

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної роботи бакалавра

на тему: *Оптимізація параметрів світлофорного регулювання транспортного вузла пр. Металургів – вул. Соборності у м. Кривий Ріг з урахуванням добової нерівномірності транспортних потоків*

Виконала:

студентка 4 курсу, групи ТТ-22

(шифр групи)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Д.В. Бойко

Керівник: к.т.н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

В.О. Сістук

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри:

д.т.н., професор

(науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

Ю.А. Монастирський

(прізвище та ініціали)

Кривий Ріг – 2026 р.

РЕФЕРАТ

Роботу присвячено вирішенню актуального науково-практичного завдання - підвищенню ефективності організації дорожнього руху та пропускної спроможності регульованого перехрестя в умовах значної нерівномірності транспортного навантаження. Метою роботи є адаптація параметрів світлофорного регулювання досліджуваного вузла до фактичних характеристик транспортних потоків.

Для досягнення поставленої мети застосовано комплексний підхід, що включав натурні обстеження та моніторинг транспортного попиту, теоретичні розрахунки на основі класичної теорії транспортних потоків Ф. Вебстера, а також мікроскопічне імітаційне моделювання у програмному комплексі PTV Vissim.

На основі розрахунку фазових коефіцієнтів для перехрестя вулиць Соборності та проспекту Металургів у м. Кривий Ріг доведено надлишковість базового режиму та розроблено нову двофазну програму регулювання із раціональним циклом $C = 60$ с (із перерозподілом зеленого часу на 23 с та 27 с).

Доведено ефективність оптимізації (за результатами моделювання в PTV Vissim): середня затримка транспортних засобів знизилася на 15,9% (з 23,52 с до 19,79 с), що підвищило рівень обслуговування перехрестя з LOS C до LOS B. Максимальна довжина черги на найбільш критичному (західному) підході скоротилася на 32,7% (до 57,83 м). Затримка рейкового транспорту зменшилася на 14,5% (на 12,72 с), а безрейкового - на 13,1% (на 5,09 с).

Ключові слова: організація дорожнього руху, світлофорне регулювання, пропускна спроможність, імітаційне моделювання, PTV Vissim, теорія Вебстера, транспортна затримка, екологічні показники.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТА КЕРУВАННЯ МІСЬКИМИ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ.....	7
РОЗДІЛ 2. МІКРОМОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ НА ПЕРЕХРЕСТІ ВУЛИЦЬ.....	13
2.1.Особливості організації ділянки дослідження та її роль в міській вулично- дорожній мережі.....	13
2.2. Збір вихідних даних	14
2.2.1. Потоки транспорту та пішоходів в різні періоди доби	14
2.2.2. Регулювання руху на перехресті	18
2.3. Розробка моделей базового сценарію	18
2.3.1. Розбудова моделі мережі	18
2.3.2. Моделювання організації руху	19
2.3.3. Моделювання потоків індивідуального транспорту	22
2.3.4. Моделювання роботи громадського транспорту.....	23
2.3.5. Моделювання пішохідного руху	26
2.3.6. Калібрування та верифікація моделі.....	27
2.3.7. Налаштування вихідних показників	30
2.4. Особливості моделювання сценаріїв	31
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ТЕХНІКО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ СЦЕНАРІЇВ МОДЕЛЮВАННЯ	32
3.1. Базова модель	32
3.2. Оптимізація світлосигнального регулювання руху.....	37
3.3. Порівняння результатів моделювання між сценаріями	41
ВИСНОВКИ.....	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	46

ВСТУП

Актуальність теми. Невідповідність параметрів світлофорного регулювання міських перехресть сучасному рівню транспортного попиту призводить до утворення локальних заторів, перевитрати палива та погіршення екологічного стану міського середовища. Оптимізація світлофорних циклів із використанням сучасних інструментів мікроскопічного моделювання дозволяє збалансувати пропускну здатність магістралей, знизити часові втрати пасажирів громадського транспорту та зменшити валові викиди шкідливих речовин в атмосферу.

Мета. Підвищення ефективності функціонування регульованого перехрестя вулиці Соборності та проспекту Металургів у місті Кривий Ріг та зменшення його негативного екологічного впливу шляхом оптимізації параметрів світлофорної програми на основі імітаційного моделювання.

Задачі дослідження.

Провести натурні обстеження та визначити годинну інтенсивність і склад транспортних потоків у пікові періоди.

Побудувати базову імітаційну модель перехрестя та оцінити поточний рівень обслуговування (LOS) і просторове накопичення черг.

Розрахувати оптимальні параметри світлофорного циклу за методологією Вебстера та розробити нову циклограму регулювання.

Оцінити ефективність впроваджених рішень шляхом порівняльного аналізу кінематичних та екологічних показників моделі.

Об'єкт дослідження.

Процес формування транспортних потоків та організації дорожнього руху на регульованому перехресті магістральних вулиць в умовах пікового навантаження.

Предмет дослідження.

Закономірності впливу часових параметрів світлофорного регулювання (тривалості циклу та фаз) на показники затримок, довжини черг, швидкісного режиму та обсяги викидів шкідливих речовин транспортними засобами.

Методи дослідження. Натурні обстеження (метод табельного обліку), теорія транспортних потоків, метод Ф. Вебстера, Мікроскопічне моделювання транспортних та пасажирських потоків у середовищі PTV Vissim.

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблено та верифіковано оптимальну 60-секундну світлофорну програму, впровадження якої дозволяє на практиці скоротити максимальні черги на проблемних підходах на 32,7%, зменшити затримки громадського транспорту на 13,1–14,5% та перевести перехрестя на вищий рівень обслуговування LOS B.

Структура і обсяг роботи. Бакалаврська робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 14 джерел. Загальний обсяг роботи – 46 с.

РОЗДІЛ 1. ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТА КЕРУВАННЯ МІСЬКИМИ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ

Протягом десятиліть регулювання світлофорних об'єктів залишається одним із найбільш критично важливих напрямків досліджень і практичного застосування, спрямованих на забезпечення максимальної ефективності міських вулично-дорожніх мереж. За цей час було розроблено різноманітні технічні рішення та проведено численні дослідження. Однак у зв'язку з постійним зростанням кількості транспортних засобів, подальшим погіршенням умов дорожнього руху та збільшенням кількості заторів зростає потреба у нових передових технологіях, здатних не лише вирішувати наявні проблеми, а й забезпечувати більш ефективні та сталі рішення. У великих містах тривалі затримки транспортних засобів на міських дорогах є наслідком невідповідності між геометричними параметрами вулично-дорожніх мереж та зростаючою інтенсивністю транспортних потоків [1].

Очевидно, що збільшення кількості доріг і вулиць, а також перебудова однорівневих розв'язок у багаторівневі призводить до перерозподілу транспортних потоків і зниження рівня перевантаження на ділянках міської дорожньої мережі з недостатньою пропускною спроможністю.

Проте загальновідомо, що будівництво нових доріг та елементів дорожньої інфраструктури є надзвичайно високовартісним. Тому першочерговим завданням є виявлення та використання наявних резервів пропускної спроможності дорожньої мережі, і лише після цього - прийняття рішень щодо конструктивних змін окремих ділянок. Для ефективного вирішення цієї проблеми необхідно застосовувати сучасні програмні засоби.

Ділянки доріг без тривалих заторів не потребують заходів щодо підвищення пропускної спроможності. Натомість увагу слід зосередити на виявленні «вузьких місць» (пляшкових шийок) у вулично-дорожній мережі та оцінці резервів їхньої

пропускної спроможності. У країнах та містах з ущільненою міською забудовою регулюються перехрестя з найвищою пропускною здатністю. Належне розташування світлофорів на перехрестях може суттєво підвищити якість руху громадського транспорту, велосипедів та пішоходів. На магістральних дорогах з високою інтенсивністю руху світлофорне регулювання використовується для обмеження доступу до цих доріг та покращення умов виїзду.

У багатьох випадках системи світлофорного регулювання допомагають зменшити просторову площу об'єктів транспортної інфраструктури. Деякі системи функціонують безперервно за заздалегідь заданими конфігураціями, тоді як інші здатні адаптувати інтервали сигналів. На основі цього світлофори класифікують на два типи: з жорстким (фіксованим) керуванням та з адаптивним керуванням.

У першому випадку система працює в постійному режимі незалежно від дня тижня, дорожніх умов чи часу доби. У великих містах такі системи все частіше замінюються на адаптивні системи керування сигналами.

Для більш ефективного управління дорожнім рухом тривалість сигнальних циклів може коригуватися різними способами, що допомагає запобігти виникненню транспортних заторів.

Сучасне програмне забезпечення дозволяє здійснювати моделювання транспортних потоків, забезпечуючи оптимізацію транспортних систем, проектування нових систем, оцінку їхньої ефективності, а також аналіз і прогнозування різних аспектів транспортної діяльності [1- 4].

Моделювання транспортних потоків — це процес створення математичних або комп'ютерних моделей, що відображають транспортну ситуацію в місті чи регіоні. Дані моделі дозволяють аналізувати та прогнозувати поведінку транспортних потоків за різних сценаріїв, таких як збільшення обсягів руху, зміни в інфраструктурі або непередбачувані ситуації (інциденти).

Використання сучасного програмного забезпечення для моделювання має низку переваг, зокрема [5]:

- Оптимізація маршрутів, що включає планування, візуалізацію та аналіз;
- Візуалізація транспортних потоків, що дозволяє краще зрозуміти поведінку транспортного потоку та виявити проблемні ділянки;
- Оптимізація роботи транспорту, зменшення кількості заторів, мінімізація часу в дорозі, покращення логістики та зниження витрат;
- Підтримка при плануванні нових транспортних систем (наприклад, доріг, мостів, перехресть), оцінка їхньої ефективності та вибір оптимальних проектних рішень.

Основними завданнями моделювання транспортних потоків є:

- Оптимізація дорожнього руху;
- Підвищення безпеки дорожнього руху;
- Зниження транспортних витрат;
- Покращення екологічного стану;
- Моделювання аварійних (надзвичайних) ситуацій та їхніх наслідків.

На рисунку 1.1 ілюструються основні методи моделювання транспортних систем.



Рис.1.1. Основні методи моделювання транспортних систем

Враховуючи множину факторів, програмні засоби дозволяють брати до уваги різноманітні елементи, що впливають на транспортний потік, такі як кількість транспортних засобів, швидкість руху, наявність пішоходів, різні дорожні інциденти тощо.

Існує велика кількість програмних продуктів, розроблених безпосередньо для моделювання транспортних потоків. Серед найбільш відомих прикладів — VISSIM, AIMSUN, PTRANS, MATLAB та Open Model [6-12]

У цих програмних засобах застосовуються різні підходи до моделювання транспортних потоків. Проте всі вони дозволяють здійснювати аналіз та оптимізацію транспортних систем, що робить їх незамінними інструментами у транспортному плануванні та проектуванні [1, 2].

Переваги моделювання транспортних систем представлені на рисунку 1.2.

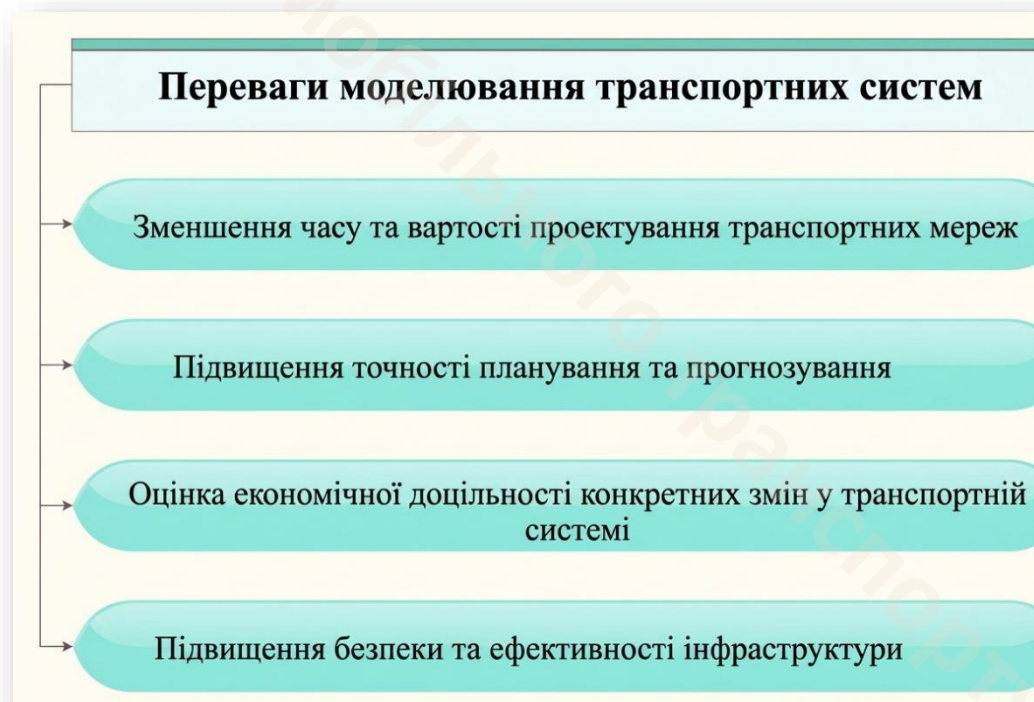


Рис.1.2. Переваги моделювання транспортних систем

Наприклад, для створення моделі перехрестя в програмному забезпеченні PTV Vissim необхідні такі вихідні дані [1, 2, 6]:

- Детальна схема ділянки, що моделюється;
- Кількість смуг руху в кожному напрямку;
- Ширина смуг руху;
- Напрямки руху для кожної ділянки;
- Технічні та геометричні характеристики всіх типів транспортних засобів;
- Інтенсивність дорожнього руху;
- Склад вхідних транспортних і пішохідних потоків;
- Розташування та ширина тротуарів;
- Пріоритети руху в точках конфлікту (конфліктних зонах).

Завдяки простоті та зрозумілості інтерфейсу програмного забезпечення PTV Vissim [6], створення моделі не викликає значних труднощів у користувачів. Відтак, особи без навичок програмування можуть моделювати будь-яку ділянку дорожньої мережі.

У процесі симуляції Vissim дозволяє виконувати такі види аналізу:

- Аналіз організації дорожнього руху на дорогах і вулицях міста, контроль напрямків руху як на окремих ділянках, так і на всьому маршруті;
- Аналіз можливості надання пріоритету громадському транспорту;
- Аналіз змін відстаней між обов'язковими зупинками транспортних засобів, перевірка точок в'їзду та організація одностороннього руху громадського транспорту;
- Аналіз пропускної спроможності транспортної мережі або її окремих вузлів.

Моделювання транспортних процесів і систем є важливим інструментом для ефективного управління транспортною інфраструктурою. Сучасні методи моделювання спроможні суттєво підвищити якість планування, посилити безпеку та оптимізувати функціонування транспортних мереж.

Таким чином, транспортні моделі призначені для відтворення обсягів транспортної діяльності в мережах, де об'єкти міста, що генерують потоки, мають конкретне просторове розташування. Використовуючи ці моделі, можна заздалегідь спрогнозувати наслідки змін у міській транспортній мережі. Такі моделі застосовуються для підтримки прийняття рішень у міському транспортному плануванні, вибору альтернативних проектів розвитку транспортних мереж, а також для аналізу ефективності певних заходів, спрямованих на організацію транспортної діяльності.

РОЗДІЛ 2. МІКРОМОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ НА ПЕРЕХРЕСТІ ВУЛИЦЬ

2.1. Особливості організації ділянки дослідження та її роль в міській вулично-дорожній мережі

Перехрестя вулиць Соборності та проспекту Металургів у місті Кривий Ріг є звичайним перехрестям за класифікацією форми перехресть ГБН В.2.3-555:2016 [13]. Вулиця Соборності – має 2 смуги руху у кожному напрямку, проспект Металургів – 3 смуги руху в одному напрямку. Регулювання транспортного та пішохідного дорожніх рухів відбувається за допомогою світлосигнальних установок із фіксованою програмою. Розміри ділянки дослідження визначали розміри мікроімітаційної моделі: по вулиці Соборності (західна сторона) – до перехрестя з вулицею Хамзата Гелаєва, східна сторона – до перехрестя з вулицею Мистецька, по проспекту Металургів – ділянка о півночі обмежена перехрестям з вулицею В. Матусевича, о півдні – вулицею Вадима Гурова. Напрямки руху західної сторони ділянки дослідження по вулиці Соборності відокремлені трамвайною колією, на східній стороні трамвайна колія проходить по проїжджій частини вулиці.

Прспект Металургів забезпечує транспортний зв'язок у меридіональному напрямку (північ-південь), з'єднуючи центральну частину міста з промисловими зонами (зокрема, ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»). Вулиця Соборності є важливою широтною артерією, що зв'язує Металургійний район із Центрально-міським на заході та Довгінцевським – на сході.

У районі цього перехрестя (історичний мікрорайон Соцмісто) зосереджена критична інфраструктура громадського транспорту. Тут перетинаються лінії комунального транспорту - міського автобуса (під номером 302), трамвая, тролейбусні маршрути та лінії маршрутного таксі. Також на проспекті Металургів

в зоні досліджуваної ділянки знаходиться станція швидкісного трамваю «проспект Металургів». Через зупинки на досліджуваній ділянці проходять 19 маршрутів громадського транспорту

Безпосередньо біля перехрестя знаходиться Центральний ринок, великі торговельні об'єкти та паркові зони (парк імені Богдана Хмельницького, парк Героїв), що створює пішохідний та пасажиропотік у денні та вечірні години. Поблизу розташовані Криворізький національний університет, палац культури, спортивні споруди (стадіон «Металург», плавальний басейн) та адміністративні установи.

2.2. Збір вихідних даних

Обстеження локації дослідження виконувалось 10.04.2026 (п'ятниця) у ранковий (9-00 до 10-00) та вечірній періоди доби (17-00 – 18-00), які є піковими. Дослідженні інтенсивності транспортних та пішохідних потоків, робота світлофорів, організація дорожньої розмітки, робота (інтервал руху) громадського транспорту. Дані по громадському транспорті (маршрути через зупинку та актуальний розклад руху), отримані у польових умовах, перевірені у додатку «Зручний маршрут».

2.2.1. Потоки транспорту та пішоходів в різні періоди доби

Потоки руху автомобільного індивідуального транспорту та громадського транспорту визначались за категоріями транспортних засобів: велосипеди, мотоцикли, легкові автомобілі, вантажні автомобілі із розподілом до 3,5 т, більше 3,5 т, довгоміри. Громадський транспорт – автобуси, маршрутні таксі, тролейбуси по кожному із чотирьох напрямків руху (рис.2.1). Інтервали дослідження по 20 хв.

Приклади позицій, з яких було проведено обстеження інтенсивності потоків показані на рис.2.2, рис.2.3.

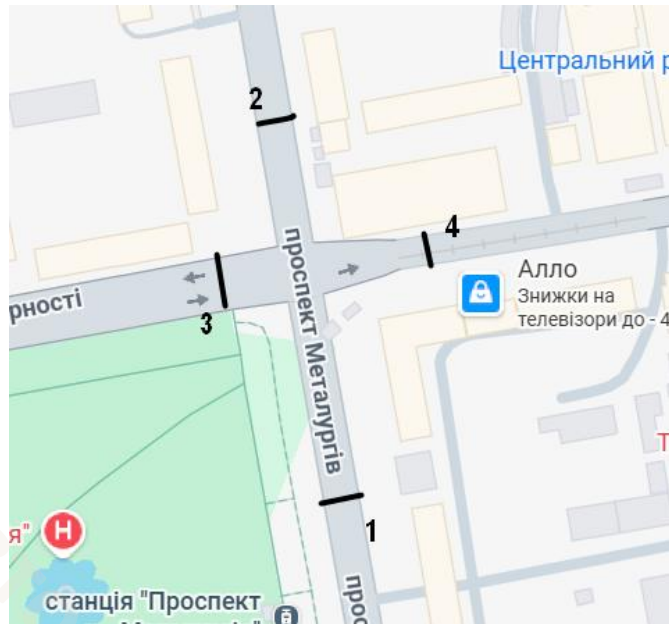


Рис. 2.1. Нумерація напрямків руху на перехресті

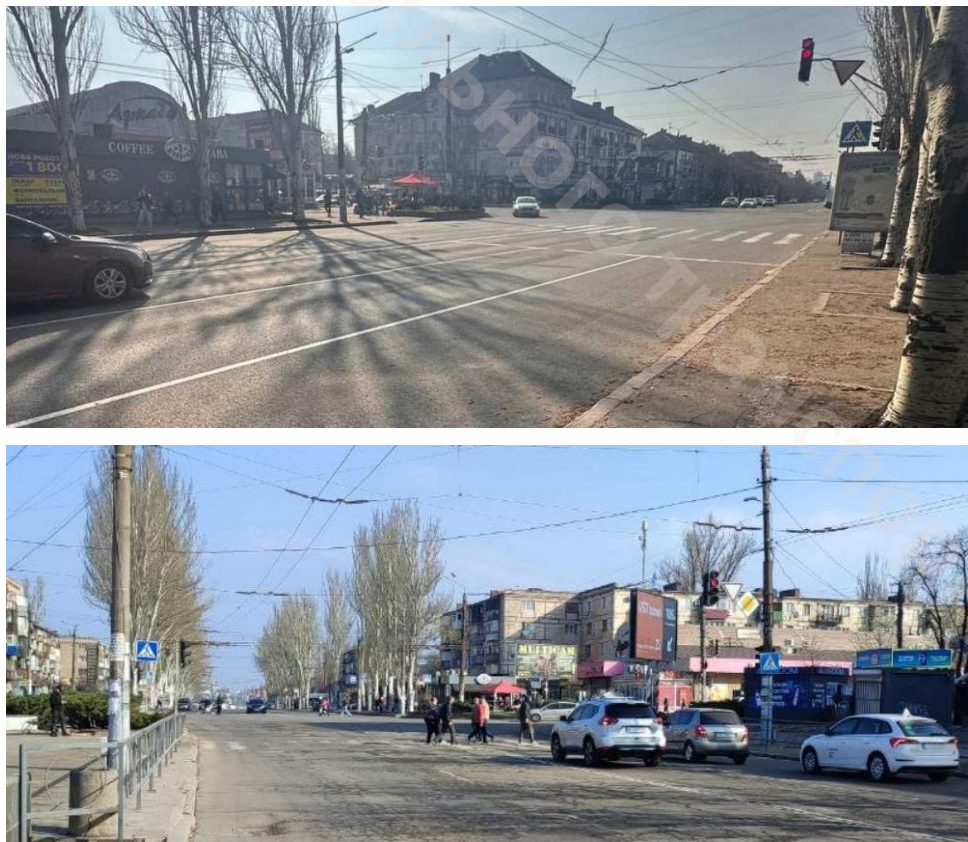


Рис.2.2. Вид з точок обстеження на проспекті Металургів



Рис.2.3. Вид з точок обстеження по вулиці Соборності

Для моделювання важливим був диференційовано підходити до врахування інтенсивності руху у ранковий та вечірній період доби. (табл.2.2, табл. 2.3). Результати обстежень представлені в окремих таблицях.

Дані по напрямкам також були агреговані по входам для моделювання вхідних потоків у моделі. Наприклад, для ранкового піку такі дані виглядали таким чином:

Табл.2.1

Агрегування даних інтенсивності руху

	Вело	Мото	Легкові автомобілі	Вантажні			Громадський транспорт		
				до 3,5т	більше 3,5т	Довгоміри	Маршрутка	Автобус	Трамвай
1	1	1	172	17	5	0	16	2	6
2	0	0	251	16	12	0	8	1	4
3	1	2	54	10	1	0	3	1	0
4	0	0	215	15	5	0	6	0	0

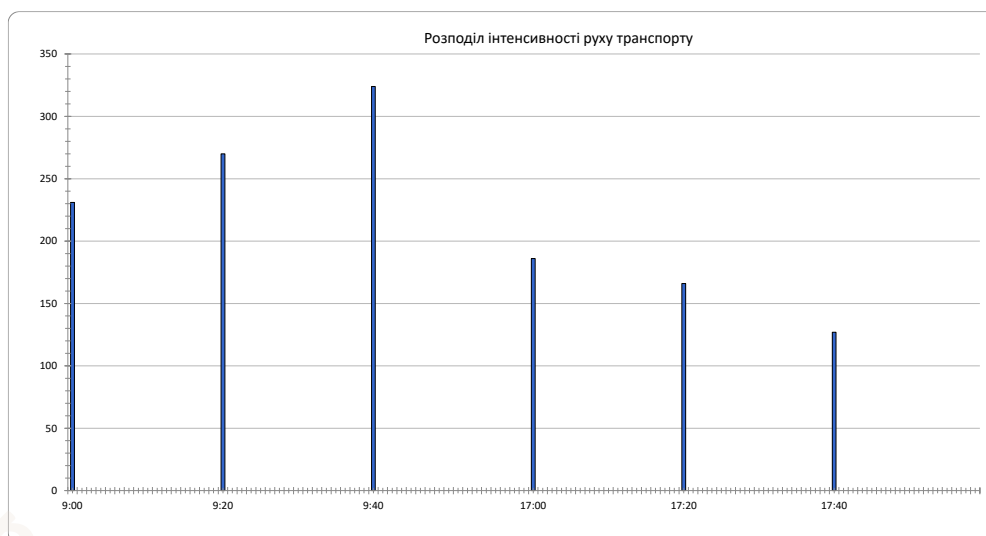


Рис.2.4. Отриманий розподіл інтенсивності руху транспорту

Табл.2.1

Результати обстеження інтенсивності руху транспорту (ранок)

Напрямок	Вело	Мото	Легкові автомобілі	Вантажні автомобілі			Громадський транспорт			Сума	Приведені одиниці
				до 3,5т	більше 3,5т	Довгоміри	Маршрутка	Автобус	Тролейбус		
1-2	1	1	125	15	3	0	9	1	6	161	199
1-3	0	0	9	1	0	0	0	1	0	11	14
1-4	0	0	38	1	2	0	7	0	0	48	57
2-1	0	0	132	8	6	0	8	1	4	159	193
2-3	0	0	26	4	4	0	0	0	0	34	46
2-4	0	0	93	4	2	0	0	0	0	99	107
3-1	1	2	10	0	0	0	0	1	0	14	14
3-2	0	0	16	6	0	0	0	0	0	22	28
3-4	0	0	28	4	1	0	3	0	0	36	44
4-1	0	0	70	1	1	0	3	0	0	75	80
4-2	0	0	74	9	2	0	0	0	0	85	98
4-3	0	0	71	5	2	0	3	0	0	81	92
Коеф.приведення	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	1.5	2.5	3.0	825.0	

Табл.2.2

Результати обстеження інтенсивності руху транспорту (вечір)

Вечір -Приведені добові по напрямках											
Напрямок	Вело	Мото	Легкові автомобілі	Вантажні автомобілі			Громадський транспорт			Сума	Приведені одиниці
				до 3,5т	більше 3,5т	Довгоміри	Маршрутка	Автобус	Тролейбус		
1-2	0	2	101	7	1	0	7	2	4	124	147
1-3	0	0	12	0	1	0	0	0	0	13	15
1-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2-1	0	0	37	2	0	0	0	0	0	39	41
2-3	0	0	16	2	3	0	0	0	0	21	29
2-4	0	0	37	2	0	0	0	0	0	39	41
3-1	0	0	6	0	0	0	0	1	0	7	9
3-2	0	0	15	1	0	0	0	1	0	17	20
3-4	0	0	33	2	2	0	4	0	0	41	49
4-1	0	0	14	1	1	0	4	0	0	20	25
4-2	0	0	38	4	0	0	0	0	0	42	46
4-3	0	0	26	0	0	0	3	0	0	29	31
Коеф.приведення	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	1.5	2.5	3.0	392.0	

2.2.2. Регулювання руху на перехресті

Напрямки руху транспорту та пішоходів на перехресті регулюються як дорожньою розміткою, так і світлофорами із фіксованою програмою. По проспекту Металургів правий поворот дозволено з крайньої смуги руху, лівий поворот – з третьої смуги. По вулиці Соборності – правий поворот – з крайньої смуги, лівий поворот – з другої смуги. Перехрестя облаштовано наземними пішохідними переходами в усіх напрямках. Пішохідний рух регульований світлофором.

Програми роботи світлофорів враховані у базовій транспортній моделі у програмному забезпеченні PTV Vissim.

2.3. Розробка моделей базового сценарію

Модель перехрестя виконана в програмному забезпеченні PTV Vissim (академічна ліцензія).

2.3.1. Розбудова моделі мережі

При розбудові моделі мережі врахований спосіб організації руху на перехресті (можливості проїзду у конкретному напрямку) відповідно до дорожньої розмітки за допомогою звичайних та з'єднувальних відрізків (рис.2.5). Ширина смуги – 3,75 м, поведінка водіння на відрізку – міський рух,

Для моделювання пішохідних переходів використано відрізки із зазначенням «є пішохідною зоною» (рис.2.6). На досліджуваній ділянці таких відрізків – 4.

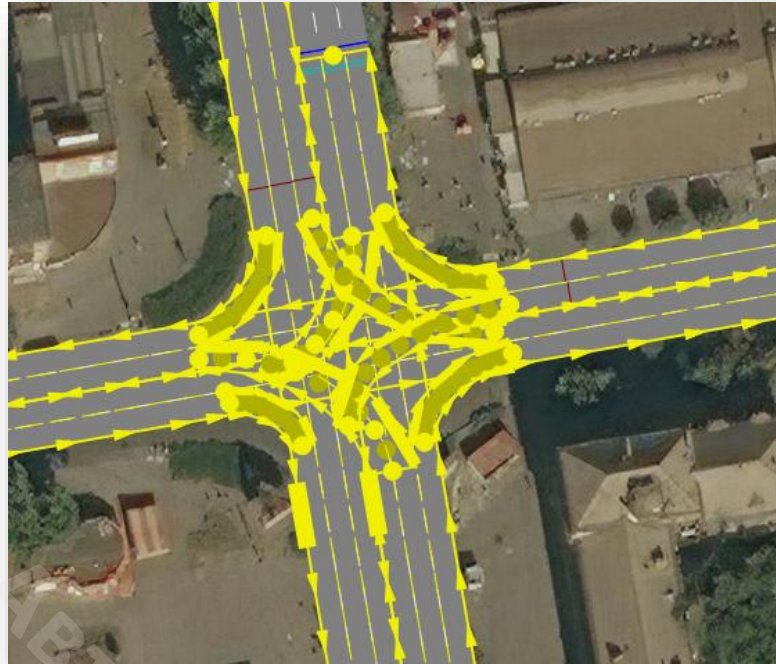


Рис.2.5. Відрізки та з'єднувальні відрізки у моделі

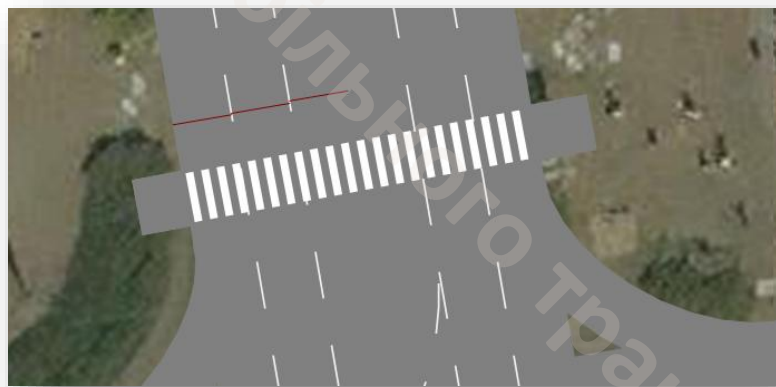


Рис.2.6. Відрізки для руху пішоходів

2.3.2. Моделювання організації руху

Окрім схеми підключення з'єднувальних відрізків, організація руху на перехресті врахована через моделювання конфліктних зон, зон малошвидкісного руху та світлосигнальних програм.

На конфліктній зоні враховані такі типи конфліктів:

- **Перетин:** взаємне пересікання відрізків мережі.

- **Злиття:** Спрямування двох з'єднувальних відрізків до одного відрізка, або примикання з'єднувального відрізка до відрізка з наявним набігаючим (вхідним) транспортним потоком; звуження двох смуг руху до однієї в межах одного конектора до його завершення.

- **Розгалуження:** Відгалуження двох з'єднувальних відрізків від одного відрізка, або відгалуження одного відрізка від відрізка, що продовжується в напрямку руху потоку на відстань понад 0,5 м, розширення однієї смуги руху до двох у межах одного з'єднувального відрізка до його завершення.

За замовчуванням для конфліктної ділянки активовано атрибут «**Автоматичне визначення типу конфлікту**», що дозволило програмному комплексу Vissim ідентифікувати конфліктну ділянку відповідно до її функціонального типу (згідно з класифікацією атрибутів конфліктних ділянок).

Головною дорогою є проспект Металургів.

Зони малдошвидкісного руху налаштовані на 15 км-год. для всіх типів транспортних засобів.

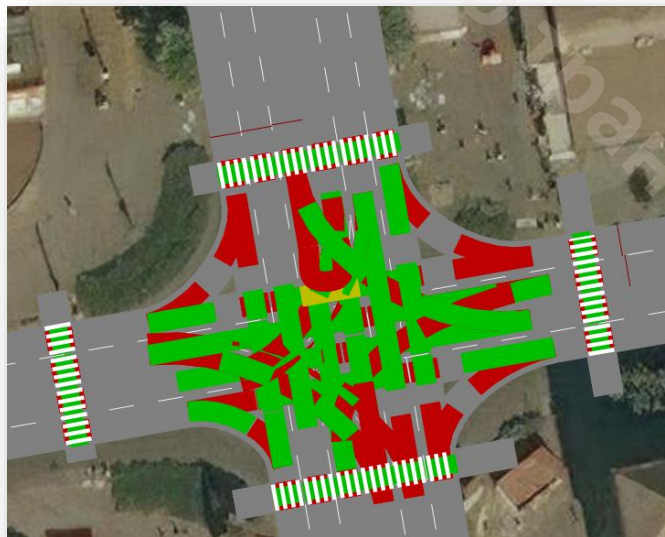


Рис. 2.7. Конфліктні зони

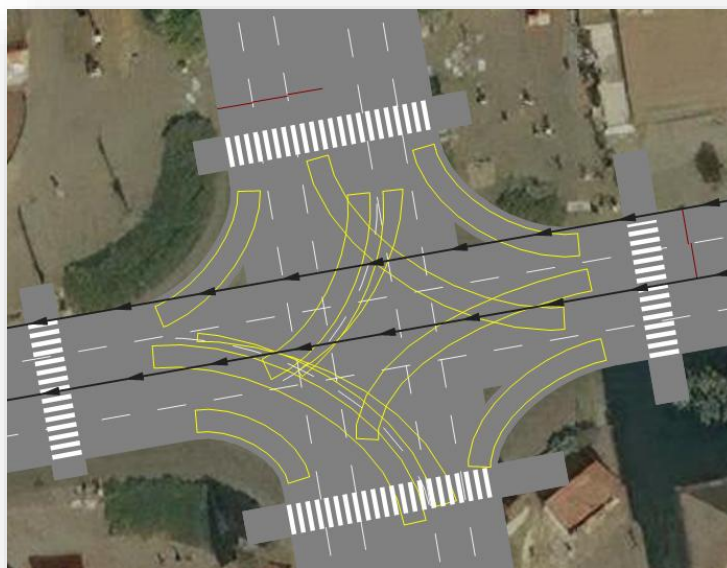


Рис. 2.8. Зони малошвидкісного руху

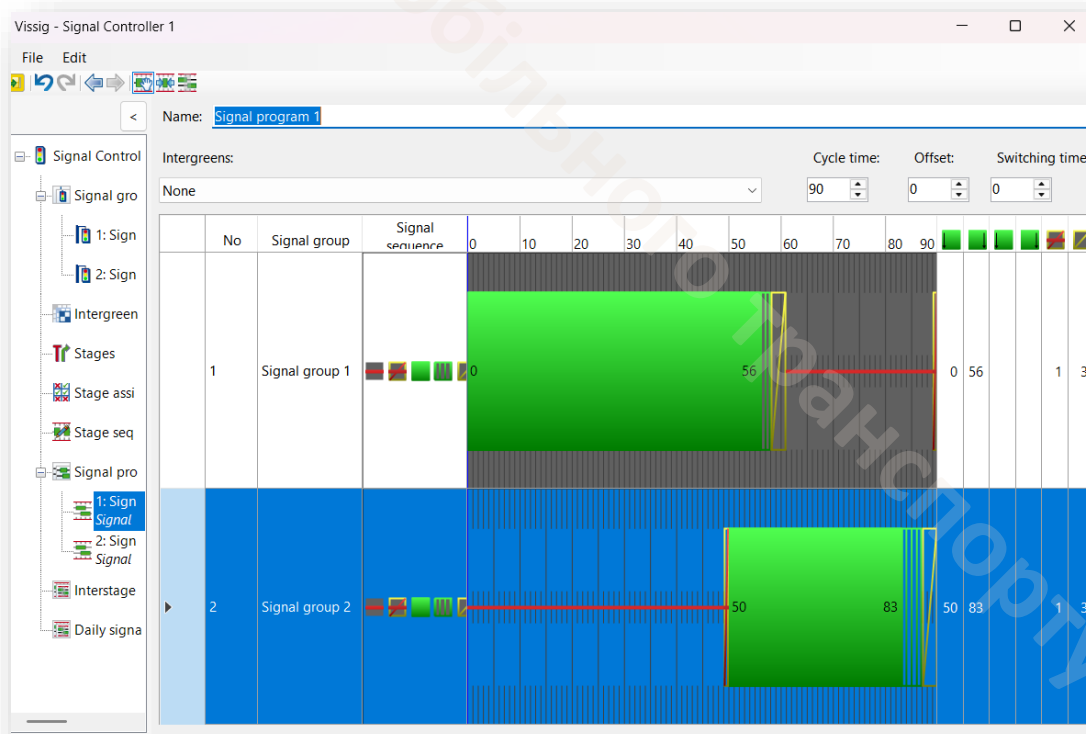


Рис.2.9. Налаштування програм світлофорів у Vissim

2.3.3. Моделювання потоків індивідуального транспорту

Розбудова маршрутів індивідуального транспорту виконана на базі статичних маршрутів у Vissim. Для визначення статичного маршруту транспортних засобів на базовому відрізку мережі було встановлено початкову точку прийняття рішення про маршрутизацію, а на цільовому відрізку - кінцеву секцію призначення. Для однієї точки прийняття рішень було передбачено можливість завдання декількох цільових відрізків. Саму точку прийняття рішень або секцію призначення припустимо розміщувати безпосередньо на з'єднувальних відрізках.

Призначення меж часових інтервалів здійснено за допомогою відповідного інструментарію тимчасових інтервалів. У випадках, коли розподіл обсягів транспортного потоку за напрямками змінювався у часі (табл. 2.2, табл. 2.3), було сформовано два сценарію базової моделі (існуючий стан) для ранкової та вечірньої години доби, що не перетиналися між собою.

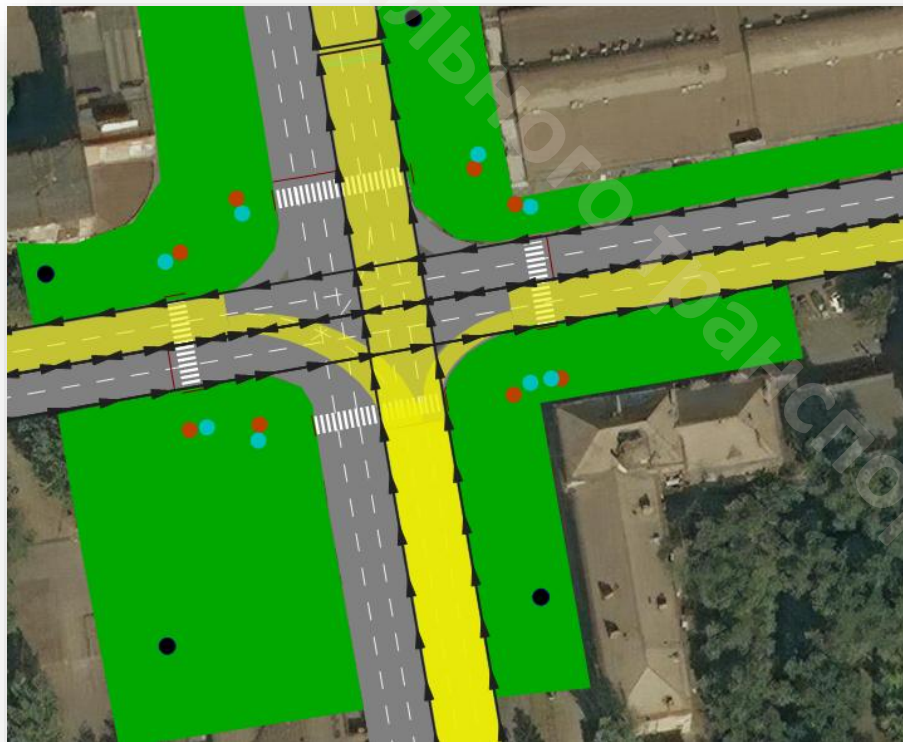


Рис.2.10. Приклад статичних маршрутів індивідуального транспорту

Для кожного статичного маршруту у вікні RelFlow (0-MAX)– доля потоку використовувались фактичні дані з облікової таблиці по транспортним потокам.

2.3.4. Моделювання роботи громадського транспорту

Система громадського транспорту складається з 9 зупиночних пунктів та 19 маршрутів (38 напрямків). Деякі зупинки мають призначення тільки для зупинки трамваю (по вулиці Соборності), або тільки для комунальних автобусів та тролейбусів (по проспекту Металургів), що враховано в кожному із напрямків конкретного маршруту через активацію відповідних зупинок (можливість зупинки із посадкою та висадкою пасажирів). Зупинки трамваю знаходяться на проїжджій частині, маршрутних таксі – в карманах.

Таким чином, для автобусного та трамвайного сполучення було визначено маршрути (лінії) громадського транспорту (ГТ), що функціонують за фіксованою послідовністю зупинок. Для цього було сформовано розклад руху із зазначенням часу відправлення з першого зупинного пункту (за даними додатку «Зручний маршрут»), часу зміщення між зупинками згідно з розкладом, а також тривалості стоянки на зупинках.

Тривалість стоянки транспортних засобів ГТ визначалася за допомогою мікроскопічного моделювання руху пішоходів. Перед початком моделювання було визначено доцільність та ступінь урахування пасажиропотоків у симуляції, відповідно до чого виконано параметризацію зупинних пунктів. Водночас обраний метод для конкретної зупинки поширювався на всі лінії ГТ, що її проходили. Для кожної зупинки було задано специфічні параметри окремо для кожної лінії та часткового маршруту ГТ.

Кожна лінія громадського транспорту у Vissim мала фіксовану траєкторію. У випадках, коли реальний маршрут ГТ передбачав рух різними траєкторіями (двома)

в межах досліджуваної мережі, у Vissim було змодельовано дві окремих лінії ГТ (всього 39). Створені лінії ГТ показані в табл.2.3.

Табл.2.3

Кодування маршрутів громадського транспорту в моделі

Number: 39	No	Name	EntryLink	DestLink	VehType	DesSpeedDistr	Color
1	1	A302	3	8	300: Bus	30: 30 km/h	 (255, 190, 0, 0)
2	2	Трам 14	2	2	400: Tram	25: 25 km/h	 (255, 0, 38, 255)
3	3	Трам 9	2	2	400: Tram	25: 25 km/h	 (255, 0, 38, 255)
4	4	Трам 9	1	1	400: Tram	25: 25 km/h	 (255, 0, 38, 255)
5	5	Трам 14	1	1	400: Tram	25: 25 km/h	 (255, 0, 38, 255)
6	6	A302	4	4	300: Bus	30: 30 km/h	 (255, 255, 0, 0)
7	7	Трам 25	2	2	400: Tram	25: 25 km/h	 (255, 0, 38, 255)
8	8	Трам 25	1	1	300: Bus	25: 25 km/h	 (255, 0, 38, 255)
9	9	Трам 22	2	2	400: Tram	25: 25 km/h	 (255, 0, 38, 255)
10	10	Трам 22	1	1	400: Tram	25: 25 km/h	 (255, 0, 38, 255)
11	11	Трам 27	1	1	400: Tram	25: 25 km/h	 (255, 0, 38, 255)
12	12	Трам 27	2	2	400: Tram	25: 25 km/h	 (255, 0, 38, 255)
13	13	Трам 7	1	1	400: Tram	25: 25 km/h	 (255, 0, 38, 255)
14	14	Трам 7	2	2	400: Tram	25: 25 km/h	 (255, 0, 38, 255)
15	15	Трам 2	1	1	400: Tram	25: 25 km/h	 (255, 0, 38, 255)
16	16	Трам 2	2	2	400: Tram	20: 20 km/h	 (255, 0, 38, 255)
17	17	M286	2	2	300: Bus	40: 40 km/h	 (255, 255, 216, 0)
18	18	M286	1	1	300: Bus	40: 40 km/h	 (255, 255, 216, 0)
19	19	M205	1	1	300: Bus	40: 40 km/h	 (255, 255, 216, 0)
20	20	M250	8	8	300: Bus	40: 40 km/h	 (255, 255, 216, 0)
21	21	M250	4	3	300: Bus	40: 40 km/h	 (255, 255, 216, 0)
22	22	M210	3	8	300: Bus	40: 40 km/h	 (255, 255, 216, 0)
23	23	M210	4	4	300: Bus	40: 40 km/h	 (255, 255, 216, 0)
24	24	M255	3	8	300: Bus	40: 40 km/h	 (255, 255, 216, 0)
25	25	M255	4	4	300: Bus	40: 40 km/h	 (255, 255, 216, 0)
26	26	M208	8	8	300: Bus	40: 40 km/h	 (255, 255, 216, 0)
27	27	M208	4	3	300: Bus	40: 40 km/h	 (255, 255, 216, 0)
28	28	M261	3	8	300: Bus	40: 40 km/h	 (255, 255, 216, 0)

29	29	M261	4	4	300: Bus	40: 40 km/h	 (255, 255, 216, 0)
30	30	Тр 24	3	8	300: Bus	25: 25 km/h	 (255, 128, 128, 128)
31	31	Тр 24	4	4	300: Bus	25: 25 km/h	 (255, 128, 128, 128)
32	32	Тр 21	3	8	300: Bus	25: 25 km/h	 (255, 128, 128, 128)
33	33	Тр 21	4	4	300: Bus	25: 25 km/h	 (255, 128, 128, 128)
34	34	Тр 11	3	8	300: Bus	25: 25 km/h	 (255, 128, 128, 128)
35	35	Тр 11	4	4	300: Bus	25: 25 km/h	 (255, 128, 128, 128)
36	36	Тр 2	3	8	300: Bus	25: 25 km/h	 (255, 128, 128, 128)
37	37	Тр 2	4	4	300: Bus	25: 25 km/h	 (255, 128, 128, 128)
38	38	Тр 8	3	8	300: Bus	25: 25 km/h	 (255, 128, 128, 128)
39	39	Тр 8	4	4	300: Bus	25: 25 km/h	 (255, 128, 128, 128)

Процес моделювання ліній ГТ за своєю специфікою зіставний із формуванням статичних маршрутів транспортних засобів. Проте лінії ГТ не розподіляли наявний транспортний потік, а генерували та вводили транспортні засоби ГТ безпосередньо на початковій секції лінії. За наявності кількох смуг руху на ланці, система Vissim позиціонувала транспортний засіб ГТ на правій смузі або на першій смузі, де розташована зупинка і де не було виявлено інших транспортних засобів чи об'єктів взаємодії.

Під час задання лінії ГТ на ланці система автоматично розміщувала початкову секцію на початку цієї ланки без можливості її подальшого переміщення.

Транспортні засоби ГТ рухалися траєкторією, визначеною параметрами лінії ГТ. За замовчуванням після завершення маршруту вони залишалися в межах моделі. Для запобігання безмаршрутному переміщенню транспорту мережею, лінії ГТ було змодельовано таким чином, щоб наприкінці кінцевої ланки транспортні засоби виводилися за межі модельованої системи.

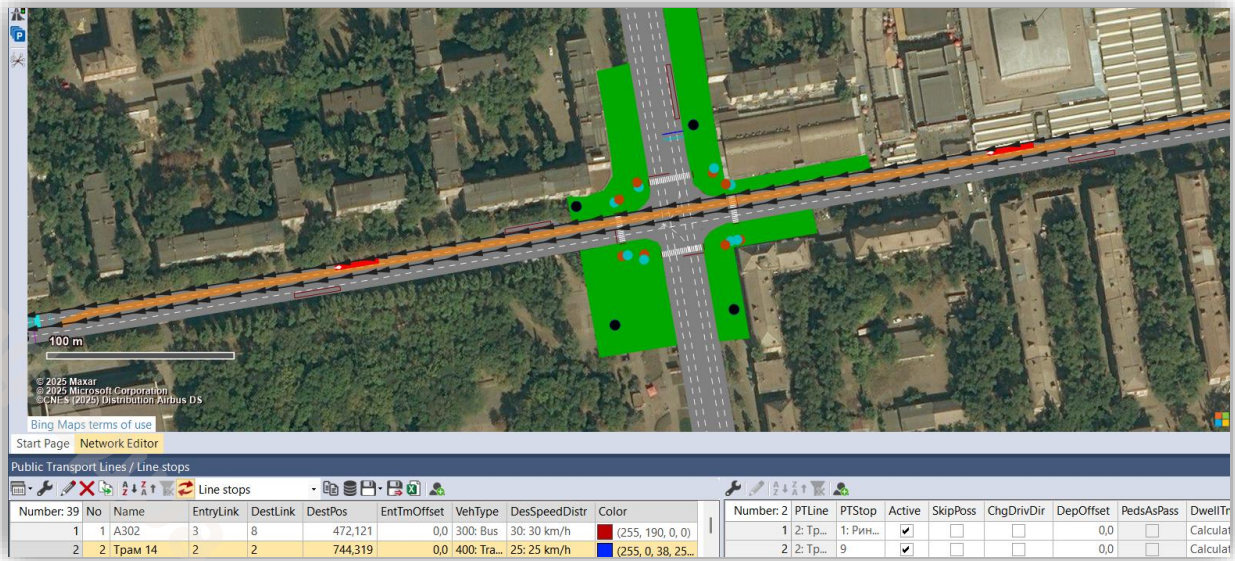


Рис.2.11. Приклад створення маршруту трамваю

2.3.5. Моделювання пішохідного руху

У моделі створено 4 пішохідних зони для відтворення траєкторій руху пішоходів у мережі. Статичний пішохідний маршрут забезпечував переміщення пішоходів із вихідної зони через інші зони до цільової зони, де розташовувався кінцевий пункт призначення. Для локального розподілу пішохідних потоків із однієї зони до інших зон було застосовано часткові пішохідні маршрути.

Процедура задання та редагування рішень про маршрутизацію пішоходів, а також їхніх статичних і часткових маршрутів загалом була аналогічною аналогічним процесам для транспортних засобів.

Редагування статичних і часткових пішохідних маршрутів здійснювалося ідентично. З огляду на це, наведені нижче описи рішень про маршрутизацію та пішохідних маршрутів стосувалися обох типів, окрім випадків, де було проведено чітке розмежування між статичними та частковими маршрутами.

Для виконання операцій додавання та редагування на панелі об'єктів мережі було обрано інструмент «Пішохідний маршрут (статичний)» або «Пішохідний маршрут (частковий маршрут)».

Пішохідний маршрут формувався як чітко визначена послідовність зон:

Початок маршруту фіксувався у його першій просторовій точці — у місці встановлення рішення про маршрутизацію пішоходів. Цей елемент обов'язково розміщувався в межах певної зони та візуалізувався у вигляді червоного кола (за замовчуванням). Від однієї точки прийняття рішень було передбачено можливість побудови кількох пішохідних маршрутів до різних пунктів призначення, які могли розташовуватися у різних зонах.

Кінець маршруту фіксувався у його останній просторовій точці, що визначалася як пункт призначення. Пункт призначення міг розташовуватися в межах зони або на рампі та маркувався бірюзовим колом (за замовчуванням). За умови досягнення пішоходом цільової зони, у якій були відсутні інші доступні для нього рішення про маршрутизацію, такий агент автоматично виводився (видалявся) з процесу симуляції.

Усі інші просторові точки на траєкторії пішохідного маршруту визначалися як проміжні пункти призначення. Вони фіксувалися як проміжні точки в межах конкретної зони.

2.3.6. Калібрування та верифікація моделі

Візуальна верифікація (перевірка адекватності логіки моделі) реалізується шляхом безпосереднього моніторингу запусків симуляції в 2D/3D режимах. Метою цього етапу є виявлення системних помилок кодування мережі та некоректної поведінки агентів (рис.2.12).



Рис.2.12. Імітація руху на перехресті

Спостереження за ділянками перетинів, злиття та розгалуження потоків. Особлива увага приділяється перевірці коректності налаштування конфліктних зон. Агенти не повинні блокувати перехрестя або проходити «наскрізь» крізь інші транспортні засоби.

Контроль перестроювання транспортних засобів по смугах: якщо шлях зміни смуги закодовано занадто коротким або з'єднувальний відрізок розміщено некоректно, транспортні засоби можуть раптово зупинитися, викликаючи штучні затори, що не відповідають реальному стану речей.

Перевірка геометрії заїздів автобусів/тролейбусів у кишені зупинкових пунктів та тривалості їхньої стоянки. Візуально контролюється ефект кумуляції (накопичення рухомого складу на зупинці) та його вплив на суміжні смуги руху.

Проводиться оцінювання взаємодії пішоходів на переходах із транспортним потоком, коректність затримки автотранспорту перед конфліктними створами.

Після усунення геометричних та логічних помилок переходяться до кількісного калібрування. Основним критерієм для оцінювання збіжності

модельованих та натурних (фактичних) обсягів транспортних потоків у міжнародній практиці моделювання є критерій Хайверса (формула GEN).

Використання стандартного відсоткового відхилення є неефективним для транспортних потоків, оскільки похибка у 100 транспортних засобів є критичною для другорядної вулиці (з потоком 200 авт/год.) і несуттєвою для магістралі (з потоком 3000 авт/год.). Статистика GEN нівелює цей недолік, поєднуючи ознаки відносного та абсолютного відхилень.

Для кожного контрольного створу (точки обліку інтенсивності руху) розраховується показник GEN за формулою:

$$GEN = \sqrt{\frac{2 \cdot (m - c)^2}{m + c}}$$

m — годинна інтенсивність транспортного потоку за результатами імітаційного моделювання у Vissim (авт/год.); c — фактична (натурна) годинна інтенсивність транспортного потоку, отримана під час натурних обстежень (авт/год.).

Згідно з профільними стандартами (наприклад, британським *DMRB — Design Manual for Roads and Bridges*), модель вважається відкаліброваною та придатною для прогнозування, якщо виконуються такі нормативні умови (Табл.2.4).

Табл.2.4

Критерії оцінювання збіжності моделі

Значення критерію GEN	Рівень відповідності	Нормативна вимога до моделі
GEN < 5,0	Висока збіжність (модель точно відтворює реальність)	Не менше ніж 85% усіх контрольних створів (точок обліку) повинні мати показник GEN < 5,0

$5,0 < GEN < 10,0$	Середня збіжність (потребує додаткової уваги)	Допускається для окремих складних вузлів, але значення не повинні переважати в загальній вибірці.
$GEN > 10,0$	Низька збіжність (висока похибка)	Модель не відкалібрована. Наявна системна помилка в параметрах генерації або розподілу потоків.

Фактичні значення потоків визначались з таблиць обстеження інтенсивності руху транспорту. Для визначення модельної інтенсивності у перерізі (напрямку) на кожній смузі руху встановлені датчики (колектори) транспорту.



Рис.2.13. Датчики транспорту для калібрування моделі

2.3.7. Налаштування вихідних показників

Вихідними показниками моделювання визначені загальні показники ефективності у мережі, дані датчиків транспорту, затримки, відрізки, дані розрахунку у вузлах. Період збору вихідних даних з 1800 по 5400 с.

Result Management Result Attributes Direct Output

Additionally collect data for these classes:

Vehicle Classes

- 19: LGV
- 20: HGV
- 30: Bus
- 40: Tram
- 50: Pedestrian
- 60: Bike
- 61: Pedelec

Pedestrian Classes

- 10: Man, Woman
- 30: Wheelchair User

	Collect data	From-time	To-time	Interval	
Area measurements	☐	0	99999	99999	
Areas & ramps	☐	0	99999	99999	
Data collections	☒	1800	5400	99999	
Delays	☒	1800	5400	99999	
Links	☒	1800	5400	99999	More...
Meso edges	☐	0	99999	99999	
Nodes	☒	1800	5400	99999	More...
OD pairs	☐	0	99999	99999	
Parking lot groups	☐	0	99999	99999	
Parking lots	☐	0	99999	99999	
Parking routing decisions	☐	0	99999	99999	
Parking spaces	☐	0	99999	99999	
Pedestrian grid cells	☐	0	99999	99999	More...
Pedestrian network performance	☐	0	99999	99999	
Pedestrian travel times	☐	0	99999	99999	
Queue counters	☐	0	99999	99999	More...
Vehicle inputs	☐	0	99999	99999	
Vehicle network performance	☒	1800	5400	99999	More...
Vehicle travel times	☐	0	99999	99999	More...

Рис.2.14. Налаштування конфігурації вихідних показників

2.4. Особливості моделювання сценаріїв

Для моделювання використовувалось порівняння двох сценаріїв- базової моделі (для години найбільшого добового навантаження) та сценарію оптимізованої програми світлофорного регулювання транспортних потоків. Детальний огляд розроблених сценаріїв та результатів моделювання у наступному розділі.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ТЕХНІКО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ СЦЕНАРІЇВ МОДЕЛЮВАННЯ

3.1. Базова модель

У результаті моделювання базового сценарію встановлено, що ранковий пік (9:00 – 10:00) є найбільш напруженим для ділянки дослідження. Загальна інтенсивність за годину становить 825 авт./год. При цьому спостерігається чітка тенденція до зростання динаміки всередині години — від 231 одиниці на початку до 324 одиниць ближче до 10:00.

Вечірній період (17:00 – 18:00) демонструє суттєво меншу інтенсивність у межах досліджуваного створу — всього 479 авт./год. На відміну від ранку, ввечері потік спадає ближче до 18:00.

В обидва періоди абсолютну більшість становлять легкові автомобілі (1785 одиниць). Вантажний транспорт (особливо категорія >3,5т) та громадський транспорт (маршрутки, автобуси, трамваї) сконцентровані переважно в ранковий час, що додатково збільшує коефіцієнт приведення потоку та завантаження перехрестя вранці. Довгомірний транспорт протягом обстеження та моделювання зафіксований не був.

Для встановлення закономірностей коливань транспортного попиту було узагальнено матрицю поворотних потоків у розрізі окремих підходів до перехрестя (вхідних створів) для ранкового та вечірнього періодів спостереження та моделювання.

Підхід 1.

Ранковий період: характеризується високим рівнем транспортної активності, що локалізується переважно на транзитному магістральному векторі 1-2, де зафіксовано динамічне зростання інтенсивності з 31 до 50 авт./20 хв. Суміжний кореспондентський зв'язок 1-4 демонструє відносну часову стабільність із

параметрами щільності в межах 10–14 авт./20 хв. Поворотний маневр 1-1 (зворотний напрямок) протягом усього періоду спостережень мав нульові значення.

Вечірній період: обсяг руху на ключовому векторі 1-2 трансформується у помірний сталий потік (30–37 авт./20 хв.). Сумарний вхідний попит на Підході 1 демонструє регресію відносно ранкових максимумів.

Підхід 2.

Ранковий період: визначається як один із найбільш навантажених елементів досліджуваного вузла. Інтенсивність руху легкового транспорту за вектором 2-1 стабільно утримується в діапазоні 40–48 авт./20 хв. Окрім високої щільності легкового потоку, тут зафіксовано суттєву концентрацію малотоннажних вантажних автомобілів (до 3,5 т) та рухомого складу громадського транспорту малої місткості (маршрутних таксі). Паралельно спостерігається прогресуюче зростання попиту на маневр розгалуження 2-4 — з 25 до 38 авт./20 хв. наприкінці години.

Вечірній період: фіксується виражений спад навантаження. Інтенсивність на векторі 2-1 знижується до 20–31 авт./20 хв. Найбільш суттєве падіння попиту (майже у три рази відносно ранкового піка) характерне для маневру 2-4, де показники опускаються до критичних 8–17 авт./20 хв.

Підхід 3.

Ранковий період: генерує слабкоінтенсивні прямі потоки за векторами 3-1 та 3-2. Натомість чітко виокремлюється цільовий поворотний потік за напрямком 3-4, який у піковий інтервал (09:40–10:00) досягає екстремуму в 15 легкових од./20 хв. із включенням поодиноких одиниць вантажного транспорту.

Вечірній період: спрямування 3-4 повністю зберігає свою функціональну актуальність (12–14 авт./20 хв.), практично не втрачаючи щільності порівняно з початком доби. Це свідчить про наявність стабільного локального транспортного тяжіння в межах досліджуваного району протягом усього робочого дня.

Підхід 4.

Ранковий період: демонструє симетричний та високий розподіл транспортного навантаження за всіма трьома доступними векторами сепарації: 4-1 (20–28 од./20 хв.), 4-2 (23–26 од./20 хв.) та 4-3 (20–26 од./20 хв.). На початку доби цей підхід функціонує як потужний дистриб'ютор (вузол розподілу) транспортних потоків.

Вечірній період: раніше зафіксований наднапружений ранковий потік повністю нівелюється. Транспортний попит на векторі 4-1 регресує до мінімальних значень (4–6 од./20 хв.), а напрямки 4-2 та 4-3 зазнають дегресії обсягів руху більш ніж удвічі.

Натурні дані чітко вказують на те, що обмежувачим станом для проектних рішень ОДР є саме ранковий пік. Модель вечірньої години матиме значно більші резерви пропускної здатності. У подальшому отримані показники моделювання наводяться для ранкової години.

У результаті моделювання базової моделі отримані техніко-експлуатаційні показники ефективності по мережі дослідження та теплові картограми швидкості руху, транспортного навантаження та довжини черг (рис.3.1 – рис.3.3).

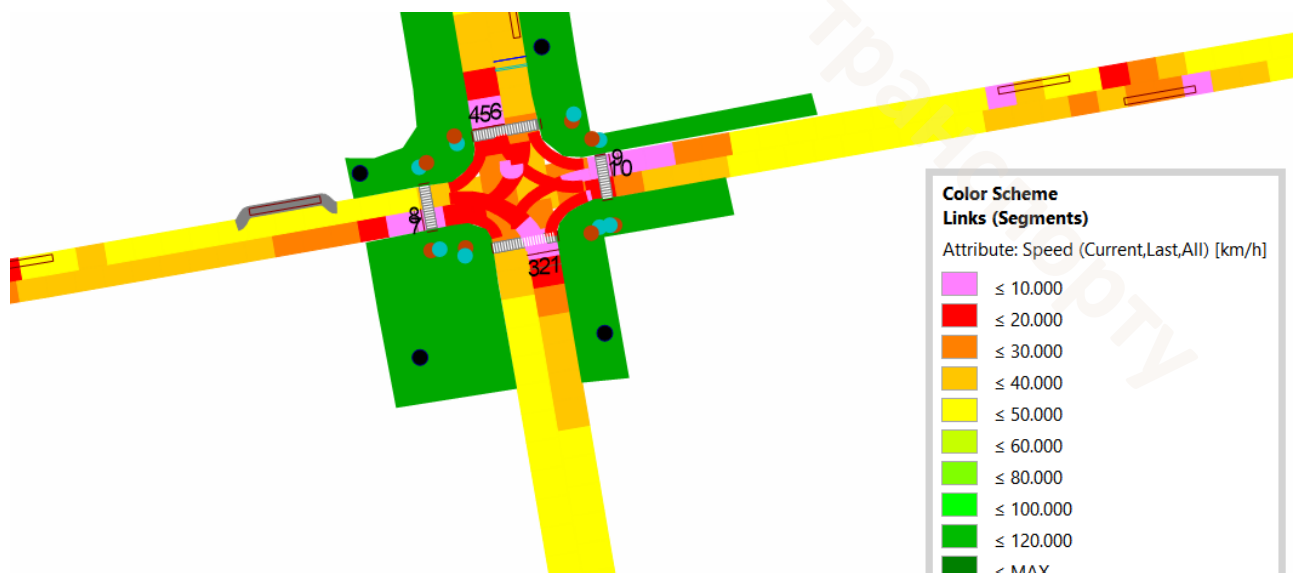


Рис.3.1. Теплова картограма розподілу швидкостей руху, км/год.

Просторовий розподіл швидкостей (рис.3.1) зафіксував явище динамічного затору в межах вузла. Центр перехрестя та стоп-лінії працюють у режимі суттєвих затримок (менше 20 км/год). Оскільки зони уповільнення до 20–30 км/год (помаранчеві та червоні хвости) по вулиці Соборності мають значну довжину, пропускна здатність світлофорних об'єктів не повністю задовольняє наявний транспортний попит.

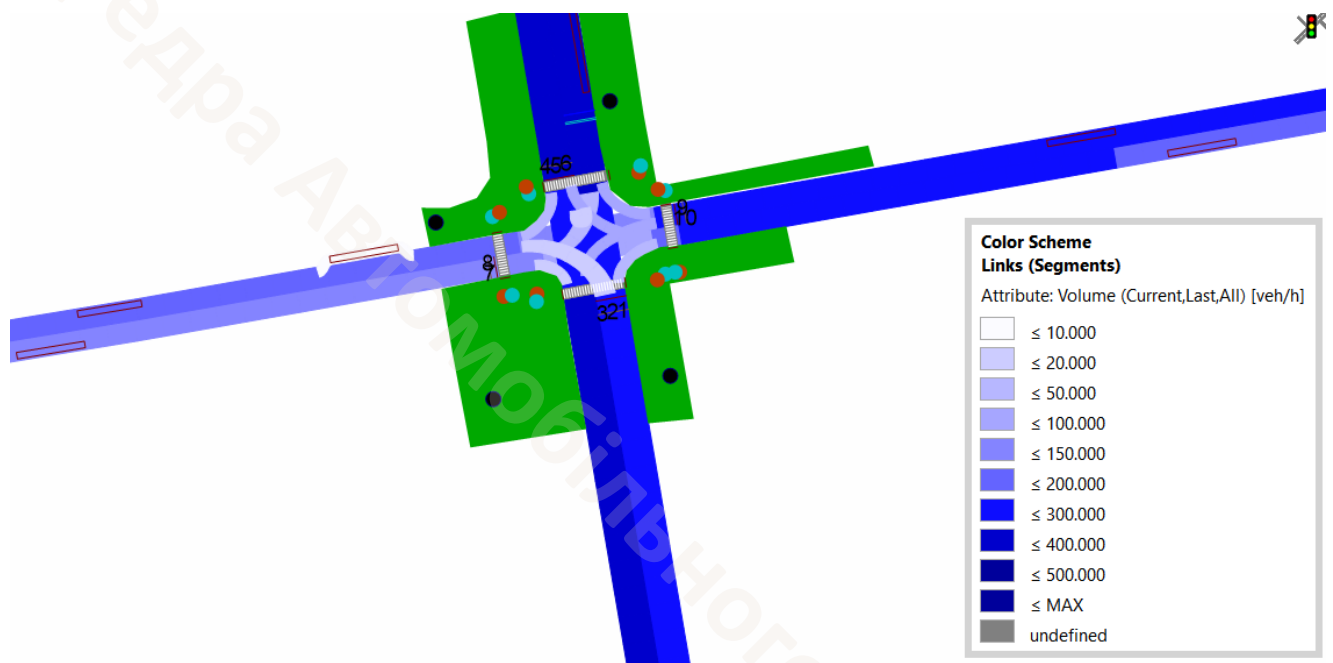


Рис.3.2. Картосхема розподілу транспортного навантаження, авт./год.

На північному підході до перехрестя (проспект Металургів) максимальна довжина черги становить 46,20 м. Черга накопичується у лівій та суміжній смугах перед пішохідним переходом. З урахуванням динамічного габариту легкового автомобіля (близько 6–7 м у черзі), у піковий момент тут одночасно перебуває орієнтовно 6–8 транспортних засобів.

Південний підхід: максимальна довжина черги становить 60,05 м. Це другий за величиною показник затримки на перехресті. Черга блокує значну ділянку підходу, вміщуючи в піковий період близько 9–10 умовних автомобілів.

На західному підході (вулиця Соборності) зафіксовано максимум довжини черги — 85,89 м, що свідчить про серйозний дефіцит пропускної здатності для західного підходу, спричинений або занадто короткою зеленою фазою світлофорного регулювання для цього напрямку, або високою інтенсивністю прямого потоку/лівого повороту. У такій черзі може одночасно перебувати до 12–14 автомобілів.

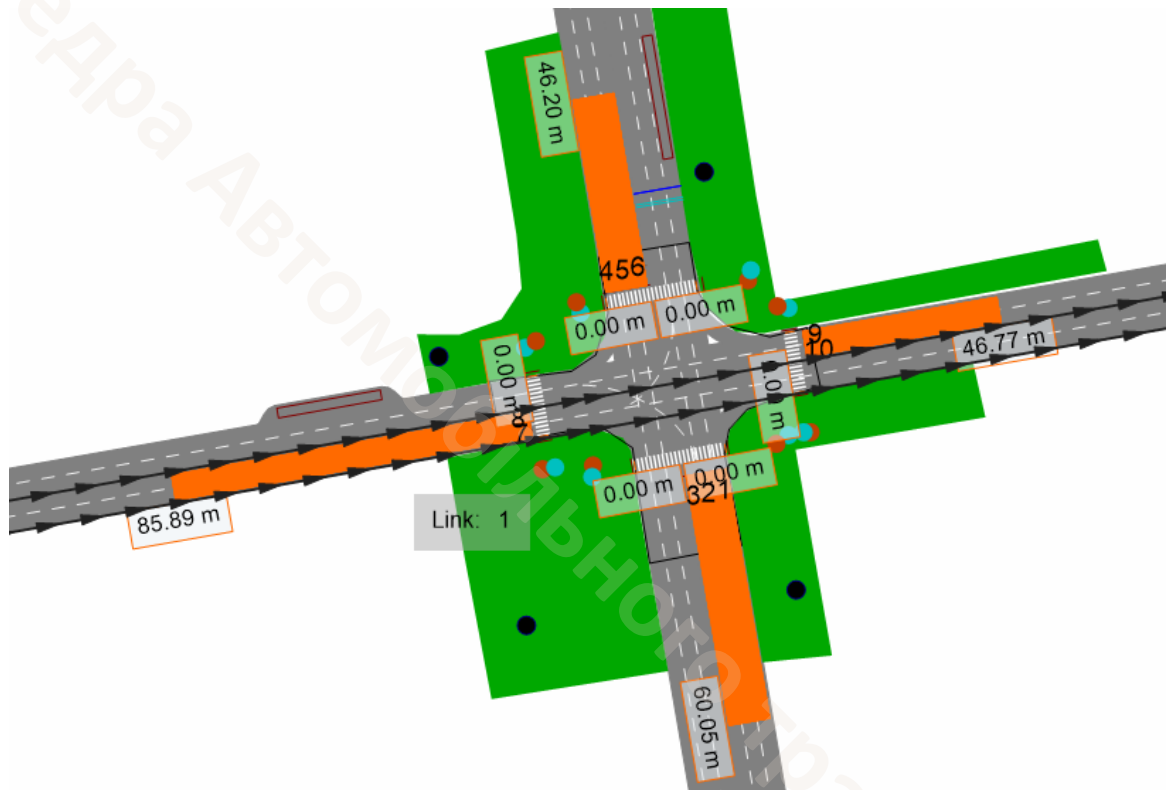


Рис.3.3. Максимальна довжина черги транспортних засобів, м

Рух із сходу на захід по вулиці Соборності характеризується максимальною довжиною черги у 46,77 м. Показник майже ідентичний північному підходу проспекту Металургів. Затримка є помірною, черга стабільно накопичується в межах однієї фази регулювання (близько 7–8 автомобілів).

Для вечірньої пікової години показники довжини черги по вулиці Соборності змінюються у протилежному напрямку із сходу на захід.

Середня питома затримка у мережі для всіх типів транспортних засобів становила 23,8 с на 1 автомобіль. Розподіл по типам ТЗ показаний на рис. 3.4.

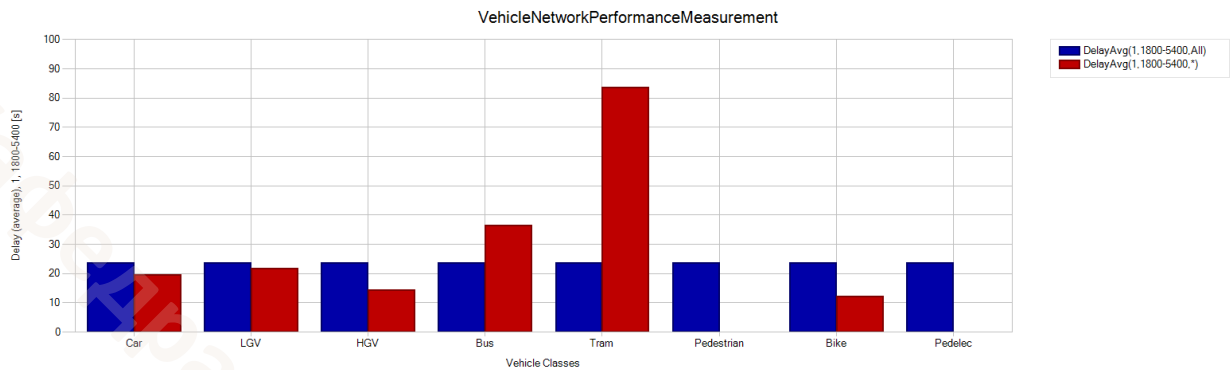


Рис.3.4. Розподіл середньої затримки по типам ТЗ

Затримка для трамваїв майже у 3,5 рази перевищує середньомережевий рівень. Показник вказує на те, що рейковий транспорт під час проходження вузла простоює більше одного повного світлофорного циклу. Головними причинами є відсутність системи адаптивного пріоритету (на кшталт пропуску за запитом), тривалий час на посадку-висадку пасажирів на зупинках та низьке прискорення під час рушання з місця.

Затримка автобусів також помітно перевищує середній рівень по перехрестю. Це прямий наслідок параметризації часу стоянки на зупинках, а також ускладнень під час маневрування (виїзду з кишень) у насиченому легковому потоці.

3.2. Оптимізація світлосигнального регулювання руху

Для розробки оптимальної програми світлофорного регулювання використовується класичний науково-методичний підхід Ф. Вебстера. Оскільки раніше було встановлено, що лімітуючим є ранковий період, розрахунок

проводиться за максимальним піковим навантаженням — інтервалом 09:40 – 10:00 (приведеним до годинної інтенсивності).

Для розрахунку фазових коефіцієнтів годинна інтенсивність N_i (авт./год) визначається шляхом множення максимального 20-хвилинного потоку на коефіцієнт $k=3$, з урахуванням складу транспорту та коефіцієнтів приведення до умовного легкового автомобіля (для вантажних автомобілів та автобусів $k_{пр} = 2,0$, для маршруток $k_{пр} = 1,5$, для трамваїв $k_{пр} = 3,0$).

Узагальнені приведені інтенсивності за підходами (M_i , од.прив./год):

Підхід 1 (Північ): (1-2, 1-4), $M_1 = 245$ од.прив./год.

Підхід 2 (Захід): транзит та лівий поворот (2-1, 2-4), $M_2 = 315$ од.прив./год.

Підхід 3 (Південь): поворотний потік (3-4), $M_3 = 65$ од. прив./год.

Підхід 4 (Схід): розподілений потік (4-1, 4-2, 4-3), $M_4 = 270$ од.прив./год.

Приймемо стандартний потік насичення для смуг руху міських перехресть $s = 1800$ од.прив./год.

Фазові коефіцієнти для напрямків визначаються як $y_i = M_i / s$.

$$y_1=0,136, y_2=0,175, y_4=0,150.$$

Сума фазових коефіцієнтів для формування двофазного регулювання (де Фаза I пропускає головну магістраль проспект Металургів, а Фаза II — напрямки по вулиці Соборності).

$$Y = \sum y_{max} = y_2 + y_4 = 0,175 + 0,150 = 0,325$$

Для двофазної схеми при тривалості проміжних тактів (жовтий) $t_{ж} = 3$ с та часі затримки запуску/очищення перехрестя $t_{зт} = 2$ с на фазу:

$$L = \sum (t_{\text{зт}} + t_{\text{ж}}) = 10 \text{ с}$$

Розрахунок оптимальної тривалості циклу (C_0):

$$C_0 = \frac{1,5 \cdot L + 5}{1 - Y} = \frac{20}{0,675} = 29,6 \text{ с}$$

Згідно з ДСТУ 4092 [14] та вимогами безпеки руху, мінімальний світлофорний цикл для забезпечення безпечного переходу пішоходів через широкі магістралі не може бути меншим за 60 с. Розрахункове теоретичне значення 29,63 с свідчить про наявність величезного резерву пропускнуої здатності. З огляду на необхідність пропуску пішохідних потоків, приймаємо оптимальний практичний цикл $C = 60 \text{ с}$.

Ефективний зелений час ($G_e = C - L = 60 - 10 = 50 \text{ с}$) розподіляється пропорційно фазовим коефіцієнтам y_i .

Фаза I (пр. Металургів/ Підходи 1 та 3):

$$g_1 = G_e \cdot \frac{y_4}{Y} = 23 \text{ с}$$

Фаза II (вул. Соборності / Підходи 2 та 4):

$$g_2 = G_e \cdot \frac{y_2}{Y} = 27 \text{ с}$$

Запропонована матриця перемикання сигналів реалізована у Vissim у програмі світлофорного регулювання (рис.3.5), яка визначала новий сценарій для моделювання.

Матриця перемикання сигнальних груп

Номер групи	Напрямок руху (Підходи)	Смуги	Зелений сигнал (on)	Жовтий сигнал	Червоний сигнал (off)
SG 1	Проспект Металургів (Північ/Південь)	Прямо, праворуч	0 с - 23с	23 с – 26 с	26 с - 60 с
SG 2	Вулиця Соборності (Захід/Схід)	Всі напрямки	26 с - 53 с	53 с - 56 с	56 с - 26с

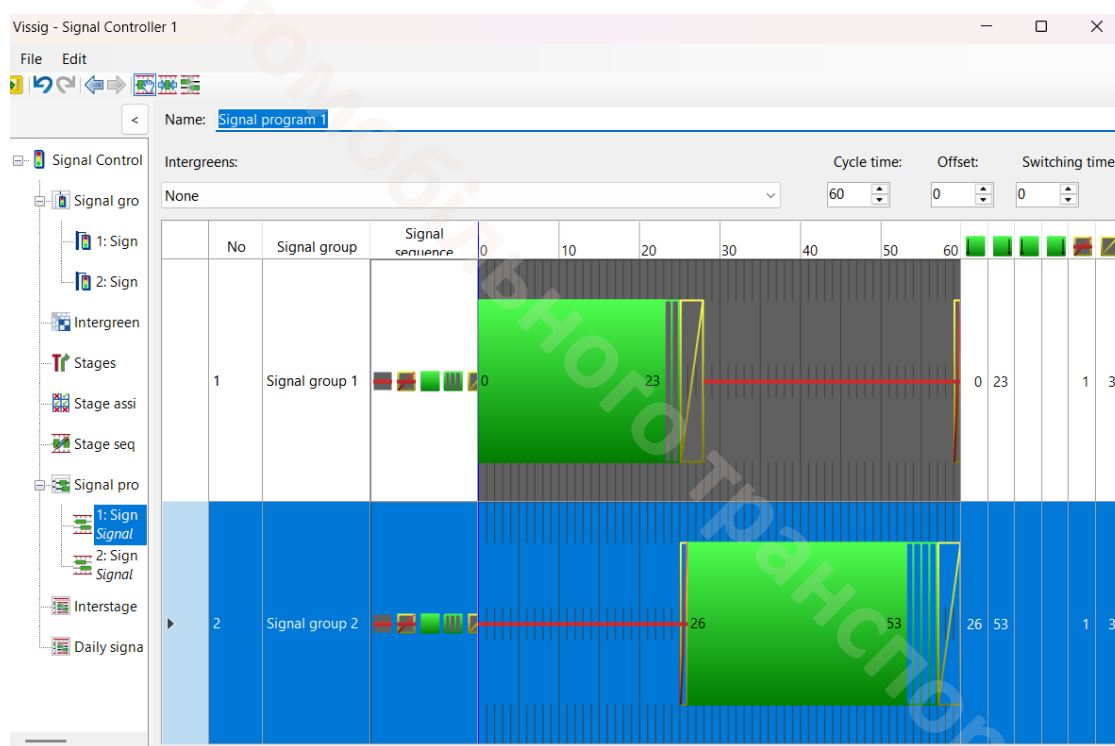


Рис.3.5. Розроблена програма сигналів світлофора у Vissim

3.3. Порівняння результатів моделювання між сценаріями

Впровадження оптимізованої програми повністю зняло надлишкове навантаження із західного підходу по вулиці Соборності. Максимальна черга там скоротилася майже на 28 м, що видно із картограми довжини черги на рис. 3.6 (еквівалент 4–5 легкових автомобілів). Отримана картограма підтверджує, що новий розподіл тривалості фаз точніше відповідає фактичному ранковому попиту, зафіксованому під час натурних обстежень.

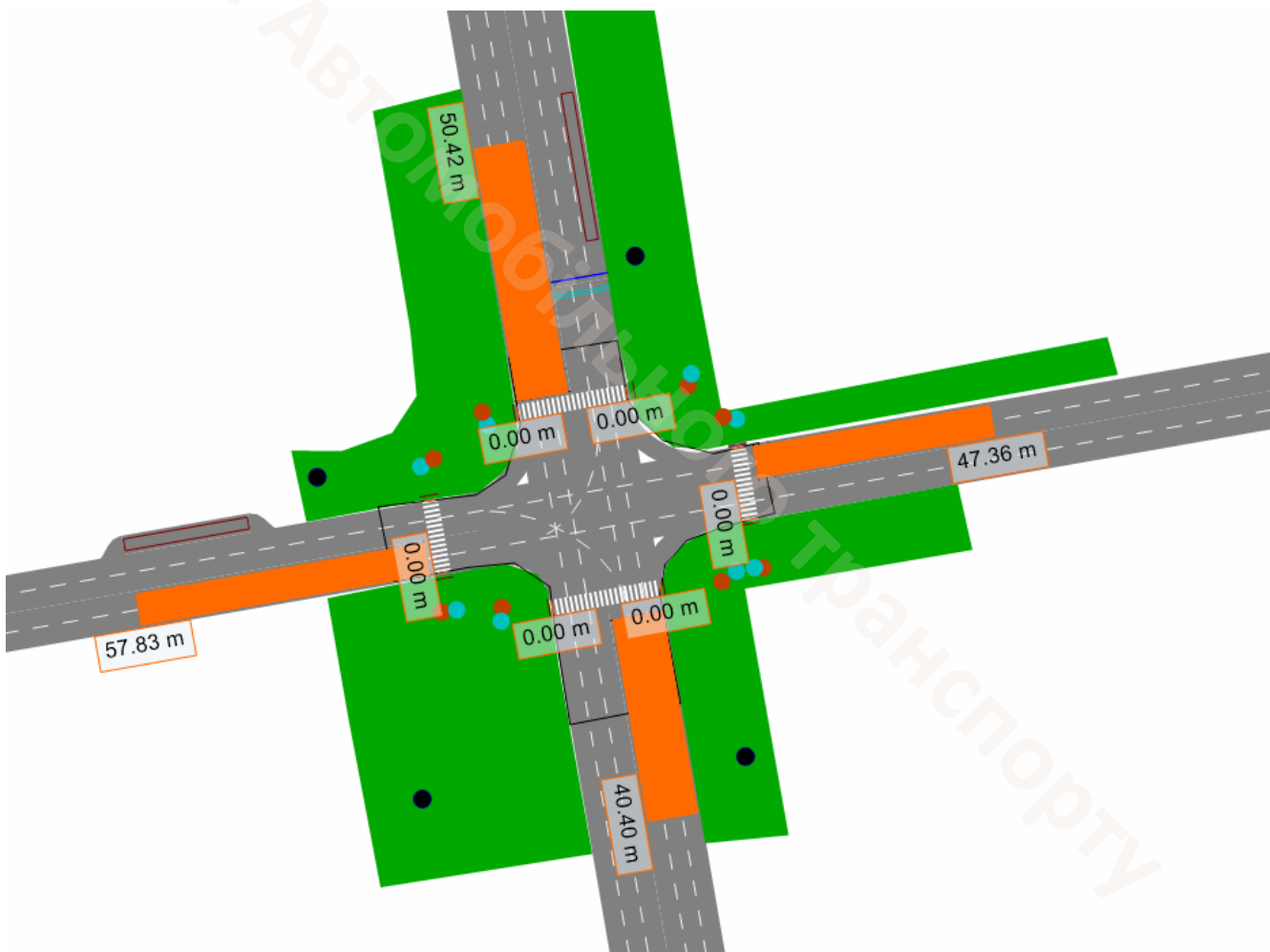


Рис.3.6. Максимальна довжина черги транспортних засобів у моделі оптимізованого регулювання руху

Південний підхід по проспекту Металургів також продемонстрував суттєве зниження черги — з 60,0 м до 40,40 м. Скорочення тривалості світлофорного циклу (з 90 до 60 с) призвело до того, що червоний (заборонний) сигнал для цього напрямку тепер горить значно менше часу. Черга просто не встигає накопичуватися до критичних просторових меж, оскільки фази змінюються частіше.

Північний підхід показав незначне збільшення черги (+4,22 м), а східний — залишився практично на тому ж рівні (+0,59 м). Маємо класичний прояв закону збереження транспортної енергії на перехрестях: для того, щоб вирівняти умови для найбільш завантаженого підходу, система змушена точково задіяти резерви пропускної здатності вільніших напрямків. Приріст у 4 метри на Північному підході є абсолютно некритичним і повністю перекривається загальним позитивним ефектом по вузлу.

Оптимізація світлофорного регулювання виявилася високоефективною. Завдяки переходу на скоригований за Вебстером цикл, вдалося досягти головної мети транспортного проектування - гомогенізації (вирівнювання) черг.

Якщо в базовій моделі спостерігався значний дисбаланс (черги коливалися від 46 м до критичних 86 м), то в оптимізованій моделі черги на всіх чотирьох підходах стабілізувалися в межах вузького, контрольованого діапазону від 40 до 58 м, забезпечує планомірну роботу світлофорного об'єкта, мінімізує ризик утворення штучних заторів та знижує середню тривалість затримок рухомого складу в цілому по мережі.

Ефективність запропонованого регулювання дорожнього руху на перехресті підтверджується також зменшенням середньої затримки на один транспортний засіб з 23,8 до 19,8 с.

В оптимізованій моделі середня швидкість зросла до 34,30 км/год. порівняно з 33,03 км/год. у базовій версії. Рух став більш плавним та рівномірним. Середня кількість зупинок на один транспортний засіб зменшилася по всіх ключових категоріях: для легкових автомобілів з 1,07 до 0.88 зупинок за поїздки (зменшення

на 17,7%), для трамваїв - з 1,96 до 1,71 зупинок (зменшення на 12,8%). Значна частина водіїв тепер проїжджає перехрестя «із ходу», не потрапляючи під запірну червону фазу.

Табл.3.2

Порівняння затримок за класами транспортних засобів

Параметр затримки	Базова модель	Оптимізована модель	Абсолютна зміна
Загальна по мережі	23,52 с	19.79 с	-3,73 с
Легкові авто	18,78 с	15,67 с	-3,11 с
Малотоннажні вантажні АТЗ	16,32 с	13,69 с	-2,63 с
Важкі вантажні АТЗ	20,65 с	14,98 с	-5,67 с
Автобуси	38,78 с	33.69 с	-5,09 с
Трамваї	87,85 с	75,13 с	-12,72 с
Велосипеди	10,81 с	10,49 с	-0,32 с

Результати експерименту доводять високу ефективність адаптації світлофорного плану за методологією Вебстера до реальної структури ранкового пікового попиту. Оптимізована схема організації дорожнього руху забезпечує збалансований розподіл затримок, мінімізує транспортні втрати та суттєво знижує екологічне навантаження на прилеглу міську територію.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання щодо підвищення ефективності організації дорожнього руху на регульованому перехресті вулиць Соборної та проспект Металургів у місті Кривий Ріг шляхом адаптації параметрів світлофорного регулювання до фактичних характеристик транспортних потоків.

За результатами комплексного аналізу, що включав натурні обстеження, теоретичні розрахунки та мікроскопічне імітаційне моделювання в програмному комплексі PTV Vissim, сформовано такі наукові та практичні результати:

1. На основі моніторингу транспортного попиту визначено, що найбільш критичним є ранковий піковий період (інтервал 09:40 – 10:00), під час якого приведення потоків до умовного легкового автомобіля виявило значну нерівномірність завантаження підходів до перехрестя.

2. Встановлено, що базове налаштування світлофорного об'єкта із тривалістю циклу $C = 90$ с (де зелена фаза для головного напрямку становила 56 с) створювало штучний дефіцит пропускної здатності на другорядних підходах, що призводило до утворення заторів на вул. Соборності (західний підхід) із максимальною довжиною черги 85,89 м.

3. Використовуючи класичну теорію транспортних потоків Ф. Вебстера та спираючись на розраховані фазові коефіцієнти інтенсивності, було доведено надлишковість початкового 90-секундного циклу. Розроблено та обґрунтовано нову двофазну програму світлофорного регулювання із раціональною тривалістю циклу $C = 60$ с та перерозподілом ефективного зеленого часу (23 с та 27 с відповідно до напрямків), що дозволило задіяти вільні резерви пропускної здатності перехрестя.

4. На основі порівняльного аналізу результатів мікроскопічного імітаційного моделювання у програмному комплексі PTV Vissim встановлено, що перехід від

базового (90 с) до оптимізованого (60 с) циклу світлофорного регулювання дозволив досягти таких результатів:

Оптимізація часових параметрів: середня затримка транспортних засобів у межах досліджуваного вузла знизилася на 15,9% (з 23,52 с до 19,79 с), що забезпечило підвищення рівня обслуговування перехрестя з LOS C до LOS B.

Зниження просторового накопичення черг: Зафіксовано гомогенізацію та суттєве скорочення максимальної довжини черг на найбільш завантажених підходах, зокрема на західному — на 32,7% (з 85,89 м до 57,83 м).

Підвищення ефективності громадського транспорту: завдяки оптимізації фазових коефіцієнтів затримка рейкового транспорту (зменшилася на 14,5% (-12,72 с), а безрейкового - на 13,1% (-5,09 с), що частково покращує умови пасажироперевезень.

Покращення екологічних та кінематичних показників: середня швидкість потоку в мережі зросла до 34,30 км/год, а сумарна кількість зупинок зменшилася, що забезпечило зниження загальних витрат палива на 3,4%, а також валових викидів оксиду вуглецю (CO) на 15,8% та оксидів азоту (NO_x) на 16,1%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні рекомендації з моделювання транспортних потоків під час оцінювання ефективності проєктних рішень щодо дорожньої інфраструктури (перша редакція) : МР – Б.2.2-37641918-928:2022. [Чинний від 2022]. Київ, 2022.
2. Осетрін М. М., Тарасюк В. П., Беспалов Д. О. Транспортне імітаційне моделювання : конспект лекцій. Київ : КНУБА, 2023. 76 с.
3. Transport Analysis Guidance (TAG). TAG unit M3-2: public transport assignment modelling, including forthcoming changes for May 2024 / Department for Transport. London, 2024.
4. JASPERS Appraisal Guidance (Transport). The Use of Transport Models in Transport Planning and Project Appraisal / JASPERS. Luxembourg, 2014.
5. Ortúzar J. de D., Willumsen L. G. Modelling Transport. 4th ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2011. 536 p.
6. <https://www.ptvgroup.com/en/products/ptv-vissim>
7. <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/OpenPaths%20Help-v1/en/GUID-AD82CEF4-FE0B-4E45-BF4D-E91532EEE914.html>
8. <https://www.bentley.com/software/openpaths/>
9. <https://docs.aimsun.com/next/24.0.0/>
10. <https://www.aimsun.com/editions/>
11. <https://www.caliper.com/transcad/default.htm?srsId=AfmBOorRb1URMPXzSRU-1kgc2kNZJNUm6EhfMKTfU2b80lwsKX8Ephg5>
12. <https://www.systra.com/digital/solutions/transport-planning/quetzal/>
13. ГБН В.2.3-37641918-555:2016 Автомобільні дороги. Транспортні розв'язки в одному рівні. Проектування. Зі зміною № 1.
14. ДСТУ 4092-2002 Безпека дорожнього руху. Світлофори дорожні. Загальні технічні вимоги, правила застосування та вимоги безпеки.