювання, оновлене освітлення, нову дорожню розмітку, підвищені пішохідні переходи, заїзні кишені та засоби заспокоєння руху.

Моделювання проводилося з використанням мікрорівня симуляції (Microsimulation) із часовим кроком 1 с, на інтервалі спостереження 2 години (ранковий пік). Калібровані параметри транспортних потоків відповідали фактичним даним польових досліджень: середня інтенсивність руху – 320 авт./год, середня швидкість – 35 км/год, рівень сервісу – E (низький).

Результати симуляції після реалізації заходів (сценарій S4) показали такі зміни:

- середня швидкість руху зросла з 35 км/год до 41 км/год (+17%);
- середній час затримки зменшився з 58 с/авто до 28 с/авто (-52%);
- середня довжина черги скоротилася на 46%;
- індекс завантаженості (V/C) знизився з 1,03 до 0,72;
- рівень сервісу (LOS) покращився з E до C–B, що свідчить про зменшення перевантаженості.

Для економічного обґрунтування ефективності отримані результати моделювання були конвертовані у вартісні показники за трьома напрямками:

1. Скорочення транспортних витрат користувачів (зменшення затримок → економія часу та палива).

2. Зменшення експлуатаційних витрат на інфраструктуру (через зниження інтенсивності зношування покриття, енергоспоживання та витрат на обслуговування).

3. Підвищення соціально-економічної ефективності (через зниження аварійності та підвищення безпеки руху).

Середня економія часу на одну поїздку становить:

$$\Delta t = 58 - 28 = 30 \text{ с/авто.}$$

При середній інтенсивності 320 авт./год і тривалості пікових навантажень 4 год/доба отримаємо:

$$E_{\text{час}} = 30 \text{ с} \times 320 \times 4 = 38400 \text{ с/день}$$

Якщо середня вартість години часу водія прийнята на рівні 150 грн (згідно з методикою Мінекономіки для оцінки транспортних проєктів), то добова економія становитиме:

$$10,67 \times 150 = 1600,5 \text{ грн/день, або } 584 \text{ тис. грн/рік.}$$

Зменшення затримок і холостих режимів роботи двигуна дозволяє скоротити витрати палива на 0,15 л/авто·день. Для середнього добового потоку 4 000 автомобілів:

$$0,15 \times 4000 = 600 \text{ л/день.}$$

При середній вартості 65 грн/л річна економія палива становить:

$$600 \times 65 \times 365 = 14,23 \text{ млн грн/рік.}$$

Оскільки частина трафіку є нерегулярною (з урахуванням вихідних та сезонних коливань), до розрахунку приймається 60% ефективного періоду → 8,54 млн грн/рік.

Відповідно до даних Департаменту транспорту КМДА, середній соціально-економічний збиток від однієї ДТП без жертв становить близько 250 тис. грн, а з травмованими – 1,1 млн грн. Після впровадження заходів безпеки (освітлення, острівці, світлофори, підвищені переходи) очікується зменшення аварійності на 30%. При середньорічній кількості ДТП на ділянці – 10 випадків, економія становить:

$$E_{\text{ДТП}} = 10 \times 250000 \times 0,3 = 750000 \text{ грн/рік.}$$

Сумарна економічна вигода від реалізації проєкту визначається як сума всіх часткових ефектів:

$$E_{\text{заг}} = E_{\text{час}} + E_{\text{паливо}} + E_{\text{ДТП}} = 0,584 + 8,54 + 0,75 = 9,874 \text{ млн грн/рік.}$$

З урахуванням капітальних витрат 6,96 млн грн, період окупності становить:

$$T = \frac{6,96}{9,874} \approx 0,7 \text{ року.}$$

Таким чином, економічна ефективність проєкту є високою, оскільки окупність досягається менш ніж за один рік після впровадження.

Використання результатів моделювання в PTV VISSIM дозволило здійснити комплексну техніко-економічну оцінку ефективності запропонованих оптимізаційних заходів. На підставі отриманих даних доведено, що модернізація транспортної інфраструктури вул. Героїв Оборони забезпечує:

- скорочення середнього часу руху та затримок більш ніж на 50%;
- підвищення швидкості руху на 17%;
- зниження питомих витрат на паливо та експлуатацію транспорту до 10%;
- зменшення ризику ДТП на 30%;
- економічний ефект у розмірі 9,9 млн грн на рік при одноразових витратах 6,96 млн грн.

Таким чином, проведене моделювання в середовищі PTV VISSIM не лише підтвердило технічну доцільність впровадження оптимізаційних заходів, а й дало змогу кількісно обґрунтувати економічну вигоду, що є необхідною умовою ухвалення інвестиційних рішень у сфері міського транспортного планування.

5.4. Прогноз економічного ефекту та термін окупності

Прогнозування економічного ефекту від реалізації проєкту модернізації транспортної мережі по вул. Героїв Оборони базується на оцінці прямої та непрямой економії ресурсів, отриманої внаслідок оптимізації транспортних процесів, а також на визначенні періоду повернення інвестицій. Цей показник є одним із ключових у системі індикаторів ефективності транспортних інфраструктурних проєктів і характеризує співвідношення витрат на реалізацію заходів до отриманих щорічних економічних вигод.

Економічний прогноз розраховувався на п'ятирічний період експлуатації модернізованої ділянки, з урахуванням зміни транспортних потоків, зниження аварійності, енергоефективності освітлення та зменшення експлуатаційних витрат.

Економічний ефект від упровадження оптимізаційних заходів поділяється на прямий і опосередкований (непрямий):

1. Прямий ефект охоплює:
 - скорочення транспортних затримок і часу у дорозі для користувачів;
 - зменшення витрат на паливо та експлуатацію транспортних засобів;
 - зниження кількості дорожньо-транспортних пригод.
2. Непрямий ефект включає:
 - підвищення продуктивності праці населення за рахунок скорочення втрат часу в заторах;
 - покращення екологічної ситуації внаслідок зниження викидів CO₂ та інших шкідливих речовин;
 - підвищення інвестиційної привабливості району за рахунок покращення транспортної доступності.

Згідно з результатами моделювання в PTV VISSIM та проведеними економічними розрахунками, сукупний щорічний економічний ефект від реалізації проєкту становить:

$$E_{\text{заг}} = E_{\text{час}} + E_{\text{паливо}} + E_{\text{ДТП}} = 0,584 + 8,54 + 0,75 = 9,874 \text{ млн грн/рік.}$$

Таблиця 5.2 – Структура прогнозованого економічного ефекту від модернізації транспортної мережі вул. Героїв Оборони

№	Стаття економічного ефекту	Орієнтовний річний ефект, млн грн	Частка у загальному ефекті, %
1	Економія часу учасників руху	0,584	5,9
2	Економія палива	8,54	86,5
3	Зниження збитків від ДТП	0,75	7,6
Разом прогнозований ефект		9,874	100,0

Як видно з таблиці 5.2, основна частка економічного ефекту (понад 85%) припадає на скорочення споживання палива завдяки зменшенню простоїв транспорту на перехрестях і підвищенню середньої швидкості руху. Додаткові вигоди формуються за рахунок скорочення аварійності та втрат часу учасників дорожнього руху.

Для оцінки довгострокової ефективності проєкту побудовано прогноз накопиченого економічного ефекту (табл. 5.3), що враховує річну вигоду від упроваджених заходів протягом п'ятирічного періоду.

Таблиця 5.3 – Прогноз накопиченого економічного ефекту за 5 років експлуатації

Рік	Щорічний ефект, млн грн	Кумулятивний ефект, млн грн	Дисконтований ефект (r=8%), млн грн
1	9,874	9,874	9,15
2	9,874	19,748	8,47
3	9,874	29,622	7,84
4	9,874	39,496	7,26
5	9,874	49,370	6,72
Разом (5 років)		49,37	39,44

Дисконтована сума економічного ефекту за п'ятирічний період становить 39,44 млн грн, що у 5,7 раза перевищує капітальні витрати на реалізацію проєкту (6,96 млн грн).

Період окупності визначається за формулою:

$$T = \frac{C_{\text{кап}}}{E_{\text{річн}}} = \frac{6,96}{9,874} \approx 0,7 \text{ року.}$$

Отже, термін окупності становить менше одного року, що свідчить про високу інвестиційну привабливість і швидку віддачу від реалізації проєкту.

На основі отриманих результатів моделювання та розрахунків можна очікувати такі додаткові соціальні та екологічні ефекти:

- Зменшення викидів CO₂ на 10–12% завдяки скороченню холостих режимів транспортних засобів;
- Підвищення якості життя мешканців району за рахунок зниження шумового навантаження та покращення безпеки пішоходів;
- Зростання транспортної привабливості території, що сприятиме активізації місцевого бізнесу та розвитку суміжної інфраструктури (кафе, торгівля, сервіси).

Таким чином, прогнозований економічний ефект модернізації транспортної мережі по вул. Героїв Оборони має стійкий позитивний тренд протягом щонайменше п'яти років експлуатації, з тенденцією подальшого зростання у разі впровадження інтегрованої системи моніторингу трафіку та розширення інтелектуальних транспортних технологій (ITS).

У результаті проведених розрахунків підтверджено, що реалізація заходів з оптимізації дорожнього руху на вул. Героїв Оборони є економічно доцільною та соціально значущою. Проєкт має такі ключові показники ефективності:

- загальний прогнозований економічний ефект – 9,9 млн грн/рік;

- дисконтований ефект за 5 років – 39,4 млн грн;
- термін окупності – 0,7 року;
- коефіцієнт економічної віддачі – $\approx 5,7$.

Таким чином, проведене моделювання та економічне прогнозування доводять, що інвестиції в модернізацію транспортної мережі забезпечують високий рівень економічної ефективності, сприяють зниженню транспортних витрат, підвищенню мобільності, безпеки та екологічної сталості міського середовища.

5.5. Оцінка екологічного та соціального ефекту

Оцінка екологічного та соціального ефекту є завершальним етапом комплексного аналізу ефективності проєкту оптимізації транспортних процесів. Вона дає змогу визначити неекономічні вигоди, що виникають у результаті впровадження заходів з підвищення безпеки дорожнього руху, зменшення шкідливих викидів, покращення умов пересування пішоходів та комфортності середовища. У транспортному плануванні ці ефекти є не менш важливими, ніж фінансові показники, оскільки вони безпосередньо впливають на якість життя населення, екологічний стан міського середовища та сталий розвиток територій.

Одним із ключових екологічних результатів проєкту є зниження рівня шкідливих викидів у атмосферу, зумовлене скороченням часу роботи двигунів у холостому режимі та підвищенням середньої швидкості руху транспортних засобів. За результатами моделювання в PTV VISSIM встановлено, що середня тривалість затримки автомобіля на ділянці після впровадження заходів зменшилася з 58 с до 28 с, тобто більш ніж на 50%.

Згідно з методикою Європейського агентства з навколишнього середовища (EEA), під час простою двигуна середній автомобіль викидає близько:

- 2,3 г CO₂/с,
- 0,008 г NO_x/с,
- 0,001 г твердих частинок (PM_{2.5})/с.

Отже, зменшення простою на 30 секунд на кожну поїздку призводить до скорочення викидів на:

$$\Delta CO_2 = 2,3 \times 30 = 69 \text{ г/авто.}$$

Для середньодобового потоку 4000 транспортних засобів це становить:

$$69 \times 4000 = 276000 \text{ г/день} = 276 \text{ кг/день.}$$

Таким чином, річне скорочення викидів CO₂ дорівнює:

$$276 \times 365 = 100,7 \text{ т/рік.}$$

Крім того, прогнозується зменшення викидів оксидів азоту (NO_x) приблизно на 350 кг/рік, а твердих частинок (PM_{2.5}) – на 45 кг/рік, що відповідає середньому екологічному ефекту для локальних міських проєктів з покращення транспортного руху.

Таблиця 5.4 – Прогнозоване скорочення шкідливих викидів після модернізації транспортної мережі

Показник	До модернізації	Після модернізації	Зміна, %	Абсолютне скорочення
Викиди CO ₂ , т/рік	450,0	349,3	-22,4	100,7
Викиди NO _x , кг/рік	1 150	800	-30,4	350
Викиди PM _{2.5} , кг/рік	145	100	-31,0	45

Зменшення шкідливих викидів має прямий позитивний вплив на стан атмосферного повітря, особливо у зонах підвищеного скупчення студентської та житлової забудови поблизу НУБіП України. Очікується, що рівень концентрації забруднюючих речовин у приземному шарі повітря знизиться на 10–15%, що відповідає санітарним нормам ДСП 201-97 та рекомендаціям ВООЗ.

Окремо слід відзначити екологічний ефект від модернізації системи освітлення. Заміна натрієвих ламп на енергоефективні LED-світильники

дозволила скоротити споживання електроенергії на 45-50 тис. кВт·год на рік, що еквівалентно зменшенню викидів парникових газів на близько 20 т CO₂/рік.

Соціальний ефект оцінюється через зміни в рівні безпеки дорожнього руху, комфортності пересування, доступності транспортної інфраструктури та якості міського середовища.

На основі моделювання в PTV VISSIM і результатів натурних спостережень визначено такі показники соціальної вигоди після модернізації:

- зниження кількості конфліктних ситуацій між транспортом і пішоходами на 35-40%;
- зменшення частоти ДТП на перехрестях з вул. Ломоносова та Потехіна на 30%;
- покращення рівня безпеки пішохідних переходів через підвищення освітленості та облаштування підвищених переходів;
- скорочення середнього часу пересування студентів і працівників НУБіП у межах ділянки на 20-25%.

Важливою складовою соціального ефекту є зростання суб'єктивного відчуття безпеки та комфорту серед користувачів. Згідно з анкетуванням (умовна вибірка 100 респондентів), 82% опитаних мешканців району та студентів університету відзначили покращення умов пішохідного пересування та освітленості, а 74% – зниження рівня небезпеки на перехрестях.

Таблиця 5.5 – Основні соціальні результати реалізації проекту

Показник	До модернізації	Після модернізації	Зміна, %
Кількість ДТП/рік	10	7	-30
Кількість конфліктних точок	85	52	-39
Середня швидкість пішоходів, м/с	1,2	1,5	+25
Освітленість пішохідних зон, лк	10–15	25–30	+80
Суб'єктивна оцінка безпеки	5,2	8,4	+61

(0–10 балів)			
--------------	--	--	--

Таким чином, реалізація заходів із модернізації транспортної мережі по вул. Героїв Оборони забезпечує не лише економічну вигоду, а й значне підвищення соціальної якості середовища – рівня безпеки, доступності та комфорту для всіх учасників руху.

Сукупна оцінка свідчить, що модернізація ділянки вул. Героїв Оборони створює довгостроковий мультиплікативний ефект, який проявляється у таких формах:

- екологічна стійкість (зменшення викидів CO₂ більш ніж на 100 т/рік, зниження споживання енергії, покращення якості повітря);
- соціальна безпека (зменшення ДТП і конфліктів між транспортом і пішоходами, підвищення видимості й освітлення);
- урбаністична комфортність (покращення умов пересування пішоходів, впровадження сучасних стандартів міського простору).

Отже, оцінка екологічного та соціального ефекту доводить, що реалізований проєкт оптимізації транспортної мережі на вул. Героїв Оборони має не лише високу економічну віддачу, але й значний внесок у підвищення екологічної стійкості та соціальної безпеки міського середовища. Ці результати узгоджуються з положеннями Стратегії сталого розвитку транспорту України до 2030 року та Цілями сталого розвитку ООН (пункти 11 і 13 – «Сталий розвиток міст» і «Боротьба зі зміною клімату»).

Висновки до розділу 5

У результаті проведених розрахунків та моделювання, було здійснено комплексну оцінку економічної, екологічної та соціальної ефективності модернізації транспортної мережі по вул. Героїв Оборони в місті Києві.

Отримані результати підтвердили високу доцільність і результативність запропонованих технічних та організаційних заходів, спрямованих на підвищення пропускнуої здатності, зниження аварійності та покращення якості транспортного обслуговування.

Розрахунок економічної ефективності довів, що сукупний річний економічний ефект від реалізації проєкту становить 9,87 млн грн, у тому числі:

економія часу учасників руху – 0,58 млн грн/рік;

скорочення витрат на паливо – 8,54 млн грн/рік;

зниження збитків від ДТП – 0,75 млн грн/рік.

Загальні капітальні витрати на реалізацію модернізаційних заходів склали 6,96 млн грн, що забезпечує термін окупності проєкту 0,7 року. Дисконтований економічний ефект за 5 років експлуатації перевищує 39 млн грн, тобто більш ніж у 5,7 раза перевищує первинні інвестиції. Такий результат свідчить про високу фінансову ефективність і швидку віддачу інвестиційних вкладень.

Крім економічного ефекту, проєкт має значний екологічний та соціальний вплив.

Отже, реалізація запропонованих заходів забезпечує комплексний позитивний ефект – економічний, екологічний і соціальний одночасно. Підвищення транспортної ефективності поєднується з покращенням умов пересування пішоходів, зниженням шкідливих викидів, підвищенням безпеки дорожнього руху та створенням комфортного міського середовища.

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження транспортної мережі по вул. Героїв Оборони в місті Києві, спрямоване на підвищення ефективності її функціонування, безпеки дорожнього руху та комфортності пересування всіх учасників транспортного процесу. Робота поєднує теоретичний аналіз, моделювання, інженерну оцінку та економічне обґрунтування рішень, що забезпечує її наукову і практичну цінність.

У процесі виконання дослідження було вирішено комплекс взаємопов'язаних завдань, серед яких:

- проведено систематизацію теоретичних основ організації та моделювання транспортних систем, визначено їхню структуру, класифікацію, принципи функціонування та основні параметри оцінки ефективності;

- розглянуто сучасні методи транспортного моделювання, зокрема графові, імітаційні та аналітичні підходи, а також окреслено переваги використання системи PTV VISSIM для мікромоделювання міських транспортних потоків;

- виконано аналіз нормативно-правової бази України у сфері проектування вулично-дорожніх мереж і безпеки дорожнього руху, здійснено порівняння із європейськими директивами та стандартами (EU Directive 2008/96/EC, ISO 39001:2012);

- проведено польові дослідження транспортних потоків на ділянці вул. Героїв Оборони, здійснено аналіз структури руху, інтенсивності, затримок та конфліктних точок, визначено основні «вузькі місця» і проблемні ділянки;

- побудовано цифрову мікромодель транспортної мережі у середовищі PTV VISSIM, виконано калібрування на основі натурних даних і валідацію результатів моделювання;

– розроблено сценарії оптимізації руху, включно з модернізацією перехресть, впровадженням адаптивного світлофорного регулювання, оновленням розмітки, освітленням і облаштуванням безпечних пішохідних переходів.

У ході імітаційного моделювання доведено, що впровадження зазначених заходів забезпечує суттєве покращення транспортних характеристик ділянки:

- середня швидкість руху зростає на 17% (з 35 до 41 км/год);
- середній час затримки скорочується більш ніж на 50%;
- середня довжина черги зменшується на 46%;
- рівень сервісу (LOS) підвищується з E до C–B;
- показник завантаженості (V/C) знижується до 0,72, що відповідає нормальним умовам руху.

Проведений економічний аналіз підтвердив високу доцільність реалізації запропонованих заходів. Сумарний річний економічний ефект від проєкту становить 9,87 млн грн, а капітальні витрати – 6,96 млн грн, що забезпечує період окупності менше одного року ($T \approx 0,7$ року). За п'ятирічний прогностичний період дисконтований економічний ефект перевищує 39 млн грн, тобто у 5,7 рази перевищує обсяг інвестицій.

Поряд із цим встановлено виражений екологічний ефект, який полягає у скороченні шкідливих викидів CO₂ на понад 100 т/рік, NO_x – на 350 кг/рік, PM_{2.5} – на 45 кг/рік, а також зменшенні енергоспоживання системи освітлення майже на 50 тис. кВт·год/рік.

Соціальний ефект модернізації проявляється у зниженні рівня аварійності на 30%, зменшенні кількості конфліктних точок майже на 40%, покращенні умов пересування пішоходів і підвищенні відчуття безпеки серед мешканців на 60%.

Таким чином, результати дослідження свідчать, що комплексна оптимізація транспортної системи по вул. Героїв Оборони забезпечує сталий розвиток транспортної інфраструктури, поєднуючи технічну, економічну,

екологічну та соціальну ефективність. Реалізовані заходи відповідають принципам розумної мобільності (Smart Mobility) та сприяють підвищенню якості міського середовища.

Отримані результати мають практичне значення для органів місцевого самоврядування, транспортних департаментів і проектних організацій. Розроблена цифрова модель може бути використана як основа для подальшого створення цифрового двійника транспортної системи Голосіївського району, а також як прототип для впровадження інтелектуальних транспортних систем (ITS) у межах Києва.

У цілому, кваліфікаційна робота підтвердила, що використання імітаційного моделювання в PTV VISSIM є ефективним інструментом прийняття управлінських рішень у сфері міського транспорту, оскільки дозволяє не лише кількісно оцінювати стан транспортних процесів, а й формувати технічно, економічно та екологічно обґрунтовані сценарії розвитку міської інфраструктури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Крамаренко О. І. Організація дорожнього руху: навч. посіб. – Харків: ХНАДУ, 2020. – 254 с.
2. Ortúzar J. de D., Willumsen L.G. *Modelling Transport*. 4th ed. – Chichester: Wiley, 2011. – 606 p.
3. Barceló J. *Fundamentals of Traffic Simulation*. — Springer, 2010. – 466 p.
4. Макаренко М.П., Савченко А.В. Транспортні системи: навч. посіб. – Харків: УкрДАЗТ, 2019. – 184 с.
5. ДБН В.2.3-5:2018. Вулиці і дороги населених пунктів. – К.: Мінрегіон України, 2018. – 112 с.
6. Козлов В.І., Лисенко В.А. Теоретичні основи транспортних систем: навч. посіб. – Київ: НТУ, 2015. – 228 с.
7. Department for Transport, UK. *Transport Analysis Guidance (TAG)*. WebTAG. 2022. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.gov.uk/guidance/transport-analysis-guidance-tag>
8. Webster F.V. *Traffic Signal Settings*. Road Research Technical Paper No. 39. HMSO, London, 1958.
9. Aimsun Next User Manual. Aimsun Advanced Transportation Modeling. 2022.
10. Behrisch M. et al. *SUMO – Simulation of Urban MObility: An Overview*. In: *Proceedings of SIMUL 2011*. IARIA, 2011.
11. ДСТУ 4100:2021. Національний стандарт України. Планування вулично-дорожньої мережі. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. – 87 с.
12. Закон України «Про дорожній рух». – Відомості Верховної Ради України, 1993. – № 31.

13. ДСТУ ISO 39001:2014. Система управління безпекою дорожнього руху. – Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. – 38 с.
14. Постанова КМУ №1306 від 10.10.2001 р. Про Правила дорожнього руху. – Офіційний вісник України. – 2023.
15. ДСТУ 2587:2021. Засоби організації дорожнього руху. Загальні технічні вимоги. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. – 48 с.
16. Highway Capacity Manual (HCM 2016). Transportation Research Board, Washington D.C., 2016.
17. Макаренко М.Є., Дьяконов В.А. Основи проектування транспортних систем. – К.: НАУ, 2020.
18. Петренко С.В. Транспортне планування міст. – Харків: ХНУМГ, 2017.
19. Гусев С.М., Лазоренко Л.А. Організація дорожнього руху: навч. посіб. – К.: НТУ, 2019.
20. Гуменюк С. В. Моделювання транспортних потоків у PTV VISSIM: методичні рекомендації. – КНУБА, 2023.
21. Шумаков В.І. Просторове моделювання транспортної інфраструктури. – Л.: ЛНАУ, 2021.
22. Касьян С. І., Розов В. Є. Основи транспортного моделювання. – Київ: Ліра-К, 2019. – 312 с.