

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ТЕПЛОВ БОГДАН СЕРГІЙОВИЧ

Допускається до захисту:

в.о. завідувача кафедри
інформаційних технологій,
д-р техн. наук, професор

_____ Наталія ВЕСЕЛОВСЬКА

« ____ » _____ 2026 р.

**МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ
ТРАНСПОРТНИМ ТРАФІКОМ У МІСЬКИХ УМОВАХ**

Спеціальність 122 Комп'ютерні науки

Кваліфікаційна (бакалаврська) робота

Науковий керівник:

Петро НІКОЛЮК, професор кафедри
інформаційних технологій,
д-р фіз.-мат. наук, професор

Оцінка: _____ / _____ / _____
(бали/за шкалою ЄКТС/за національною шкалою)

Голова ЕК: _____
(підпис)

Вінниця – 2026

АНОТАЦІЯ

Теплов Б.С. Моделювання автоматизованого управління транспортним трафіком у міських умовах. Кваліфікаційна (бакалаврська) робота зі спеціальності 122 «Комп'ютерні науки», освітня програма «Комп'ютерні науки». Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, 2025.

У кваліфікаційній роботі досліджено сучасні підходи до моделювання транспортних потоків та методи оптимізації дорожнього руху в міських умовах. Проведено аналіз існуючих засобів імітаційного моделювання та обґрунтовано вибір програмного середовища AnyLogic. Розроблено модель транспортної системи перехрестя із використанням адаптивного керування світлофорними об'єктами. Проведено серію експериментів для оцінювання ефективності запропонованого підходу та здійснено порівняльний аналіз отриманих результатів. Результати дослідження підтверджують можливість підвищення пропускної здатності транспортної мережі та зменшення середнього часу очікування транспортних засобів.

Ключові слова: транспортний потік, імітаційне моделювання, AnyLogic, транспортна система, світлофорне регулювання, оптимізація трафіку, адаптивне керування.

ABSTRACT

Surname I.O. Qualification Thesis Title. Bachelor's Qualification Thesis in Specialty 122 "Computer Science", Educational Program "Computer Science". Vasyl' Stus Donetsk National University, Vinnytsia, 2025.

The qualification thesis investigates modern approaches to traffic flow modeling and methods of urban traffic optimization. Existing simulation modeling tools are analyzed and the choice of the AnyLogic software environment is justified. A traffic

intersection model with adaptive traffic light control was developed. A series of simulation experiments was conducted to evaluate the effectiveness of the proposed approach and compare the obtained results. The research results demonstrate the possibility of increasing road network capacity and reducing the average vehicle waiting time.

Keywords: traffic flow, simulation modeling, AnyLogic, transportation system, traffic light control, traffic optimization, adaptive control.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМ ТРАФІКОМ	8
1.1 Аналіз проблем міського трафіка.....	8
1.2 Існуючі системи автоматичного управління рухом.....	12
1.3 Методи моделювання транспортних потоків.....	16
1.4 Огляд програмних середовищ моделювання транспортних потоків	19
1.5 Обґрунтування вибору Anylogic.....	22
1.6 Висновок до 1 розділу.....	25
РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМ ТРАФІКОМ	26
2.1 Постановка задачі моделювання.....	26
2.2 Опис транспортної системи.....	28
2.3 Розробка структури моделі в Anylogic.....	31
2.4 Опис алгоритму управління світлофорами.....	38
2.5 Висновок до 2 розділу.....	46
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМ ТРАФІКОМ	47
3.1 Методи проведення експериментів.....	47
3.2 Дослідження роботи системи при різному транспортному навантаженні.....	53
3.3 Порівняння фіксованого та адаптивного режимів управління.....	58
3.5 Висновки до 3 розділу.....	61
ВИСНОВКИ.....	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	64
ДОДАТКИ.....	66

ВСТУП

Актуальність теми

У сучасних міських умовах проблема організації та оптимізації транспортного руху набуває особливої актуальності. Зростання кількості транспортних засобів, урбанізація, збільшення інтенсивності перевезень та обмеженість дорожньої інфраструктури призводять до виникнення заторів, підвищення аварійності, збільшення часу пересування та негативного впливу на екологічний стан міста.

Традиційні методи регулювання дорожнього руху, що базуються на фіксованих режимах роботи світлофорів, часто не враховують реальну інтенсивність транспортних потоків, що знижує ефективність управління. У зв'язку з цим особливої ваги набувають автоматизовані системи управління транспортним трафіком, які дозволяють адаптувати режими регулювання руху до поточної ситуації на дорогах.

Моделювання транспортних процесів є важливим інструментом дослідження та оптимізації роботи таких систем. Використання сучасних програмних середовищ, зокрема AnyLogic, дозволяє створювати імітаційні моделі міських транспортних мереж, аналізувати різні сценарії управління та оцінювати їх ефективність без необхідності втручання у реальну інфраструктуру.

Таким чином, тема моделювання автоматизованого управління транспортним трафіком у міських умовах є актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору.

Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан проблеми управління міським транспортним трафіком.
2. Дослідити існуючі підходи та методи автоматизованого регулювання дорожнього руху.

3. Обґрунтувати вибір середовища моделювання AnyLogic.
4. Сформулювати постановку задачі моделювання транспортної системи.
5. Розробити структуру імітаційної моделі міської транспортної мережі.
6. Реалізувати алгоритм управління світлофорними об'єктами (фіксований та адаптивний режими).
7. Провести експериментальні дослідження моделі.
8. Проаналізувати отримані результати та оцінити ефективність запропонованого рішення.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є процеси управління транспортними потоками в межах міської дорожньої мережі.

Предметом дослідження є методи та алгоритми автоматизованого управління транспортним трафіком, реалізовані у вигляді імітаційної моделі в середовищі AnyLogic.

Методи дослідження

У процесі виконання дипломної роботи використовувалися методи аналізу та моделювання транспортних систем. Для дослідження процесів управління транспортними потоками було застосовано імітаційне моделювання в середовищі AnyLogic. Під час розробки моделі використовувалися елементи агентного та дискретно-подієвого підходів.

Для оцінки ефективності роботи транспортної системи проводився аналіз інтенсивності транспортного потоку, довжини транспортних черг та часу очікування транспортних засобів на перехрестях. Також використовувалися методи порівняльного аналізу фіксованого та адаптивного режимів роботи світлофорної системи.

Практичне значення роботи

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої моделі для дослідження ефективності різних алгоритмів управління дорожнім рухом та

зменшення транспортних заторів. Запропонований підхід може бути застосований для попереднього аналізу варіантів організації руху перед їх впровадженням у реальній міській інфраструктурі.



РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМ ТРАФІКОМ

1.1 Аналіз проблем міського міського трафіку

Проблема транспортних заторів є однією з найактуальніших для сучасних міст [1, 2]. Зі збільшенням кількості автомобілів навантаження на дорожню інфраструктуру постійно зростає, а існуючі транспортні мережі часто вже не здатні забезпечити стабільний рух транспорту. Особливо це помітно у великих містах у години пік, коли на основних магістралях формуються значні транспортні черги.

Транспортні затори негативно впливають не лише на швидкість пересування автомобілів, але й на економічний стан міста, екологію та якість життя населення. Наслідки перевантаження транспортної мережі можна умовно поділити на економічні, екологічні та соціальні.

Однією з основних проблем є економічні втрати, які виникають у результаті перевантаження дорожньої мережі. При русі в умовах постійних зупинок і низької швидкості значно збільшується витрата пального. Автомобілі працюють у менш ефективному режимі, через що витрати бензину або дизельного пального можуть збільшуватися на 30–50 % у порівнянні з рівномірним рухом [1].

Крім перевитрати пального, у заторах прискорюється зношення транспортних засобів. Часте гальмування та повторний розгін збільшують навантаження на двигун, гальмівну систему, зчеплення та ходову частину автомобіля. У великих містах це призводить до додаткових витрат на обслуговування транспорту.

Суттєвими є й непрямі економічні втрати. Водії та пасажери витрачають значну кількість часу на пересування містом, що негативно впливає на продуктивність праці. Для логістичних компаній транспортні затори створюють

додаткові труднощі через порушення графіків доставки, збільшення тривалості рейсів та необхідність використання більшої кількості транспортних засобів [2].

Особливо відчутними ці проблеми є для громадського та комерційного транспорту. Автобуси, таксі та вантажні автомобілі часто не можуть дотримуватися встановленого графіка руху, що знижує ефективність транспортної системи загалом.

Важливою проблемою сучасних міст є погіршення екологічної ситуації через збільшення інтенсивності дорожнього руху. У режимі частих зупинок та прискорень двигуни внутрішнього згоряння працюють менш ефективно та створюють значно більшу кількість шкідливих викидів [3].

У транспортних заторах підвищується рівень викидів вуглекислого газу, оксидів азоту та чадного газу. Ці речовини негативно впливають на стан атмосфери та здоров'я людей. Крім того, через зношення шин, гальмівних колодок і дорожнього покриття у повітрі накопичується дрібнодисперсний пил.

Додатковою проблемою є шумове забруднення. Постійна робота двигунів на холостих обертах, гальмування та використання звукових сигналів значно підвищують рівень шуму на міських вулицях. У години пік рівень шумового навантаження на магістралях часто перевищує допустимі санітарні норми.

Транспортні затори також мають суттєвий вплив на якість життя населення. Значне збільшення часу в дорозі призводить до зростання рівня стресу та психологічного навантаження на водіїв.

Тривале перебування у заторах часто викликає втому, роздратування та конфлікти між учасниками дорожнього руху. У складних транспортних умовах підвищується ризик дорожньо-транспортних пригод.

Окремою проблемою є затримка роботи екстрених служб. Автомобілі швидкої допомоги, пожежної служби та поліції не завжди можуть швидко дістатися до місця виклику через перевантаження дорожньої мережі.

Крім того, затори негативно впливають на громадський транспорт. Автобуси та маршрутні транспортні засоби, потрапляючи у загальний транспортний потік, втрачають перевагу в швидкості пересування. У результаті частина пасажирів переходить на використання особистих автомобілів, що ще більше збільшує навантаження на дороги.

Одним із найбільш перспективних напрямів вирішення проблем міського трафіку є використання інтелектуальних транспортних систем [4]. Такі системи дозволяють здійснювати збір, обробку та аналіз інформації про стан транспортного потоку в режимі реального часу.

Для отримання інформації про транспортне навантаження використовуються різноманітні сенсорні системи. До них належать індуктивні датчики, відеокамери, радарні детектори та системи аналізу мобільних пристроїв.

Сучасні бездротові системи передачі даних дозволяють організувати моніторинг транспортного потоку на значних ділянках міської мережі. Отримана інформація використовується для аналізу навантаження на дороги та оптимізації роботи світлофорних об'єктів.

Одним із найбільш ефективних методів зменшення транспортних заторів є використання адаптивного світлофорного керування [5, 6]. На відміну від традиційних світлофорів із фіксованими циклами, адаптивні системи можуть змінювати тривалість фаз залежно від поточного транспортного навантаження.

У сучасних системах адаптивного керування застосовуються алгоритми аналізу транспортного потоку, методи прогнозування та елементи штучного інтелекту. Такі системи можуть враховувати час доби, щільність руху, погодні умови та інші фактори.

Додатково використовуються методи координації декількох світлофорних об'єктів. Одним із найбільш відомих підходів є організація «зеленої хвилі», коли транспортний засіб може проїжджати кілька перехресть поспіль без зупинки при дотриманні певної швидкості руху.

Транспортний потік є складною динамічною системою, що складається з великої кількості взаємодіючих транспортних засобів. Основними характеристиками транспортного потоку є інтенсивність руху, густина транспортного потоку та середня швидкість руху [3, 4].

Між цими характеристиками існує взаємозв'язок: зі збільшенням густини транспортного потоку середня швидкість поступово зменшується. Після перевищення критичного рівня густини починається утворення транспортних заторів.

Пропускна здатність дороги залежить від багатьох факторів. Одними з найважливіших є геометричні параметри дорожньої мережі: кількість смуг руху, ширина проїжджої частини та тип перехрестя.

На швидкість руху транспорту також впливають погодні умови, стан дорожнього покриття, освітлення, наявність пішохідних переходів та зупинок громадського транспорту.

Окрему роль відіграє людський фактор. Стиль водіння, різкі гальмування та перебудови транспортних засобів можуть спричиняти так звані фантомні затори навіть за відсутності реальної перешкоди на дорозі.

У міських умовах використовуються різні типи доріг, кожен з яких має свої особливості та рівень пропускної здатності.

Магістралі безперервного руху забезпечують найбільшу пропускну здатність завдяки відсутності перехресть в одному рівні та розділенню транспортних потоків.

Вулиці з регульованими перехрестями є найбільш поширеним типом міських доріг. Основною проблемою таких вулиць є необхідність координації роботи світлофорних об'єктів.

Кругові перехрестя дозволяють зменшити кількість конфліктних точок та забезпечити більш безперервний рух транспорту, однак при великій інтенсивності руху також можуть перевантажуватися.

Аналіз статистичних даних показує, що у великих містах середня швидкість руху транспорту у години пік суттєво зменшується у порівнянні з періодами низького навантаження [1, 2].

При перевищенні критичного рівня завантаження дороги транспортна система починає працювати нестабільно, а довжина транспортних черг швидко збільшується.

Отже, проблема транспортних заторів є комплексною та потребує використання сучасних методів аналізу й управління транспортними потоками. Одним із найбільш перспективних напрямів є впровадження адаптивних систем керування дорожнім рухом, здатних змінювати параметри роботи світлофорних об'єктів залежно від поточного стану транспортної мережі [7, 8].

1.2 Існуючі системи автоматичного управління рухом

Системи автоматизованого управління дорожнім рухом постійно розвиваються разом зі зростанням транспортного навантаження у великих містах. Збільшення кількості автомобілів, ускладнення дорожньої інфраструктури та необхідність зменшення транспортних заторів сприяли переходу від простих світлофорів із фіксованим циклом до сучасних адаптивних систем керування [1, 2].

Перші світлофорні системи працювали за фіксованими часовими інтервалами. Тривалість зеленого, жовтого та червоного сигналів задавалася заздалегідь і не змінювалася залежно від реальної ситуації на дорозі. Такий підхід є достатньо простим у реалізації, однак його ефективність суттєво знижується при нерівномірному транспортному потоці.

Фіксовані світлофори добре підходять для перехресть із невеликою інтенсивністю руху або стабільним транспортним навантаженням. Проте у великих містах інтенсивність руху постійно змінюється залежно від часу доби, погодних умов, аварійних ситуацій та інших факторів. У таких умовах використання

однакових циклів світлофорів часто призводить до утворення транспортних черг і заторів.

Наступним етапом розвитку стали системи, які використовують транспортні детектори. Такі системи можуть змінювати тривалість фаз світлофора залежно від наявності автомобілів на певному напрямку руху.

Для виявлення транспортних засобів застосовуються індуктивні датчики, відеокамери, радарні системи та інші сенсорні пристрої. Найпростішим прикладом є виклик зеленої фази для другорядної дороги лише тоді, коли датчики фіксують наявність автомобіля.

Хоча подібні системи дозволяють частково підвищити ефективність роботи перехресть, вони зазвичай працюють локально та не враховують стан сусідніх ділянок транспортної мережі.

Подальший розвиток транспортних систем привів до появи світлофорів, які можуть частково реагувати на транспортне навантаження. Для цього використовуються різні типи транспортних датчиків та сенсорів. Найчастіше застосовуються індуктивні петлі, відеокамери, радарні детектори та системи аналізу транспортного потоку [4].

Однією з найбільш відомих адаптивних систем є система SCOOT (Split Cycle Offset Optimisation Technique), розроблена у Великій Британії. Дана система використовує інформацію від індуктивних датчиків, які встановлюються на підходах до перехресть [5].

Основною особливістю SCOOT є постійний аналіз транспортного навантаження та автоматична зміна параметрів світлофорного циклу. Система може змінювати:

- тривалість циклу;
- співвідношення зелених фаз;
- часовий зсув між сусідніми світлофорами.

Алгоритм роботи SCOOT базується на оцінці довжини транспортних черг і прогнозуванні стану транспортного потоку на короткий проміжок часу. Після аналізу поточної ситуації система поступово коригує роботу світлофорів для зменшення затримок транспорту.

Перевагою SCOOT є можливість роботи навіть при значному транспортному навантаженні. Система дозволяє зменшувати кількість зупинок транспорту та підвищувати пропускну здатність міських магістралей.

Разом із тим система потребує складного налаштування та великої кількості датчиків, що підвищує вартість її впровадження та обслуговування.

Іншою відомою адаптивною системою є SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System), яка була створена в Австралії. На сьогодні вона використовується у багатьох країнах світу. [9]

На відміну від SCOOT, система SCATS працює переважно на основі аналізу ступеня завантаження перехресть та використовує набір заздалегідь підготовлених сценаріїв керування.

SCATS оцінює транспортне навантаження та автоматично обирає найбільш відповідний режим роботи світлофорної системи. Такий підхід дозволяє швидко реагувати на зміни інтенсивності транспортного потоку без складного прогнозування.

Перевагою SCATS є відносна простота реалізації та висока надійність роботи. Система добре підходить для великих міських транспортних мереж із постійною зміною навантаження.

Однак при різких або нестабільних змінах транспортного потоку ефективність SCATS може бути нижчою порівняно із системами, що використовують прогнозування транспортної ситуації.

Окрім SCOOT та SCATS, існують і інші сучасні системи управління дорожнім рухом.

Наприклад, система RHODES використовує елементи штучного інтелекту та алгоритми прогнозування транспортного потоку. У процесі роботи система аналізує можливі сценарії зміни транспортної ситуації та обирає найбільш ефективний варіант керування світлофорами.

Система UTOPIA поєднує централізоване управління магістральними напрямками з локальним адаптивним керуванням на окремих перехрестях. Такий підхід дозволяє забезпечити баланс між глобальною координацією транспортної мережі та швидкою реакцією на локальні перевантаження.

Сучасні системи управління дорожнім рухом також активно інтегруються з навігаційними сервісами, GPS-моніторингом та мобільними застосунками. Це дозволяє отримувати інформацію про транспортну ситуацію в режимі реального часу та швидше реагувати на виникнення заторів або дорожньо-транспортних пригод.

Додатково сучасні системи можуть реалізовувати:

- пріоритет громадського транспорту;
- автоматичне виявлення аварійних ситуацій;
- керування реверсивними смугами;
- динамічне обмеження швидкості;
- інформаційне повідомлення водіїв про стан дорожнього руху [10].

Одним із перспективних напрямів розвитку транспортних систем є використання штучного інтелекту та методів машинного навчання. Такі алгоритми здатні аналізувати великі обсяги даних і прогнозувати зміни транспортного потоку залежно від часу доби, погодних умов та інших факторів.

Використання адаптивних систем управління дорожнім рухом дозволяє зменшити транспортні затори, скоротити середній час очікування на перехрестях та підвищити ефективність використання дорожньої інфраструктури [5, 6].

Ефективність впровадження подібних систем підтверджується практичними результатами у багатьох містах світу. Наприклад, після впровадження адаптивного керування в окремих районах Лондона та Сіднея вдалося зменшити транспортні затримки та покращити пропускну здатність основних магістралей без суттєвого розширення дорожньої мережі.

Таким чином, сучасні адаптивні системи управління дорожнім рухом є важливим напрямом розвитку інтелектуальних транспортних технологій та дозволяють більш ефективно реагувати на зміну транспортного навантаження у міських умовах [11, 12].

1.3 Методи моделювання транспортних потоків

Моделювання транспортних потоків є важливим інструментом для аналізу дорожнього руху та дослідження роботи транспортних систем у міських умовах. Використання моделей дозволяє оцінювати ефективність організації дорожнього руху, досліджувати причини виникнення транспортних заторів та перевіряти роботу різних алгоритмів управління транспортним потоком без необхідності проведення експериментів у реальному середовищі.

Сучасні методи транспортного моделювання активно застосовуються при проектуванні дорожньої інфраструктури, оптимізації роботи світлофорних систем та дослідженні транспортного навантаження на міські магістралі. За рівнем деталізації транспортного потоку моделі поділяються на макроскопічні, мезоскопічні та мікроскопічні.

Макроскопічні моделі розглядають транспортний потік як єдину безперервну систему. В даних моделях не аналізується поведінка окремих автомобілів, а використовуються усереднені характеристики транспортного потоку. Основними параметрами є інтенсивність руху, густина транспортного потоку та середня швидкість автомобілів.

Подібний підхід часто порівнюють із моделями руху рідини або газу, оскільки транспортний потік описується схожими математичними залежностями. Макроскопічні моделі дозволяють швидко аналізувати великі транспортні мережі та оцінювати загальний стан міського трафіку. Вони використовуються для транспортного планування, прогнозування навантаження на дороги та оцінки пропускної здатності міських магістралей.

Разом із тим макроскопічні моделі мають певні обмеження. Вони не дозволяють детально досліджувати поведінку окремих транспортних засобів, процес утворення локальних заторів або вплив роботи світлофорів на конкретних перехрестях.

Мезоскопічні моделі займають проміжне положення між макроскопічним та мікроскопічним моделюванням. В моделях транспортні засоби об'єднуються у групи або пакети, які мають схожі характеристики руху. При цьому зберігається певний рівень деталізації транспортного потоку, однак складність обчислень є меншою порівняно з мікроскопічними моделями.

Мезоскопічний підхід дозволяє ефективно аналізувати великі транспортні мережі та оцінювати розподіл транспортних потоків між різними ділянками дорожньої системи. Такі моделі часто використовуються у випадках, коли необхідно поєднати достатню точність моделювання з помірними вимогами до обчислювальних ресурсів.

Недоліком мезоскопічного моделювання є менша деталізація поведінки окремих транспортних засобів. Через це подібні моделі не завжди дозволяють точно аналізувати процес утворення черг або досліджувати локальні особливості роботи транспортних вузлів.

Найбільш детальними є мікроскопічні моделі транспортних потоків. Кожний транспортний засіб розглядається окремо та має власні параметри руху. Для кожного автомобіля можуть визначатися швидкість, прискорення, дистанція до інших транспортних засобів та реакція на сигнали світлофора.

Мікроскопічні моделі дозволяють максимально точно відтворювати поведінку транспортного потоку та аналізувати взаємодію між окремими автомобілями. Основою подібних моделей є правила взаємодії транспортних засобів між собою та з елементами дорожньої інфраструктури.

Одним із найбільш поширених підходів є модель «лідер – послідовник». У такій моделі поведінка автомобіля залежить від транспортного засобу, який рухається попереду. Водій змінює швидкість руху залежно від дистанції до іншого автомобіля та зміни його швидкості.

Мікроскопічне моделювання дозволяє досліджувати процес утворення транспортних заторів, оцінювати довжину транспортних черг, аналізувати роботу світлофорів та перевіряти ефективність адаптивних алгоритмів управління дорожнім рухом.

Перевагою мікроскопічного підходу є висока точність моделювання транспортної системи. Саме тому такі моделі широко використовуються для дослідження міських перехресть, транспортних вузлів та інтелектуальних систем управління дорожнім рухом.

Недоліком мікроскопічних моделей є значне навантаження на обчислювальні ресурси. При великій кількості транспортних засобів складність обчислень суттєво зростає, що може впливати на швидкість виконання моделювання.

Вибір типу транспортного моделювання залежить від поставленої задачі та необхідного рівня деталізації транспортної системи. Макроскопічні моделі переважно використовуються для аналізу великих транспортних мереж, мезоскопічні дозволяють поєднати швидкість роботи та середній рівень деталізації, а мікроскопічні забезпечують найбільш точне відтворення поведінки транспортного потоку.

У даній роботі для дослідження адаптивного управління транспортним потоком було обрано мікроскопічний підхід. Це пояснюється необхідністю

детального аналізу роботи світлофорного об'єкта, оцінки довжини транспортних черг та дослідження поведінки окремих транспортних засобів на перехресті.

Використання мікроскопічного моделювання дозволяє більш точно відтворювати процес зміни транспортного навантаження та оцінювати ефективність адаптивного алгоритму керування світлофорною системою в різних умовах руху.

1.4 Огляд програмних середовищ моделювання транспортних потоків

Для дослідження транспортних потоків та розробки систем управління дорожнім рухом використовуються спеціалізовані програмні середовища моделювання. Такі програмні продукти дозволяють створювати транспортні мережі різного рівня складності, аналізувати поведінку транспортних потоків та перевіряти ефективність алгоритмів керування без необхідності проведення експериментів у реальних умовах.

Сучасні системи транспортного моделювання відрізняються рівнем деталізації, функціональними можливостями, складністю налаштування та вимогами до обчислювальних ресурсів. Деякі середовища орієнтовані переважно на наукові дослідження, інші — на практичне використання у транспортному плануванні або проектуванні дорожньої інфраструктури.

Одним із найбільш відомих програмних продуктів є SUMO (Simulation of Urban Mobility). Це безкоштовне програмне середовище з відкритим кодом, яке активно використовується у наукових дослідженнях та навчальних проектах.

SUMO підтримує мікроскопічне моделювання транспортних потоків та дозволяє створювати детальні транспортні мережі з великою кількістю транспортних засобів. Система підтримує імпорт дорожніх карт із сервісу OpenStreetMap, що значно спрощує створення моделей міських транспортних систем.

Перевагою SUMO є відкритість програмного коду та можливість інтеграції з мовами програмування Python, Java та C++. Це дозволяє реалізовувати власні алгоритми управління транспортними потоками та проводити різноманітні експериментальні дослідження.

Разом із тим SUMO має і певні недоліки. Інтерфейс програми є менш зручним порівняно з комерційними програмними продуктами, а створення складних моделей потребує значного часу та технічної підготовки користувача.

Іншим популярним програмним середовищем є VISSIM, розроблений компанією PTV Group. Дане програмне забезпечення широко використовується для професійного транспортного моделювання та аналізу дорожнього руху.

VISSIM забезпечує високий рівень деталізації транспортної системи та дозволяє досліджувати поведінку окремих транспортних засобів, роботу світлофорів, громадського транспорту та пішохідних потоків. [13]

Однією з основних переваг VISSIM є якісна візуалізація транспортної системи та велика кількість інструментів для аналізу результатів моделювання. Програма дозволяє оцінювати довжину транспортних черг, середній час затримки, пропускну здатність доріг та інші характеристики транспортного потоку.

Недоліком VISSIM є висока вартість ліцензії та відносно складний процес налаштування моделей, особливо для користувачів без досвіду транспортного моделювання.

Ще одним сучасним середовищем є AIMSUN. Дана система підтримує макроскопічне, мезоскопічне та мікроскопічне моделювання в одному програмному середовищі.

Основною особливістю AIMSUN є можливість комбінування різних рівнів деталізації транспортної системи. Наприклад, центральна частина міста може моделюватися мікроскопічно, а віддалені райони — макроскопічно. Такий підхід дозволяє зменшити навантаження на обчислювальні ресурси.

AIMSUN активно використовується для дослідження інтелектуальних транспортних систем та адаптивного управління дорожнім рухом. Програма підтримує інтеграцію з алгоритмами оптимізації та системами аналізу транспортних даних.

До недоліків AIMSUN можна віднести складність освоєння та необхідність значного часу для створення великих транспортних моделей.

Для транспортного моделювання також використовуються MATLAB та Simulink. Ці програмні середовища не є спеціалізованими транспортними симуляторами, однак дозволяють створювати власні математичні моделі транспортних систем та реалізовувати алгоритми управління дорожнім рухом.

Перевагою MATLAB є гнучкість та можливість реалізації складних математичних алгоритмів. Проте створення транспортної моделі у такому середовищі потребує значного обсягу програмування та не забезпечує готових інструментів для роботи з транспортною інфраструктурою.

AnyLogic займає окреме місце завдяки своїй мультиметодній платформі. Вона підтримує не лише агентне та дискретно-подієве моделювання, а й системну динаміку, що дозволяє поєднувати різні рівні абстракції. AnyLogic має зручне середовище візуального програмування з бібліотеками дорожнього руху, залізничного, виробничих процесів. Моделі в AnyLogic можуть бути інтерактивними, із кнопками та повзунками для зміни параметрів у реальному часі. Хоча вартість ліцензії є високою, навчальна версія дозволяє створювати моделі обмеженого розміру безкоштовно. [14, 15, 16]

Порівняльна характеристика програмних середовищ наведена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Порівняння характеристик програмних середовищ моделювання транспортних потоків

Параметр	SUMO	VISSIM	AIMSUN	AnyLogic
Тип ліцензії	Відкритий код	Комерційна	Комерційна	Комерційна (є навчальна)
Підтримка мікроскопічного моделювання	Так	Так	Так	Так
Підтримка інших методів	Ні	Ні	Макро, мезо	Агентний, системна динаміка
Зручність графічного інтерфейсу	Середня	Висока	Висока	Висока
Інтеграція з Python/Java	Так	Обмежена	Обмежена	Так (Java)
Можливість створення користувацьких алгоритмів керування	Високий рівень	Середній рівень	Середній рівень	Високий рівень
Популярність в академічних публікаціях Sensors	Дуже висока	Висока	Середня	

Продовження таблиці 1.1

З таблиці видно, що для досліджень, які потребують гнучкості в реалізації адаптивних алгоритмів керування світлофорами на основі даних з сенсорів, найкраще підходять SUMO та AnyLogic. SUMO є безкоштовним, що важливо для студентських проектів, але AnyLogic пропонує більш інтуїтивно зрозумілу роботу з транспортною бібліотекою та візуалізацію. [14, 17]

1.5 Обґрунтування вибору AnyLogic

Для реалізації моделі автоматизованого управління транспортним трафіком у даній дипломній роботі було обрано програмне середовище AnyLogic. Вибір цього середовища пояснюється його можливостями у сфері транспортного моделювання, підтримкою мікроскопічного підходу та зручністю реалізації адаптивних алгоритмів управління дорожнім рухом.

Однією з головних особливостей AnyLogic є підтримка декількох підходів до моделювання в межах одного середовища. Програма дозволяє поєднувати агентне, дискретно-подієве та системно-динамічне моделювання. Це є важливим для транспортних систем, оскільки дорожній рух містить елементи кожного з цих підходів.

У даній роботі агентний підхід використовується для моделювання окремих транспортних засобів. Кожен автомобіль у моделі має власні параметри руху, швидкість та маршрут пересування. Дискретно-подієвий підхід застосовується для реалізації логіки роботи світлофорів, зміни сигналів та формування транспортних черг перед перехрестями.

Важливою перевагою AnyLogic є наявність спеціалізованої бібліотеки дорожнього руху. Вона містить готові елементи транспортної інфраструктури, зокрема дороги, перехрестя, світлофори, смуги руху та транспортні засоби. Завдяки цьому створення транспортної моделі значно спрощується та не потребує реалізації базових механізмів руху з нуля.

Графічне середовище AnyLogic дозволяє швидко створювати транспортні мережі та налаштовувати параметри їх роботи. Елементи дорожньої інфраструктури можуть з'єднуватися між собою за допомогою візуального редактора, що значно спрощує процес створення моделі.

Ще однією важливою перевагою є можливість використання мови програмування Java. Це дозволяє реалізовувати власні алгоритми управління транспортними потоками та створювати адаптивну логіку роботи світлофорних систем.

Java використовувалися для створення алгоритму адаптивного світлофорного керування. Алгоритм аналізує кількість транспортних засобів перед центральним перехрестям та автоматично змінює тривалість зеленої фази залежно від рівня транспортного навантаження.

Для визначення кількості автомобілів у моделі використовувалися стоп-лінії та спеціальні змінні, які відстежують транспортне навантаження у горизонтальному та вертикальному напрямках руху. Залежно від отриманих значень система переходить між режимами BALANCED, HORIZONTAL або VERTICAL.

AnyLogic також надає зручні інструменти для візуалізації процесу моделювання. Під час виконання експериментів можна спостерігати за рухом транспортних засобів, зміною сигналів світлофорів, формуванням транспортних черг та зміною навантаження на окремих ділянках дороги.

У програмі підтримується побудова графіків та збір статистичних даних у реальному часі. Це дозволяє аналізувати довжину транспортних черг, інтенсивність руху та ефективність роботи адаптивного алгоритму.

Порівняно з іншими програмними середовищами транспортного моделювання AnyLogic має ряд переваг. Наприклад, SUMO є потужним інструментом для транспортного моделювання, однак потребує складнішого налаштування та активного використання конфігураційних файлів. VISSIM забезпечує високий рівень деталізації транспортної системи, але є більш складним у використанні та потребує комерційної ліцензії.

AnyLogic поєднує достатній рівень деталізації транспортного потоку зі зручним інтерфейсом та можливістю реалізації власних алгоритмів керування. Це робить його зручним середовищем для створення експериментальних транспортних моделей.

Додатковою перевагою є можливість проведення серії експериментів зі зміною параметрів транспортної системи. У процесі моделювання можна змінювати інтенсивність транспортного потоку, тривалість світлофорних фаз та

параметри адаптивного алгоритму, що дозволяє оцінювати ефективність різних режимів роботи транспортної мережі. [9, 10]

У дипломній роботі AnyLogic використовується для створення мікроскопічної моделі міського перехрестя з адаптивним світлофорним керуванням. Середовище дозволяє моделювати поведінку транспортних потоків у різних умовах навантаження та проводити порівняння фіксованого й адаптивного режимів роботи світлофornoї системи.

Таким чином, використання AnyLogic дозволяє реалізувати модель транспортної системи з достатнім рівнем деталізації, забезпечує можливість створення власної логіки керування та надає інструменти для проведення експериментальних досліджень ефективності адаптивного управління транспортним трафіком у міських умовах.

1.6 Висновки до 1 розділу

У першому розділі було проведено аналіз сучасних підходів до управління транспортними потоками в міських умовах. Розглянуто основні причини виникнення транспортних заторів, особливості функціонування автоматизованих систем керування дорожнім рухом, а також сучасні методи моделювання транспортних систем. Проведено порівняння програмних середовищ транспортного моделювання та обґрунтовано вибір середовища AnyLogic для реалізації поставлених завдань.

РОЗДІЛ 2

ПРОЕКТУВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМ ТРАФІКОМ

2.1 Постановка задачі моделювання

У сучасних міських умовах проблема ефективного управління транспортними потоками є однією з найбільш актуальних задач розвитку транспортної інфраструктури. Постійне збільшення кількості транспортних засобів, нерівномірний розподіл транспортного навантаження та обмежена пропускна здатність дорожньої мережі призводять до виникнення транспортних заторів, збільшення часу пересування та зниження ефективності функціонування міської транспортної системи.

Особливо гостро проблема перевантаження дорожньої мережі проявляється на міських перехрестях, де одночасно взаємодіють транспортні потоки з різних напрямків руху. Значна частина сучасних світлофорних систем працює за фіксованими часовими інтервалами, які не враховують поточну інтенсивність транспортного потоку. У результаті цього можуть виникати ситуації, коли один напрямок руху перевантажений транспортними засобами, тоді як інший має низький рівень навантаження, проте тривалість сигналів світлофора залишається незмінною.

Для підвищення ефективності управління транспортними потоками доцільним є використання адаптивних систем керування світлофорними об'єктами, які здатні аналізувати поточний стан транспортної мережі та автоматично змінювати режими роботи світлофорів залежно від рівня транспортного навантаження.

Дослідження роботи таких систем у реальних міських умовах потребує значних фінансових та технічних ресурсів, тому ефективним підходом є використання імітаційного моделювання. Моделювання дозволяє відтворювати поведінку транспортної системи у різних умовах функціонування, проводити експерименти з різними алгоритмами управління та оцінювати ефективність прийнятих рішень без необхідності втручання у реальну транспортну інфраструктуру.

У даній дипломній роботі поставлено задачу створення імітаційної моделі міської транспортної мережі з адаптивним управлінням світлофорним об'єктом у програмному середовищі AnyLogic. Розроблена модель повинна забезпечувати відтворення процесів руху транспортних потоків у міській дорожньої мережі та дозволяти аналізувати ефективність різних режимів світлофорного регулювання.

У моделі передбачається реалізація правостороннього двосмугового руху транспортних засобів, декількох взаємопов'язаних перехресть та системи світлофорного регулювання. Основна увага приділяється центральному перехрестю, на якому реалізовано адаптивний алгоритм управління транспортними потоками.

Для контролю транспортного навантаження у моделі використовуються стоп-лінії, що виконують функцію датчиків транспортного потоку. На основі інформації про кількість транспортних засобів у різних напрямках руху система визначає більш завантажений напрямок та автоматично змінює тривалість зеленої фази світлофора.

У процесі моделювання передбачається реалізація двох режимів роботи світлофорної системи:

- режиму із фіксованою тривалістю фаз;
- адаптивного режиму керування.

Порівняння результатів роботи цих режимів дозволить оцінити ефективність адаптивного управління транспортними потоками в умовах різного рівня транспортного навантаження.

Для оцінки ефективності роботи транспортної системи у моделі будуть використовуватися такі показники:

- середній час очікування транспортних засобів;
- середня довжина транспортних черг;
- інтенсивність проходження транспортного потоку через перехрестя;
- пропускна здатність транспортного вузла;
- загальний час проходження транспортними засобами модельованої ділянки дорожньої мережі.

Реалізація моделі виконується у програмному середовищі AnyLogic із використанням бібліотеки Road Traffic Library, яка дозволяє створювати імітаційні моделі транспортних систем та досліджувати процеси функціонування міської дорожньої інфраструктури.

Таким чином, побудова імітаційної моделі дозволить дослідити особливості функціонування адаптивного світлофорного керування, оцінити ефективність автоматизованого управління транспортними потоками та визначити можливості зменшення транспортних заторів у міських умовах.

2.2 Опис транспортної системи

Для дослідження процесів автоматизованого управління транспортними потоками у роботі було розроблено імітаційну модель міської транспортної мережі в середовищі AnyLogic. Модель являє собою ділянку міської дорожньої інфраструктури, що включає декілька взаємопов'язаних перехресть, транспортні потоки та систему світлофорного регулювання.

Основним елементом транспортної системи є центральне перехрестя, на якому реалізовано адаптивне управління дорожнім рухом. Додатково модель включає ще три світлофорні об'єкти, які працюють у звичайному режимі з фіксованими часовими фазами.

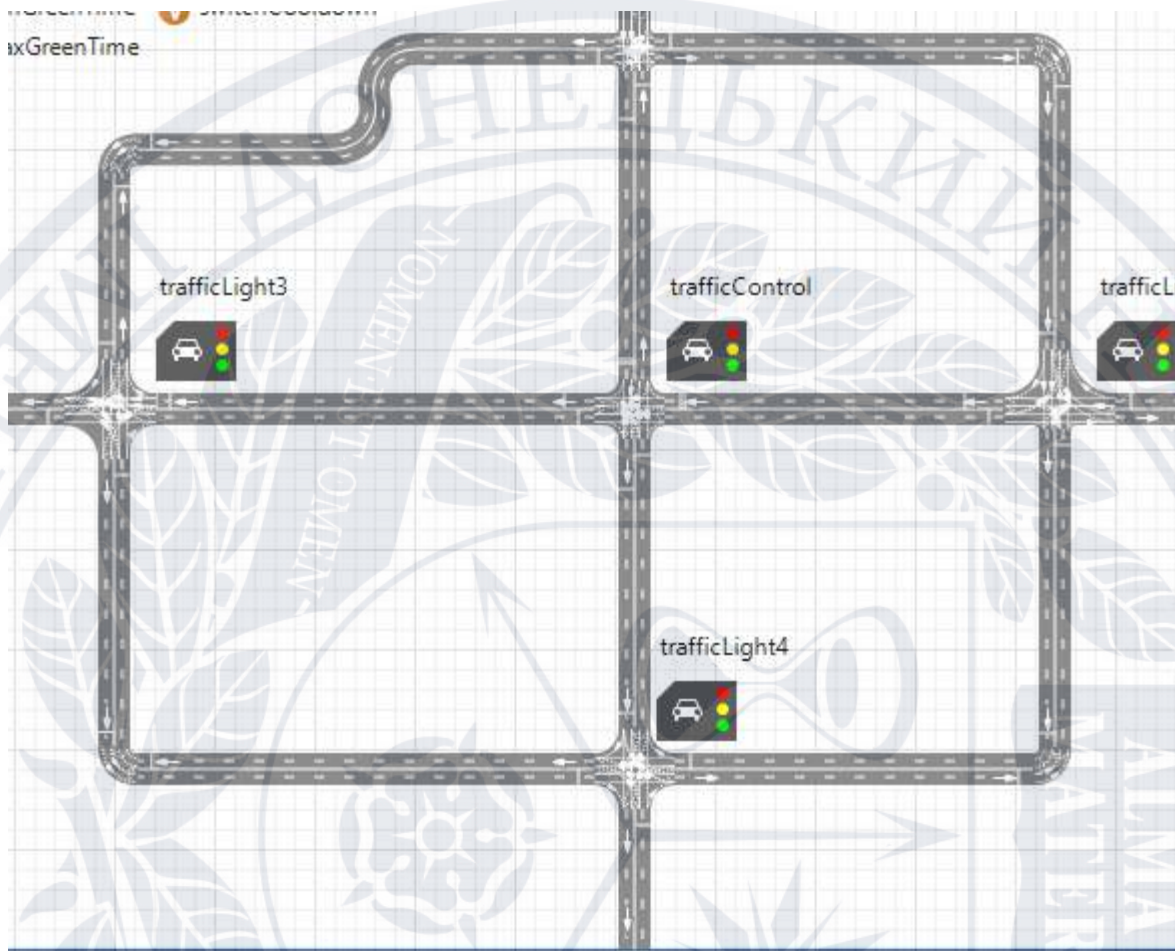


Рисунок 2.1 - Схема транспортної мережі представлена на рисунку

Побудована модель використовує правосторонній двосмуговий рух транспортних засобів. Для кожного напрямку передбачено дві смуги руху, що дозволяє більш реалістично відтворювати умови функціонування міської транспортної системи.

Транспортна мережа складається з горизонтальних та вертикальних дорожніх сегментів, які формують замкнену структуру руху транспортних потоків між перехрестями. Така структура дозволяє моделювати накопичення транспортних засобів, формування черг та взаємодію декількох транспортних потоків одночасно.

У моделі реалізовано декілька джерел генерації транспортного потоку. Генерація транспортних засобів здійснюється за допомогою спеціалізованих елементів бібліотеки Road Traffic Library середовища AnyLogic. Інтенсивність

транспортного потоку може змінюватися під час проведення експериментів, що дозволяє досліджувати поведінку транспортної системи при різних рівнях навантаження.

Для регулювання руху транспортних потоків у транспортній мережі використовується система світлофорного керування. Основне транспортне навантаження припадає на центральне перехрестя, де реалізовано адаптивний алгоритм управління світлофором.

Особливістю розробленої моделі є використання стоп-ліній як елементів контролю транспортного потоку. Стоп-лінії розміщуються перед та після перехрестя і виконують функцію датчиків, що дозволяють визначати рівень завантаження окремих напрямків руху.

На основі даних, отриманих від стоп-ліній, система аналізує кількість транспортних засобів у горизонтальному та вертикальному напрямках руху. У випадку перевищення заданого порогового значення система автоматично змінює тривалість зеленої фази світлофора для більш завантаженого напрямку.

У моделі передбачено два режими роботи світлофорної системи:

- режим із фіксованою тривалістю фаз;
- адаптивний режим управління.

У режимі фіксованого керування тривалість сигналів світлофора залишається незмінною незалежно від інтенсивності транспортного потоку. В адаптивному режимі система автоматично коригує тривалість зеленого сигналу залежно від кількості транспортних засобів, що накопичилися на відповідному напрямку руху.

Для моделювання транспортних потоків використовується однаковий тип транспортних засобів із середньою швидкістю руху 50 км/год. Це дозволяє зосередити увагу саме на дослідженні ефективності алгоритму управління світлофорним регулюванням.

Запропонована модель дозволяє досліджувати процеси формування транспортних заторів, оцінювати ефективність роботи адаптивного світлофорного

керування та аналізувати вплив зміни інтенсивності транспортного потоку на функціонування транспортної системи.

2.3 Розробка структури моделі в AnyLogic

Для реалізації імітаційної моделі автоматизованого управління транспортним трафіком було використано програмне середовище AnyLogic. Дане середовище дозволяє створювати складні транспортні моделі, виконувати моделювання транспортних потоків у реальному часі та проводити експериментальні дослідження різних алгоритмів управління дорожнім рухом.

Однією з основних переваг середовища AnyLogic є підтримка спеціалізованої бібліотеки Road Traffic Library, яка містить готові елементи для створення дорожньої інфраструктури, транспортних потоків, перехресть, дорожніх сегментів та світлофорних систем. Використання даної бібліотеки значно спрощує процес побудови транспортної мережі та дозволяє створювати моделі, максимально наближені до реальних умов функціонування міського дорожнього руху.

У даній дипломній роботі було розроблено модель міської транспортної мережі, яка включає декілька взаємопов'язаних перехресть, дорожні сегменти, транспортні потоки та систему світлофорного регулювання. Основна увага приділяється центральному перехрестю, на якому реалізовано адаптивний алгоритм управління транспортними потоками.

На рисунку 2.2 представлено загальну структуру розробленої моделі в середовищі AnyLogic.

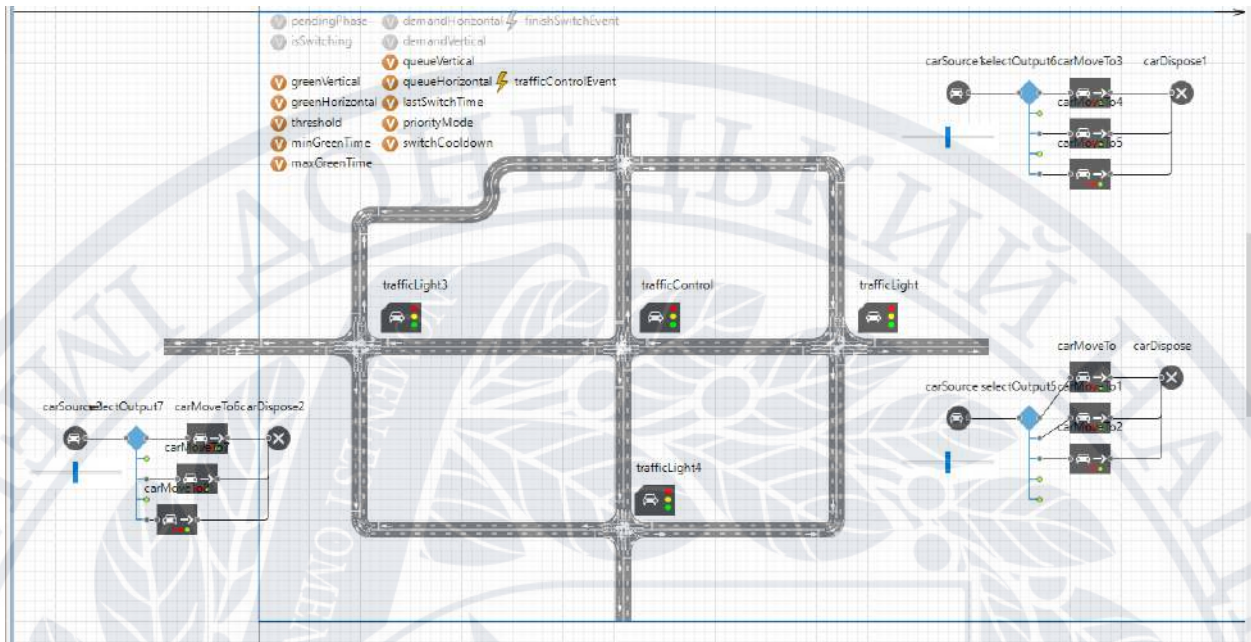


Рисунок 2.2 – Структура транспортної моделі в середовищі AnyLogic

Розроблена транспортна мережа включає декілька дорожніх сегментів, що формують замкнену систему руху транспортних потоків. У моделі реалізовано правосторонній двосмуговий рух транспортних засобів. Для кожного напрямку передбачено дві смуги руху, що дозволяє більш реалістично моделювати транспортні процеси у міських умовах.

Побудова дорожньої мережі виконувалася із використанням елементів Road Traffic Library. Основними компонентами транспортної системи є:

- дорожні сегменти;
- перехрестя;
- світлофорні об'єкти;
- джерела генерації транспортних засобів;
- елементи видалення транспортних засобів із системи;
- стоп-лінії для контролю транспортного потоку.

Для створення транспортних потоків у моделі використовувалися спеціалізовані елементи CarSource, які виконують функцію генерації транспортних

засобів у дорожньої мережі. Інтенсивність генерації автомобілів може змінюватися залежно від параметрів експерименту.

На рисунку 2.3 представлено приклад генерації транспортного потоку у моделі.

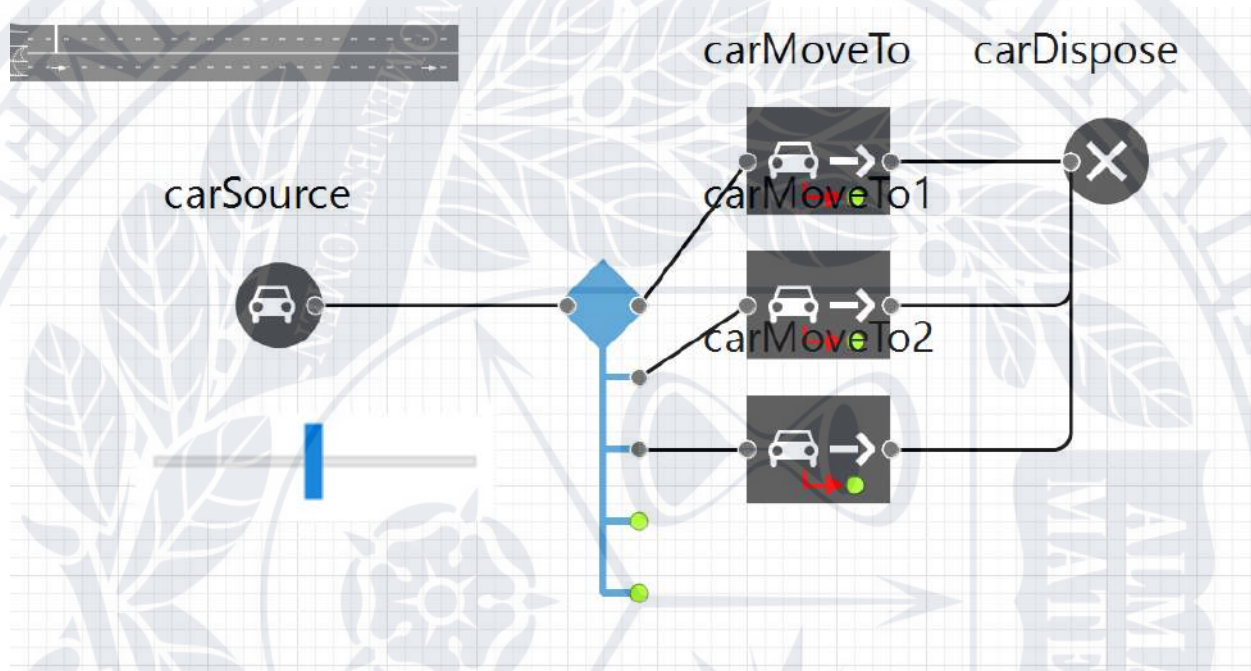


Рисунок 2.3 – Генерація транспортного потоку в середовищі AnyLogic

Після створення транспортні засоби рухаються дорожньою мережею відповідно до заданих маршрутів. Для моделювання руху автомобілів використовуються стандартні механізми бібліотеки Road Traffic Library, які враховують:

- напрямок руху;
- швидкість транспортного потоку;
- наявність світлофорного регулювання;
- взаємодію транспортних засобів між собою;
- формування транспортних черг.

Усі транспортні засоби у моделі мають однакові характеристики руху. Середня швидкість транспортного потоку становить 50 км/год, що відповідає типовим умовам руху у міських умовах.

Особливу роль у роботі моделі відіграє система світлофорного регулювання. У транспортній мережі реалізовано чотири світлофорні об'єкти, один із яких працює в адаптивному режимі. Центральний світлофор здійснює аналіз транспортного навантаження та автоматично змінює тривалість фаз залежно від інтенсивності руху.

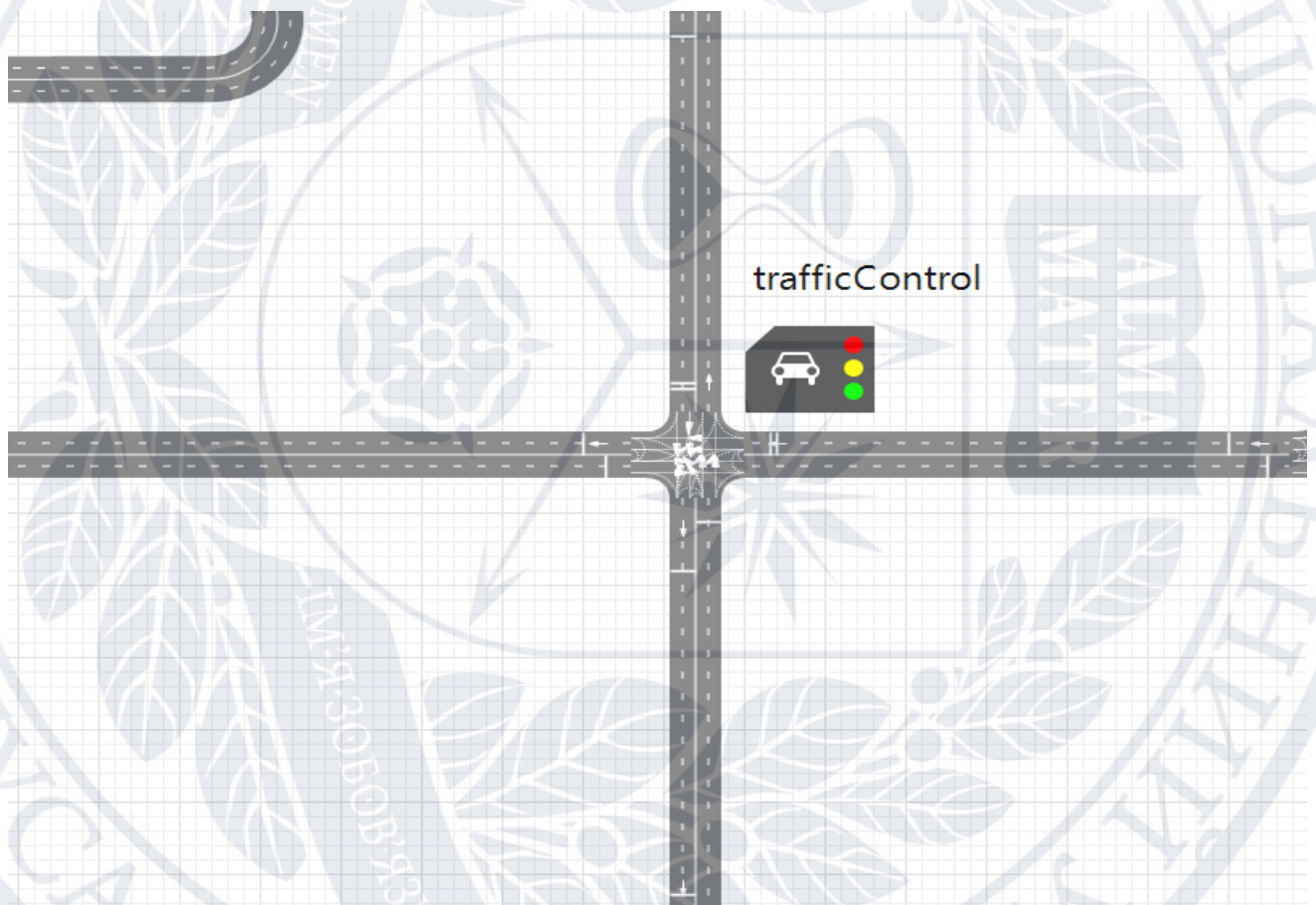


Рисунок 2.4 - Центральний адаптивний світлофор моделі

Для аналізу транспортного навантаження у моделі використовуються стоп-лінії, які виконують функцію датчиків транспортного потоку. Стоп-лінії розміщені перед та після центрального перехрестя і дозволяють визначати кількість транспортних засобів у кожному напрямку руху.

Інформація, отримана від стоп-ліній, використовується адаптивним алгоритмом для визначення рівня завантаження горизонтального та вертикального напрямків руху.

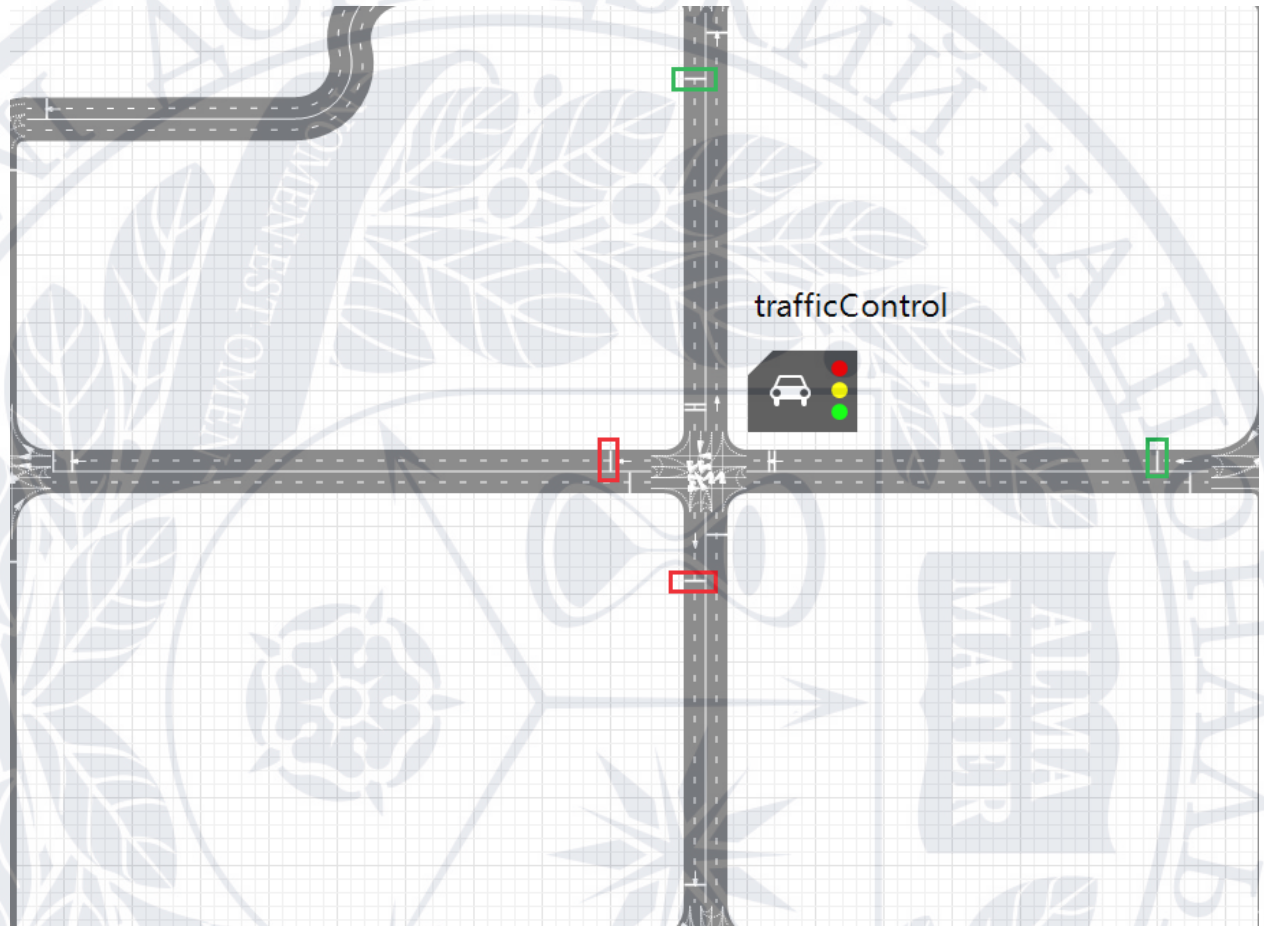


Рисунок 2.5 - Стоп-лінії як елементи контролю транспортного потоку

Для реалізації адаптивного управління у моделі використовуються спеціальні змінні, що зберігають інформацію про поточний стан транспортної системи. До основних змінних належать:

- `queueHorizontal` – кількість транспортних засобів у горизонтальному напрямку;
- `queueVertical` – кількість транспортних засобів у вертикальному напрямку;
- `threshold` – порогове значення перевищення транспортного потоку;

- greenHorizontal – тривалість зеленого сигналу для горизонтального напрямку;
- greenVertical – тривалість зеленого сигналу для вертикального напрямку;
- priorityMode – поточний режим роботи світлофорної системи.

На рисунку 2.6 представлено змінні адаптивного алгоритму керування.

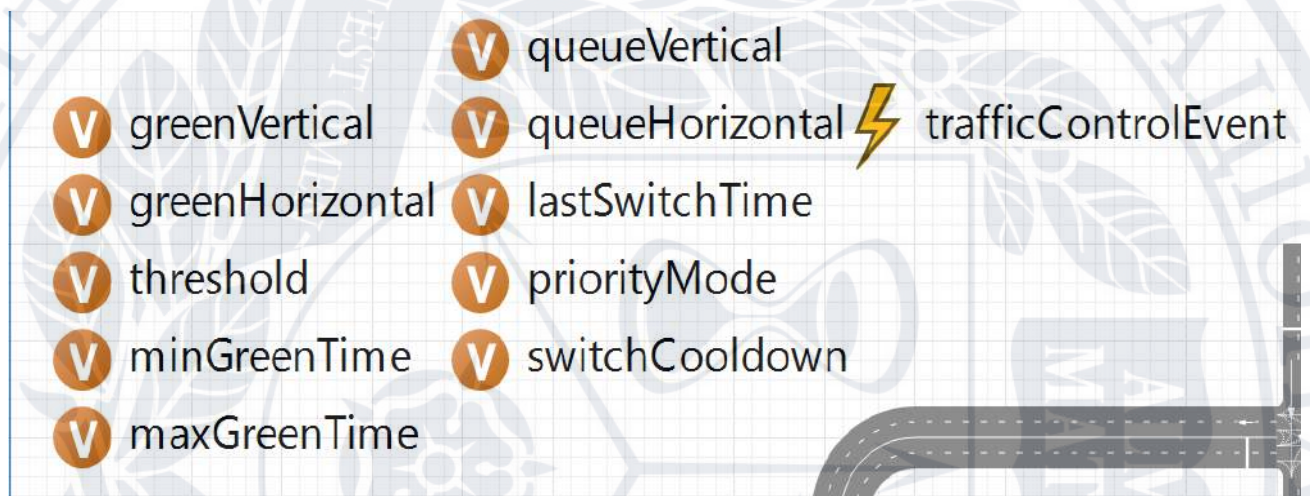


Рисунок 2.6 – Змінні адаптивного алгоритму управління

У процесі роботи моделі система постійно аналізує рівень транспортного навантаження. Якщо кількість транспортних засобів у певному напрямку перевищує встановлене порогове значення, адаптивний алгоритм автоматично збільшує тривалість зеленої фази для перевантаженого напрямку.

У випадку вирівнювання транспортного навантаження система повертається до стандартного збалансованого режиму роботи.

Для реалізації логіки адаптивного управління використовується програмний код мовою Java, інтегрований у середовище AnyLogic.


```

traceln("time=" + time()
+ " | H=" + queueHorizontal
+ " | V=" + queueVertical
+ " | mode=" + priorityMode
+ " | greenH=" + greenHorizontal
+ " | greenV=" + greenVertical);

double now = time();

// 1. Якщо горизонталь сильно перевантажена
if (queueHorizontal >= queueVertical + threshold) {

    // даємо пріоритет горизонталі
    greenHorizontal = maxGreenTime;    // 16
    greenVertical = minGreenTime;      // 5
    priorityMode = "HORIZONTAL";

    traceln("MODE: HORIZONTAL PRIORITY");
}

// 2. Якщо вертикаль сильно перевантажена
else if (queueVertical >= queueHorizontal + threshold) {

    // даємо пріоритет вертикалі
    greenVertical = maxGreenTime;      // 16
    greenHorizontal = minGreenTime;    // 5
    priorityMode = "VERTICAL";

    traceln("MODE: VERTICAL PRIORITY");
}

// 3. Якщо навантаження приблизно однакове
else {

    // повертаємося до балансу
    greenHorizontal = 10;
    greenVertical = 10;
    priorityMode = "BALANCED";

    traceln("MODE: BALANCED");
}

lastSwitchTime = now;

traceln("UPDATED: mode=" + priorityMode
+ " | greenH=" + greenHorizontal
+ " | greenV=" + greenVertical);

```

Рисунок 2.7 – Фрагмент програмного коду адаптивного керування

Розроблена модель дозволяє досліджувати процеси формування транспортних заторів, аналізувати вплив інтенсивності транспортного потоку на роботу світлофornoї системи та оцінювати ефективність адаптивного управління дорожнім рухом.

Крім того, використання середовища AnyLogic дозволяє проводити візуальне спостереження за роботою транспортної системи у реальному часі, що значно спрощує процес аналізу результатів моделювання та виявлення проблемних ділянок транспортної мережі.

Таким чином, використання середовища AnyLogic та бібліотеки Road Traffic Library дозволило створити імітаційну модель міської транспортної системи з

адаптивним управлінням транспортними потоками, що забезпечує можливість проведення експериментальних досліджень ефективності різних алгоритмів світлофорного регулювання.

2.4 Опис алгоритму управління світлофорами

Принцип роботи адаптивного алгоритму. Одним із основних елементів розробленої транспортної моделі є адаптивний алгоритм управління світлофорним об'єктом, реалізований для центрального перехрестя транспортної мережі. Основною метою алгоритму є автоматичне регулювання транспортних потоків залежно від поточного рівня навантаження на різних напрямках руху.

На відміну від традиційних систем світлофорного регулювання, у яких тривалість фаз є фіксованою, розроблений алгоритм дозволяє змінювати тривалість зеленого сигналу в режимі реального часу. Це забезпечує більш ефективний розподіл пропускної здатності перехрестя та дозволяє зменшити накопичення транспортних засобів на перевантажених напрямках руху.

Принцип роботи алгоритму базується на аналізі транспортного навантаження у горизонтальному та вертикальному напрямках руху. Система постійно порівнює кількість транспортних засобів у різних напрямках та визначає необхідність зміни режиму роботи світлофора.

У випадку перевищення транспортного навантаження на певному напрямку система автоматично збільшує тривалість зеленої фази для відповідного транспортного потоку. Після зменшення кількості транспортних засобів алгоритм повертає систему до стандартного збалансованого режиму роботи.

Налаштування адаптивного світлофора. Реалізація адаптивного керування виконана за допомогою елемента Traffic Light середовища AnyLogic. Центральний світлофор здійснює регулювання транспортних потоків на основному перехресті транспортної мережі.

На рисунку 2.8 представлено налаштування адаптивного світлофора у середовищі AnyLogic.

trafficControl - Traffic Light

Имя: ☒ Отображать имя ☐ Исключить

Задаёт режим работы для: ☒ Стоп-линий перекрестка ☐ Соединителей полос перекрестка ☐ Заданных стоп-линий

Перекресток: intersection

Фазы:

Длительности, сек:	greenVertical	3	greenHorizontal	3
Стоп-линии:				
stopLine11				
stopLine12				
stopLine6				
stopLine4				

Действия

При смене фазы:

```
traceln("PHASE CHANGED at time=" + time()
+ " greenH=" + greenHorizontal
+ " greenV=" + greenVertical);
```

Рисунок 2.8 – Налаштування адаптивного світлофора

Світлофор працює у режимі керування стоп-лініями перехрестя. Для кожного напрямку руху задаються відповідні сигнали світлофора, які визначають можливість або заборону руху транспортних засобів.

У моделі використовується декілька фаз роботи світлофornoї системи. Для горизонтального та вертикального напрямків руху задаються окремі значення тривалості зеленої фази:

greenHorizontal - тривалість зеленої фази горизонтального напрямку;

greenVertical - тривалість зеленої фази вертикального напрямку.

Також у моделі реалізовано жовтий сигнал світлофора тривалістю 3 секунди, який використовується як перехідна фаза між режимами руху.

Основні змінні адаптивного алгоритму. Для реалізації адаптивного алгоритму управління у моделі використовуються спеціальні змінні, які зберігають інформацію про поточний стан транспортної системи.

Змінна `greenVertical` визначає тривалість зеленої фази для вертикального напрямку руху. Початкове значення змінної становить 10 секунд, що відповідає стандартному режиму роботи транспортної системи.

greenVertical - Переменная

Имя: ☒ Отображать имя ☐ Исключить

Видимость: ☒ да

Тип:

Начальное значение:

Специфические

Уровень доступа:

Рис 2.9 - Змінна `greenVertical`

Змінна `greenHorizontal` визначає тривалість зеленої фази для горизонтального напрямку руху. У стандартному режимі значення змінної також становить 10 секунд.

greenHorizontal - Переменная

Имя: ☒ Отображать имя ☐ Исключить

Видимость: ☒ да

Тип:

Начальное значение:

Специфические

Уровень доступа:

Рис 2.10 - Змінна `greenHorizontal`

Змінна `threshold` використовується як порогове значення перевищення транспортного навантаження. Якщо різниця між транспортними потоками перевищує дане значення, система переходить у режим пріоритетного обслуговування перевантаженого напрямку.

У розробленій моделі значення `threshold` дорівнює 3.

threshold - Переменная

Имя: ☒ Отображать имя ☐ Исключить

Видимость: ☒ да

Тип:

Начальное значение:

▼ Специфические

Уровень доступа:

Рис 2.11 - Змінна threshold

Змінні queueHorizontal та queueVertical використовуються для збереження кількості транспортних засобів у горизонтальному та вертикальному напрямках руху відповідно.

На основі значень цих змінних система визначає поточний рівень транспортного навантаження.

queueHorizontal - Переменная

Имя: ☒ Отображать имя ☐ Исключить

Видимость: ☒ да

Тип:

Начальное значение:

▼ Специфические

Уровень доступа:

Рисунок 2.12 - Змінна queueHorizontal

queueVertical - Переменная

Имя: ☒ Отображать имя ☐ Исключить

Видимость: ☒ да

Тип:

Начальное значение:

▼ Специфические

Уровень доступа:

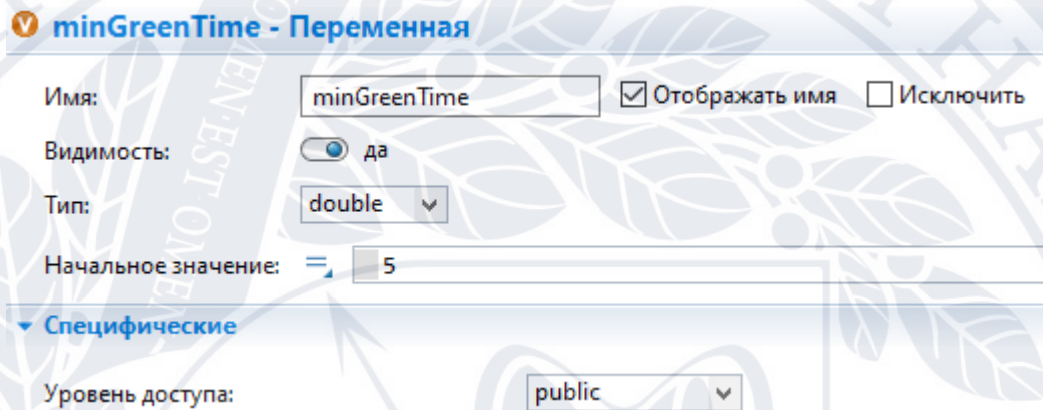
Рисунок 2.13 - Змінна queueVertical

Змінні `minGreenTime` та `maxGreenTime` визначають мінімальну та максимальну тривалість зеленої фази світлофора.

У моделі використовуються такі значення:

`minGreenTime` = 5 секунд;

`maxGreenTime` = 16 секунд.



minGreenTime - Переменная

Имя: ☒ Отображать имя ☐ Исключить

Видимость: ☒ да

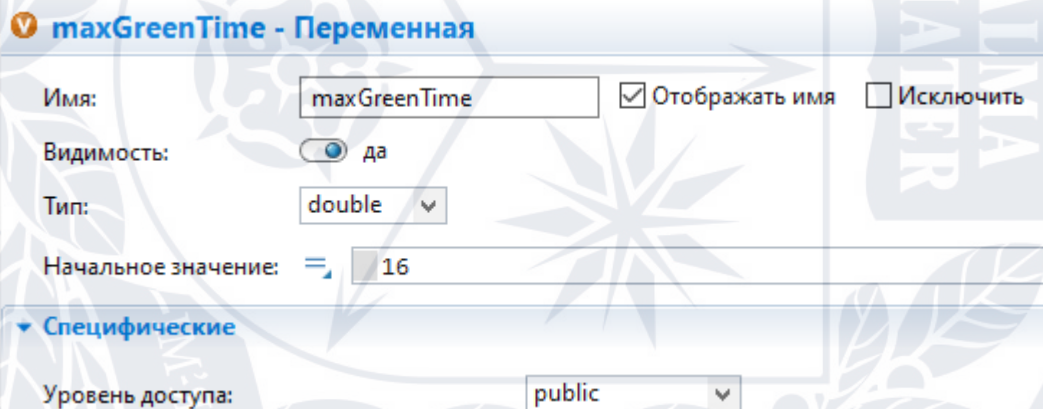
Тип:

Начальное значение:

▼ Специфические

Уровень доступа:

Рисунок 2.14 - Змінна `minGreenTime`



maxGreenTime - Переменная

Имя: ☒ Отображать имя ☐ Исключить

Видимость: ☒ да

Тип:

Начальное значение:

▼ Специфические

Уровень доступа:

Рисунок 2.15 – Змінна `maxGreenTime`

Змінна `priorityMode` використовується для збереження поточного режиму роботи адаптивного алгоритму.

Система підтримує три режими роботи:

BALANCED;

HORIZONTAL PRIORITY;

VERTICAL PRIORITY.

priorityMode - Переменная

Имя: ☒ Отображать имя ☐ Исключить

Видимость: ☒ да

Тип:

Начальное значение:

Специфические

Уровень доступа:

Рисунок 2.16 – Змінна priorityMode

Змінна switchCooldown використовується для обмеження частоти зміни режимів роботи системи. Використання затримки між перемикаваннями дозволяє уникнути надто частих змін фаз світлофора.

switchCooldown - Переменная

Имя: ☒ Отображать имя ☐ Исключить

Видимость: ☒ да

Тип:

Начальное значение:

Специфические

Уровень доступа:

Рисунок 2.17 – Змінна switchCooldown

Логіка визначення перевантаження. Основним завданням адаптивного алгоритму є визначення найбільш завантаженого напрямку руху.

Для цього система постійно аналізує співвідношення між значеннями queueHorizontal та queueVertical.

У випадку перевищення транспортного навантаження у горизонтальному напрямку використовується умова:

$$\text{queueHorizontal} \geq \text{queueVertical} + \text{threshold} \quad \vee \quad \text{queueHorizontal} \geq \text{queueVertical} + \text{threshold}$$

У разі виконання даної умови система переходить у режим HORIZONTAL PRIORITY та збільшує тривалість зеленої фази для горизонтального напрямку руху.

Аналогічно реалізовано визначення перевантаження вертикального напрямку.

Представлено фрагмент програмного коду адаптивного алгоритму.

```
// 1. Якщо горизонталь сильно перевантажена
if (queueHorizontal >= queueVertical + threshold) {

    // даємо пріоритет горизонталі
    greenHorizontal = maxGreenTime;    // 16
    greenVertical = minGreenTime;      // 5
    priorityMode = "HORIZONTAL";

    println("MODE: HORIZONTAL PRIORITY");
}
```

```
// 2. Якщо вертикаль сильно перевантажена
else if (queueVertical >= queueHorizontal + threshold) {

    // даємо пріоритет вертикалі
    greenVertical = maxGreenTime;      // 16
    greenHorizontal = minGreenTime;    // 5
    priorityMode = "VERTICAL";

    println("MODE: VERTICAL PRIORITY");
}
```

```
// 3. Якщо навантаження приблизно однакове
else {

    // повертаємося до балансу
    greenHorizontal = 10;
    greenVertical = 10;
    priorityMode = "BALANCED";

    println("MODE: BALANCED");
}
```

Режими роботи системи. У процесі функціонування адаптивного алгоритму система може працювати у трьох основних режимах.

У режимі HORIZONTAL PRIORITY система надає пріоритет горизонтальному напрямку руху шляхом збільшення тривалості зеленої фази.

У режимі VERTICAL PRIORITY пріоритет надається вертикальному напрямку руху.

У режимі BALANCED система працює у стандартному режимі з однаковою тривалістю фаз для всіх напрямків руху. Даний режим використовується у випадку приблизно однакового транспортного навантаження.

На рисунку 2.18 представлено приклад зміни режимів роботи адаптивної системи.

```

UPDATED: mode=VERTICAL | greenH=5.0 | greenV=16.0
time=102.0 | H=2 | V=7 | mode=VERTICAL | greenH=5.0 | greenV=16.0
MODE: VERTICAL PRIORITY
UPDATED: mode=VERTICAL | greenH=5.0 | greenV=16.0
H IN queueHorizontal = 3
H IN queueHorizontal = 4
V IN queueVertical = 8
V OUT queueVertical = 7
time=104.0 | H=4 | V=7 | mode=VERTICAL | greenH=5.0 | greenV=16.0
MODE: VERTICAL PRIORITY
UPDATED: mode=VERTICAL | greenH=5.0 | greenV=16.0
time=106.0 | H=4 | V=7 | mode=VERTICAL | greenH=5.0 | greenV=16.0
MODE: VERTICAL PRIORITY
UPDATED: mode=VERTICAL | greenH=5.0 | greenV=16.0
V OUT queueVertical = 6
time=108.0 | H=4 | V=6 | mode=VERTICAL | greenH=5.0 | greenV=16.0
MODE: BALANCED
UPDATED: mode=BALANCED | greenH=10.0 | greenV=10.0
time=110.0 | H=4 | V=6 | mode=BALANCED | greenH=10.0 | greenV=10.0

```

Рисунок 2.18 - Режими роботи адаптивного алгоритму

Переваги адаптивного алгоритму. Розроблений адаптивний алгоритм управління дозволяє:

- зменшити довжину транспортних черг;
- скоротити середній час очікування транспортних засобів;
- підвищити пропускну здатність транспортного вузла;
- забезпечити більш ефективний розподіл транспортних потоків;
- адаптувати роботу світлофорної системи до зміни транспортного навантаження.

Крім того, використання адаптивного підходу дозволяє більш ефективно використовувати пропускну здатність дорожньої мережі в умовах нерівномірного транспортного навантаження.

Таким чином, реалізований алгоритм забезпечує автоматичне регулювання транспортних потоків залежно від поточної дорожньої ситуації та підвищує ефективність функціонування транспортної системи у міських умовах.

2.5 Висновки до 2 розділу

У другому розділі виконано постановку задачі дослідження та розроблено структуру імітаційної моделі міської транспортної мережі. Побудовано дорожню інфраструктуру з декількома взаємопов'язаними перехрестями, реалізовано систему генерації транспортних потоків та світлофорного регулювання. Особливу увагу приділено розробці адаптивного алгоритму керування світлофором, який використовує інформацію про транспортне навантаження для автоматичного коригування тривалості фаз світлофорного циклу.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМ ТРАФІКОМ

3.1 Методика проведення експериментів

Після побудови транспортної моделі та реалізації адаптивного алгоритму управління світлофорним об'єктом було проведено серію експериментальних досліджень, метою яких є оцінка ефективності роботи адаптивної системи керування транспортними потоками у різних умовах транспортного навантаження.

Основним завданням проведення експериментів є дослідження впливу адаптивного світлофорного регулювання на процес формування транспортних черг, час очікування транспортних засобів та загальну пропускну здатність транспортного вузла.

Дослідження проводилися у програмному середовищі AnyLogic із використанням розробленої імітаційної моделі міської транспортної мережі. Під час проведення експериментів транспортна структура моделі залишалася незмінною, а зміни вносилися лише до параметрів транспортного потоку та режиму роботи центрального світлофорного об'єкта.

Для забезпечення коректності порівняння дослідження виконувалися для двох режимів роботи системи:

- режиму фіксованого світлофорного керування;
- режиму адаптивного управління.

У режимі фіксованого керування світлофор працював із незмінною тривалістю зелених фаз для всіх напрямків руху. У режимі адаптивного керування тривалість фаз змінювалася автоматично залежно від поточного транспортного навантаження.

Під час проведення експериментів досліджувалися такі показники:

- довжина транспортних черг;
- середній час очікування транспортних засобів;
- інтенсивність транспортного потоку;
- режим роботи адаптивного алгоритму;
- пропускна здатність центрального перехрестя.

На рис. 3.1 представлено процес проведення експериментального дослідження у середовищі AnyLogic.

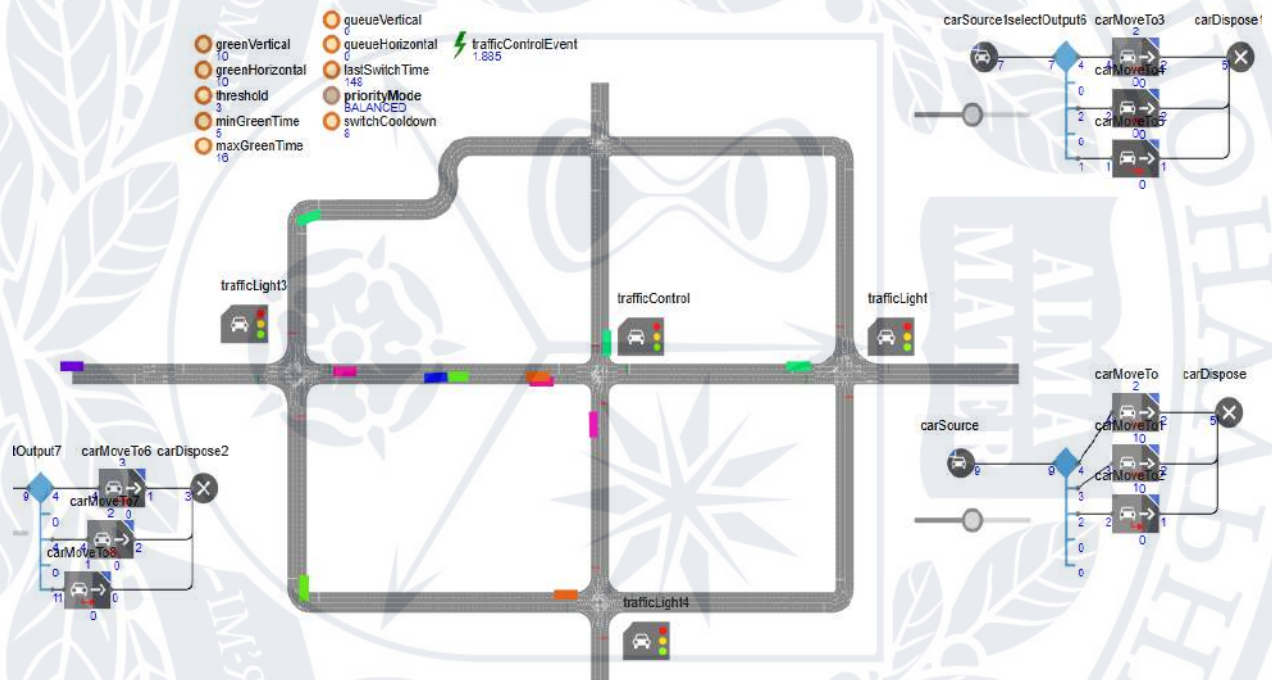


Рисунок 3.1 - Проведення експериментального моделювання в AnyLogic

Для аналізу роботи системи використовувалися різні рівні транспортного навантаження. У процесі дослідження було сформовано декілька сценаріїв моделювання, які відрізнялися інтенсивністю транспортного потоку та характером розподілу транспортних засобів між напрямками руху.

Основними сценаріями експериментів є:

- низьке транспортне навантаження;
- середнє транспортне навантаження;

- високе транспортне навантаження;
- нерівномірне транспортне навантаження.

При низькому навантаженні кількість транспортних засобів у системі є незначною, у результаті чого транспортні черги практично не формуються, а система переважно працює у режимі BALANCED.

Середній рівень транспортного навантаження характеризується періодичним утворенням транспортних черг та епізодичним переходом адаптивного алгоритму до режимів пріоритетного керування.

У випадку високого транспортного навантаження спостерігається інтенсивне накопичення транспортних засобів перед центральним перехрестям. У таких умовах адаптивний алгоритм активно змінює тривалість фаз світлофора для зменшення довжини транспортних черг.

Окремо досліджувався сценарій нерівномірного транспортного навантаження, при якому один із напрямків руху мав значно більшу інтенсивність транспортного потоку. Даний сценарій дозволяє оцінити ефективність адаптивного алгоритму в умовах асиметричного розподілу транспортного навантаження.

На рис. 3.2 представлено приклад високого транспортного навантаження у моделі.



Рисунок 3.2 - Високе транспортне навантаження транспортної мережі

Для аналізу зміни транспортного навантаження у процесі моделювання використовувалися графіки та засоби статистичного аналізу середовища AnyLogic. Зокрема, у моделі реалізовано побудову графіків зміни кількості транспортних засобів у горизонтальному та вертикальному напрямках руху.

На рис. 3.3 представлено приклад графіка зміни кількості транспортних засобів у горизонтальному напрямку руху.

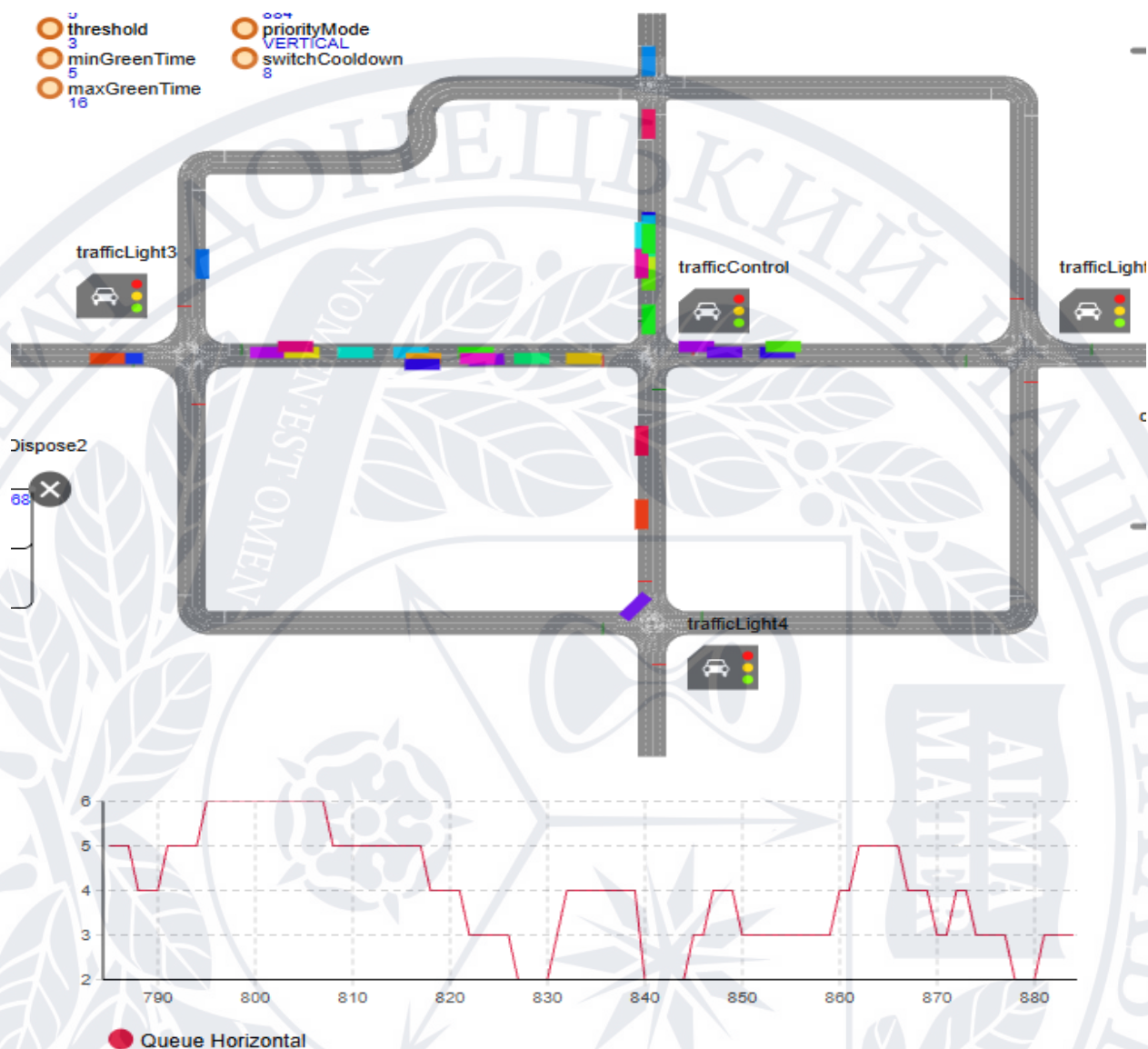


Рисунок 3.3 - Графік зміни транспортного навантаження у горизонтальному напрямку

Графіки дозволяють візуально оцінити процес накопичення транспортних засобів, ефективність роботи адаптивного алгоритму та зміну рівня транспортного навантаження у різні моменти часу.

На рис. 3.4 представлено приклад графіка зміни кількості транспортних засобів у вертикальному напрямку руху.

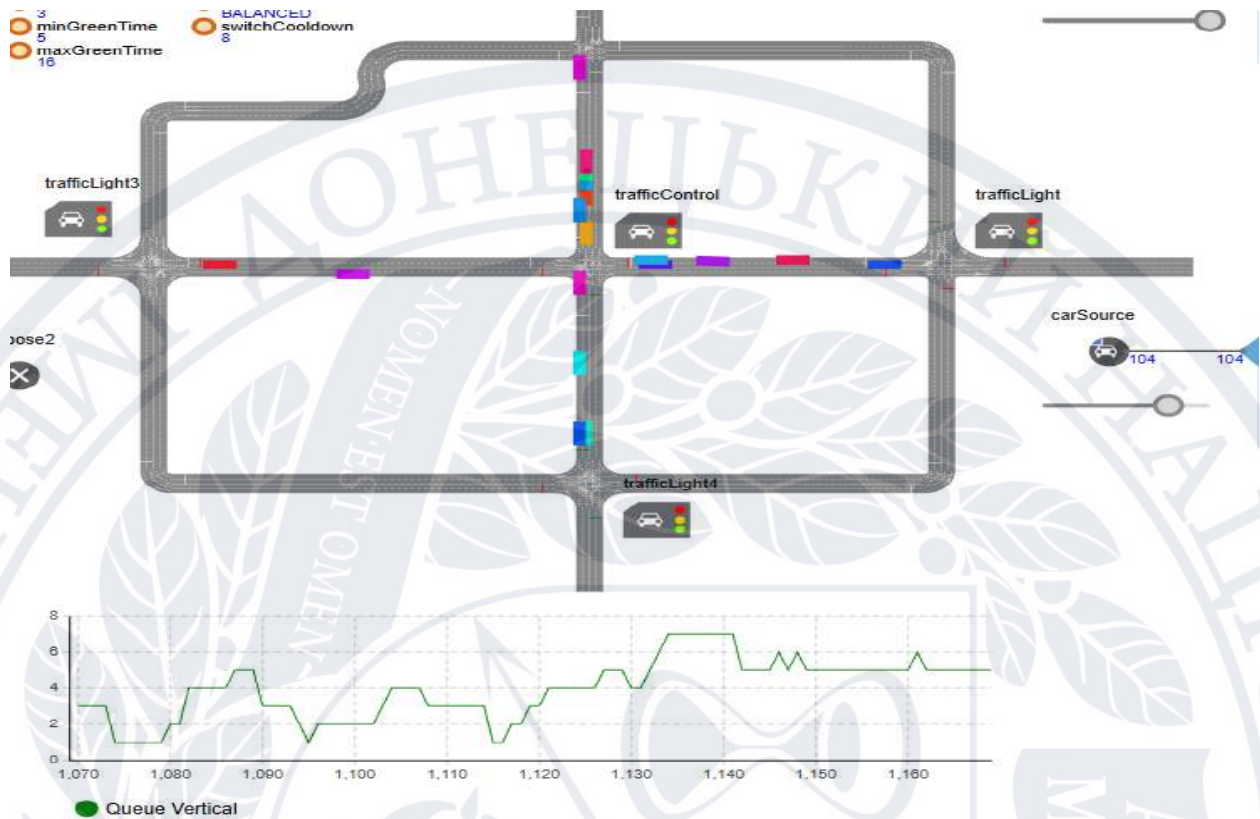


Рисунок 3.4 - Графік зміни транспортного навантаження у вертикальному напрямку

Для проведення порівняльного аналізу результати експериментів фіксувалися у вигляді таблиць, які містять інформацію про середній час очікування транспортних засобів, довжину транспортних черг та режими роботи світлофорної системи.

У процесі проведення експериментів особлива увага приділялася порівнянню ефективності адаптивного та фіксованого режимів роботи світлофорної системи. Основним критерієм оцінки ефективності є здатність системи зменшувати транспортні затори та скорочувати час очікування транспортних засобів.

Проведені експериментальні дослідження створюють основу для подальшого аналізу результатів моделювання та оцінки ефективності адаптивного управління транспортними потоками у міських умовах.

3.2 Дослідження роботи системи при різному транспортному навантаженні

Одним із основних етапів дослідження ефективності адаптивного управління транспортними потоками є аналіз роботи системи при різних рівнях транспортного навантаження. Для оцінки поведінки транспортної моделі було проведено серію експериментів із різною інтенсивністю руху транспортних засобів.

Основною метою проведення даних експериментів є дослідження процесу формування транспортних черг, зміни навантаження на центральне перехрестя та аналіз реакції адаптивного алгоритму на зміну інтенсивності транспортного потоку.

У процесі моделювання було досліджено чотири основні сценарії роботи транспортної системи:

- низьке транспортне навантаження;
- середнє транспортне навантаження;
- високе транспортне навантаження;
- нерівномірне транспортне навантаження.

Для кожного сценарію оцінювалися:

- довжина транспортних черг;
- кількість транспортних засобів перед центральним перехрестям;
- режим роботи адаптивного алгоритму;
- загальна завантаженість транспортної мережі.

При низькому транспортному навантаженні кількість автомобілів у системі є незначною, у результаті чого транспортні черги практично не формуються. У більшості випадків адаптивний алгоритм працює у режимі BALANCED, оскільки різниця між транспортними потоками не перевищує встановлене порогове значення.

У даному режимі транспортні засоби проходять центральне перехрестя без значних затримок, а час очікування перед світлофором є мінімальним.

На рис. 3.5 представлено роботу транспортної системи при низькому транспортному навантаженні.

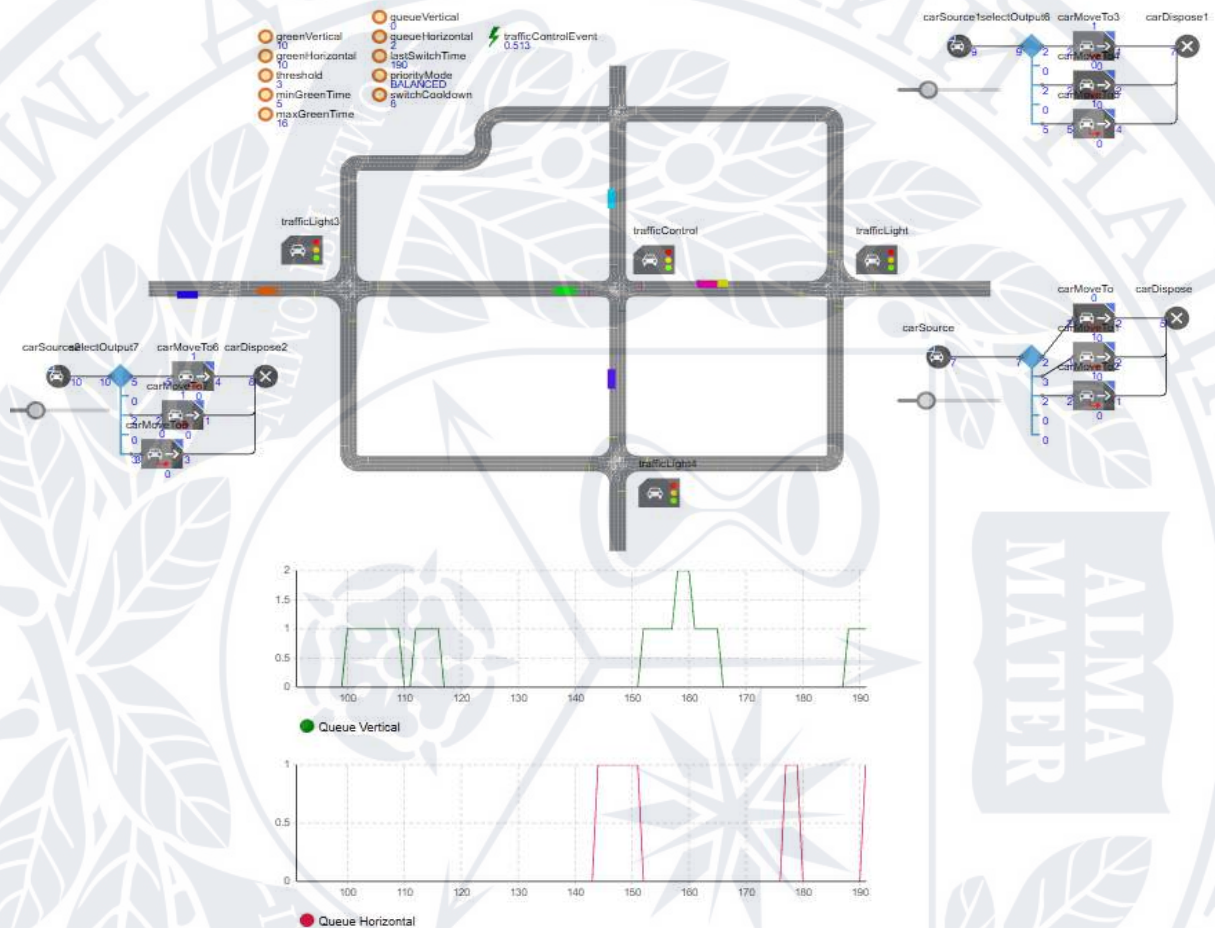


Рисунок 3.5 - Робота системи при низькому транспортному навантаженні

При низькому навантаженні транспортна система працює стабільно, а адаптивний алгоритм практично не змінює стандартний режим роботи світлофорного об'єкта. Це пояснюється відсутністю значного перевантаження одного з напрямків руху.

При середньому рівні транспортного навантаження у системі починають формуватися транспортні черги перед центральним перехрестям. Кількість транспортних засобів поступово збільшується, що призводить до зростання часу очікування на світлофорі.

У даних умовах адаптивний алгоритм починає періодично змінювати режими роботи світлофорної системи залежно від поточного транспортного навантаження.

На рис. 3.6 представлено роботу системи при середньому транспортному навантаженні.

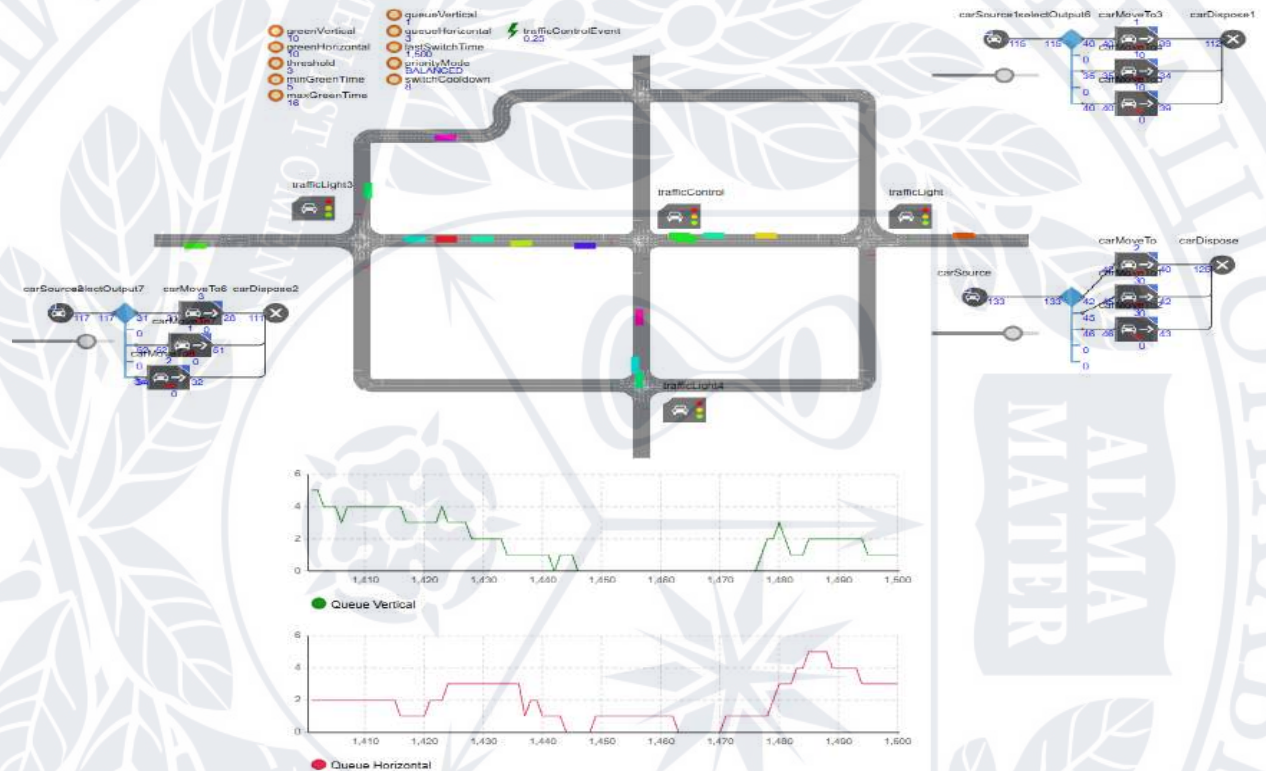


Рисунок 3.6 - Робота системи при середньому транспортному навантаженні

У процесі моделювання спостерігається періодичне накопичення транспортних засобів у горизонтальному та вертикальному напрямках руху. Після збільшення транспортного навантаження адаптивний алгоритм змінює тривалість зеленої фази для перевантаженого напрямку, що дозволяє частково зменшити довжину транспортних черг.

При високому транспортному навантаженні у системі формується значна кількість транспортних засобів перед центральним перехрестям. У результаті цього виникають транспортні затори та суттєво збільшується час очікування автомобілів.

У даному режимі адаптивний алгоритм активно змінює режими роботи світлофорної системи та збільшує тривалість зеленої фази для найбільш перевантаженого напрямку руху.

На рис. 3.7 представлено роботу системи при високому транспортному навантаженні.

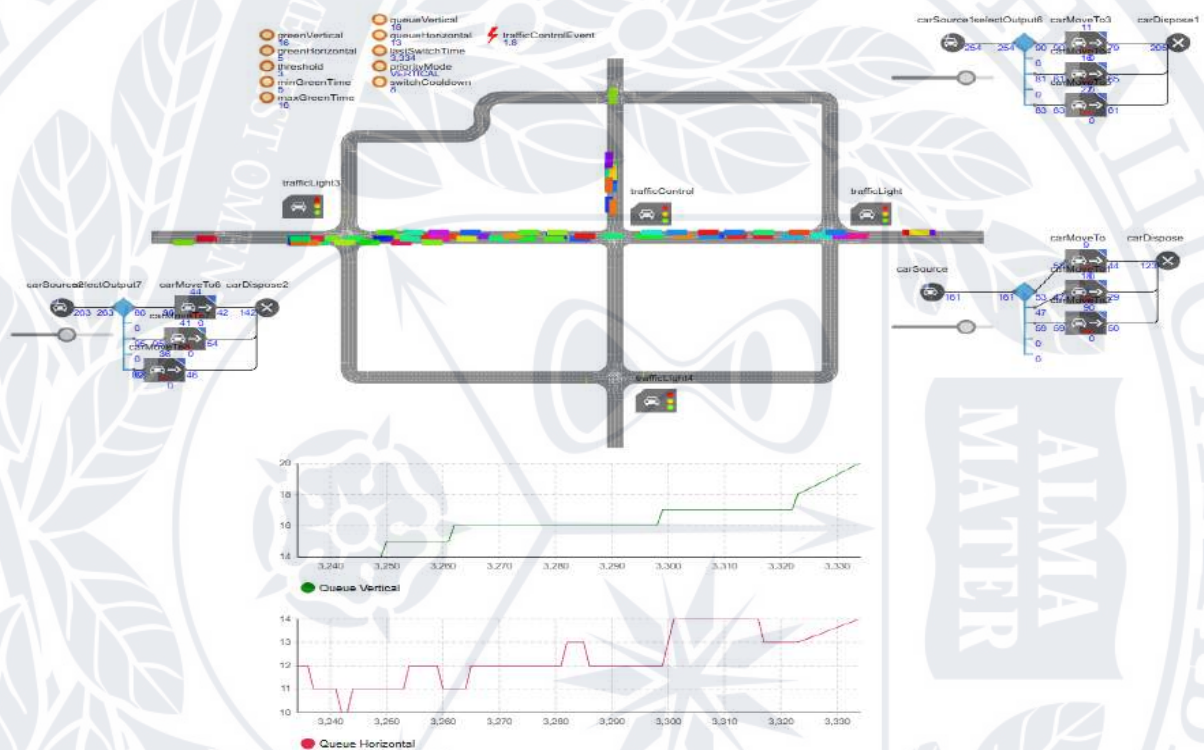


Рисунок 3.7 - Робота системи при високому транспортному навантаженні

У процесі проведення експерименту спостерігається значне збільшення транспортних черг перед світлофором. При цьому адаптивний алгоритм дозволяє частково зменшити перевантаження шляхом автоматичної зміни тривалості зелених фаз.

Незважаючи на високу інтенсивність транспортного потоку, адаптивна система забезпечує більш рівномірний розподіл транспортного навантаження між напрямками руху.

Окремо було проведено дослідження роботи системи в умовах нерівномірного транспортного навантаження. У даному сценарії один із напрямків

руху мав значно більшу інтенсивність транспортного потоку порівняно з іншими напрямками.

Такий режим моделювання дозволяє оцінити ефективність адаптивного алгоритму у випадку асиметричного розподілу транспортних потоків.

На рис. 3.8 представлено приклад нерівномірного транспортного навантаження.

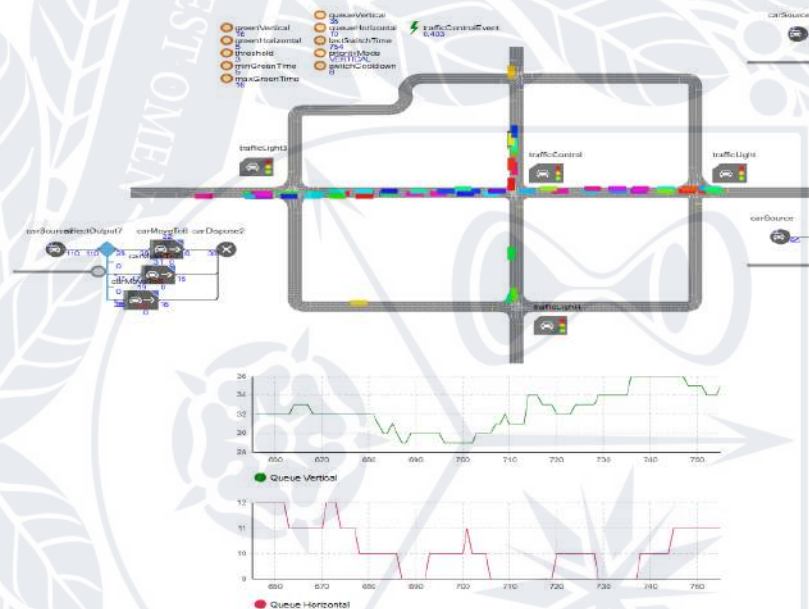


Рисунок 3.8 Нерівномірне транспортне навантаження транспортної системи

У процесі моделювання адаптивний алгоритм автоматично визначає перевантажений напрямок руху та збільшує для нього тривалість зеленої фази світлофора. Це дозволяє зменшити швидкість накопичення транспортних засобів та покращити пропускну здатність центрального перехрестя.

Проведені експериментальні дослідження показують, що адаптивне управління транспортними потоками дозволяє більш ефективно реагувати на зміну транспортного навантаження та забезпечує більш стабільну роботу транспортної системи у різних умовах функціонування міської дорожньої мережі.

3.3 Порівняння фіксованого та адаптивного режимів управління

Після проведення експериментальних досліджень роботи транспортної системи при різних рівнях навантаження було виконано порівняльний аналіз фіксованого та адаптивного режимів світлофорного керування. Основною метою даного дослідження є оцінка ефективності адаптивного алгоритму в умовах зміни інтенсивності транспортного потоку.

Для забезпечення коректності порівняння транспортна мережа та параметри генерації транспортних засобів залишалися незмінними. Відмінність між експериментами полягала лише у режимі роботи центрального світлофорного об'єкта.

У фіксованому режимі світлофор працював із постійною тривалістю зелених фаз незалежно від транспортного навантаження. В адаптивному режимі тривалість фаз автоматично змінювалася залежно від кількості транспортних засобів перед перехрестям.

Порівняння режимів роботи проводилося для трьох основних сценаріїв транспортного навантаження:

- мінімального;
- середнього;
- високого.

Мінімальне транспортне навантаження

У першому експерименті досліджувалася робота системи при мінімальному транспортному навантаженні. У моделі використовувалися три точки генерації транспортних засобів, кожна з яких створювала приблизно 70 автомобілів на годину.

Під час проведення експерименту значного накопичення транспортних засобів перед центральним перехрестям не спостерігалось. Транспортні черги практично були відсутні, а час очікування автомобілів перед світлофором був мінімальним.

У таких умовах різниця між фіксованим та адаптивним режимами керування є незначною, оскільки транспортна система працює стабільно навіть без використання адаптивного алгоритму.

Середнє транспортне навантаження

У другому експерименті досліджувалася робота системи при середньому рівні транспортного навантаження. Кожна точка генерації транспортних засобів створювала приблизно 257 автомобілів на годину.

Під час проведення експерименту транспортні черги почали періодично формуватися перед центральним перехрестям. У фіксованому режимі світлофорного керування система працювала стабільно лише за умови рівномірного транспортного потоку. При збільшенні інтенсивності руху або виникненні нерівномірного навантаження швидкість розвантаження транспортних черг поступово зменшувалася.

В адаптивному режимі світлофорна система більш ефективно реагувала на зміну транспортного навантаження. Алгоритм автоматично збільшував тривалість зеленої фази для перевантаженого напрямку, що дозволяло швидше зменшувати транспортні черги та підтримувати більш стабільний рух транспортних засобів.

Високе транспортне навантаження

У третьому експерименті досліджувалася робота системи при високому транспортному навантаженні. У даному сценарії кожна точка генерації створювала приблизно 500 автомобілів на годину.

У процесі моделювання спостерігалось значне накопичення транспортних засобів перед центральним перехрестям. Виникали транспортні затори та суттєво збільшувався час очікування автомобілів.

У фіксованому режимі світлофорного керування система не встигала ефективно розподіляти транспортні потоки між напрямками руху, у результаті чого довжина транспортних черг поступово збільшувалася.

Адаптивний режим також почав працювати менш ефективно через надмірне транспортне навантаження. Проте під час проведення експерименту було встановлено, що основною причиною перевантаження є не лише центральний світлофор, а й другорядні фіксовані світлофори транспортної мережі, які не встигали розподіляти транспортні потоки після проходження центрального перехрестя.

Таким чином, ефективність адаптивного алгоритму частково обмежується роботою інших елементів транспортної системи.

Таблиця 3.1 Порівняння фіксованого та адаптивного режимів управління

Сценарій	Інтенсивність транспортного потоку	Фіксований режим	Адаптивний режим
Мінімальне навантаження	210 авто/год	Стабільна робота системи	Стабільна робота системи
Середнє навантаження	771 авто/год	Часткове утворення черг	Менші транспортні черги
Високе навантаження	1500 авто/год	Значні транспортні затори	Кращий розподіл транспортних потоків

Проведені експериментальні дослідження також показали, що ефективність адаптивного світлофорного керування значною мірою залежить від загальної структури транспортної мережі. Використання лише одного адаптивного світлофора у великій міській системі не завжди дозволяє повністю усунути транспортні затори, оскільки на роботу центрального перехрестя впливають інші світлофорні об'єкти з фіксованими режимами керування.

У процесі моделювання було встановлено, що при дуже високому транспортному навантаженні другорядні фіксовані світлофори починають обмежувати ефективність адаптивного алгоритму, створюючи додаткове накопичення транспортних засобів на суміжних ділянках дорожньої мережі.

Отримані результати свідчать про те, що адаптивне світлофорне керування найбільш ефективно працює або в системах із координацією декількох адаптивних

перехресть, або на окремих критично навантажених транспортних вузлах із нестабільним транспортним потоком. У таких умовах адаптивний алгоритм дозволяє більш ефективно реагувати на зміну транспортного навантаження та покращувати пропускну здатність транспортної системи.

3.4 Висновки до 3 розділу

У третьому розділі проведено серію експериментальних досліджень роботи моделі при різних рівнях транспортного навантаження. Виконано аналіз роботи адаптивного алгоритму керування та здійснено порівняння його ефективності з традиційним режимом фіксованого світлофорного регулювання. Отримані результати показали, що адаптивний підхід дозволяє більш гнучко реагувати на зміни інтенсивності транспортних потоків та ефективніше використовувати пропускну здатність перехрестя.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи було досліджено сучасні підходи до управління транспортними потоками в міських умовах та розроблено імітаційну модель автоматизованого управління транспортним трафіком із використанням адаптивного світлофорного регулювання.

У першому розділі проведено аналіз проблем організації дорожнього руху в сучасних містах. Встановлено, що зростання кількості транспортних засобів, нерівномірність транспортного навантаження та обмеженість дорожньої інфраструктури призводять до виникнення заторів, збільшення часу очікування та зниження ефективності функціонування транспортної системи. Розглянуто існуючі автоматизовані системи управління дорожнім рухом, принципи їх роботи та сучасні підходи до адаптивного керування світлофорними об'єктами. Також виконано аналіз методів моделювання транспортних потоків та програмних засобів транспортного моделювання. За результатами порівняльного аналізу обґрунтовано вибір середовища AnyLogic як найбільш придатного інструменту для реалізації поставлених завдань.

У другому розділі сформульовано постановку задачі та розроблено структуру імітаційної моделі міської транспортної мережі. У середовищі AnyLogic створено модель, яка включає чотири взаємопов'язані перехрестя, двосмутовий правосторонній рух, генерацію транспортних потоків із регульованою інтенсивністю та систему світлофорного керування. Для центрального перехрестя реалізовано адаптивний алгоритм керування, який аналізує транспортне навантаження за допомогою стоп-ліній та автоматично змінює тривалість світлофорних фаз залежно від поточної ситуації на дорозі. Розроблений алгоритм підтримує режими збалансованого керування та пріоритетного пропуску транспорту в найбільш завантаженому напрямку.

У третьому розділі проведено серію експериментальних досліджень роботи моделі за різних рівнів транспортного навантаження. Виконано аналіз функціонування адаптивного алгоритму та здійснено порівняння його роботи з традиційним фіксованим режимом керування світлофором. Результати моделювання показали, що за умов середнього та нерівномірного навантаження адаптивний алгоритм дозволяє більш ефективно використовувати пропускну здатність перехрестя, зменшувати довжину транспортних черг та скорочувати час очікування транспортних засобів. При низькому навантаженні різниця між режимами є незначною, а при дуже високій інтенсивності руху ефективність окремого адаптивного світлофора обмежується впливом сусідніх перехресть та загальним перевантаженням транспортної мережі.

Практичне значення роботи полягає у створенні імітаційної моделі, яка може використовуватися для дослідження ефективності різних алгоритмів світлофорного регулювання без необхідності втручання в реальну дорожню інфраструктуру. Розроблена модель дозволяє оцінювати вплив різних параметрів керування на транспортні потоки та може бути використана як основа для подальших досліджень у сфері інтелектуальних транспортних систем.

У результаті виконання роботи досягнуто поставленої мети — створено імітаційну модель автоматизованого управління транспортним трафіком у міських умовах, реалізовано адаптивний алгоритм керування світлофором та проведено комплекс експериментальних досліджень його ефективності. Отримані результати підтверджують доцільність використання адаптивного підходу для керування дорожнім рухом в умовах змінного транспортного навантаження.

Разом із тим проведене дослідження показало, що використання одного адаптивного світлофора не може повністю усунути проблему транспортних заторів у масштабах міста. Найбільша ефективність таких рішень досягається за умови координації декількох адаптивних світлофорних об'єктів у межах єдиної системи управління дорожнім рухом або на окремих ділянках із нерівномірним

транспортним навантаженням, де адаптивне керування дозволяє оперативно реагувати на зміни дорожньої ситуації.

Перспективами подальших досліджень є розширення моделі шляхом впровадження взаємодії між декількома адаптивними світлофорами, використання прогнозування транспортного навантаження, інтеграція з реальними джерелами даних та застосування сучасних методів інтелектуального управління транспортними потоками в рамках концепції «розумного міста».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Гаврилов Е.В. Основы транспортных систем. – Київ: Либідь, 2017. – 320 с.
- [2] Поліщук В.П. Організація та регулювання дорожнього руху. – Київ: КНТ, 2019. – 280 с.
- [3] Treiber M., Kesting A. Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation. – Springer, 2016.
- [4] Gartner N., Messer C., Rathi A. Traffic Flow Theory: A State-of-the-Art Report. – Transportation Research Board, Washington, 2018.
- [5] Hunt P., Robertson D., Bretherton R., Winton R. SCOOT – A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals. – Transport and Road Research Laboratory, UK, 2015.
- [6] Lowrie P. SCATS: The Sydney Coordinated Adaptive Traffic System. – Roads and Traffic Authority, Sydney, 2016.
- [7] Transportation Research Board. Highway Capacity Manual. – Washington DC, 2016.
- [8] Helbing D. Traffic and Related Self-Driven Many-Particle Systems. – Reviews of Modern Physics, 2011.
- [9] FHWA Traffic Signal Timing Manual. – Federal Highway Administration, 2015.
- [10] Intelligent Transportation Systems: Functional Design for Effective Traffic Management. – Wiley, 2020.
- [11] Zhang Y., Wang Y. Adaptive Traffic Signal Control Using Reinforcement Learning. – IEEE Access, 2021.
- [12] Li L., Lv Y., Wang F.Y. Traffic Signal Timing via Deep Reinforcement Learning. – IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020.
- [13] PTV VISSIM User Manual. – PTV Group, 2023.
- [14] [AnyLogic Company. AnyLogic Simulation Software Documentation](#) – 2024.
- [15] Law A. Simulation Modeling and Analysis. – McGraw-Hill Education, 2015.
- [16] Macal C., North M. Agent-Based Modeling and Simulation. – Winter Simulation Conference, 2014.
- [17] AnyLogic Road Traffic Library User Guide. – AnyLogic Documentation, 2024.
- [18] SUMO Simulation of Urban Mobility Documentation. – Eclipse Foundation, 2024.

- [19] Papageorgiou M. Applications of Automatic Control Concepts to Traffic Flow Modeling and Control. – Springer, 2019.
- [20] AIMSUN Next User Manual. – AIMSUN, 2023.
- [21] Borshchev A. The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic. – AnyLogic North America, 2013.
- [22] Sterman J. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. – McGraw-Hill, 2018.
- [23] Borshchev A., Filippov A. From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent-Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools. – Winter Simulation Conference, 2014.
- [24] [OpenStreetMap Project Documentation](#) – 2024.
- [25] Intelligent Transport Systems and Smart City Technologies. – Elsevier, 2022.



ДОДАТКИ

Додаток А

Лістинг коду адаптивного світлофора

```

traceln("time=" + time()
    + " | H=" + queueHorizontal
    + " | V=" + queueVertical
    + " | mode=" + priorityMode
    + " | greenH=" + greenHorizontal
    + " | greenV=" + greenVertical);

double now = time();

// 1. Якщо горизонталь сильно перевантажена
if (queueHorizontal >= queueVertical + threshold) {

    // даємо пріоритет горизонталі
    greenHorizontal = maxGreenTime;    // 16
    greenVertical = minGreenTime;      // 5
    priorityMode = "HORIZONTAL";

    traceln("MODE: HORIZONTAL PRIORITY");
}

// 2. Якщо вертикаль сильно перевантажена
else if (queueVertical >= queueHorizontal + threshold) {

    // даємо пріоритет вертикалі
    greenVertical = maxGreenTime;      // 16
    greenHorizontal = minGreenTime;    // 5
    priorityMode = "VERTICAL";

    traceln("MODE: VERTICAL PRIORITY");
}

// 3. Якщо навантаження приблизно однакове
else {

    // повертаємося до балансу
    greenHorizontal = 10;
    greenVertical = 10;
    priorityMode = "BALANCED";

    traceln("MODE: BALANCED");
}

lastSwitchTime = now;

traceln("UPDATED: mode=" + priorityMode
    + " | greenH=" + greenHorizontal
    + " | greenV=" + greenVertical);

```