

22.04.2026).

2. Report: Vehicles on European Roads 2026 [Електронний ресурс] / European Automobile Manufacturers' Association (ACEA). – Режим доступу: <https://acea.auto/publication/report-vehicles-on-european-roads-2026/> (дата звернення: 22.04.2026).

3. Теоретичні основи технічної експлуатації автомобілів: навч. посіб. / О.П. Сакно, В.В. Кривда, О.Г. Ходос; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : ЛІРА, 2025. – 76 с.

4. Офіційний сервісний центр Scania в Дніпрі - ТОВ «ДНІПРО-СКАН-СЕРВІС». ООО «ДНЕПРО-СКАН-СЕРВІС». URL: <https://scania.dp.ua/uk/services-uk/> (дата звернення: 11.04.2026).

5. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал. – Луцьк: ЛНТУ, 2022.– №1(18).– 193 с.

6. Забезпечення енергоефективності трансмісій автомобілів і тракторів при модернізації зі зміною числа циліндрів ДВЗ / М.А. Подригало, А.А. Кашканов, А.А. Коряк // Вісник машинобудування та транспорту №1 (13), 2021. С 102-110.

7. Innovative engines in the history of automobile building / Rozum R.I., Buriak M.V., Zakharchuk O.P. // Modern engineering and innovative technologies Heutiges Ingenieurwesen und innovative Technologien .Issue №18. 2021. Part 2. P. 64-67.

8. Дзядикевич Ю. Пошукове конструювання колісних транспортних засобів Ю. Дзядикевич, О. Захарчук, П. Прогній, М. Микола, П. Попович, О. Шашкевич, Ю. Коваль / Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті // 2021/5/20. Volume 1. Issue 16. С. 54-65.

9. Аулін В.В., Голуб Д.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В. Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. – Кропивницький: Видавець «КОД», 2017. – 370 с.

УДК 656.072

ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ІМІТАЦІЙНОГО ТРАНСПОРТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

В.В. Литвин¹

¹к.т.н., доцент кафедри управління на транспорті, e-mail: lytvyn.v.v@nmu.one

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

Анотація. В дослідженні визначена область застосування імітаційного моделювання та основні етапи розробки імітаційних моделей. Виконано аналіз можливостей, переваг та недоліків сучасних програмних продуктів для прогнозування і оптимізації складних транспортних систем.

Ключові слова: імітаційне моделювання, етапи розробки моделей, транспортні та пішохідні потоки, автомобільні вантажні перевезення, Paramics, PTV VISSIM, PTV VISUM, TransCAD, Transmodeler, AnyLogic, LISA+, AIMSUN.

TRANSPORT SIMULATION SOFTWARE

Vadym Lytvyn¹

¹Ph.D., Associate professor of Department of Transport Management, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: lytvyn.v.v@nmu.one

Abstract. The study defines the scope of application of simulation modeling and the main stages of development of simulation models. An analysis of the capabilities, advantages and disadvantages of modern software products for forecasting and optimization of complex transport systems is performed..

Keywords: simulation modeling, model development stages, transport and pedestrian flows, road freight transportation, Paramics, PTV VISSIM, PTV VISUM, TransCAD, Transmodeler, AnyLogic, LISA+, AIMSUN.

Вступ. Якісне вирішення завдань пов'язаних з організацією роботи міського громадського транспорту неможливо без застосування сучасних методик і технологій. Перш за все, до таких технологій належать інструменти і технології комп'ютерного моделювання. При проектуванні складних транспортних систем виникають численні задачі, які вимагають оцінки кількісних характеристик і якісних закономірностей процесів функціонування таких систем. Обмеженість можливостей експериментального дослідження великих транспортних систем унеможливорює їх повне проектування, впровадження та експлуатацію без використання методики моделювання, яка дозволяє у відповідній формі представити процеси функціонування систем і опис перебігу цих процесів за допомогою математичних моделей

Моделювання – метод вирішення задач, при використанні якого система, що досліджується, замінюється більш простим об'єктом, що описує реальну систему і називається моделлю.

Створення транспортних моделей дозволяє якісно і кількісно оцінити наслідки реалізації тих чи інших сценаріїв розвитку транспортних систем міст і регіонів. Моделювання дозволяє врахувати різні гіпотези розвитку транспортних систем і є досить гнучким інструментом при вирішенні задач транспортного планування та організації дорожнього руху.

Мета роботи. Метою є аналіз можливостей, переваг та недоліків сучасних програмних продуктів для прогнозування і оптимізації складних транспортних систем.

Матеріали і результати дослідження. Серед методів прикладного системного аналізу імітаційне моделювання (ІМ) є найпотужнішим інструментом дослідження складних систем, управління яких пов'язане з прийняттям

рішень в умовах невизначеності. У порівнянні з іншими методами таке моделювання дозволяє розглядати більшу кількість альтернатив, покращувати якість підсумкових рішень, точніше прогнозувати їх наслідки. Його мета допомогти дослідникам глибше зрозуміти процеси, які відбуваються у робочій моделі, їх реалізацію, а також інтерпретацію результатів моделювання.

Воно дозволяє користувачеві експериментувати з системами (існуючими або припущеними) в тих випадках, коли робити це на реальному об'єкті неможливо або недоцільно. *Доцільність використання методів ІМ:*

- не існує закінченої математичної постановки задачі, або не розроблені аналітичні методи рішення сформульованої математичної моделі;
- математичні процедури важкі і трудомісткі, імітаційне моделювання дає простий спосіб вирішення задачі;
- імітаційне моделювання може виявитися однією, єдиною можливістю внаслідок виникнення труднощів постановки експерименту і спостереження явищ в реальних умовах.

Імітаційне моделювання може застосовуватися у будь яких сферах діяльності та особливо ефективно при вирішенні наступних задач:

- проектування та аналіз виробничих систем;
- оцінка різних систем озброєнь та вимог до їх матеріально-технічного забезпечення;
- проектування та аналіз роботи транспортних систем, наприклад, аеропортів, автомагістралей, портів та метрополітену.

Сфера застосування імітаційних моделей для вирішення задач, які пов'язані з підвищенням ефективності міського громадського транспорту наведена на рис. 1.

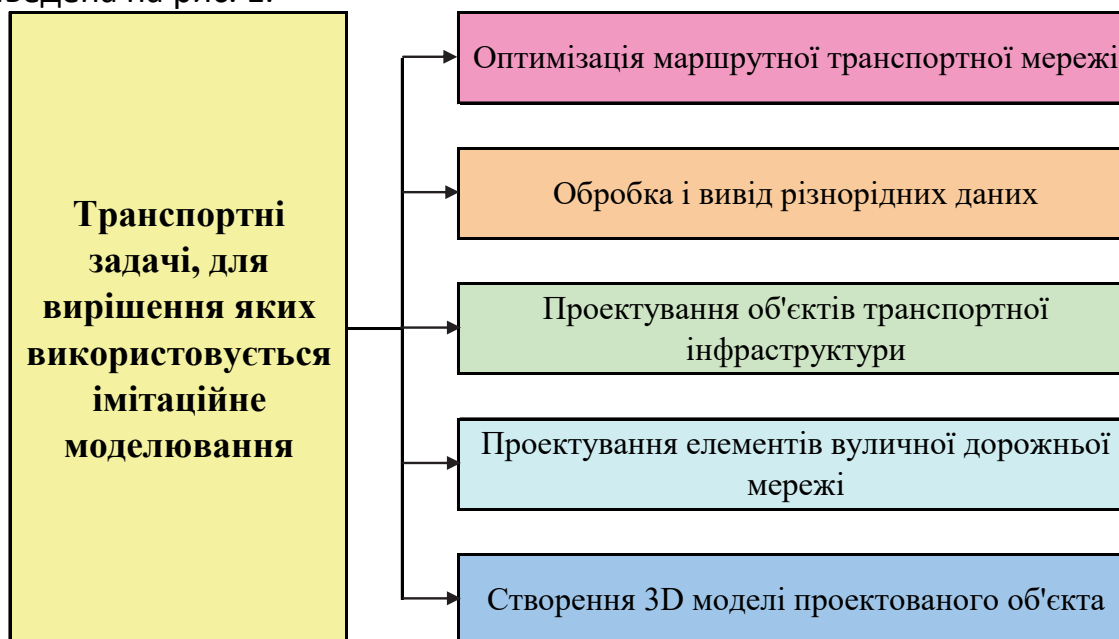


Рис. 1. – Сфера застосування імітаційних моделей

Імітаційне моделювання вирізняється серед інших методів завдяки наступним важливим перевагам:

- *безризикове середовище* – імітаційне моделювання забезпечує безпечний спосіб перевірити та дослідити різні сценарії «що буде, якщо?» та дозволяє приймати вірні рішення, перш ніж робити реальні зміни.
- *економія гроші та часу*: – віртуальні експерименти з імітаційними моделями менш дорогі та займають менше часу, ніж експерименти з реальними об'єктами;
- *візуалізація* – імітаційні моделі можна анімувати у 2D/3D, що дозволяє легше перевіряти, передавати та розуміти концепції та ідеї;
- *проникнення в динаміку* – на відміну від аналітики на основі електронних таблиць або розв'язувачів, імітаційне моделювання дозволяє спостерігати за поведінкою системи з часом на будь-якому рівні деталізації. Наприклад, можна перевірити використання складського простору на будь-яку задану дату;
- *підвищена точність* – імітаційна модель може фіксувати набагато більше деталей, ніж аналітична модель, що забезпечує підвищену точність і більш точний прогноз;
- *подолання невизначеності* – невизначеність у часі та результатах операцій можна легко відобразити в імітаційних моделях, що дозволяє вимірювати ризик і знаходити надійніші рішення.

Основні етапи створення імітаційних моделей представлені у табл.1.

Розглянемо можливості, переваги та область застосування сучасних програмних продуктів для прогнозування і оптимізації складних транспортних систем.

Transyt – програмний пакет (ПП) комп'ютерного імітаційного макроскопічного моделювання транспортних систем. Розглянемо основні можливості ПП *Transyt* (розглядаються можливості 15-ї версії).

1. Велика кількість цільових функцій:

- мінімізація сумарних затримок ТЗ та пішоходів;
- мінімізація кількості зупинок ТЗ;
- мінімізація витрати палива ТЗ;
- максимізація пропускної спроможності ділянки УДС;
- мінімізація черг.

2. Здатність оптимізувати параметри світлофорного регулювання (тривалість циклу, кількість фаз та їх тривалість, зміщення фаз світлофорних циклів між перехрестями).

Табл. 1. – Основні етапи створення імітаційних моделей

№	Назва етапу	Основний зміст етапу
1	Розуміння системи	Розуміння того, що відбувається в системі, що підлягає аналізу, якою є її структура, які процеси в ній протікають
2	Формулювання мети моделювання системи	Список завдань, які передбачається вирішити з допомогою майбутньої моделі. Список вхідних та вихідних параметрів моделі, критерії завершеності дослідження
3	Розробка концептуальної структури моделі	Структура моделі, склад суттєвих процесів, що підлягають відображенню в моделі, , опис логіки, що управляє, для підсистем
4	Реалізація моделі у середовищі моделювання	Реалізовані підсистеми, їх параметри та змінні, їх поведінка, реалізована логіка та зв'язки підсистем
5	Реалізація анімаційного представлення моделі	Анімаційне представлення моделі, інтерфейс користувача
6	Перевірка коректності реалізації моделі	Переконання у цьому, що модель безпосередньо відображає ті процеси реальної системи, які потрібно аналізувати
7	Калібрування моделі	Фіксація значень параметрів, коефіцієнтів рівнянь і розподілів випадкових величин
8	Планування та проведення експерименту	Результати моделювання - графіки, таблиці і т.п., що дають відповіді на поставлені питання

Існує можливість створення графічної анімації пішохідних та транспортних потоків (ТП) (рис. 2) та результатів моделювання (рис. 3).

Програмний пакет *Paramics* призначений для оптимізації процесів ОДР за рахунок моделювання транспортних та пішохідних потоків, аналізу різних варіантів організації ОДР у широкому діапазоні – від одиничного перетину до транспортної системи цілого міста. У ПП *Paramics* можна створювати регульовані перехрестя на основі готових шаблонів. Динаміка транспортних потоків заноситься до моделі за допомогою детекторів транспортних засобів, які встановлюються на ділянках дорожньої мережі (рис. 4).

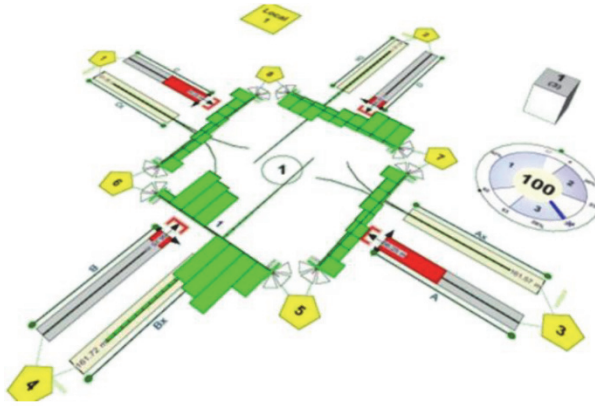


Рис. 2. – Приклад анімації пішохідних та транспортних потоків у ПП *Transyt*

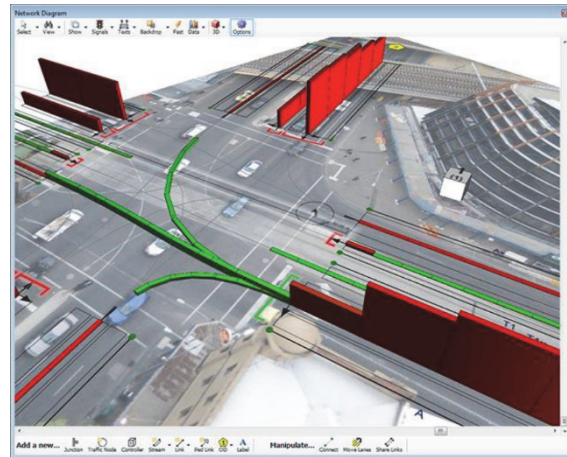


Рис. 3. – Представлення результатів моделювання у ПП *Transyt*

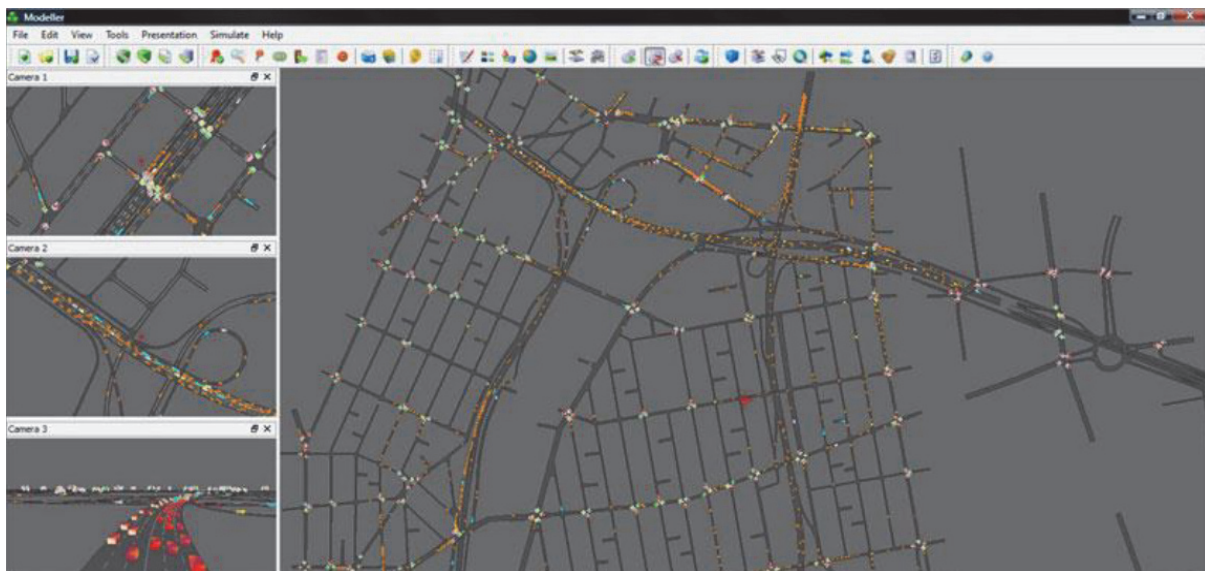


Рис. 4. – Приклад робочого вікна ПП *Paramics*

ПП *Paramics* дозволяє вирішити такі завдання:

- оцінка затримки пішоходів та ймовірність виникнення конфлікту між пішохідними та автомобільними потоками;
- створення графічного дизайну міського простору за допомогою анімованих варіацій, у тому числі візуалізації пішохідного руху;
- розрахунок викидів вихлопних газів ТЗ (при цьому характеристики двигуна та стилів водіння можуть бути взяті з бібліотеки або доповнені, викиди розраховуються на підставі фактичної швидкості руху транспорту);
- врахування та моделювання динаміки пасажиропотоків МПТ;
- оцінка безпеки висадки та посадки пасажирів, переміщення пішоходів у годину пік.



PTV VISSIM – багатоцільовий програмний продукт комп'ютерного імітаційного мікроскопічного моделювання транспортних систем, який дозволяє аналізувати та оптимізувати міські та міжміські дорожні мережі. Він знайшов широке застосування в Європі, США та багатьох інших країнах, оскільки дозволяє моделювати міські перехрестя будь-якої складності та типу регулювання, аналізувати пропускну спроможність транспортних мереж та тестувати схеми з різними пріоритетами. Також *VISSIM* дозволяє створювати та керувати системами контролю динаміки пасажиропотоку МПП, розраховувати необхідну ємність стоянкових майданчиків, моделювати транспортні потоки для різних видів МПТ.

Основним обмеженням є характеристики комп'ютера, а за розміром транспортної мережі та кількістю транспортних засобів можливості *VISSIM* не обмежені. Програма дозволяє з точністю деталізувати схему транспортної мережі з усіма маршрутами, переходами, стоянками, зупинками громадського транспорту. У моделюванні беруть участь усі види ТЗ (легкові та вантажні автомобілі, автобуси, трамваї, поїзди, мотоцикли, велосипеди), а також пішоходи та пасажирів. Для всіх видів ТЗ можна додатково уточнити характеристики (габарити, потужність двигуна, прискорення розгону та гальмування, вага тощо). За бажанням користувач може створити новий тип транспортного засобу.

Основні задачі, які вирішує *VISSIM*:

- збір статистики на будь-якій ділянці транспортної мережі, формування звітів, створення презентацій та відеороликів;
- оцінка впливу різних факторів на пропускну спроможність ділянок дорожньої мережі (нерегульовані та регульовані перехрестя, кільцеві розв'язки на одному рівні, залізничні переїзди, розв'язки на різних рівнях);
- проектування, тестування та оцінка впливу режиму роботи світлофорів на характеристики транспортних потоків;
- аналіз системи управління дорожнім рухом, та аналіз ефективності заходів, що проводяться на автомобільних дорогах і міських вулицях;
- аналіз результатів щодо надання пріоритету у русі МПТ;
- аналіз пропускну спроможності великих дорожніх мереж (наприклад, мережі автомагістралей або всієї міської дорожньої мережі) за динамічної взаємодії транспортних потоків;
- детальна імітація пересування кожного з учасників руху;
- моделювання пасажирських та транспортних потоків біля зупиночних пунктів та станцій метрополітену з урахуванням їхнього взаємного впливу;
- розрахунок аналітичних показників якості дорожнього руху (понад 50 різних оцінок та аналітичних коефіцієнтів), автоматична побудова в Microsoft Excel графіків тимчасового завантаження мережі тощо.

На рис. 5 наведено приклад використання ПП VISSIM у м. Київ.



Рис. 5. – Приклади використання ПП VISSIM у м. Київ

Програмний продукт *LISA+* є інструментом для розробки та оптимізації режимів регулювання світлофорних об'єктів, розробки координованого світлофорного регулювання (в основі – графоаналітичний метод) та алгоритмів адаптивного керування. Надалі отримані результати можна експортувати (імпортувати) до *VISSIM* та моделювати різні варіанти організації дорожнього руху, використовуючи інструментарій останньої програми. *LISA+* має можливість передачі даних розробленого режиму регулювання у дорожні контролери (*Siemens, Swarco, Cross* та ін.).

Основні завдання, які вирішуються за допомогою *LISA+*:

- оцінка та автоматичний розрахунок світлофорних циклів для простої (рис. 6) та складової ділянки дорожньої мережі;
- розрахунок світлофорних циклів для організації координованого управління світлофорними об'єктами;
- розробка режимів регулювання для світлофорного об'єкта із застосуванням адаптивного керування на локальному рівні;
- оцінка розроблених алгоритмів управління в моделі *VISSIM*;
- визначення можливих конфліктних зон і розрахунок «часів розвантаження» для усунення конфліктів з використанням відеофайлів.

PTV VISUM – багатоцільовий пакет для імітаційного моделювання транспортних потоків, транспортного планування та оптимізації пасажиропотоків МПТ.

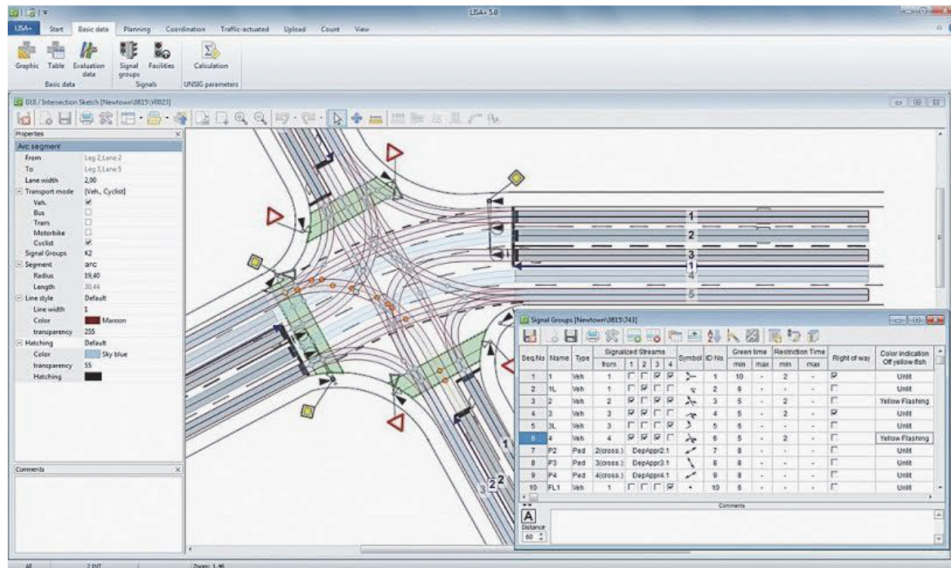


Рис. 6. – Приклад розрахунку світлофорного циклу для перехрестя у ПП LISA+

ПП VISUM використовуватися під час вирішення наступних задач:

- розподіл існуючих транспортних потоків по дорожній мережі (рис. 7);
- розрахунок транспортної потреби міст у перевезеннях МПТ;
- оцінка різних дорожньо-транспортних ситуацій та варіантів розвитку дорожньої інфраструктури;
- оцінка якості роботи транспортної мережі в цілому за розробленою системою показників якості (транспортна забезпеченість території, оцінка транспортної доступності територій для різних груп населення);
- візуалізація даних у вигляді графіків та відеофайлів, стосовно транспортної системи міста, регіону, країни;
- техніко-економічне обґрунтування різних інвестиційних проектів для розвитку дорожньої інфраструктури модельованого регіону (будівництво або реконструкція автомобільних доріг або вулиць; реорганізація роботи ДПТ; будівництво великих промислових, торгових, розважальних об'єктів на території регіону, що моделюється, з виявленням можливих транспортних проблем);
- оптимізація потоків індивідуальних транспортних засобів та МПТ (розрахунок обсягів перевезень різними видами транспорту; оцінка собівартості МПТ; аналіз топології мережі МПТ та оцінка її доступності; оптимізація інтервалів випуску рухомого складу; обґрунтування введення нових маршрутів та зміна існуючих);
- розробка комплексних програм стратегії розвитку транспортної мережі, що включає всі види транспорту.

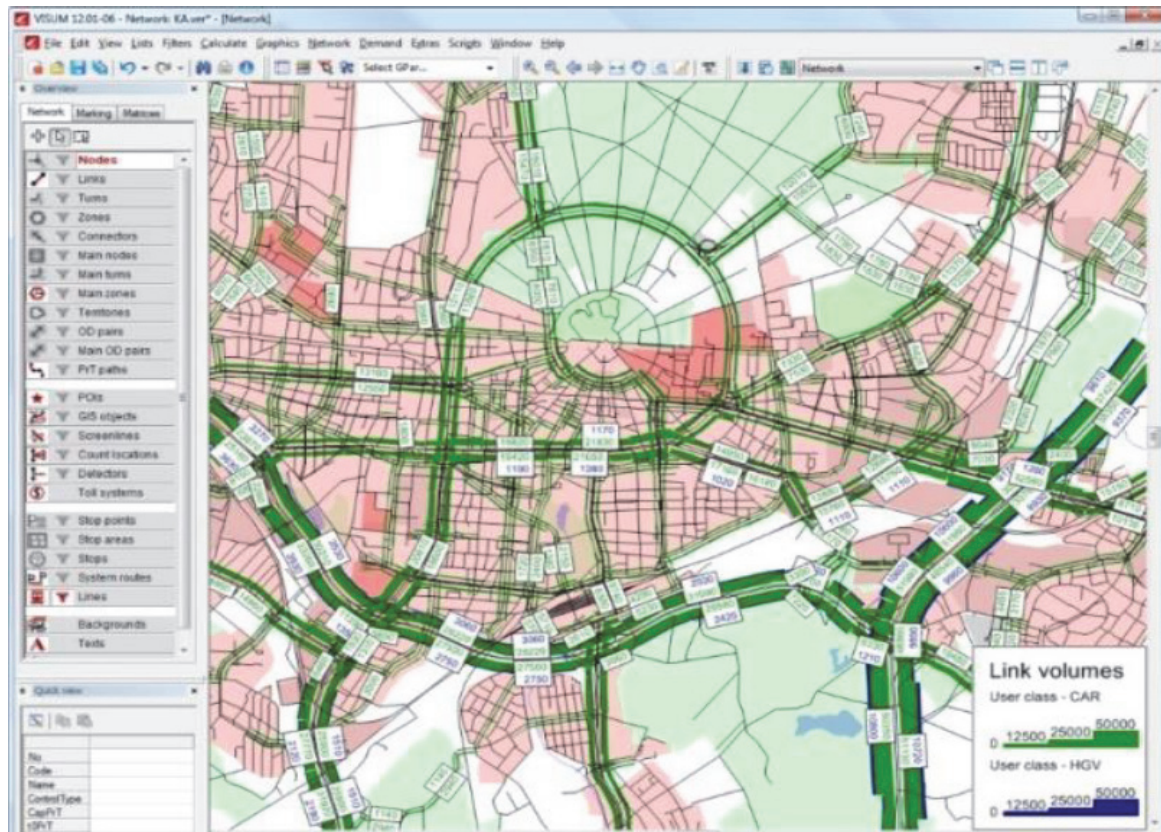


Рис. 7. – Розрахунок транспортних потоків у ПП VISUM

ПП AIMSUN являє собою програмне забезпечення, яке має повнофункціональний комплекс інструментів для аналізу транспортних потоків. ПП AIMSUN базується на мікроскопічному моделюванні. Поведінка кожного транспортного засобу в мережі постійно коригується у часі згідно з різними моделями поведінки водія, яка налаштовується (відомий автомобіль, зміна смуги тощо). AIMSUN поєднує дискретно-безперервний підхід до моделювання: стан ряду елементів транспортних систем (транспортні засоби, детектори) постійно змінюється протягом періоду моделювання, а для інших елементів (світлофори, входи у вузли) їх стан змінюється дискретно (рис. 8).

Вихідна інформація для моделювання, планування або візуалізації в програмі може бути завантажена з транспортних детекторів у режимі реального часу або баз даних. Пакет реалізує інтегровану платформу, що дозволяє виконувати як статичне, і динамічне моделювання. Передбачено можливість імпортувати та обробляти дані з різних ГІС, включаючи ESRI, Tele Atlas, NAVTEQ та ін. Також існує можливість зчитування графічної інформації САПР та растрових зображень, що спрощує завдання редагування та подання проектної документації.

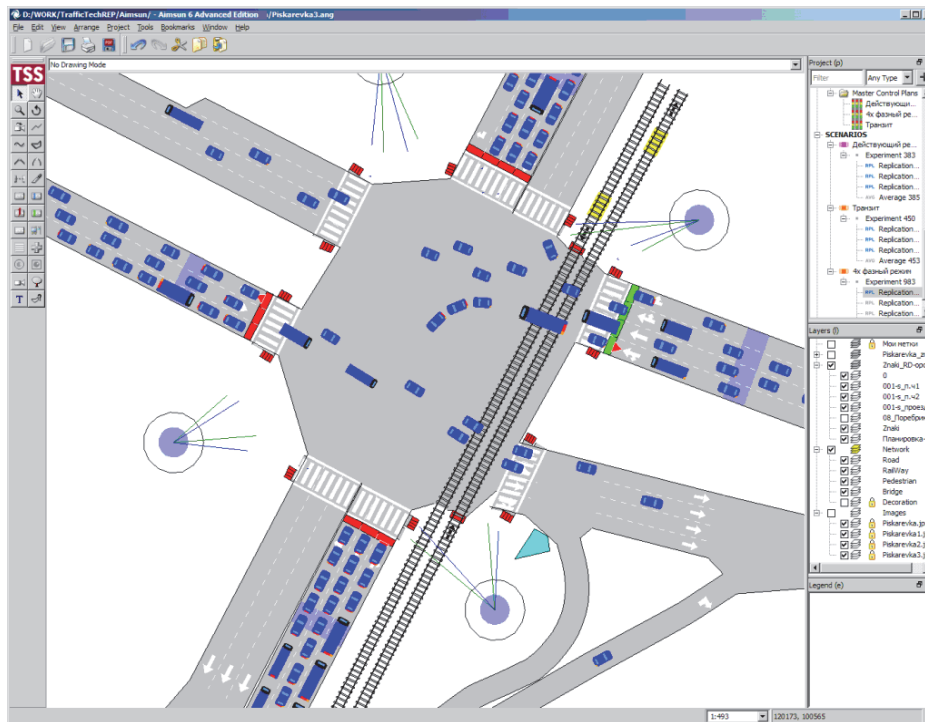


Рис. 8. – Робоче вікно ПП AIMSUN

ПП *TransCAD* надає можливості моделювання транспортного попиту, а *Transmodeler* – можливості моделювання руху автомобілів (розробник компанія Caliper, США).

Можливості TransCAD + Transmodeler:

- мікромоделювання руху індивідуального транспортного засобу;
- отримання інформації про параметри руху (швидкість, щільність, інтенсивність) на кожній ділянці дорожньої мережі. Інформація доступна в «реальному часі» під час моделювання, і детальна кількісна інформація про середню швидкість, щільності та інтенсивності руху по дорогах і про транспортні затримки доступна в результаті моделювання (рис. 9);
- можливість створювати модель системи управління дорожнім рухом (в тому числі з використанням елементів ІТС). Програмний комплекс містить блок, що імітує роботу системи управління, який за свідченнями датчиків, що монтуються блоком дорожнього руху, управляє модельованим дорожнім рухом за допомогою світлофорів.

AnyLogic – програмний продукт імітаційного моделювання, який дозволяє моделювати рух транспортних засобів по дорожній мережі, оцінювати вплив режимів роботи світлофорів на транспортні потоки, аналізувати наповнення парковок, моделювати рух маршрутних транспортних засобів, а також пішоходів.

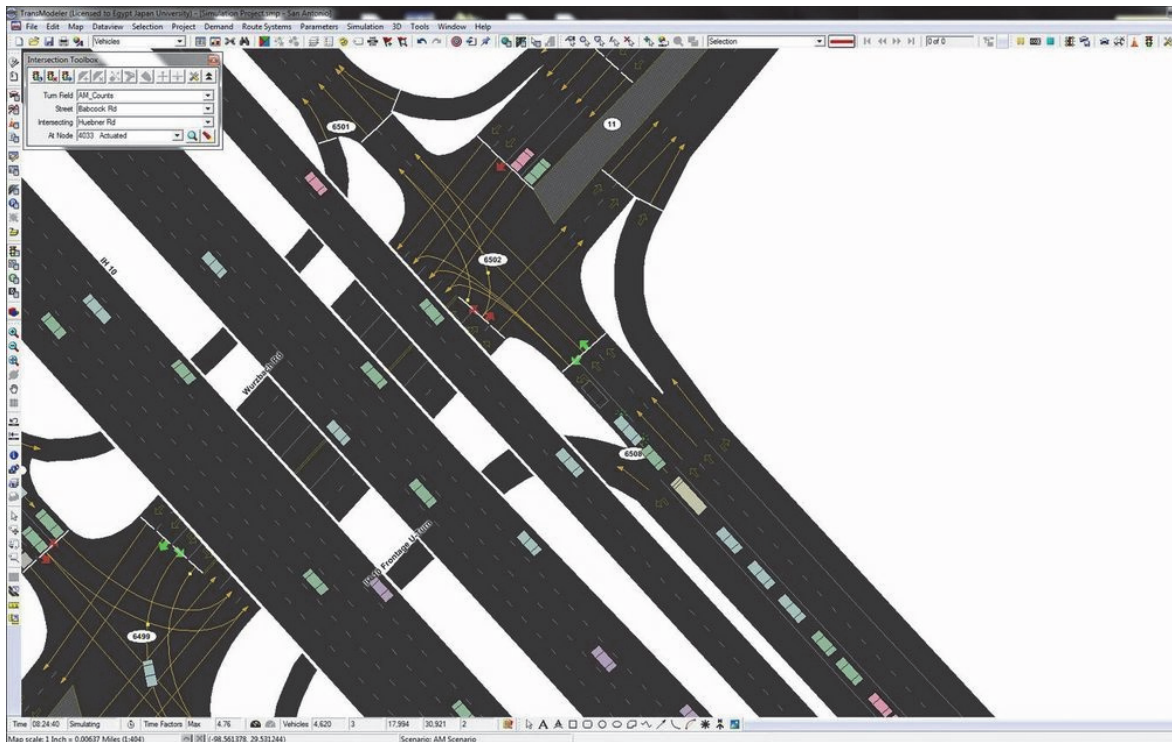


Рис. 9. – Інтерфейс ПП *TransCAD + Transmodeler*

Основні можливості та переваги ПП *AnyLogic*:

- простота створення моделей, орієнтованість на фахівців предметної області, а не на фахівців з імітації;
- наявність графічного інтерфейсу розробки моделей, який прискорює процес їх створення;
- розширюваність моделей за рахунок відкритого програмного коду;
- широка експериментальна база, заснована на методі Монте-Карло, та різні види оптимізації;
- можливість створення інтерактивної анімації;

Для моделей транспортних систем за допомогою *AnyLogic* можна створювати та редагувати елементи дорожньої мережі (рис. 10), маршрути МПТ та зупиночні пункти на них, ділянки зі світлофорним регулюванням, задавати розклад руху маршрутних транспортних засобів, їх тип, швидкість пересування тощо. За допомогою створених моделей можна оцінювати завантаженість ділянок дорожньої мережі, змінювати траєкторії маршрутів та розташування зупиночних пунктів, досліджувати наповнення маршрутних транспортних засобів у години пік, тощо.

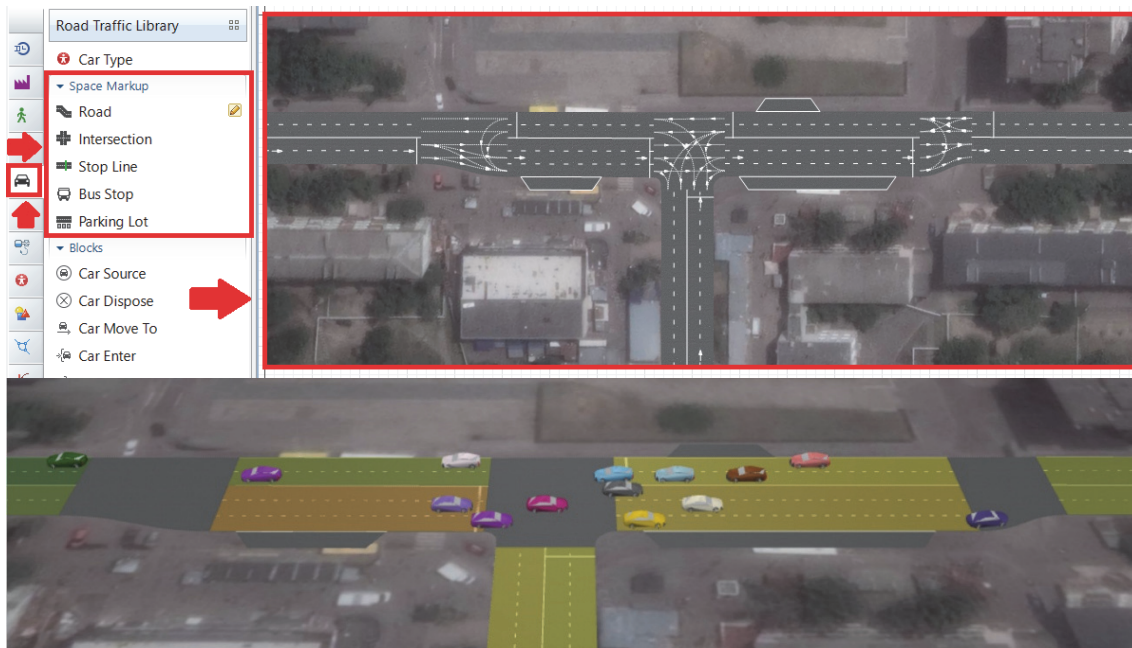


Рис. 10. – Розробка дорожньої мережі та візуалізації руху ТЗ у ПП AnyLogic

Висновок. Створення транспортних моделей дозволяє якісно і кількісно оцінити наслідки реалізації тих чи інших сценаріїв розвитку транспортних систем міст і регіонів. В роботі проаналізовані основні етапи розробки імітаційних моделей, а також можливості та області застосування таких сучасних продуктів для моделювання транспортних потоків, як Transyt, Paramics, VISSIM, LISA+, VISUM, AIMSUN, TransCAD, Transmodeler та AnyLogic.

ЛІТЕРАТУРА

1. Вакулєнко К. Є. Управління міським пасажирським транспортом: навч. посібник / К. Є. Вакулєнко, К. В. Доля ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекєтова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекєтова, 2015. – 257 с.
2. Вдовиченко В.О. Розвиток науково-технологічних основ взаємодії міського пасажирського транспорту в транспортно-пересадочних вузлах: дис... д-ра техн. наук: 05.22.01 / В.О. Вдовиченко; Харків. нац. автомоб.-дорож. ун.-т. – Харків, 2016. – 472 с.
3. Методичні рекомендації з моделювання транспортних потоків під час оцінювання ефективності проєктних рішень щодо дорожньої інфраструктури / Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури». Київ, 2022, с. 54.
4. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з освітньої компоненти «Основи комп'ютерного моделювання транспортних процесів» [Електронне видання] / Кристопчук М. Є., Хітров І. О. – Рівне : НУВГП, 2023. – 86 с.