

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня
магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: “Розробка імітаційної моделі транспортних потоків на перехресті
вулично-дорожньої мережі”

Виконав: студент 6 курсу, групи МНм-61
спеціальності 275 Транспортні технології
(на автомобільному транспорті)
(шифр і назва спеціальності)

Дрозд П.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Рожко Н.Я.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Плекан У.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Зав. кафедри Цьонь О.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Кобельник В.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)

Кафедра автомобілів
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Цьонь О.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

«11» листопада 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 275 Транспортні технології (на автомобільному транспорті)
(шифр і назва спеціальності)

студенту Дрозду Павлу Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка імітаційної моделі транспортних потоків на перехресті
вулично-дорожньої мережі

Керівник роботи Рожко Н.Я., д.е.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «11» листопада 2024 року № 4/7-1081

2. Термін подання студентом завершеної роботи 23 грудня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Огляд програмного забезпечення для виконання імітаційного моделювання.

2. Постановка завдання на проектування. 3. Опис об'єктів імітаційної моделі.

4. Модуль статистика. 5. Моделювання інтенсивності транспортного потоку.

6. Візуалізація імітаційної моделі та результати моделювання. 7. Планування експерименту.

8. Проведення експерименту. 9. Вплив дорожньо-транспортних ситуацій на безпеку людини.

10. Стомлення, його причини та психофізіологічні механізми.

11. Основні причини скоєння дорожньо-транспортних пригод та безпека учасників ДР.

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

1. Титульний лист. 2. Реферат. 3-5. Програми для імітаційного моделювання. 6. Загальна схема

об'єкту дослідження. 7. Загальний вигляд вулиць перехрестя. 8. Інтенсивність та склад

транспортних потоків. 9. Властивості тимчасових графіків. 10. Моделювання об'єкту

дослідження. 11. Результати моделювання.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці			
Безпека в надзвичайних ситуаціях			

7. Дата видачі завдання 11.11.2024 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз об'єкту дослідження	29.11.2024 р.	
2	Імітаційне моделювання	06.12.2024 р.	
3	Результати дослідження та обґрунтування вибору оптимального значення	13.12.2024 р.	
4	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	16.12.2024 р.	
5	Загальні висновки	17.12.2024 р.	
6	Перелік посилань	18.12.2024 р.	

Студент

(підпис)

Дрозд П.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Рожко Н.Я.

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	5
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ	
1.1. Огляд програмного забезпечення для виконання імітаційного моделювання	8
1.2. Постановка завдання на проектування	18
РОЗДІЛ 2. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	
2.1. Опис об'єктів імітаційної моделі	25
2.2. Модуль статистика	29
2.3. Моделювання інтенсивності транспортного потоку	38
2.4. Візуалізація імітаційної моделі та результати моделювання	44
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕННЯ	
3.1. Планування експерименту	47
3.2. Проведення експерименту	51
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	
4.1. Вплив дорожньо-транспортних ситуацій на безпеку людини	57
4.2. Стонлення, його причини та психофізіологічні механізми	58
4.3. Основні причини скоєння дорожньо-транспортних пригод та безпека учасників ДР	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	63
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	64

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Швидкий ріст автомобілізації і збільшення транспортних потоків значно ускладнюють ситуацію на дорогах. Однією з основних проблем є недостатній рівень розвитку та організації дорожньої інфраструктури, зокрема, перехресть, що призводить до підвищення аварійності та затримок. Тому розробка і впровадження алгоритмів керування транспортними потоками на перехрестях стає актуальним і важливим напрямом для забезпечення безпечного та ефективного руху.

Мета роботи. Метою дослідження є моделювання функціонування перехрестя на основі взаємодії його основних елементів, що дозволяє аналізувати ступінь завантаженості трафіку в певні періоди. Такий підхід сприяє виявленню можливостей для оптимізації організації руху, що зменшує затори та підвищує безпеку на дорозі.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є система дорожнього руху на перехресті з круговим рухом. Кругові перехрестя є цікавим об'єктом для аналізу завдяки їхній здатності покращувати безпеку та зменшувати затримки, якщо потоки транспортних засобів на них оптимально організовані.

Методи та інструменти дослідження. Для виявлення слабких місць у функціонуванні перехрестя проведено логічний аналіз із застосуванням сучасного програмного забезпечення AnyLogic, яке забезпечує гнучкі інструменти для імітаційного моделювання. З використанням AnyLogic була створена імітаційна модель роботи перехрестя, що дозволила відтворити реальну динаміку руху транспортних засобів та проаналізувати різні сценарії керування потоками.

Результатом дослідження стала розроблена імітаційна модель роботи перехрестя з круговим рухом в середовищі AnyLogic. Модель дозволяє аналізувати рух транспортних засобів і виявляти оптимальні режими роботи перехрестя. На основі отриманих даних були сформовані рекомендації для

підвищення ефективності роботи перехрестя, що сприяє зниженню затримок та підвищенню безпеки для всіх учасників руху.

ВСТУП

Сучасні інформаційні технології та математичні методи відкривають широкі можливості для комплексного аналізу існуючих дорожніх мереж, виявлення та усунення їхніх недоліків, а також для створення моделей майбутніх транспортних систем без недоліків. Завдяки імітаційному моделюванню, яке виступає основним інструментом при проектуванні складних економічних процесів і систем, стає можливим поєднати математичні й теоретичні підходи для більш точного прогнозування і наочної демонстрації роботи різних транспортних компонентів.

Предметом дослідження є ефективне функціонування дорожньої мережі, особливо в частині перехресть, де найбільш часто виникають проблеми через стрімке збільшення кількості транспортних засобів у світі. Інтенсифікація дорожнього руху загострює низку існуючих проблем: недостатній розвиток дорожньої інфраструктури, неефективну організацію руху та неправильне функціонування перехресть. Ці чинники зумовлюють потребу в розробці ефективних алгоритмів для управління транспортними потоками, що дозволить зменшити затори та підвищити безпеку руху.

Метою цього дослідження є моделювання функціонування перехресть, зокрема детальний аналіз завантаженості трафіку в різні періоди часу. Для виявлення основних проблемних зон і підвищення ефективності роботи перехресть у дослідженні використовуються методи логічного аналізу та програмне забезпечення AnyLogic. Це дозволяє створити віртуальну модель перехрестя та проводити аналіз у реальних умовах, забезпечуючи точність та об'єктивність отриманих результатів.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Огляд програмного забезпечення для виконання імітаційного моделювання

Імітаційне моделювання - це метод відтворення поведінки складної системи шляхом аналізу основних взаємозв'язків між її елементами та створення віртуального симулятора досліджуваної предметної області для проведення експериментів. Цей підхід дозволяє отримати більш точне уявлення про функціонування системи, що є критично важливим для ефективного планування і управління складними процесами.

Імітаційне моделювання застосовується в ситуаціях, коли:

- експериментування на реальному об'єкті є занадто дорогим або технічно неможливим;
- створення аналітичної моделі виявляється непридатним через складність системи;
- необхідно простежити поведінку системи протягом певного відрізка часу для прогнозування її розвитку.

Однією з ключових переваг імітаційного моделювання є можливість імітувати поведінку системи з урахуванням часових змін. Зокрема, швидкість часу в моделі можна гнучко налаштовувати: уповільнювати для глибокого аналізу швидкоплинних процесів або прискорювати для дослідження тривалої динаміки систем з повільними змінами. Це дозволяє отримувати точні результати за короткий проміжок часу, що робить моделювання потужним інструментом для управління ресурсами та оптимізації процесів.

З розвитком комп'ютерної техніки та появою персональних комп'ютерів імітаційне тривимірне моделювання стало невід'ємною частиною сучасного виробництва, особливо при розробці складних і унікальних виробів. Ця високоточна та відносно швидка технологія надає можливість детально опрацювати всі характеристики майбутнього продукту

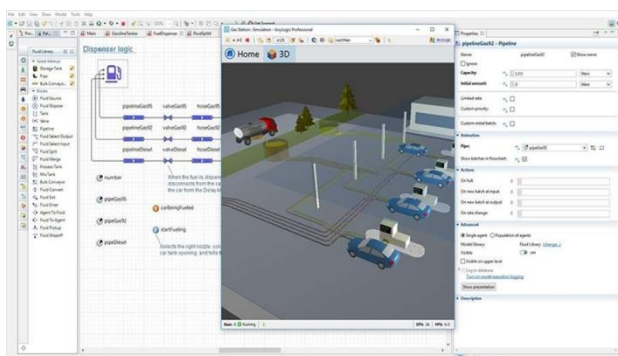
ще до його виробництва, що зменшує ризики і витрати, підвищуючи ефективність та ймовірність успіху проєктів.

AnyLogic - це потужне програмне забезпечення для моделювання, яке дозволяє створювати складні моделі систем для різних галузей, включаючи виробництво, логістику, транспорт, медицину та інші. Програма використовує декілька підходів до моделювання, таких як дискретно-подійне моделювання, системна динаміка та агентне моделювання, що дозволяє користувачам вибирати оптимальні методи для вирішення їхніх задач (рис. 1.1).

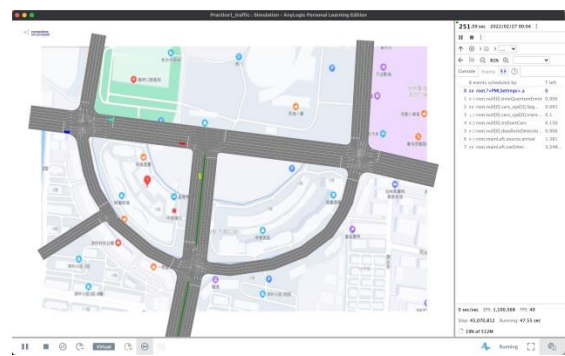
Однією з особливостей AnyLogic є можливість створювати мультипарадигмові моделі, що означає використання декількох методів моделювання в одній моделі, наприклад, об'єднання агентного підходу з дискретно-подійним для детальнішого аналізу системи.

Основні можливості програми включають:

1. Побудова моделей із використанням різних підходів (дискретно-подійне, агентне та системна динаміка).
2. Гнучкість у налаштуванні та інтеграції різних компонентів моделі.
3. Можливість масштабування моделей для вирішення великих задач.
4. Потужні інструменти для аналізу результатів симуляцій.



a)



б)

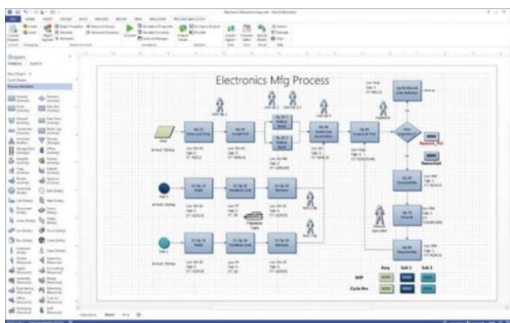
Рисунок 1.1. Інтерфейс AnyLogic

ProModel - це програмне забезпечення для імітаційного моделювання, спеціально розроблене для аналізу, оптимізації та покращення продуктивності складних систем, особливо у виробничих, логістичних та обслуговуючих галузях. Основна мета ProModel - надання користувачам можливості візуально моделювати процеси, експериментувати з різними сценаріями та приймати обґрунтовані рішення на основі результатів симуляцій (рис. 1.2).

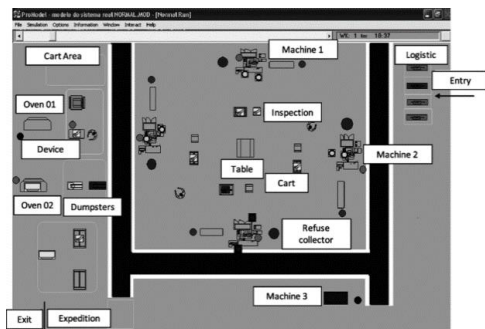
Основні функції та переваги ProModel:

- Візуалізація процесів: дає можливість створювати анімовані моделі, що демонструють роботу систем у динаміці, що полегшує розуміння та аналіз процесів.
- Інтеграція з іншими інструментами: підтримує взаємодію з програмами для збору даних і розширеного аналізу, такими як Excel, що робить процес збору та аналізу даних більш зручним і точним.
- Оптимізація ресурсів: дозволяє виявляти вузькі місця в роботі систем і тестувати різні стратегії для підвищення ефективності.
- Підтримка різних методів моделювання : зокрема дискретно-подійного, що дозволяє моделювати роботу об'єктів у конкретні моменти часу.

ProModel широко використовується для підвищення ефективності виробництва, зниження часу простою обладнання, планування логістичних потоків і покращення обслуговування клієнтів.



а)



б)

Рисунок 1.2. Інтерфейс ProModel

Arena - це програмне забезпечення для імітаційного моделювання, розроблене для моделювання та оптимізації бізнес-процесів, особливо в сфері виробництва, логістики, обслуговування та охорони здоров'я. Воно допомагає користувачам будувати динамічні моделі систем для аналізу продуктивності, визначення вузьких місць і оцінки потенційного впливу змін у процесах (рис. 1.3).

Основні можливості та переваги Arena:

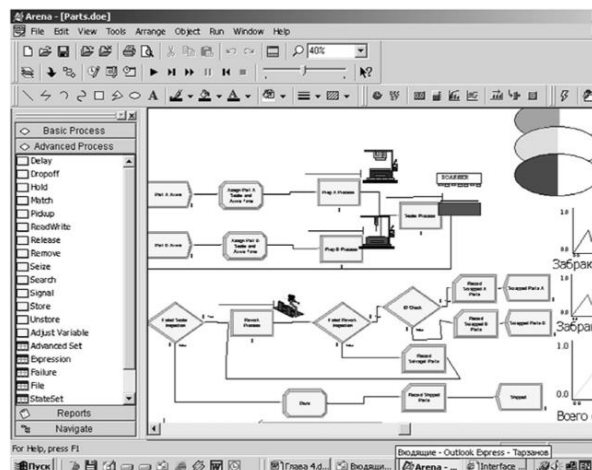
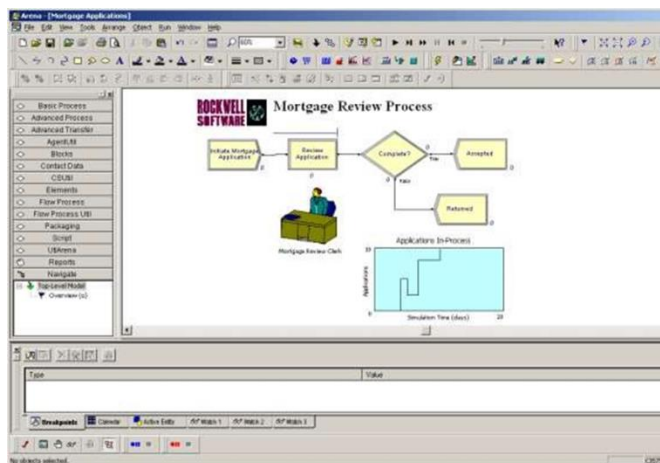
1. Дискретно-подійне моделювання: використовує підхід, який дозволяє аналізувати зміни в системі, що відбуваються у визначені моменти часу, що ідеально підходить для моделювання складних процесів із різними видами ресурсів.

2. Графічний інтерфейс: простий у використанні інтерфейс із блок-схемами дозволяє користувачам візуально створювати моделі за допомогою перетягування елементів, що робить моделювання більш інтуїтивним навіть для новачків.

3. Аналіз та оптимізація: Arena пропонує широкий набір інструментів для аналізу результатів симуляцій, таких як статистичний аналіз і різноманітні діаграми. Це дозволяє швидко ідентифікувати неефективності та оптимізувати роботу систем.

4. Побудова сценаріїв "що-якщо": дає можливість проводити експерименти з різними варіантами змін у системі для оцінки їхнього впливу на продуктивність, що сприяє прийняттю оптимальних рішень.

Arena широко застосовується в таких галузях, як виробництво (для оптимізації ліній збірки), логістика (для управління складськими процесами та транспортом) і обслуговування (для покращення обслуговування клієнтів і скорочення часу очікування).



a)

6)

Рисунок 1.3. Інтерфейс Arena

AutoMod - це програмне забезпечення для імітаційного моделювання, яке використовується для детального аналізу складних виробничих, логістичних і транспортних систем. Програма спеціалізується на створенні високоточних моделей матеріальних потоків, що робить її корисною для проектування та оптимізації складських процесів, ліній збірки, транспортування та управління ланцюгом поставок (рис. 1.4).

Основні можливості та переваги AutoMod:

- Тривимірне моделювання: надає можливість створювати реалістичні 3D-моделі систем, що дозволяє краще візуалізувати та аналізувати процеси.
- Дискретно-подійне моделювання: дозволяє моделювати змінні процеси, коли події відбуваються в конкретні моменти часу, забезпечуючи точний аналіз процесів у логістичних та виробничих системах.
- Гнучкість у моделюванні матеріальних потоків: AutoMod може створювати моделі складних систем, включаючи транспортні конвеєри, системи транспортування з використанням AGV (автоматичних транспортних засобів) та складські операції.
- Інтеграція з системами управління: підтримує обмін даними з ERP та іншими управлінськими системами, що полегшує впровадження

моделювання в операційні процеси.

- Автоматична оптимізація: містить інструменти для автоматизованої оптимізації, що дозволяє швидко виявляти вузькі місця та пропонувати рішення для покращення ефективності системи.

AutoMod широко використовується у виробничій галузі, для моделювання конвеєрних ліній, оптимізації руху транспорту в складських приміщеннях, а також для планування складських систем і транспортних мереж.

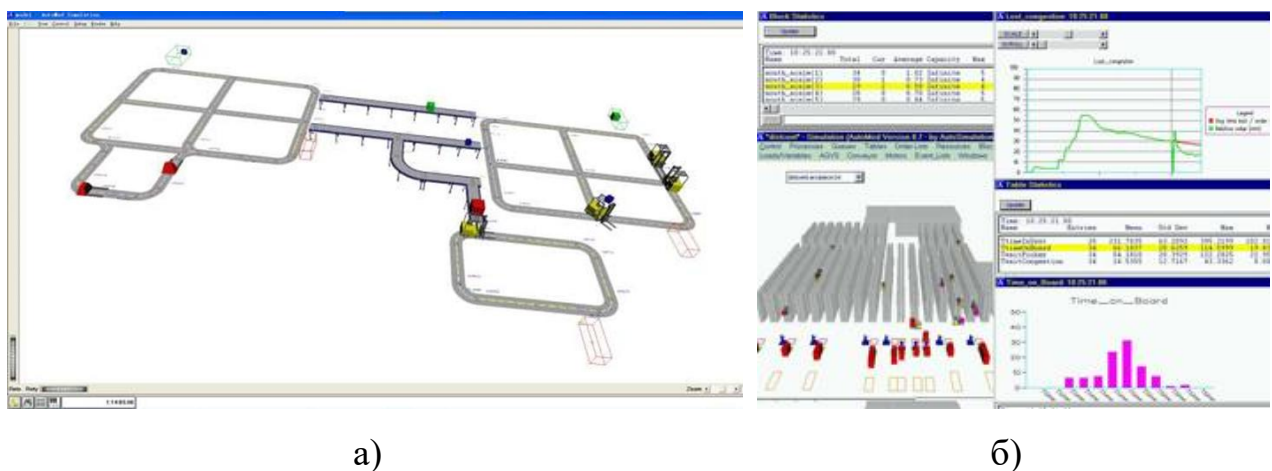


Рисунок 1.4. Інтерфейс AutoMod

ExtendSim (раніше Extend) - це програмне забезпечення для імітаційного моделювання, яке дозволяє створювати гнучкі, настроювані моделі для аналізу та оптимізації процесів у різних галузях, зокрема у виробництві, логістиці, охороні здоров'я та фінансах. ExtendSim підтримує різні типи моделювання, включаючи дискретно-подійне, безперервне, агентне та гібридне моделювання, що робить його надзвичайно універсальним інструментом для комплексного аналізу систем (рис. 1.5).

Основні функції та переваги ExtendSim:

- Графічний інтерфейс з блоками: користувачі можуть створювати моделі, використовуючи метод перетягування блоків, які представляють різні елементи моделі, такі як ресурси, процеси та змінні.

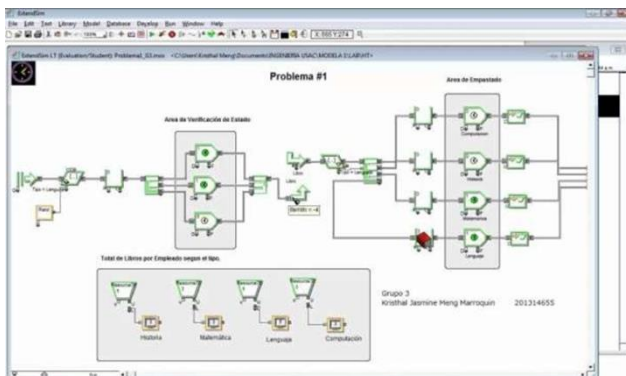
- Гнучка настройка моделі: ExtendSim дозволяє створювати власні блоки та модифікувати стандартні, що забезпечує високий рівень адаптації під потреби конкретного проєкту.

- Інструменти для аналізу даних і результатів: вбудовані інструменти дозволяють детально аналізувати результати моделювання, використовувати діаграми, статистику та створювати звіти для прийняття обґрунтованих рішень.

- Сценарії "що-якщо" і оптимізація: підтримує створення сценаріїв для прогнозування наслідків змін і оптимізації системи.

- Підтримка безперервного і гібридного моделювання: особливо корисна для моделювання систем, де важливо враховувати як дискретні, так і безперервні елементи (наприклад, у виробничих і енергетичних системах).

ExtendSim часто використовується для аналізу виробничих процесів, оптимізації складських операцій, моделювання фінансових процесів і систем охорони здоров'я. Це програмне забезпечення ефективно підтримує прийняття рішень, знижує ризики і дозволяє значно скоротити витрати, пов'язані з експериментами в реальних умовах.



a)



b)

Рисунок 1.5. Інтерфейс ExtendSim

PTV - це програмне забезпечення для моделювання транспортних систем, розроблене для планування, аналізу та оптимізації транспортних

потоків у міських і регіональних мережах. Рішення PTV використовуються для прогнозування трафіку, управління дорожнім рухом, розробки транспортних стратегій та поліпшення транспортної інфраструктури. Основними продуктами в лінійці PTV є PTV Vissim для моделювання дорожнього руху і PTV Visum для планування транспортних систем, хоча існують і інші спеціалізовані рішення для логістики та управління мобільністю.

Основні можливості та переваги PTV:

- Детальне моделювання транспортних потоків: PTV Vissim дозволяє створювати мікроскопічні моделі руху транспорту і пішоходів, що допомагає аналізувати перехрестя, розв'язки, світлофори та інші транспортні вузли.

- Інтеграція з системами управління рухом: дозволяє тестувати нові системи управління та сценарії віртуально перед їх впровадженням на практиці.

- Моделювання великих мереж: PTV Visum створений для макроскопічного планування мереж і використовується для стратегічного транспортного планування, визначення потреб в інфраструктурі та оптимізації маршрутів громадського транспорту.

- Аналіз сценаріїв "що-якщо": дозволяє моделювати різні варіанти розвитку трафіку в залежності від змін у дорожній інфраструктурі, зростання попиту чи нових екологічних вимог.

- Взаємодія з GIS і BIM: PTV підтримує інтеграцію з геоінформаційними та будівельними інформаційними системами, що полегшує роботу з великими проєктами.

PTV широко використовується органами місцевого самоврядування, транспортними агентствами та консультантами для покращення трафіку, підвищення безпеки руху і зниження заторів у міських агломераціях.



Рисунок 1.6. Інтерфейс програми PTV Vissim

PTV Optima - це програмне забезпечення для динамічного управління дорожнім рухом і прийняття оперативних рішень у режимі реального часу. Розроблене для використання органами управління дорожнім рухом, це рішення дозволяє моделювати транспортні потоки в поточних умовах і прогнозувати розвиток ситуації на дорогах на основі реальних даних. PTV Optima об'єднує функціональність прогнозування з потужними інструментами аналізу для прийняття обґрунтованих рішень, спрямованих на зниження заторів і покращення загальної ефективності руху (рис. 1.7).

Основні можливості та переваги PTV Optima:

- Прогнозування транспортних потоків: використовує історичні та поточні дані про рух для створення короткострокових прогнозів, які показують, як буде змінюватися трафік протягом найближчих хвилин або годин.
- Оперативне моделювання в режимі реального часу: дозволяє органам управління дорожнім рухом адаптуватися до ситуації на дорогах, вносячи

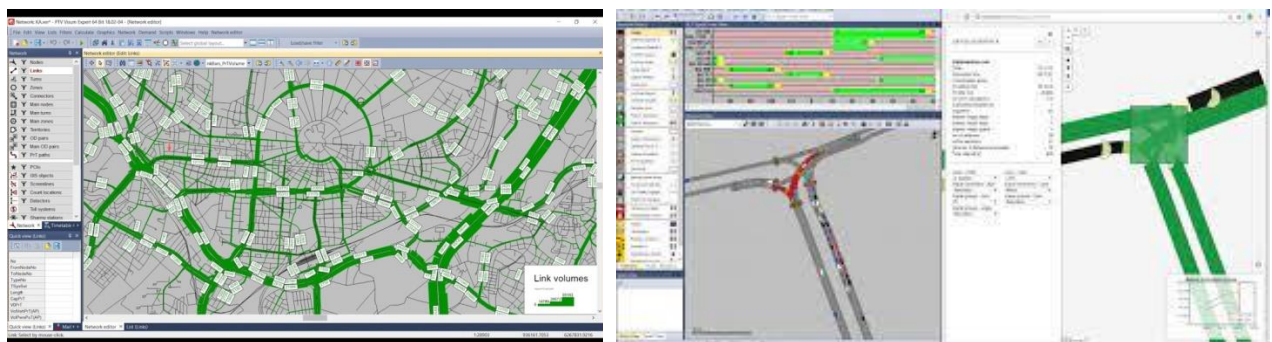
зміни в сигнальні системи, обмеження швидкості або маршрути для мінімізації заторів.

- Інтеграція з іншими транспортними системами: легко підключається до існуючих систем моніторингу та управління, таких як камери, датчики і системи оповіщення, що забезпечує централізоване управління.

- Сценарії "що-якщо" для оцінки впливу: моделює різні сценарії розвитку подій (наприклад, аварії, перекриття доріг або підвищений попит), дозволяючи оперативно оцінити їхній вплив на дорожню ситуацію.

- Гнучке управління дорожніми подіями: забезпечує автоматичне оновлення маршрутів, адаптацію світлофорів і організацію руху для найкращого потоку транспорту в умовах непередбачених подій.

PTV Optima використовується для ефективного управління транспортною мережею в містах та агломераціях, особливо корисна для зменшення заторів, скорочення затримок та оптимізації використання інфраструктури в години пік.



а)

б)

Рисунок 1.7. Інтерфейс програми PTV Visum

Аналізуючи характеристики програм, наданих вище, AnyLogic є найкращим варіантом для моделювання транспортної мережі. Ось ключові фактори, які роблять її найкращим вибором для цього завдання:

1. Підтримка середовищ: AnyLogic працює на Windows, Mac OS, і

Linux, що забезпечує гнучкість у використанні на різних платформах.

2. Розширюваність і інтеграція: можливість створення користувацьких бібліотек і шаблонів дозволяє адаптувати програму до специфічних потреб транспортної мережі, а підтримка Java забезпечує додаткову гнучкість у налаштуваннях.

3. Потужність моделювання: AnyLogic пропонує необмежену кількість потоків випадкових чисел, що важливо для точного імітаційного моделювання та випадкових сценаріїв.

4. 3D-анімація і документування: AnyLogic підтримує тривимірну анімацію, що дозволяє детально візуалізувати транспортні процеси, і містить засоби для документування.

5. Оптимізація: наявність модуля OptQuest дозволяє оптимізувати моделі, що є важливим для аналізу та управління транспортними потоками.

AnyLogic також є універсальним інструментом, який підтримує мультипарадигмове моделювання (агентне, дискретно-подійне, системна динаміка), що може знадобитися при моделюванні складної транспортної інфраструктури.

1.2. Постановка завдання на проектування

На рисунку 1.8. представлена схема організації дорожнього руху на кільцевій розв'язці в місті Тернопіль. Основні елементи та напрямки руху позначені наступним чином:

1. Кільцева розв'язка: Центральний елемент схеми — кільцева розв'язка, яка об'єднує чотири напрямки з під'їздами з різних сторін.

2. Основні напрямки під'їзду до розв'язки:

- Зверху (північний напрямок) — під'їзд з вулиці 15 квітня.
- Зліва — під'їзд з проспекту Степана Бандери, який веде з мікрорайону "Східний".
- Знизу (південний напрямок) — під'їзд з вулиці Т. Протасевича, який

також обслуговує мікрорайон "Східний".

- Справа (східний напрям) — під'їзд з Подільського шосе, який обслуговує мікрорайон "Варшавський".

3. Торговий центр "АТБ": Розташований у правій верхній частині схеми. Позначені в'їзди та виїзди до/від ТЦ "АТБ".

4. Пішохідні переходи та надземний перехід:

- На під'їзді з вулиці 15 квітня позначений надземний пішохідний перехід.

- На інших під'їздах є звичайні пішохідні переходи з позначеннями відповідних знаків.

5. Дорожні знаки та розмітка: Вказані основні знаки, що регулюють рух, зокрема, знаки "Уступи дорогу", "Головна дорога", знаки пішохідних переходів та інші попереджувальні знаки. Розмітка смуг показує основні напрямки руху, включаючи смуги для зупинки перед перехрестям.

6. Смуги руху: Кожен під'їзд має багатосмугову структуру, що забезпечує можливість розподілення транспортних потоків залежно від напрямку. Дорожня розмітка дозволяє зрозуміти, які смуги призначені для в'їзду на кільце, а які — для руху поза кільцем.

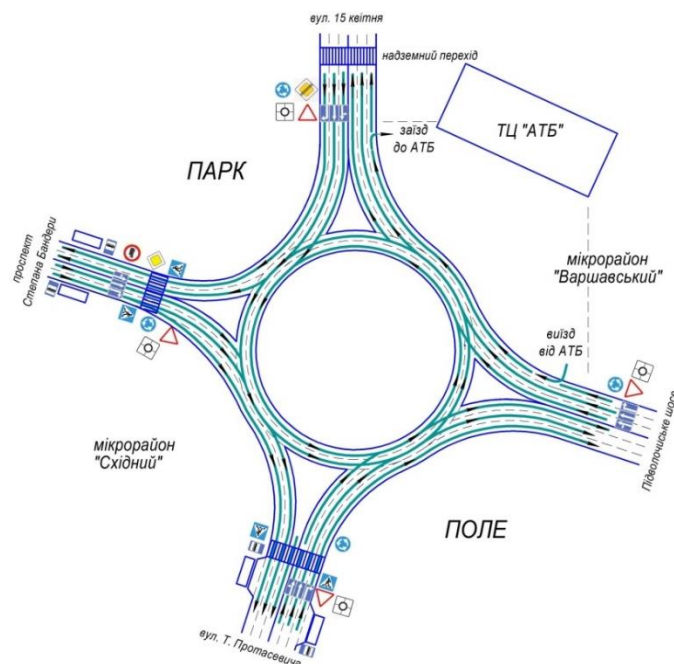


Рисунок 1.8. Загальна схема об'єкту дослідження

Перехрестя регулюється дорожньою розміткою та знаками дорожнього руху (таблиця 1.1). Фото перехрестя показано на рис. 1.9.

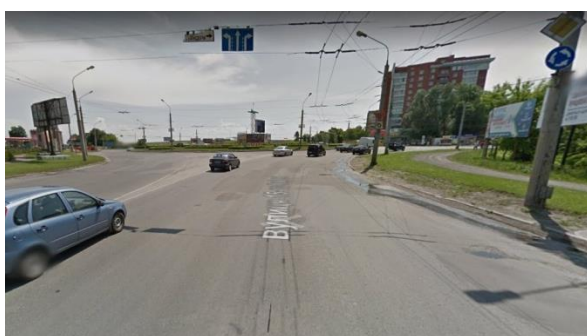
Таблиця 1.1

Відомості про технічні засоби регулювання дорожнього руху на перехресті
«Збаразьке кільце» м. Тернополя

№	Позначення	Найменування	Тип	Кількість
Дорожня розмітка				
1	1.1	Вузька суцільна	Горизонтальна	1
2	1.3	Вузька подвійна	Горизонтальна	3
3	1.5	Штрихова	Горизонтальна	7
4	1.12	Стоп-лінія	Горизонтальна	4
Дорожні знаки				
1	1.39	Інша небезпека	Попереджув.	1
2	2.1	Дати дорогу	Пріоритету	2
3	2.3	Головна дорога	Пріоритету	2

Продовження таблиці 1.1

№	Позначення	Найменування	Тип	Кількість
4	2.4	Кінець головної дороги	Пріоритету	2
5	3.3	Рух вантаж. ТЗ заборонено	Заборонний	1
6	4.10	Круговий рух	Інф.-вказівний	4
	7.8	Напрямок головної дороги	Інф.-вказівний	4
7	5.16	Напрямки руху по смугах	Інф.-вказівний	4
8	5.35.1	Пішохідний перехід	Інф.-вказівний	6
9	5.35.2	Пішохідний перехід	Інф.-вказівний	6



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.9. Загальний вигляд вулиць перехрестя «Збаразьке кільце»:
а - вул. 15 квітня (напрямок 1); б – Підволочиське шосе (напрямок 2);
в – вул. Т. Протасевича (напрямок 3); г – проспект С. Бандери (напрямок 4)

Згідно зі спостереженнями, встановлено, що інтенсивність руху транспортних і пішохідних потоків на перехресті «Збаразьке кільце» значно змінюється протягом доби. Погодинний аналіз показує помітне зниження інтенсивності руху з 11 до 13 год. та після 20 год. Проте при зниженні інтенсивності спостерігається значне збільшення швидкості руху транспортних засобів, особливо у напрямках 1 та 3.

Щодо пішохідних потоків, то на напрямку 3 інтенсивність залишається стабільною протягом доби, тоді як на напрямках 1 та 4 вона зростає після 17 год. та у вихідні дні. Варто зазначити, що пішохідні потоки на цих напрямках суттєво знижують інтенсивність руху транспорту.

Результати досліджень наведено у таблицях 1.2 – 1.5.

Таблиця 1.2

Інтенсивність та склад транспортного потоку за напрямком 1

Вид транспортного засобу	Напрямок руху			Всього у фізичних од./год.	Всього у привед. од./год.	Всього у привед. од./добу
	1-2	1-3	1-4			
Легкові автомобілі	81	76	41	198	198	4752
Мікроавтобуси і вантажні автомобілі до 3,5 т	20	11	12	43	64,5	1548
Вантажні автомобілі 3,5 – 6 т	4	1	1	6	15	360
Вантажні автомобілі більше 6 т	5	0	0	5	15	360
Автобуси	13	20	4	37	92,5	2220
Тролейбуси	3	2	3	8	28	672
Мотоцикли, мопеди	1	1	1	3	1,5	36
				300	414,5	9948

Таблиця 1.3

Інтенсивність та склад транспортного потоку за напрямком 2

Вид транспортного засобу	Напрямок руху			Всього у фізичних од./год.	Всього у привед. од./год.	Всього у привед. од./добу
	2-1	2-3	2-4			
Легкові автомобілі	80	67	53	200	200	4800
Мікроавтобуси і вантажні автомобілі до 3,5 т	19	10	8	37	55,5	1332
Вантажні автомобілі 3,5 – 6 т	4	1	1	6	15	360
Вантажні автомобілі більше 6 т	5	0	0	5	15	360
Автобуси	12	3	8	23	57,5	1380
Тролейбуси	2	0	0	2	7	168
Мотоцикли, мопеди	1	0	0	1	0,5	12
				274	237	8412

Таблиця 1.4

Інтенсивність та склад транспортного потоку за напрямком 3

Вид транспортного засобу	Напрямок руху			Всього у фізичних од./год.	Всього у привед. од./год.	Всього у привед. од./добу
	3-1	3-2	3-4			
Легкові автомобілі	77	68	64	209	209	5016
Мікроавтобуси і вантажні автомобілі до 3,5 т	11	10	14	35	52,5	1260
Вантажні автомобілі 3,5 – 6 т	1	1	2	4	10	240
Вантажні автомобілі більше 6 т	0	0	0	0	0	0
Автобуси	21	3	7	31	77,5	1860
Тролейбуси	1	0	2	3	10,5	252
Мотоцикли, мопеди	2	0	0	2	1	24
				284	360,5	8652

Таблиця 1.5

Інтенсивність та склад транспортного потоку за напрямком 4

Вид транспортного засобу	Напрямок руху			Всього у фізичних од./год.	Всього у привед. од./год.	Всього у привед. од./добу
	4-1	4-2	4-3			
Легкові автомобілі	41	54	63	158	158	3792
Мікроавтобуси і вантажні автомобілі до 3,5 т	12	8	13	33	49,5	1188
Вантажні автомобілі 3,5 – 6 т	1	1	2	4	10	240
Вантажні автомобілі більше 6 т	0	0	0	0	0	0
Автобуси	3	7	8	18	45	1080
Тролейбуси	4	0	1	5	17,5	420
Мотоцикли, мопеди	1	0	0	1	0,5	12
				219	280,5	6732

Швидкість пішохідних і транспортних потоків на перехресті досліджувалися за допомогою відомих методів. Дані про швидкість руху автотранспортних засобів для складу транспортного потоку на вул. 15 квітня наведено в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6

Швидкість руху транспортних засобів по вул. 15 квітня

Вид транспортного засобу	Час проходження ділянки, с	Швидкість, км/год
Легкові автомобілі	7	50
	7,55	45
Мікроавтобуси і вантажівки до 3,5 т	7,55	45
	8,2	40
Вантажні автомобілі 3,5 – 6 т	7,79	43
	8,34	39
Вантажні автомобілі 6 - 8 т	8,82	36
	8,65	35
Вантажні автомобілі більше 8 т	10,47	28
	9,37	33
Автобуси	9,57	32
	8,65	37
Тролейбуси	11,28	25
Спарені тролейбуси	7	50
Мотоцикли, мопеди	7,79	43

Для створення імітаційної моделі (рис. 1.10) було використано середовище розробки AnyLogic, яке містить вбудовані бібліотеки для моделювання процесів.

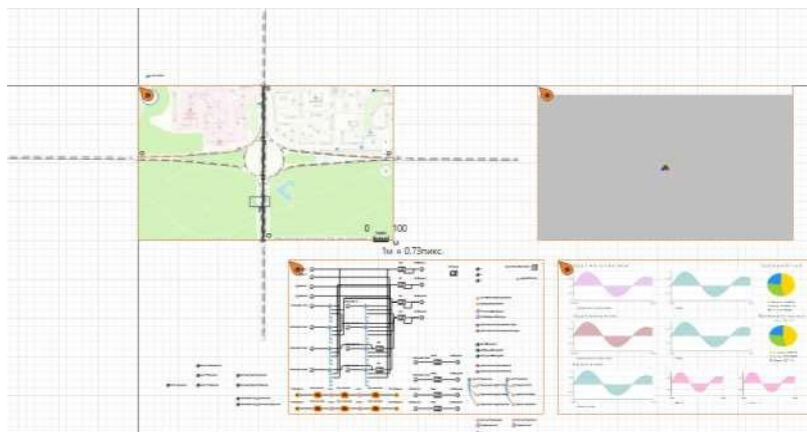


Рисунок 1.10. Схема імітаційною моделі в редакторі AnyLogic

У цій імітаційній моделі було створено 5 агентів: Main, Car, Transport, Bus, Trolleybus; 2 експерименти: Simulation (Простий) та Optimization (Оптимізаційний), База даних та Ресурси. На рисунку 1.11 представлені складові проєкту.

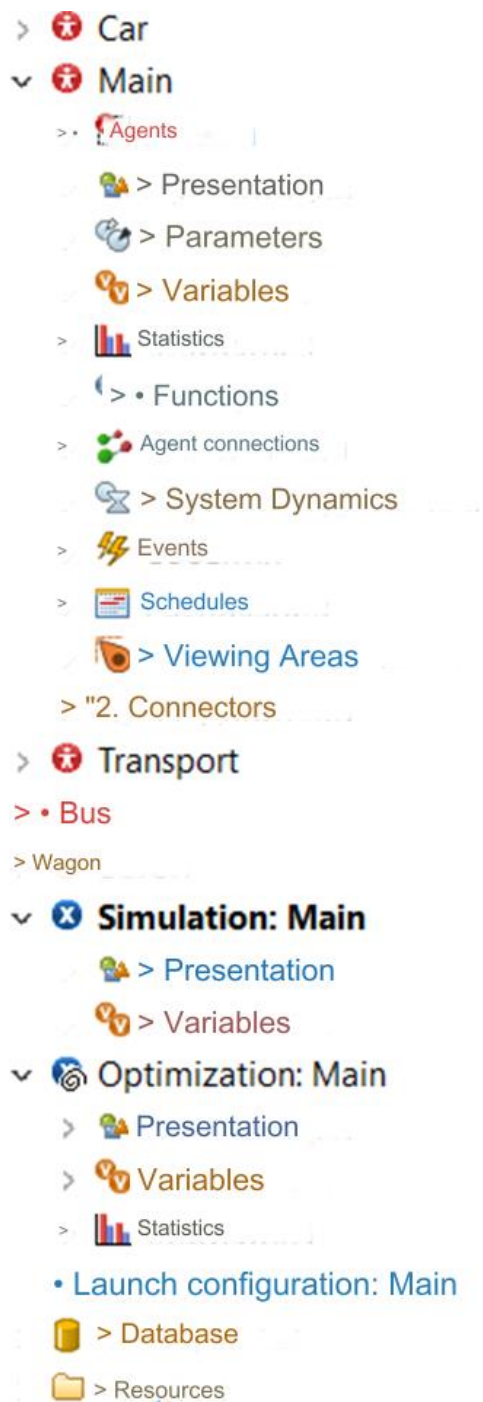


Рисунок 1.11. Складові проєкту

РОЗДІЛ 2. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

2.1. Опис об'єктів імітаційної моделі

Моделювання виконується на навчальній вибірці, виділеній спеціально для об'єкту дослідження. Найкращі результати були досягнуті з такими параметрами: регуляризаційний параметр дорівнює 1, тип ядра - 'linear', ступінь поліноміальної функції ядра - 3, а коефіцієнт ядра встановлений на 'auto'.

Ця імітаційна модель включає набір фіксованих значень, які представлені в таблиці 2.1 як параметри, а в таблиці 2.2 - як змінні. Модель також містить функції, об'єкти статистичного аналізу, елементи розкладу, а також блоки з бібліотеки для моделювання процесів, які забезпечують багаторівневу деталізацію для проведення різних сценаріїв моделювання.

Таблиця 2.1 - Константні значення імітаційної моделі

Найменування	Тип	Значення	Опис
1	2	3	4
a1	double	60	налаштування інтервалів світлофора, с
b1	double	65	інтервал на перехресті (кільце), с
c1	double	240	інтервал вул. С. Бандери - Протасевича, с
частка об'їзна	double	0.75	частка появи авто, [0..1]
інт.фур.на.об'їзній	double	15	інтенсивність фур, в годині
інт.вант.на.об'їзній	double	7	інтенсивність вантажівок, 1 годинну
заповненість	double	0.8	кількість людей, що визначає заповненість всіх видів транспорту

продовження таблиці 2.1

Найменування	Тип	Значення	Опис
вміст. тролейбусів	int	230	місткість пасажиропотоку тролейбусі
вміст. автобусів	int	110	місткість пасажиропотоку автобусі
вміст. автомобілів	int	5	місткість пасажиропотоку особистий транспорт/автомобіль, згідно з умовою
інтервал руху тролейбуси	double	20	інтервал руху тролейбусів
інтервал руху автобусів	double	5	інтервал руху автобусів
зупинити при досягненні	int	1500	Інтервал руху автобусів, в хв.
зупинити при досягненні	int	36000	Інтервал руху тролейбусів за хв.

Таблиця 2.2. - Змінні імітаційної моделі

Найменування	Тип	Початкове значення	Опис
1	2	3	4
числоЗупинокТранспорту	int	Порожнє	Кількість зупинок транспорту під час руху
пройденоТранспорту	int	Порожнє	Кількість транспорту, який проїхав через перехрестя
перевезеноЛюдейТролейбус	int	Порожнє	Кількість перевезених людей в тролейбусі
перевезено ЛюдейАвтобус	int	Порожнє	Кількість перевезених людей в автобусі
перевезено ЛюдейАвтомобілі	Int	Порожнє	Кількість перевезених людей в автомобілі

всьогоПеревезено	динамічна	всьогоПеревезено = перевезеноЛюддейТролейбус + перевезеноЛюддейАвто + перевезеноЛюддейАвтобус	Загальна кількість перевезених людей через перехрестя
проїхалоТролейбус	int	Порожнє	Кількість тролейбусів
проїхалоАвтобус	int	Порожнє	Кількість автобусів
проїхалоАвто	int	Порожнє	Кількість автомобілів
всьогоПроїхало	динамічна	всьогоПроїхало = проїхалоАвтобус + проїхалоТролейбус + проїхалоАвто	Загальна кількість транспорту що проїхали через досліджуваний об'єкт
післяПеревезено	double	Порожнє	Кількість перевезених людей, год.
післяЧасПроїхало	double	Порожнє	Кількість транспорту, год

Алгоритм роботи програми AnyLogic полягає в побудові моделей за допомогою інтерактивного інтерфейсу, що дозволяє проектувати сценарії для кожного процесу, визначати тригерні події, стани агентів, і налаштовувати параметри для оптимізації. Наприклад, у моделюванні покупців можна задати ряд станів (як-от потенційний покупець, бажання купити та використання продукту) і налаштувати перехід між ними, що базується на подіях, таких як реклама або наявність товару на склад.

Деталі моделювання можна налаштовувати для досліджень у різних галузях - від виробництва до економічної безпеки, а для аналізу результатів AnyLogic підтримує візуалізацію та інтерактивну анімацію, що робить моделі

більш зрозумілими та доступними для презентації різним користувачам.

Функція «формСтатистик» призначена для формування статистики: середнього часу в системі і кількості зупинок машин. Код функції представлений рисунку 2.1.

• formStatistics - Function

Name: ☒ Display name

☐ Exclude

Visibility: ☒ Yes

☒ Action (returns nothing)

☐ Returns value

▼ Arguments

Name	Type
car	Car

Function body

```
double timeInSystem = time() car.startTime;  
statAvgTimeInSystem.add(timeInSystem);  
  
stat Number of stops.add((Transport passed == 0) ? 0  
: numberTransport stops / (double) passedTrans
```

► Specific

► Description

Рисунок 2.1. Функція «формСтатистик»

2.2. Модуль статистика

Для відображення статистики було додано модуль кількох тимчасових графіків, властивості яких наведені на рисунках 2.2–2.18:

- тимчасовий графік (plot), показує середня число зупинок транспорту у системі (рис. 2.2–2.3);
- тимчасовий графік (рис. 2.4 - 2.5), показує середній час машин у системі;
- тимчасовий графік (plot 3), вказує на кількість машин у системі (рис. 2.6–2.7);
- тимчасовий графік (plot4), показує загальну кількість перевезених людей (рис. 2.8-2.9);
- тимчасовий графік (plot5), показує загальну кількість того, хто проїхав в Центр (рис. 2.10-2.11);
- тимчасові графіки (plot2–plot6), показують кількість перевезених пасажирів та кількість транспорту, за годину (рис. 2.12-2.14);
- круговий графік (chart), що визначає загальну кількість перевезених пасажирів (рис. 2.16-2.17);
- круговий графік (chart1), що визначає загальну кількість транспорту, що проїхав (рис. 2.18).

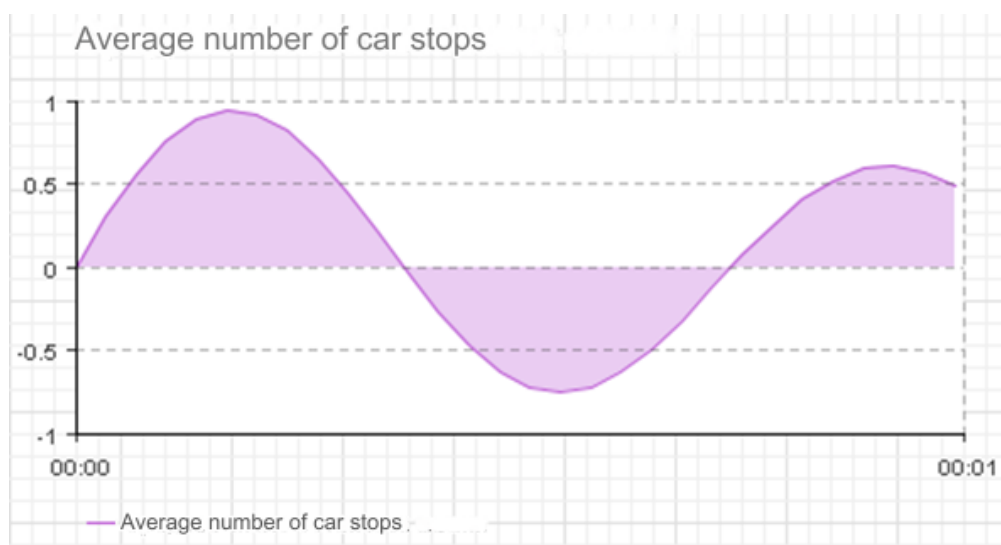


Рисунок 2.2. Властивості тимчасового графіка, plot


plot - Time chart

Name:
☐ Exclude

☒ Displayed on top agent
☐ Block

Data

☒ Meaning
☐ Dataset

Title:

Meaning:

Marker style:

Line thickness: pt

Color:

+

×

↑

↓

Рисунок 2.3. Властивості тимчасового графіка, plot

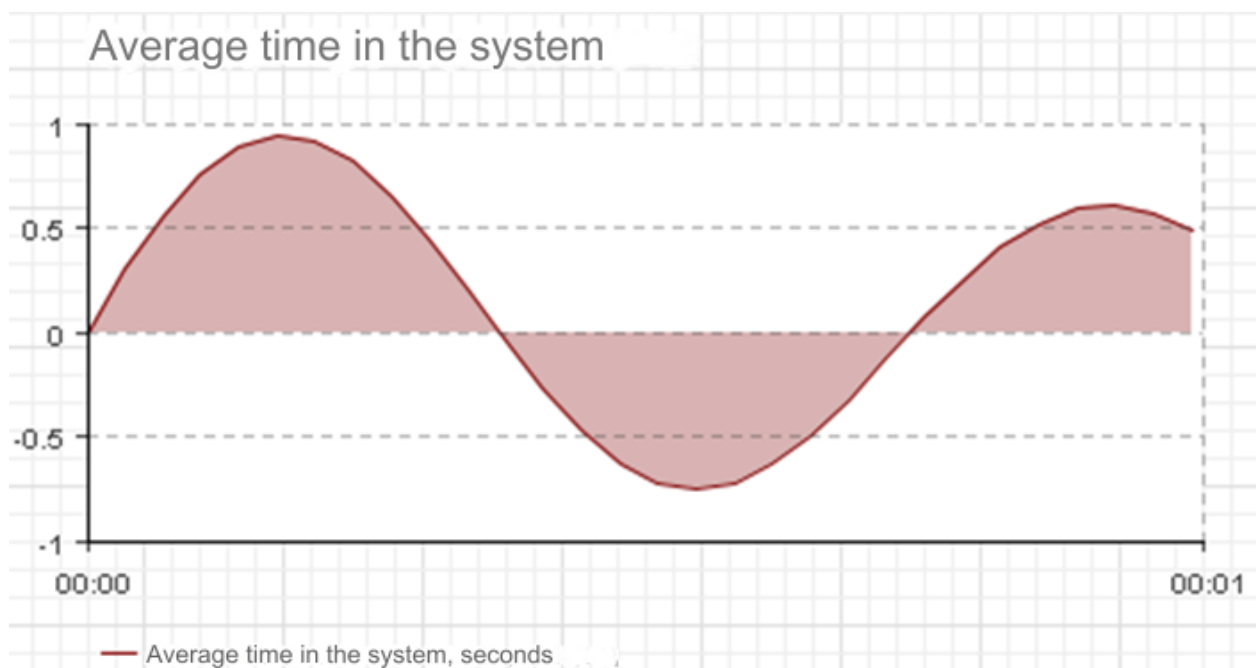


Рисунок 2.4. Властивості тимчасового графіка, plot1

 **plot1 - Time plot**

Name: ☐ Exclude

☒ Displayed on top agent ☐ Block

▼ Data

☒ Meaning ☐ Dataset

Title:

Meaning:

Marker style:

Line thickness: pt

Color:

Рисунок 2.5. Властивості тимчасового графіка, plot1

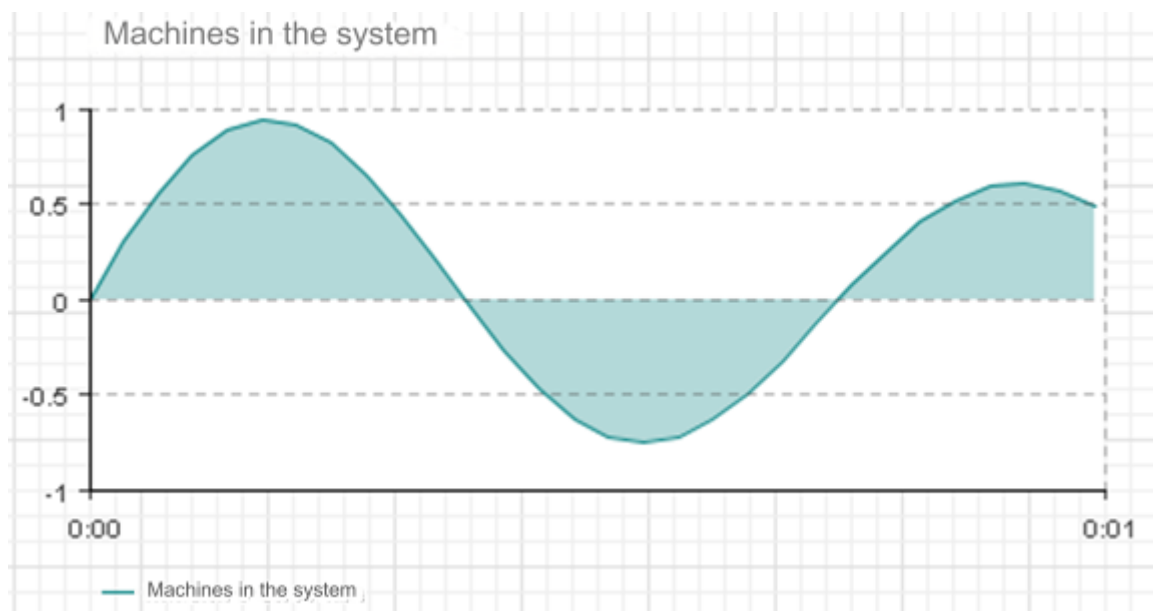


Рисунок 2.6. Властивості тимчасового графіка, plot3

 plot3 - Timeline graph

Name: ☐ Exclude

☒ Displayed on top agent ☐ Block

▼ Data

☒ Meaning ☐ Dataset

Title: Machines

Meaning:

Marker style:

Line thickness: pt

Color:

Рисунок 2.7. Властивості тимчасового графіка, plot3

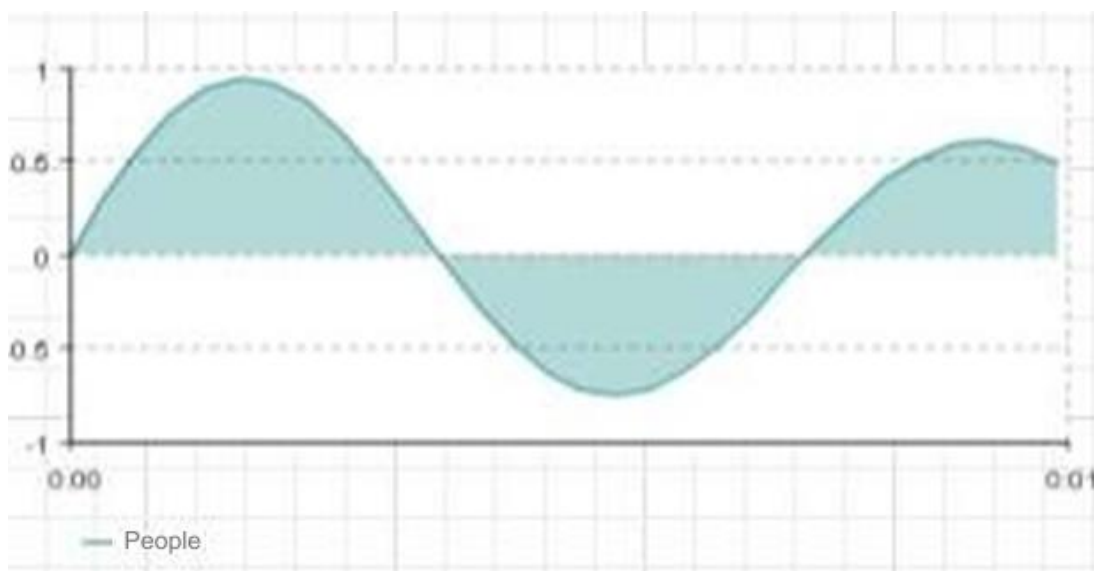


Рисунок 2.8. Властивості тимчасового графіка, plot4


plot4 - Timeline graph

Name:
☐ Exclude

☒ Displayed on top agent
☐ Block

▼ Data

☒ Meaning
☐ Dataset

Title:

Meaning:

Marker style:

Line thickness: pt

Color:






Рисунок 2.9. Властивості тимчасового графіка, plot4

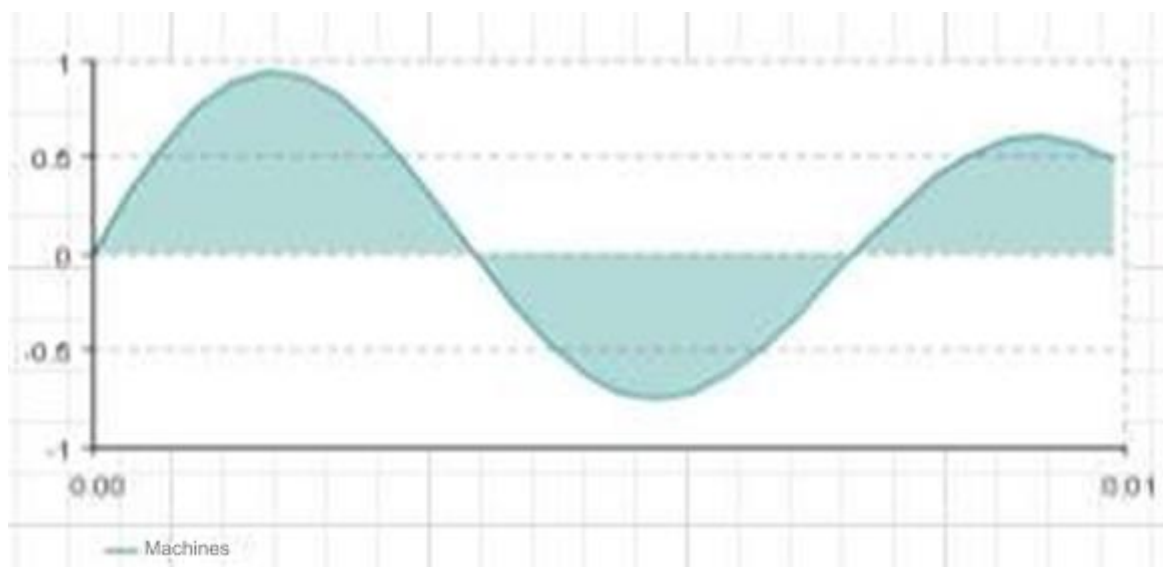


Рисунок 2.10. Властивості тимчасового графіка, plot5

 **plot5 - Timeline graph**

Name: ☐ Exclude ☒ Displayed on top agent

☐ Block

▼ Data

☒ Meaning ☐ Dataset

Title:

Meaning:

Marker style:

Line thickness: pt

Color:

Рисунок 2.11. Властивості тимчасового графіка, plot5

 **plot2 - Timeline graph**

Name: ☐ Exclude ☒ Displayed on top agent

☐ Block

▼ Data

☐ Meaning ☒ Dataset

Title:

Dataset:

Marker style:

Line thickness: pt

Color:

Рисунок 2.12. Властивості тимчасового графіка, plot2–plot6

plot6 - Timeline graph

Name:
☐ Exclude
☒ Displayed on top agent

☐ Block

▼ Data

☐ Meaning
☒ Dataset

Title:

Dataset:

Marker style:

Line thickness: pt

Color:

+
x
↑
↓

Рисунок 2.13. Властивості тимчасового графіка, plot2–plot6

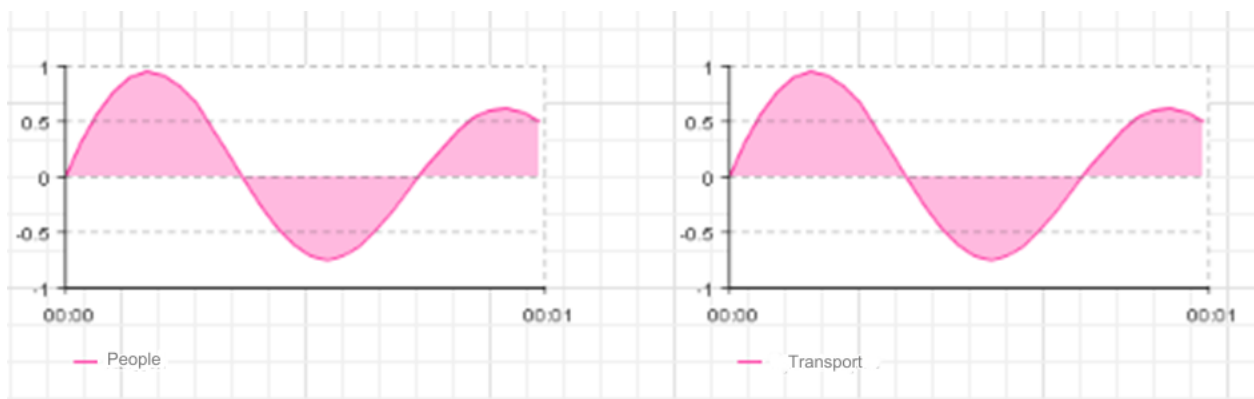


Рисунок 2.14. Властивості тимчасових графіків, plot2–plot6

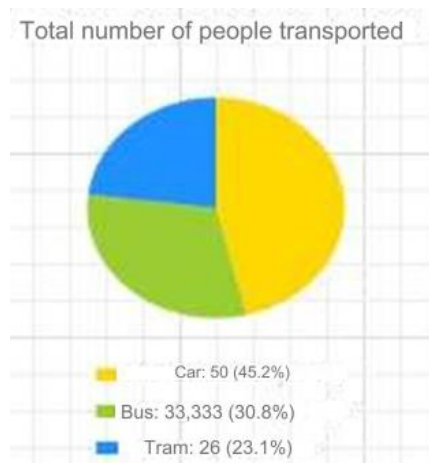


Рисунок 2.15. Властивості кругового графіка, chart

chart - Pie chart

Name: ☐ Exclude ☒ Displayed on top agent

☐ Block

☒ Update data automatically ☐ Do not update data automatically

☒ Use model time ☐ Use calendar dates

First update time: seconds

Date updated:

Period: seconds

▼ Data

Title:

Color:

Meaning:

Title:

Color:

Meaning:

Title:

Color:

Meaning:

Рисунок 2.16. Властивості кругового графіка, chart

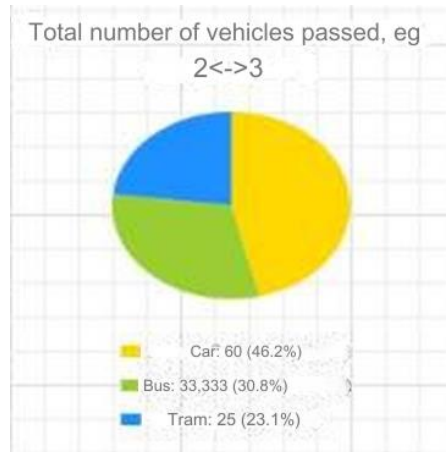


Рисунок 2.17. Властивості кругового графіка, chart1

chart1 - Pie chart

Name: ☐ Exclude ☒ Displayed on the top agent

☐ Block

☒ Update data automatically ☐ Don't update data automatically

☒ Use model time ☐ Use calendar dates

First update time: seconds

Update date:

Period: seconds

Data

Heading: Color: Meaning:

Heading: Color: Meaning:

Heading: Color: Meaning:

Рисунок 2.18. Властивості кругового графіка, chart1

2.3. Моделювання інтенсивності транспортного потоку

Для визначення циклічності додали модуль з розкладом, який дозволив встановити інтенсивність трафіку вранці та ввечері (розклад «Інтенсивність3», («Інтенсивність4»). Цей модуль містить:

- розклад інтенсивності трафіку вранці «ранкова інтенсивність», що відображає потік автомобілів у ранковий час (рис. 2.19);
- розклад інтенсивності трафіку ввечері «вечірня інтенсивність», який відображає вечірній потік автомобілів (рис. 2.20).
- розклад інтенсивності вранці «розклад Інтенсивності3», де формується трафік транспорту з району Східний (рис. 2.21);
- розклад інтенсивності ввечері «Розклад Інтенсивності4», де формується трафік транспорту з Центру (рис. 2.22).

Morning Intensity Schedule - Schedule

Name: ☒ Display name • ☐ Exclude

Visibility: ☒ Yes

▼ Data

Type:

Unit of measurement:

The schedule specifies: ☐ Intervals (Start, End) ☒ Moments of time

Duration: ☐ Week ☒ Days/Weeks ☐ Other (no connection to

Repeat every: d.

☒ Bind to

• Loaded from the database

Table:

Sampling conditions:

Start column:

Value column:

> Action

► Exceptions

▼ Preview

Jump to:

	2022																					
	brya							January														
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
	Thu	Fri	Sat	BC	PH	BT	CP	Thu	NT	Sat					BC	PH	BT	CP	Thu	Fri	Sat	a.c.
0:00	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
1:00	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2:00	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0
3:00	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0
4:00	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0
5:00	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0

Рисунок 2.19. Властивості розклад «Розклад Інтенсивності Увечері»

Intensity3 schedule - Schedule

Name: ☒ Display name ☐ Exclude

Visibility: ☒ Yes

Data

Type:

Unit of measurement:

The schedule specifies: ☐ Intervals (Start, End) ☒ Moments of time

Duration: ☐ Week ☒ Days/Weeks ☐ Other (not linked to calendar)

Repeat every: d.

☒ Bind to

☒ Loaded from the database

Table:

Sampling conditions: Hello

Start column:

Value column:

Рисунок 2.20. Властивості розклад «Розклад Інтенсивності3»

Intensity4 schedule - Schedule

Name: ☒ Display name ☐ Exclude

Visibility: ☒ Yes

Data

Type:

Unit of measurement:

The schedule specifies: ☐ Intervals (Start, End) ☒ Moments of time

Duration: ☐ Week ☒ Days/Weeks ☐ Other (not linked to calendar)

Repeat every: d.

☒ Bind to

☒ Loaded from the database

Table:

Sampling conditions:

Start column:

Value column:

Рисунок 2.21. Властивості розклад «Розклад Інтенсивності3»

Для створення імітаційної моделі використовувалися блоки процесів:

- 1 процес, що визначає напрями руху транспорту в системі з урахуванням ймовірностей технічного завдання (рис. 2.22);
- блок "світлофор" (Traffic Light), що задає режим роботи світлофорів (рис. 2.23);
- блок "roadNetworkDescriptor" (RoadNetworkDescriptor), що визначає і задає статистику машин у системі (рис. 2.24);
- 1 процес, що визначає напрями руху тролейбусів у системі (рис. 2.25);
- 1 процес, що визначає напрямки руху автобусів у системі, з урахуванням розподілу інтенсивності потоку людей (рис. 2.26);
- додатковий процес, визначає напрями руху особистого транспорту (рис. 39).

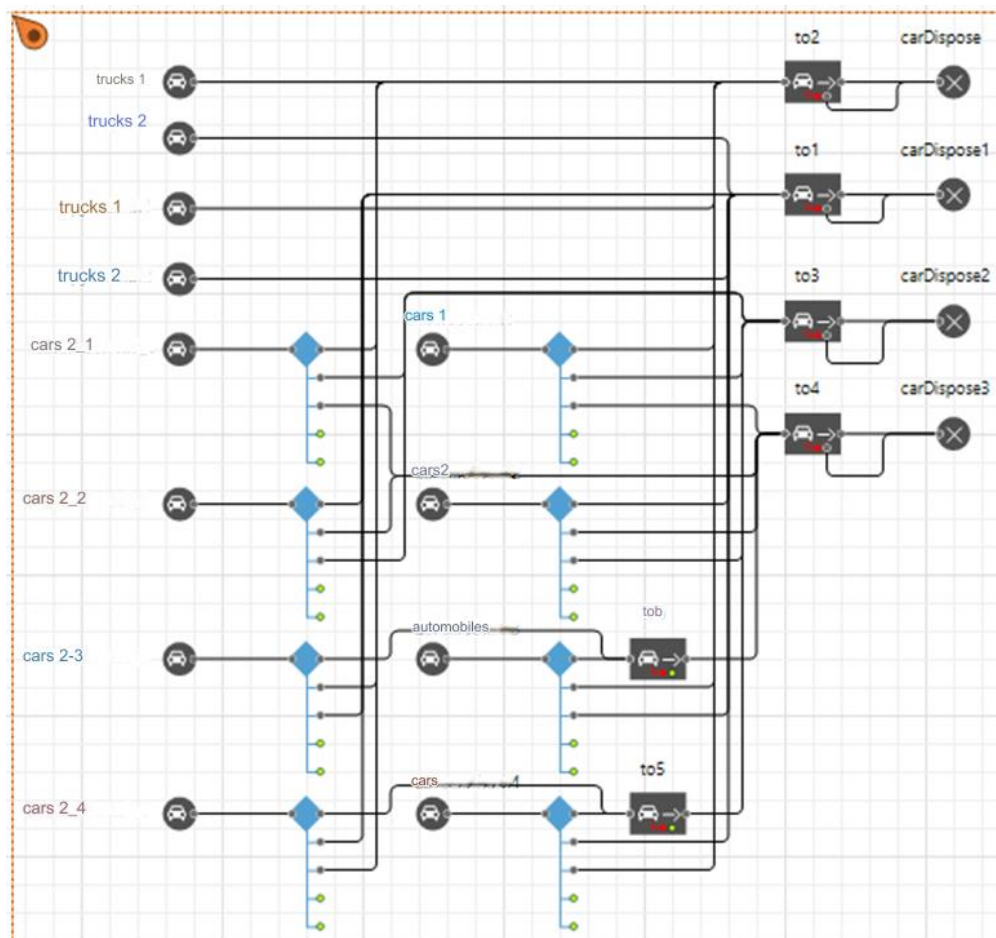


Рисунок 2.22. Процес, який визначає напрямки руху транспорту

6 : traffic light - Traffic Light

Name:

☒ Display name ☐ Exclude

Sets the operating mode for: ☐ Stop lines at intersections ☐ Lane connectors at intersections ☒ Set stop lines

Phases:

Stop lines:	a1	5	b1	5	c1	5
stopLine20	Green	Yellow	Red	Yellow	Red	Yellow
stopLine21	Green	Yellow	Red	Yellow	Red	Yellow
stopLine19	Green	Yellow	Red	Yellow	Red	Yellow
stopLine5	Green	Yellow	Red	Yellow	Red	Yellow
stopLine7	Green	Yellow	Red	Yellow	Red	Yellow
stopLine9	Green	Yellow	Red	Yellow	Red	Yellow
stopLine16	Red	Yellow	Green	Yellow	Green	Yellow
stopLine3	Red	Yellow	Green	Yellow	Green	Yellow
stopLine12	Red	Yellow	Red	Yellow	Green	Yellow

Actions

Specific

Description

Рисунок 2.23. Блок «світлофор», Traffic Light

roadNetworkDescriptor - RoadNetworkDescriptor

Name:

☒ Display name ☐ Exclude

Road network:

Length of road section: M

Traffic jam map

Show traffic jams: ☐

Actions

When logging into the network:

When leaving the network:

When entering the road:

When leaving the road:

When entering an intersection:

When exiting an intersection:

When changing lanes:

When stopping:

Рисунок 2. 24. Блок "roadNetworkDescriptor", RoadNetworkDescriptor



Рисунок 2.25. Процес, який встановлює напрямки руху тролейбусів у системі

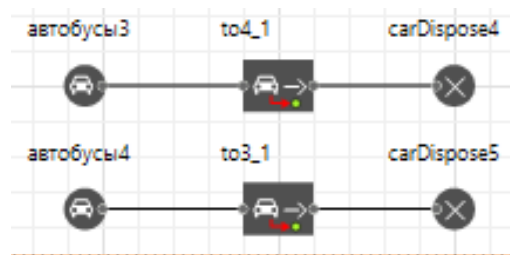


Рисунок 2.26. Процес, який визначає напрямки руху автобусів у системі

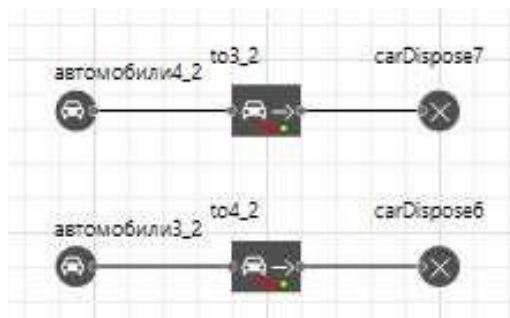


Рисунок 2.27. Додатковий процес, який визначає напрями руху на особистому транспорті

Подія «година» використовується для визначення таких параметрів, як «всьогоПеревезено» і «Всього проїхало». Код події показаний на рисунку 2.28.

4 hour - Event

Name: ☒ Display name ☐ Exclude

Visibility: ☒ Yes

Event type:

Mode:

☒ Use model time ☐ Use calendar dates

First response time (abs.):

Response time:

Period:

☒ Keep a log in the database
Keep a log of the model execution

▼ Action

```

transportedhour.add(total Transported-lastHour Transported);
lastHour Transported total Transported;
passedHour.add(total Passed-lastHour Passed);
lastHour Passed in total Passed;

```

Рисунок 2.28. Подія «година»

2.4. Візуалізація імітаційної моделі та результати моделювання

Для наочності процесів було створено анімацію імітаційної моделі з додаванням кількох фігур. Для створення анімації моделі використовувалися такі фігури, як:

- прапорець (checkbox) – для відображення карти заторів у просторі, що моделюється;
- дорога (Road) і перехрестя (Intersection) - для демонстрації напрямку руху транспорту;

- стоп-лінії (stopLine) - для моделювання сигнальних вказівок світлофорів;
- 3D Об'єкти.

Для демонстрації роботи імітаційною моделі була додано можливість керування такими ресурсами (рис. 2.29):

The interface displays several control parameters for a simulation:

- Interval, sec. (3-4):** 29.0
- Interval, sec. (ring):** 72.0
- Interval, sec. (1-2):** 109.0
- * Explanation of symbols:**
 - 1 - Svetlorechenskaya st.
 - 2 - Amundsen st.
 - 3 - Academic
 - 4 - Center
- Intensity of trucks on the bypass, per hour:** 15.0
- Truck intensity on the bypass, per hour:** 7.0
- Share of car appearance on the bypass, [0..1]:** Slider set at approximately 0.85
- Tram interval, min.:** 20.0
- Bus interval, min.:** 5.0
- Max. vehicle capacity, persons:** 5
- Max. capacity of tram, persons:** 230
- Max. bus capacity, persons:** 110
- Avg. transport occupancy, [0..1]:** Slider set at approximately 0.9

Рисунок 2.29. Можливість управління ресурсами

При заданих параметрах, представлених на рисунку 2.29, було проведено моделювання транспортної системи (протягом доби), під час якого розроблена імітаційна модель показала такі результати моделювання (рис. 2.30-2.31):

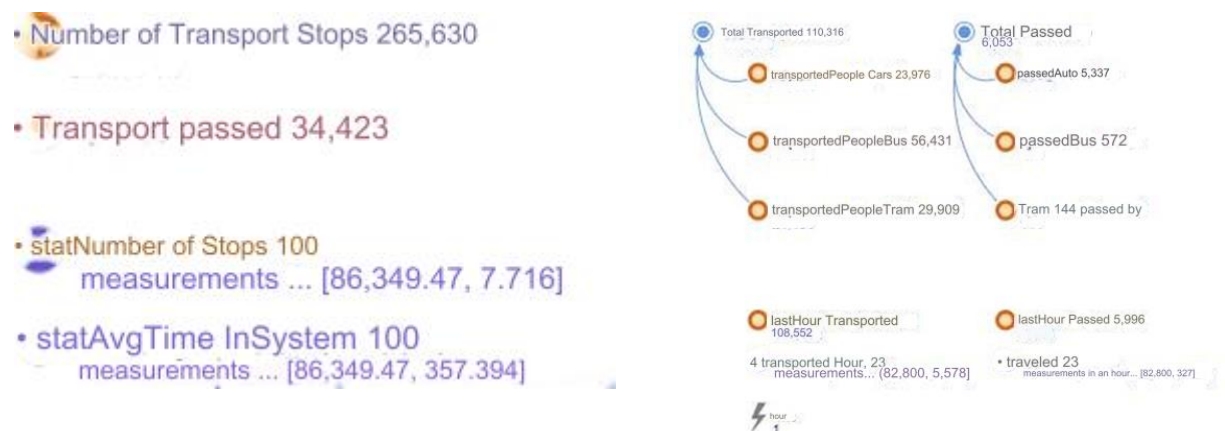


Рисунок 2.30 – Результат моделювання

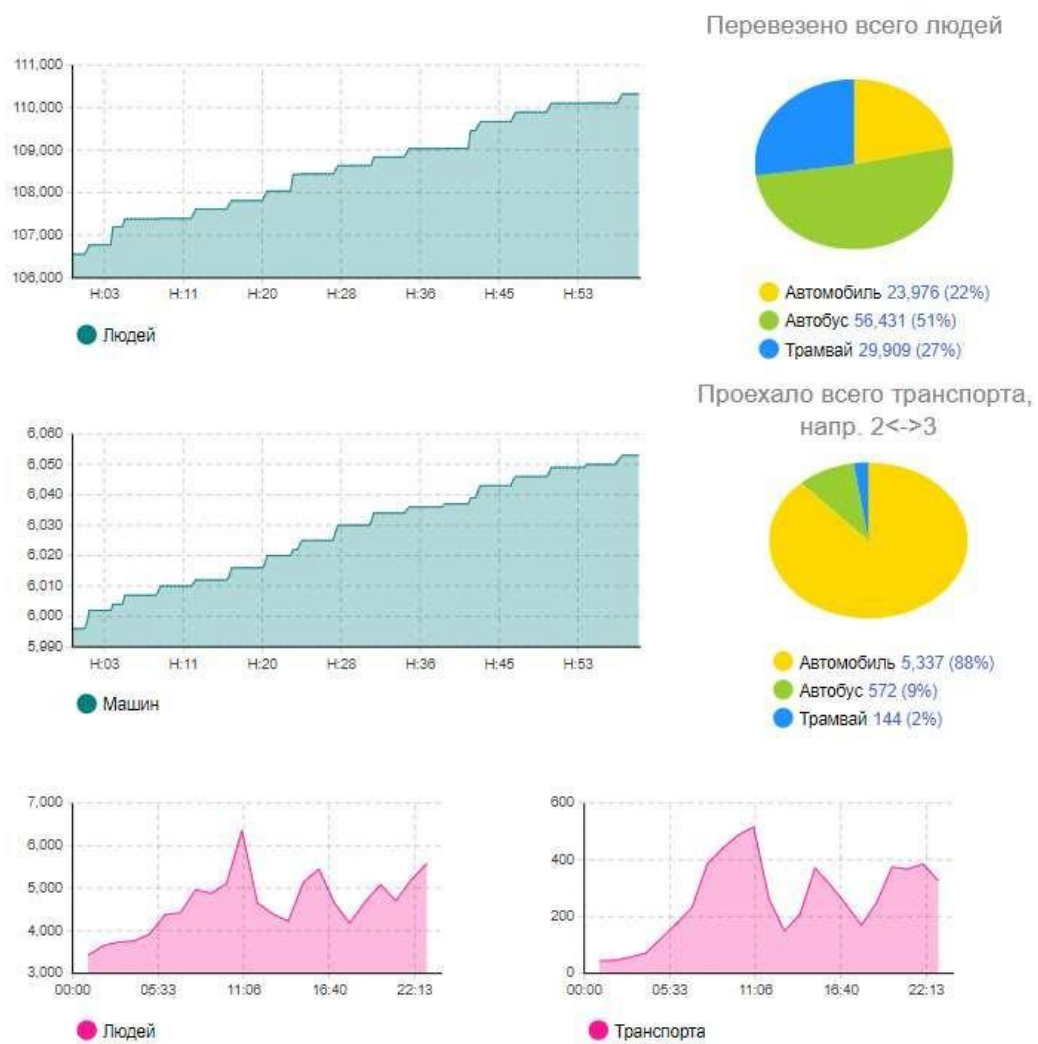


Рисунок 2.31.- Статистика імітаційною моделі

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕННЯ

3.1. Планування експерименту

Для того, щоб покращити продуктивність системи, необхідно знайти значення параметрів, при яких досягається найкращий результат роботи моделі, а також детальніше вивчити поведінку моделі за різних умов. Скористаємося методом оптимізації.

Процес оптимізації моделі полягає у виконанні кількох запусків імітаційної моделі з різними значеннями параметрів та знаходження оптимальних (з урахуванням заданих обмежень) значень параметрів (при яких досягається оптимальне значення заданої цільової функції).

Виходячи з умов задачі проектування, необхідно знайти оптимальні параметри роботи перехрестя, для цього проведемо оптимізацію транспортних потоків, зокрема налаштування значень інтервалів за напрямом руху: a_1 , інтервал східний - центр, с; b_1 , інтервал на перехресті (кільце); c_1 , інтервал вул. Підволочиське шосе – 15 квітня, сек.

На рисунку 3.1 представлені властивості оптимізаційного експерименту:

Optimization - Optimization experiment

Name: ☐ Exclude

Top Level Agent:

Objective function: ☒ minimize ☐ maximize

☒ Number of iterations:

☒ Automatic stop

Maximum memory size: M6

Parameters

Parameters:

Parameter	Type	Meaning			
		Min.	Max.	Step	Starting...
a1	discrete	20	120	1	120
b1	discrete	20	120	1	120
c1	discrete	20	120	1	120
share...one	fixed...	0.75			
intF...dnoy	fixed...	15			
intGr...dnoy	fixed...n 7	/			
inter...vaev	fixed...	20			
inter...buses	fixed... 5				
together...vaev	fixed...	230			
instead of...mustache	fixed...	110			
vmes...iley	fixed... 5				
fullness	fixed...	0.8			
remaining...	fixed...	1500			
rest...nii 1	fixed...	3600			

Model time

Stop:

Рисунок 3.1. Властивості оптимізаційного експерименту

У ході виконання оптимізаційного експерименту, модельний час однієї ітерації становить 24 години. На рисунку 3.2 представлені результати оптимізації:



Рисунок 3.2. Результати оптимізації, час ітерації - 24 години

Після завершення процесу оптимізації моделі були отримані найбільш оптимальні значення функціоналу. У результаті експеримент видав такі значення параметрів: a1: 30; b1: 65; c1: 85.

Застосуємо отримані значення параметрів та виконаємо симуляцію моделі. На рисунках 3.3-3.4 подано результати моделювання з оновленими параметрами інтервалів (статистика):

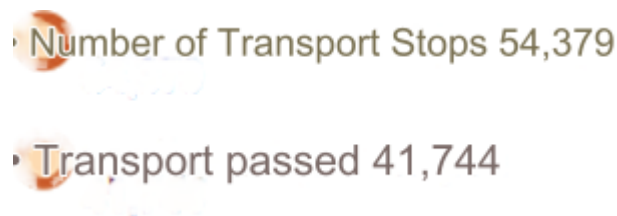


Рисунок 3.3. Результати моделювання з оновленими параметрами інтервалів

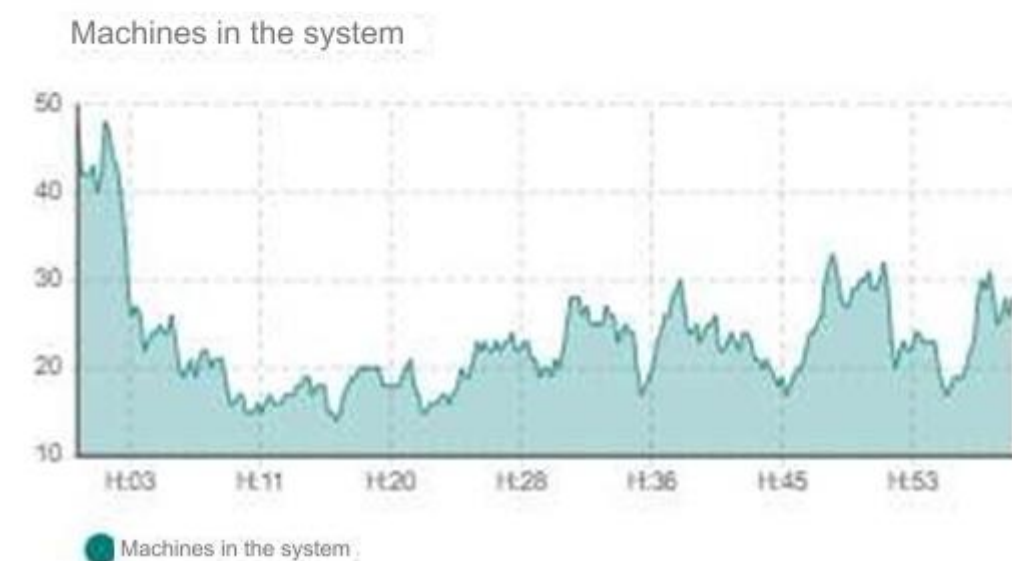
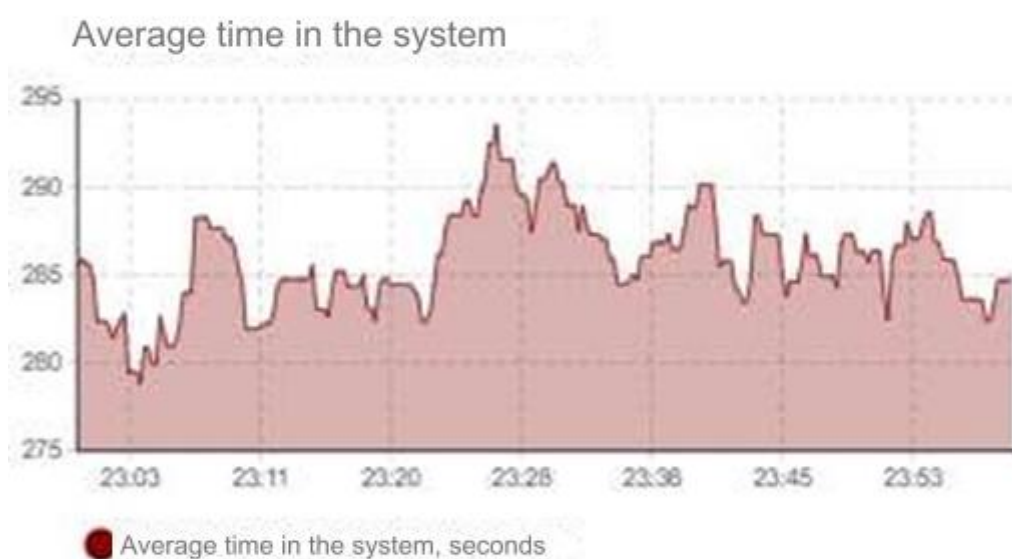


Рисунок 3.4. Статистика результатів моделювання з оновленими параметрами інтервалів

Виходячи з представлених даних можна зробити висновок, що після процесу оптимізації моделі було знайдено найбільш оптимальні значення функціоналу, і результати показали:

- число пройденого транспорту зросло з 34.665 до 41.744, кількість зупинок скоротилася з 61.748 до 54.379, що говорить про кращу роботу перехрестя;

- середня кількість зупинок машин так само знизилася і дорівнювала 1.32, середній час машин у системі знизився до 270 секунд.

3.2. Проведення експерименту

Також, крім проведення оптимізаційного експерименту, необхідно провести ряд інших експериментів. Тим самим необхідно варіювати такими параметрами, як:

- налаштування інтервалів світлофорів;
- частка появи авто на об'їзний;
- кількість людей, які перетнули перехрестя на автомобілі/тролейбусі/автобусі;
- оцінка необхідного кількості автобусів і тролейбусів;
- оцінка впливу громадського транспорту на трафік перехрестя;
- інтенсивність появи великогабаритних ТЗ і вантажівок на об'їзний.

У таблиці 3.1 представлені: номер експерименту, параметр, який буде змінюватись, поточне значення, засноване на номері експерименту.

Таблиця 3.1. Результати проведених експериментів

Експеримент	Параметр	Значення
1	2	3
№1	Налаштування інтервалів світлофорів, с	a1: 84 b1: 65 c1: 200
	Частка появи авто, [0..1]	0.65
	Інтенсивність появи великогабаритних ТЗ на об'їзний, година	12
	Інтенсивність появи вантажівок на об'їзну, год.	7
	Інтервал руху тролейбусів, хв	15
	Інтервал руху автобусів, хв	7
№2	Налаштування інтервалів світлофорів, с	a1: 60 b1: 80 c1: 180
	Частка появи авто, [0..1]	0.80
	Інтенсивність появи великогабаритних ТЗ на об'їзний, год.	17
	Інтенсивність появи вантажівок на об'їзну, год.	9
	Інтервал руху тролейбусів, хв	25
	Інтервал руху автобусів, хв	10
№3	Налаштування інтервалів світлофорів, с	a1: 75 b1: 40 c1: 220
	Частка появи авто, [0..1]	0.72
	Інтенсивність появи великогабаритних ТЗ на об'їзний, год.	11
	Інтенсивність появи вантажівок на об'їзну, год.	9
	Інтервал руху тролейбусів, хв	17
	Інтервал руху автобусів, хв	8
№4	Налаштування інтервалів світлофорів, с	a1: 40 b1: 80 c1: 170
	Частка появи авто, [0..1]	0.73
	Інтенсивність появи великогабаритних ТЗ на об'їзний, год.	13
	Інтенсивність появи вантажівок на об'їзну, год.	8
	Інтервал руху тролейбусів, хв	18
	Інтервал руху автобусів, хв	12

№5	Налаштування інтервалів світлофорів, с	a1: 36 b1: 30 c1: 100
	Частка появи авто, [0..1]	0.65
	Інтенсивність появи великогабаритних ТЗ на об'їзний, год.	12
	Інтенсивність появи вантажівок на об'їзну, годину	7
	Інтервал руху тролейбусів, хв	20
	Інтервал руху автобусів, хв	14
№6	Налаштування інтервалів світлофорів, с	a1: 40 b1: 40 c1: 190
	Частка появи авто, [0..1]	0.85
	Інтенсивність появи великогабаритних ТЗ на об'їзний, год.	14
	Інтенсивність появи вантажівок на об'їзну, год.	9
	Інтервал руху тролейбусів, хв	22
	Інтервал руху автобусів, хв	11
№7	Налаштування інтервалів світлофорів, с	a1: 43 b1: 33 c1: 150
	Частка появи авто, [0..1]	0.95
	Інтенсивність появи великогабаритних ТЗ на об'їзний, год.	16
	Інтенсивність появи вантажівок на об'їзну, год.	10
	Інтервал руху тролейбусів, хв	24
	Інтервал руху автобусів, хв	16
№8	Налаштування інтервалів світлофорів, с	a1: 50 b1: 50 c1: 210
	Частка появи авто, [0..1]	0.99
	Інтенсивність появи великогабаритних ТЗ на об'їзний, год.	20
	Інтенсивність появи вантажівок на об'їзну, год.	13
	Інтервал руху тролейбусів, хв	26
	Інтервал руху автобусів, хв	15

продовження таблиці 3.1

№9	Налаштування інтервалів світлофорів, с	a1: 46 b1: 36 c1: 120
	Частка появи авто, [0..1]	0.75
	Інтенсивність появи великогабаритних ТЗ на об'їзний, год.	12
	Інтенсивність появи вантажівок на об'їзну, год.	9
	Інтервал руху тролейбусів, хв	22
	Інтервал руху автобусів, хв	16
№10	Налаштування інтервалів світлофорів, с	a1: 49 b1: 39 c1: 130
	Частка появи авто, [0..1]	0.8
	Інтенсивність появи великогабаритних ТЗ на об'їзний, год.	14
	Інтенсивність появи вантажівок на об'їзну, год.	11
	Інтервал руху тролейбусів, хв	23
	Інтервал руху автобусів, хв	15
№11	Налаштування інтервалів світлофорів, с	a1: 31 b1: 75 c1: 115
	Частка появи авто, [0..1]	0.8
	Інтенсивність появи великогабаритних ТЗ на об'їзний, год.	16
	Інтенсивність появи вантажівок на об'їзну, год.	8
	Інтервал руху тролейбусів, хв	23
	Інтервал руху автобусів, хв	6

У таблицях 3.2 та 3.3 представлені результати моделювання при проведенні експериментів.

Таблиця 3.2. Результати моделювання експериментів 1-6

Параметр	Експеримент, №					
	1	2	3	4	5	6
Число зупинок транспорту	121.374	219.428	28.153	934.48	43.601	59.214
Пройдено транспорту через перехрестя	7.859	15.148	4.075	34.070	5.862	5.860
Середня кількість зупинок машин	15.427	14.485	6.828	27.428	7.309	10.068
Середній час машин у системі, секунд	577.224	5.427,467	4.497,04	217.18	2.614,7	3.774,84
Загальна кількість перевезених людей	36.302	40.891	22.332	80.130	32,698	20.940
Загальна кількість транспорту, що проїхав	1.556	3.038	655	5.639	1.177	897
Помилка в системі при досягненні 1.500 автомобілів	так	так	так	ні	так	так

Таблиця 3.3. Результати моделювання експериментів 7-11

Параметр	Експеримент, №				
	7	8	9	10	11
Число зупинок транспорту	56.762	45.283	45.948	46.386	137.218
Пройдено транспорту через перехрестя	4.735	6.107	6.385	6.629	25.190
Середня кількість зупинок машин	25.356	7.892	7.903	8.030	5.447
Середній час машин в системі, секунд	219.052	2.915,348	2.941,512	2.998	3.106,356
Загальна кількість перевезених людей	86.027	34.547	36.617	37.513	38.561
Загальна кількість транспорту, що проїхав	796	6.743	6.976	6.593	7.149
Помилка в системі при досягненні 1.500 автомобілів	так	ні	ні	ні	ні

Таким чином, в результаті проведення експериментів було виявлено, що параметри, які були вихідними, не є найкращими.

В результаті експерименту №11 були отримані кращі результати в порівнянні з іншими експериментами. Виходячи з цього, було прийнято рішення порівнювати результати експерименту з вихідними даними та з результатами експерименту №11.

У таблиці 3.4 представлено порівняння результатів експерименту №11 та експерименту з вихідними даними.

Таблиця 3.4 - Порівняння результатів (експерименти: з вихідними даними і №11)

Параметр	Експеримент з вихідними даними	Експеримент №11
Число зупинок транспорту	265.630	137.218
Пройдено транспорту через перехрестя	34.423	25.190
Середнє число зупинок	7.717	5.447
Середній час машин в системі, секунд	301	3.106,356
Загальна кількість перевезених людей	110.316	38.561
Загальна кількість транспорту, що проїхав через перехрестя	6.053	7.149

Найгірший результат показав експеримент №1, під час якого на перехресті постійно виникали затори, що призводило до утворення черг і свідчило про низьку ефективність роботи. Це підкреслює, що скорочення часу налаштування світлофорів може покращити прохідність транспорту, зменшити кількість зупинок і збільшити потік через перехрестя. Особливо важливим напрямком для таких налаштувань є вулиця Підволочиське шосе – вул. Т. Протасевича, де оптимізація світлофорів матиме найбільший вплив.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Вплив дорожньо-транспортних ситуацій на безпеку людини

Безпека життєдіяльності розглядає питання охорони праці, довкілля та екології. Завдання забезпечення безпеки життєдіяльності людини зводяться до теоретичного аналізу небезпечних та шкідливих чинників у місці існування людини, комплексній оцінці багатфакторного впливу небезпечного і шкідливого впливу на здоров'я людини та прогнозуванню надзвичайних ситуацій. У межах практичних завдань з охорони праці та безпеки життєдіяльності входять завдання забезпечення безпеки дорожнього руху (БДР) та запобігання дорожньо-транспортним пригодам (ДТП) та їх наслідкам.

Поряд із позитивною роллю, яку автомобільний транспорт відіграє у розвитку економіки, існують і негативні чинники, пов'язані з процесом автомобілізації. До них відносяться забруднення довкілля, містобудівні проблеми, пов'язані з виділенням міського простору для руху і стоянок транспортних засобів, ріст дефіциту нафтопродуктів тощо. До найбільш негативних чинників процесу автомобілізації належать дорожньо-транспортні пригоди та їх наслідки, що характеризуються загибеллю та пораненням людей, матеріальними збитками від пошкодження транспортних засобів, вантажів, дорожніх або інших споруд, виплатою відшкодування у зв'язку з інвалідністю та тимчасовою непрацездатністю тощо.

У більшості випадків розроблення заходів, спрямованих на підвищення

БДР, базується на ретельному аналізі причин та умов виникнення ДТП, прогнозуванні розвитку ситуації, а також визначенні найбільш ефективних напрямів боротьби з аварійністю.

4.2. Стомлення, його причини та психофізіологічні механізми

Проблема стомлення є вельми складним науково-практичним питанням, яке досліджують представники різних наук – фізіологи, психологи та інші спеціалісти.

Втома – сукупність тимчасових змін у фізіологічному і психічному стані людини, які з’являються внаслідок напруженої чи тривалої діяльності і призводять до погіршення її кількісних та якісних показників. Стан втоми залежить від звички людини до фізичного та розумового напруження. Якщо таких звичок немає, то втома може настати на самому початку роботи. Суб’єктивне відчуття втоми називається змореністю (стомленістю).

Стомлення проявляється в різних сферах. Тому розрізняють техніко-економічні, фізіологічні, психологічні і медичні ознаки стомлення.

До числа техніко-економічних ознак втоми входять зниження виробітку, зростання браку й інше. До фізіологічних ознак – зменшення витривалості, тремтіння у пальцях, подовження часу зорово-моторної реакції, зростання температури шкіри голови і рук, інші показники. Психологічні ознаки втоми – це відчуття змореності, загальмованість психічних процесів, інші ознаки. Медичними показниками стомлення є травматизм і виробничо-обумовлені захворювання.

Стомлення за своєю біологічною суттю є нормальним фізіологічним процесом, який супроводжується певними змінами функціонального стану і

виконує захисну роль в організмі, оберігаючи його від надмірного перенапруження і можливого, у зв'язку з цим, ураження і виснаження.

Перенапруження визначається як несприятливий, граничний між нормою і патологією функціональний стан окремих фізіологічних систем або органів, зумовлений надмірними або тривалими навантаженнями або напруження цих систем або органів. У результаті перенапруження знижується резистентність організму людини до різноманітних несприятливих впливів.

Виникнення втоми обумовлено багатьма причинами, які можуть бути неоднаковими при різній діяльності людини. В одних випадках зниження працездатності залежить від зменшення енергетичних запасів, в інших цей фактор не має жодного значення.

Зниження працездатності при втомі обумовлюється змінами у проведенні нервових імпульсів через синапси у центральній нервовій системі та у м'язах.

У працюючих м'язах також можуть знижуватись запаси енергетичних речовин. Окрім того, стомлююча робота призводить до зниження активності ферментів, які каталізують хімічні реакції.

Таким чином, причини стомлення складні і різноманітні.

Втома після важкої, але потрібної людині праці супроводжується позитивним емоційним станом.

Розрізняють фізичне і розумове стомлення. Крім того, виділяють первинну втому, яка розвивається досить швидко, на початку робочого дня і є ознакою недостатнього закріплення трудових навичок. Вона переборюється у процесі праці, в результаті чого виникає «друге дихання» – значне підвищення працездатності. Розрізняють вторинну, або таку, що повільно розвивається, втому – власне стомлення, яка виникає приблизно через 2,5-3 години від початку роботи та для зняття якої необхідний відпочинок.

У зв'язку зі змінами психічного стану ряд психофізіологів пропонують виділяти три стадії втоми. На першій стадії прояв відчуття стомленості є

незначним, продуктивність праці не знижена; друга стадія характеризується значним зниженням продуктивності праці та вираженими психічними змінами (дефекти пам'яті і мислення, ослаблення волі, витримки, самоконтролю); третя стадія оцінюється як гостра перевтома.

Головними ознаками перевтоми при фізичній діяльності є тимчасова відмова від роботи в результаті порушення функціонування хоч би однієї з чисельних ланок рухової системи. Чим вища потужність виконуваної роботи, тим вища вірогідність того, що такою ланкою буде нервово-м'язовий апарат.

4.3. Основні причини скоєння дорожньо-транспортних пригод та безпека учасників ДР

До основних причини скоєння дорожньо-транспортних пригод варто віднести:

- керування ТЗ у стані сп'яніння (в середньому до 12-18 %);
- недодержання дистанції (до 5% від загальної кількості ДТП);
- перевищення допустимої швидкості руху ТЗ (до 40%);
- виїзд на смугу де рухається зустрічний транспорт (до 10 %);
- порушення правил проїзду залізних дорожніх перехресть (до 10%).

Причини та умови, які сприяють зростанню ДТП:

- низький рівень дорожньої дисципліни в учасників руху;
- недостатні навички водійської майстерності;
- поганий стан вулично-шляхової мережі;
- недостатній рівень упровадження у практичне застосування новітніх технологій і технічних засобів організації дорожнього руху, перш за все у містах з великим населенням;
- низька ефективність нагляду за дотриманням учасниками дорожнього

руху правил та вимог безпеки;

- неналежний технічний стан автомобільного парку, де залишається великою частка старих транспортних засобів, які являють собою об'єктивну загрозу безпеці руху.

Сучасні автомобілі здатні рухатися зі швидкостями значно більшими 100 км/год. Але сенсорна система людини пристосована до швидкості руху пішки, в кращому випадку – швидкості кінного руху. Тому з точки зору найбільш продуктивної роботи сенсорної сфери (прийому інформації, її переробки, впровадження в дію прийнятих рішень) швидкість не повинна перевищувати 60 км/год. Із зростанням швидкості руху кількість сприйнятої інформації зменшується, що в умовах щільного транспортного потоку, при маневруванні, при наявності пішохідного руху стає небезпечним, підвищуючи ризик виникнення аварійних ситуацій і ДТП.

При ДТП (зустрічному зіткненні або наїзді на нерухому перешкоду) виникають значні прискорення та відповідно й перевантаження.

За даними фахівців, шанс водія залишитися живим при ДТП, якщо автомобіль рухався зі швидкістю 115 км/год, дорівнює нулю. Якщо прийняти ризик загибелі пасажирів при ДТП при швидкості руху 65 км/год за 1, то при швидкості 85 км/год він буде дорівнювати 1,5; при швидкості 96 км/год – 2,5; при 112 км/год – 6, при 128 км/год – 20. Звичайно, що в разі ДТП із зростанням швидкості зростають і матеріальні втрати від пошкодження транспортних засобів.

Під високою швидкістю фахівці мають на увазі рух із швидкістю, близьку або таку, що перевищує безпечну для даної дорожньої обстановки та конкретного водія.

Безпечна швидкість руху залежить від багатьох факторів, але в найзначнішій мірі – від надійності водія. Саме від водія вимагається під час руху обирати безпечну швидкість.

Отже, висока, небезпечна швидкість може бути 40-60 км/год для одних умов, для інших – 80 – 100 км/год і більше.

Під час руху на великих швидкостях утруднено сприйняття об'єктів на дорозі й у просторі біля дороги, тому збільшується час реакції та гальмівний шлях (при швидкості руху 50 км/год гальмівний шлях становить близько 15 м, при 100 км/год – близько 60 м). Збільшення часу реакції та гальмівного шляху в умовах збільшення швидкості руху призводить до збільшення ймовірності наїздів на перешкоди, пішоходів, попутні зіткнення тощо.

Особливості сприйняття під час руху з великою швидкістю:

1. Просторове сприйняття різко обмежене, так як звужується поле зору.
2. Водії позбавлені свободи маневру.
3. Водій змушений працювати у нав'язаному йому темпі, так як уся дорожня інформація пред'являється йому на обмежений час.

Надійність керування на великій швидкості залежить від вміння водія прогнозувати розвиток дорожньої обстановки; вміння організувати спостереження за дорожньою обстановкою, тобто вчасно отримувати потрібну інформацію та відкидати таку, яка не має відношення до забезпечення безпеки руху; вміння вчасними діями попереджати небезпечний розвиток обстановки на дорозі.

Під час руху на великих швидкостях у щільному транспортному потоці на ділянках з обмеженою пропускною здатністю виграш часу як правило незначний, тоді як вірогідність ДТП багаторазово збільшується.

При організації дорожнього руху необхідно враховувати, що безпечними швидкостями є лише такі, які забезпечують водію оптимальне нервово-емоційне та інформаційне навантаження. Причому потрібно врахувати психологічний фактор обмеження: незрозумілі, невиправдані обмеження не тільки не виконують поставленої мети, а й провокують порушення водіями введених обмежень. Водії за таких умов не будуть виконувати не тільки згаданих обмежень, а й взагалі збудуть з недовірою ставитися до усіх заходів по організації руху.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Імітаційне моделювання є головним інструментом конструювання складних економічних процесів та систем. Перевагою є те, що в моделі можна керувати часом, а саме якщо процес швидкоплинний – уповільнювати його, а якщо процес повільно змінюється – прискорювати час. Можливість імітації поведінки об'єктів, із якими неможливо чи небезпечно робити реальні експерименти.

У процесі виконання кваліфікаційної роботи магістра було спроектовано імітаційну модель руху автомобілів на перехресті у системі AnyLogic. Ця модель імітує роботу дорожньо-транспортної системи. Було проведено аналіз ступеня завантаженості трафіку у певному проміжку часу, додано можливість зміни таких параметрів, як час перемикання світлофорів, інтенсивність появи великогабаритних ТЗ та вантажівок (автомобілів), кількості автомобілів, інтервалу руху тролейбусів та автобусів, а також середньої заповненості транспорту.

Надалі отримана модель може бути змінена відповідно до необхідних умов (завдання).

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Babii, M., Tson, O., Kuchvara, I., & Chernii, V. (2021). Improving the efficiency of the road organization traffic at an unregulated crossroads. *Transport Development*, (1(8), 125-134.
2. <https://anylogic.help/library-reference-guides/road-traffic-library/index.html>
3. Ren, J., Zhao, Q., Liu, B., & Chen, C. (2019). Selection of pallet management strategies from the perspective of supply chain cost with Anylogic software. *PloS one*, 14(6), e0217995.
4. Stupin, A., Kazakovtsev, L., & Stupina, A. (2022). Control of traffic congestion by improving the rings and optimizing the phase lengths of traffic lights with the help of anylogic. *Transportation research procedia*, 63, 1104-1113.
5. Zarte, M., Wunder, U., & Pechmann, A. (2017, October). Concept and first case study for a generic predictive maintenance simulation in AnyLogic™. In *IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 3372-3377). IEEE.
6. Гаврилов Е.В., Дмитриченко М.Ф., Доля В.К. Організація дорожнього руху: Підручник у 5 книгах. Книга 4: Системологія на транспорті. – К.: Знання України, 2011 – 450 с.
7. Зеркалов Д.В., Левковець П.Р., Мельниченко О.І., Дмитрієв О.М. Безпека руху автомобільного транспорту: довідник. - Київ: Основа, 2002. - 360с.
8. І. О. Хітров, О. П. Цьонь, М. Є. Кристопчук, і О. Д. Почужевський, «Аналіз транспортних затримок в центральній частині міста та шляхи їх зниження», ВМТ, вип. 14, вип. 2, с. 131–139, 2021.
9. Кашканов А. А. Організація дорожнього руху : навчальний посібник / А.А. Кашканов, В. П. Кужель. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 125 с.
10. Методичні вказівки для виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів за освітньо-професійною програмою "Транспортні технології

(автомобільний транспорт)" другого рівня вищої освіти спеціальності 275 Транспортні технології (на автомобільному транспорті) денної та заочної форми навчання / уклад.: О.П. Цьонь, У.М. Плекан, Ю.Я. Вовк, В.О. Дзюра, Н.Я. Рожко, М.В. Бабій, А.Й. Матвійшин, І.М. Кучвара; під заг. редакцією У.М. Плекан. М-во освіти і науки Укр., Тернопільський нац. техн. ун-т. ім. І. Пулюя – Тернопіль: ТНТУ, 2021. – 52 с.

11. Михайло Кристопчук, Ігор Хітров, Олег Цьонь, Олег Почужевський. Дослідження координованого управління транспортними потоками в центральній частині міста / Том 1 № 16 (2021): Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. С. 82-90.

12. О.Л. Ляшук, М.Я. Сташків, О.П. Цьонь, Н.Я. Рожко, У.М. Плекан, Б.Р. Гевко. Підвищення ефективності функціонування нерегульованого перехрестя з круговим рухом / Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2023. Вип. 8(39), ч.І. — С. 219-229.

13. Основи безпеки дорожнього руху / А.О. Собакарь, Я.Д. Холмянський, С.М. Тараненко. – К.: Знання, 2007. – 332 с.

14. Потійчук О. Б. Транспортні розв'язки: навч. Посібник / О. Б. Потійчук, Л. М. Піліпака. – Рівне : НУВГП, 2020. – 263 с.

15. Сташків М.Я. Підвищення транспортної безпеки на нерегульованому перехресті з кільцевим рухом / М.Я. Сташків, В.О. Дзюра, О.Б. Романюк, Т.В. Чорний // Матер. XV Міжнар. науково-практичної конф. «Транспортна безпека: правові та організаційні аспекти». – Кривий Ріг, 2020. –с. 248 – 252.

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

17. Навчальний посібник «Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека»» / автор-укладач В.С. Стручок– Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 156 с.

18. І. О. Хітров, О. П. Цьонь, М. Є. Кристопчук, і О. Д. Почужевський, «Аналіз транспортних затримок в центральній частині міста та шляхи їх зниження», ВМТ, вип. 14, вип. 2, с. 131–139, 2021.

19. Н.Я. Рожко, О.Л. Ляшук, М.Я. Сташків, О.П. Цьонь, Б.Р. Гевко
У.М. Плекан Підвищення ефективності функціонування нерегульованого
перехрестя з круговим рухом //Центральноукраїнський науковий вісник.
Технічні науки. 2023. Вип. 8(39), ч.І. — С. 219-229