

УДК 656.13:004.358

О. В. ГОРБОВА^{1*}, О. Д. МЕРЗЛИЙ^{2*}

^{1*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта alexandra.gorbova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5612-2715

^{2*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта zver343434@gmail.com, ORCID 0000-0002-5219-5028

Дослідження автомобільних потоків засобами імітаційного моделювання

Мета. Автомобільні перевезення вантажів і пасажирів стали важливою частиною загального процесу перевезення та взаємодії з усіма видами транспорту. Через збільшення автотранспортних потоків у транспортній мережі актуальною є проблема їх раціональної організації. Однак з урахуванням впливу різних чинників, таких як завантаженість і стан дороги, це завдання не може бути вирішене за допомогою аналітичних моделей, заснованих на графових моделях. Тому метою цієї статті є розробка безпечної моделі дорожнього руху на основі імітаційного моделювання координованих транспортних потоків у міській дорожній мережі із застосуванням системи комп'ютерного моделювання. **Методика.** Для пошуку ефективних стратегій управління транспортними потоками в мегаполісі, оптимальних рішень із проектування вулично-дорожньої мережі та організації дорожнього руху необхідно враховувати широкий спектр характеристик транспортного потоку, закономірності впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на динамічні характеристики змішаного транспортного потоку. Застосування моделювання і створення адекватної моделі транспортного потоку є актуальним завданням у процесі організації та управління дорожнім рухом. Методика досліджень дозволить створити комплексний підхід до розв'язання задач наведеного типу та міститиме симбіоз теоретичних та експериментальних положень. **Результати.** Під час проведення експериментів було виявлено, що в разі звичайної роботи транспортної мережі швидкість проїзду всього виду транспорту задовільна. У випадку появи чинників, які створюють велике навантаження, збільшується час проїзду всього виду транспорту. Було виділено фактори, які можуть вплинути на оптимальну роботу мережі навіть за великого навантаження. **Наукова новизна.** Уперше створено загальну методологію імітаційного моделювання та вдосконалено формалізацію методу агентного моделювання. **Практична значимість.** Результати роботи покладені в основу системи імітаційного моделювання транспортних потоків, що дозволяє аналізувати властивості наявних і проєктованих транспортних вузлів. Система реалізована у вигляді програмного комплексу, який може бути використаний в установах державного управління, проєктних організаціях і консалтингових компаніях, що займаються проєктуванням і реорганізацією схем дорожнього руху. Запропонована модель агента може бути використана для більш складних імітаційних моделей організаційно-технічних систем.

Ключові слова: автотранспортний потік; імітаційне моделювання; графова модель; стратегія управління транспортними потоками; дорожня мережа

Вступ

Україна має досить розвинуту мережу автодоріг загального користування протяжністю 172,4 тис. км, у тому числі 164,1 тис. км із твердим покриттям. За оцінками Міністерства інфраструктури, із числа міжнародних автотрас (близько 8 200 км) у хорошому стані перебуває 24 %, у задовільному – ще 65 %. Для доріг національного значення (4 800 км) ці цифри складають 21 і 68 % відповідно, а ось для регіональних (9 800 км) – лише 10 і 50 %. Очевидно,

що вітчизняні автомагістралі потребують серйозної модернізації [10].

Статистичні дані свідчать про швидке зростання автотранспорту: 1900 року в усьому світі нараховувалось близько 12 тисяч автомобілів; 1920 – 10 922, 1950 року – 70 388, 1957 року – 102 827. У наш час в світі більше ніж 1,5 млрд автомобілів.

2014 року на кожних 1 000 чоловік у світі припадало 118 легкових автомобілів. У деяких країнах показник склав лише 2–10 автомобілів на 1 000 жителів, але є країни, у яких цей показник перевищує 500 автомобілів на 1 000 меш-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

канців. Це нормальний показник для багатьох європейських країн. Рівня автомобілізації (250–300 автомобілів на 1 000 чоловік) ці країни досягли ще в 60–70-х роках минулого століття. Україна порівняно з іншими країнами має показник у чотири рази менший. Потрібно відзначити, що на 1 000 мешканців в Україні припадає 191 автомобіль, а всього нараховується 8 млн 700 тис. автомобілів, що ставить Україну на 69-те місце за рівнем автомобілізації серед 145 країн.

Процес автомобілізації найбільших міст Західної Європи, що почався в 50-ті роки минулого сторіччя, проходив практично за однією закономірністю для всіх країн: лінійне зростання кількості автомобілів до рівня 300–350 авт./1 000 жителів, потім уповільнення зростання та стабілізація при 550 ± 50 авт./1 000 жителів [2].

У цілому в розвинутих країнах проходить зниження темпів зростання автомобільного парку, що в останні роки складає 1–2 %. У Північній Америці вже достатньо довго спостерігається зростання чисельності сімей, які мають два автомобілі й більше. У США їх частка вже досягла 58 %. У Західній Європі зростання чисельності середнього класу та його добробуту супроводжується аналогічними процесами. Так, наприклад, в Іль-де-Франс (агломерація Парижа) 1991 року 75 % домогосподарств мали один автомобіль, а 20 % – два й більше. Такі тенденції спостерігалися і у Великобританії, наприклад, за період 1992–2000 років відбулася зміна: кількість домогосподарств без автомобілів знизилась з 32 до 26 %; частка господарств з одним автомобілем залишилася сталою – 45 %, а частка домогосподарств із двома автомобілями й більше зросла з 24 до 27 %; середня кількість автомобілів, яка припадає на одне домогосподарство, збільшилась з 0,86 до 1,04. Особливо цікавою для нас є динаміка зростання автомобільного парку в містах країн Східної Європи та прогнозовані показники фахівців цих країн. Темпи зростання автомобільного парку в містах Східної Європи, звичайно, вищі, ніж у містах Західної Європи. Так, зростання автопарку Парижа становило 1 %, Варшави – 7 %, а зростання парку автомобільного транспорту для України в середньому складає 4,8 %, хоча

2008 р. цей показник складав 6,9 % (рис. 1). Слід зазначити, що у країнах Східної Європи збільшення частки поїздок, здійснюваних із використанням легкових автомобілів, виявилось меншим, ніж зростання автомобільного парку. Україна проходить той самий етап розвитку і формування автомобільного парку, який 30–50 років тому пройшли розвинуті країни світу [11].



Рис. 1. Зростання автомобільного парку України в період 2000–2014 рр., %

Fig. 1. Growth of the car fleet of Ukraine in the period 2000–2014, %

В Україні інтенсивне зростання парку транспортних засобів розпочалося в 1990-х роках і стабільно продовжується. Цей процес прямий і безпосередньо пов'язаний із набуттям економічної свободи громадянами України, свободи щодо вибору місця проживання й місця прикладення праці. Це своєю чергою призвело до швидкого зростання автомобілізації, що підтверджує прагнення українців до підвищення мобільності та якості життя. Автомобіль став не лише засобом переміщення, а й підтвердженням соціального статусу, символом благополуччя й успішності в житті [7].

Але зростання парку автомобільного транспорту у світі пов'язане не тільки зі збільшенням кількості індивідуальних транспортних засобів. У зв'язку зі збільшенням кількості населення та його потреб, модернізації транспорту та підвищення рівня життя постала необхідність у комерційних перевезеннях.

Основні фактори, що впливають на ціну перевезення й на ціну самого товару – обсяг і вага вантажу (питома вартість перевезення великих

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

партій завжди нижче, як і в будь-яких товарів оптом). Деякі товари потребують особливих умов перевезення і зберігання. Чим довше товар буде в дорозі, тим гірше для перевізника, і разом ці всі фактори будуть впливати на кінцеву ціну товару.

Має значення і вид використовуваного автомобіля, а також регіон: у великих логістичних та промислових вузлах перевезення для вантажовідправників традиційно дорожче. Це в першу чергу Київ, Дніпро, Одеса, Львів і Рівне.

Лише 2020 року обсяг перевезення вантажів автомобільним транспортом склав близько 242,7 млн тонн, оскільки Україна територіально розташована майже в самому центрі автомобільних перевезень і основні дороги між державами проходять через Україну, доцільно організувати максимально швидкі маршрути для подолання відстані між точками А і Б. А через збільшення транспорту гостро постала проблема заторів.

Чим більшим є місто і його населення, з тим більшою кількістю проблем йому доводиться стикатися щодня. А бажання кожного жителя мати особистий транспорт створює одну величезну проблему – трафік, із яким не кожна дорога може впоратися.

Відсутність достатньої кількості паркувальних місць, збільшення часу, проведеного в дорозі, висока ймовірність ДТП, зниження безпеки для пішоходів і, звичайно ж, затори, які збільшують витрату палива й рівень забруднення навколишнього середовища – ось реалії здійснення автомобільних перевезень.

Основні проблеми функціонування транспортних систем у містах:

- зростання рівня автомобілізації населення;
- збільшення інтенсивності використання індивідуального транспорту;
- зниження ефективності міського пасажирського транспорту;
- зростання потреби жителів міста в переміщеннях;
- диспропорція між рівнем автомобілізації й темпами дорожнього будівництва;
- містобудівні проблеми розвитку міської території.

Особливо проблематичними є високі прямі й непрямі економічні витрати, у тому числі високі витрати, пов'язані з логістикою, аваріями, заторами та забрудненням повітря. Від цього страждають конкурентоспроможність України та її привабливість для інвесторів. Тому головним завданням є модернізація концепцій мобільності в українських містах.

Затори не тільки порушують наші плани. Вони – основне джерело забруднення повітря, що негативно позначається на здоров'ї кожного. За даними Центру аналізу ризиків Гарвардського університету, затори у 83 найбільших містах Сполучених Штатів Америки стали причиною понад 2 200 випадків передчасної смерті у 2010 році та збільшили витрати на потреби охорони здоров'я на 18 млрд доларів.

Але ж є ще економічні витрати, пов'язані зі змарнованими в заторах годинами (робочими й неробочими) та із затримкою доставок. Водії в 10 американських містах із найбільш перевантаженим рухом щорічно проводять у заторах близько 42 годин, зазнаючи збитків на більш ніж 121 млрд доларів.

У період автомобільного буму 1960-х містобудівники бачили тільки одне, здавалося б, очевидне рішення: будувати більше доріг і робити їх ширшими. Але це не спрацювало. Чим більше доріг будували, тим більше автомобілів на них з'являлося. Наприклад, дослідження, проведене в Каліфорнії 1997 року, показало, що як би не збільшувалася пропускна здатність доріг, знадобиться всього п'ять років, щоб рівень їх завантаження досяг 90 %.

Проблема заторів не вирішується шляхом будівництва нових доріг і тунелів. Необхідно визначити пріоритети. Це означає, що громадський транспорт повинен мати окремі рейсові шляхи й виділені автобусні смуги, а також мати перевагу на світлофорах.

Шляхів вирішення проблем заторів дуже багато – від соціальних і психологічних до розробки моделей поведінки і розуміння основної причини появи заторів.

Під час первинного аналізу проблеми можна зробити висновок, що є головною причиною заторів. Це, здавалося б, очевидно – вузькі дороги і скупчення автомобілів. Проте, деякі затори, що на перший погляд, виникають спон-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

танно, можуть бути викликані так званим ефектом «метелика», коли всього один водій раптом робить нічим не виправданий маневр, наприклад, різко перебудовується в інший ряд. Автомобілям, які їдуть за ним, доводиться різко гальмувати, що викликає ланцюгову реакцію, миттєво призводить до утворення затору на дорозі.

Автори дослідження, проведеного в Технологічному університеті штату Джорджія, бачать проблему в поєднанні агресивних водіїв (їдуть занадто швидко й занадто близько до машини попереду) і боязких водіїв, які дотримуються занадто великої дистанції. І перші, і другі змушують інших водіїв гальмувати, у результаті чого рух сповільнюється ще більше, аж до повної зупинки.

Учені намагалися змоделювати транспортні потоки, шукаючи аналогії в тому, як рухаються рідина або газ, переміщаються птахи або лижники. Однак, як вважає Габор Орос з Університету штату Мічиган, «хоча подібні аналогії допомагають зрозуміти деякі закономірності, стає все більш очевидним, що транспортні потоки не схожі ні на які інші потоки в ньютонівському всесвіті».

У наш час покладають великі сподівання на смарттехнології і те, як саме вони можуть вирішити і вже вирішують проблеми транспортного трафіка. Оскільки велика кількість машин на дорозі – це ті, водії яких шукають місця для паркування, у деяких містах намагаються управляти дорожнім рухом, використовуючи датчики для визначення того, зайняте конкретне місце на вулиці або на автостоянці чи вільне.

Якщо зв'язати ці розумні датчики із системою, яка швидко й ефективно направляє водіїв на вільні паркувальні місця, є сподівання, що це знизить рівень завантаженості доріг. Першим містом для випробовування таких датчиків стало Сан-Франциско. Не відстає від сусіда й Лос-Анджелес. Сьогодні обидва міста обслуговує ACS, дочірня компанія корпорації «Xerox».

Ще одним способом позбутися заторів, як вважають деякі дослідники, може стати автоматизація самого процесу водіння. Нещодавно компанія «Google» представила власний прототип повністю автономного самокерованого автомобіля, якому не потрібен водій.

Мета

Основною метою статті є розробка безпечної моделі дорожнього руху шляхом імітаційного моделювання координованих транспортних потоків у міській дорожній мережі із застосуванням системи комп'ютерного моделювання.

Методика

Вивчення сутності проблем транспортної перевантаженості сучасних мегаполісів спирається на два методологічні принципи: принцип історизму та принцип системності. Згідно з принципом історизму, основну увагу в аналізі було приділено формуванню, розвитку й динаміці досліджуваних об'єктів. Аналіз спирається на принцип історизму як методологічне вираження саморозвитку дійсності, включаючи вивчення сучасного стану, минулого та процесів генезису. Принцип системності дозволяє розглядати міський транспорт як складну систему. Причому тут можливі різні підходи. Наприклад, можна розглядати міський транспорт як складну систему з точки зору [14]:

- 1) інтенсивності руху по міських магістралях;
- 2) пропускної здатності перехресть;
- 3) оптимального регулювання й розподілу транспортних потоків за допомогою заборонних та обмежувальних знаків.

У цьому випадку елементами складної системи будуть:

- 1) міські магістралі та перехрестя;
- 2) засоби сигналізації та управління;
- 3) транспортні засоби.

Можна вивчати міський пасажирський транспорт як складну систему – сукупність транспортних засобів (тролейбусів, автобусів, трамваїв, метрополітену, таксі та ін.), маршрутів руху, перехресть і світлофорів, з урахуванням їх завантаження іншими видами транспорту, пасажиропотоками, що формуються в різних пунктах міста залежно від часу доби, диспетчерських пунктів, засобів зв'язку і збору інформації, органів планування й управління, засобів ремонту й заправки автомобілів і т. д. За такого підходу міський пасажирський транспорт як складну систему розглядають із точки

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

зору якості обслуговування пасажирів, планування маршрутів, розподілу рухомого складу на маршрутах і визначення оптимальних режимів руху (розкладів), планування поточного та капітального ремонту транспортних засобів [3]. Аналогічно як складну систему можна розглядати міський вантажний транспорт. Замість пасажиропотоків розглядаються вантажопотоки від постійних і тимчасових джерел, що вимагають доставки в постійні й тимчасові пункти призначення. Під час дослідження такої складної системи виникають питання попереднього й оперативного планування перевезень, що забезпечує своєчасну й економічну доставку вантажів, а також проблеми, пов'язані з нормальною експлуатацією транспортних засобів [3]. Для проектування й розробки інструментального забезпечення в ході дослідження автотранспортних потоків використовують середовище AnyLogic. Це єдиний інструмент імітаційного моделювання (ІМ), який підтримує всі підходи до створення імітаційних моделей: процесно-орієнтований (дискретно-подієвий), системно динамічний та агентний, а також будь-яку їх комбінацію [4]. Унікальність, гнучкість і потужність мови моделювання AnyLogic дозволяє врахувати будь-який аспект моделювання з будь-яким рівнем деталізації. Графічний інтерфейс AnyLogic, інструменти та бібліотеки дозволяють швидко створювати моделі для широкого спектру завдань – від моделювання виробництва, логістики, бізнес-процесів до стратегічних моделей розвитку компанії та ринків. AnyLogic – це імітаційна платформа для повного бізнес-циклу [15].

Агент – елемент моделі, який може мати поведінку, пам'ять (історію), контакти тощо. Як агентів можна моделювати людей, компанії, проекти, автомобілі, міста, тварин, кораблі, товари тощо.

Можна створювати всередині об'єкта змінні, діаграми станів, задавати події, потокові діаграми системної динаміки, а також додавати всередину агента об'єкти бібліотек AnyLogic. Можна створити в одній моделі стільки типів агентів, скільки агентів потрібно промоделювати [4].

Створення агента зазвичай починається з визначення його інтерфейсу для зв'язку із зовнішнім світом [4].

Початковий стан і поведінка агента можуть бути реалізовані різними способами. Стан (накопичену історію) агента можна представити за допомогою змінної, або стану діаграми станів. Поведінка може бути пасивною (агенти реагують тільки на прибуття повідомлень або на виклик методів і не мають власних подій, запланованих на майбутнє) або активною, коли внутрішня динаміка агента (події, заплановані через заданий тайм-аут або процеси системної динаміки) є причиною, здійснюваних ним дій. В останньому випадку всередині агентів швидше за все повинні бути задані події і/або діаграми станів [14].

AnyLogic містить графічну мову моделювання, а також дозволяє користувачеві розширювати створені моделі за допомогою мови Java. Інтеграція компілятора Java в AnyLogic надає більш широкі можливості під час створення моделей, а також створення Java-аплетів, які можуть бути відкриті будь-яким браузером. Ці аплети дозволяють легко розміщувати моделі AnyLogic на вебсайтах. Окрім Java-аплетів, AnyLogic Professional підтримує створення Java-додатків, у цьому випадку користувач може запустити модель без інсталяції AnyLogic [6].

Графічне середовище моделювання AnyLogic містить такі елементи:

- Stock & Flow Diagrams – діаграма потоків і накопичувачів, яку застосовують під час розробки моделей за методом системної динаміки [6];
- Statecharts – карти станів, які в основному використовують в агентних моделях для визначення поведінки агентів. Також їх часто використовують в дискретно-подієвому моделюванні, наприклад, для симуляції машинних збоїв [6];
- Action charts – блок-схеми, які використовують для побудови алгоритмів в дискретно-подієвому (маршрутизація дзвінків) та агентному моделюванні (для логіки рішень агента) [6];
- Process flowcharts – процесні діаграми, що є основною конструкцією, яку використовує

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

для визначення процесів у дискретно-подієвому моделюванні [6].

Середовище моделювання також містить: низькорівневі конструкції моделювання (змінні, рівняння, параметри, події тощо), форми подання (лінії, квадрати, овали і т. ін.), елементи аналізу (бази даних, гістограми, графіки), стандартні картини й форми експериментів [14].

Під час розробки моделі було використано елементи з таких бібліотек, як:

- бібліотека дорожнього руху (елементи бібліотеки показані на рис. 2);
- бібліотека моделювання процесів (елементи бібліотеки показані на рис. 3);
- пішохідна бібліотека (елементи бібліотеки показані на рис. 4).

Бібліотека дорожнього руху дозволяє детально імітувати фізичне переміщення машин по дорожній мережі. Крім того, вона дає можливість моделювати:

- рух з урахуванням правил дорожнього руху;
- світлофори й пріоритети проїзду на перехрестях;
- місця для паркування;
- рух і зупинки громадського транспорту.

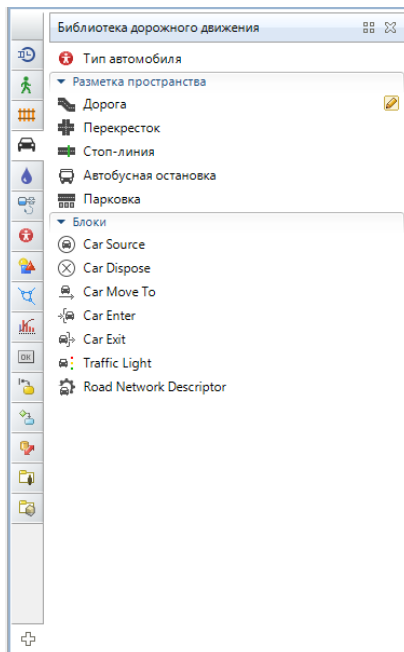


Рис. 2. Дорожня бібліотека

Fig. 2. Road library

Бібліотека моделювання процесів AnyLogic підтримує дискретно-подієвий, або, якщо бути більш точним, «процесний» підхід моделювання. За допомогою об'єктів бібліотеки процеси можна моделювати системи реального світу, динаміка яких уявляється як послідовність операцій (прибуття, затримка, захоплення ресурсу, поділ) над агентами, що представляють клієнтів, документи, дзвінки, пакети даних, транспортні засоби тощо. Ці агенти можуть володіти певними атрибутами, що впливають на процес їх обробки (наприклад, тип дзвінка, складність роботи) або накопичують статистику (загальний час очікування, вартість).

Процес задають у формі потокових діаграм (блок-схем) – графічне представлення, яке застосовують у багатьох сферах: виробництво, бізнес-процеси, центри обробки дзвінків, логістика, охорона здоров'я тощо [14].

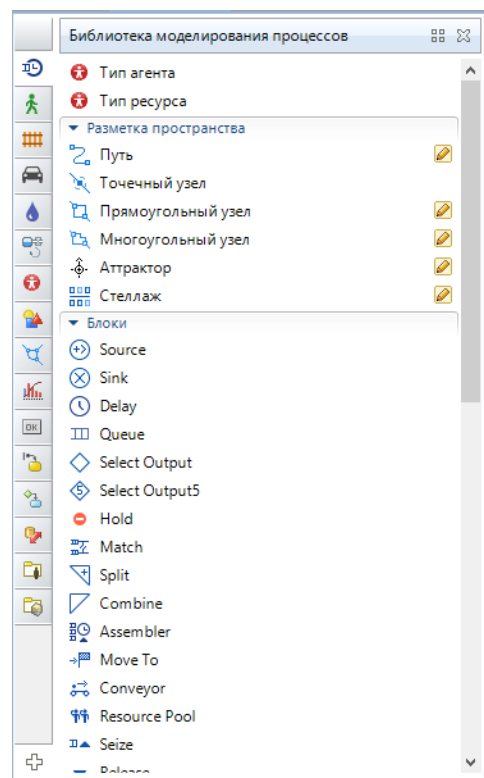


Рис. 3. Бібліотека моделювання процесів

Fig. 3. Process modeling library

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

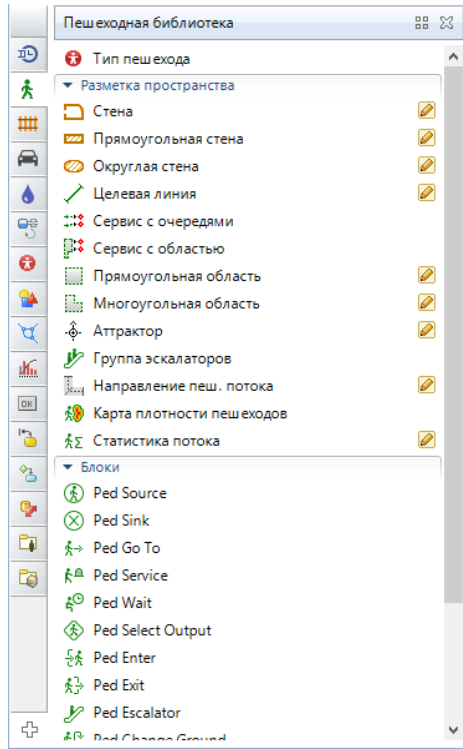


Рис. 4. Пішохідна бібліотека

Fig. 4. Pedestrian library

Пішохідна бібліотека AnyLogic є високорівневою бібліотекою моделювання руху пішоходів у фізичному просторі. Вона дозволяє моделювати будівлі, у яких рухаються пішоходи (станції метро, стадіони, музеї), а також вулиці й інші місця великого скупчення людей. За нею можна збирати статистичні дані [14].

Моделі руху пішоходів мають дві складові – середовище й поведінку. Під середовищем розуміють фізичні об'єкти – стіни, різні сфери, сервіси, черги тощо.

Основним об'єктом бібліотеки є пішохід, якого задають за допомогою об'єкта типу Ped. Пішохід «живе» в заданому фізичному просторі (середовищі) й пересувається згідно із заданими правилами. З іншого боку, тип пішохода успадкований від типу агента Agent, тому пішоходи пересуваються по блок-схемі так само, як агенти.

Блок-схему пішохідної моделі будують за допомогою об'єктів, що містяться в пішохідній бібліотеці. Тип агента Ped є базовим для моделювання пішоходів. У бібліотеці є об'єкти для створення пішоходів та управління потоком

пішоходів [7]. Правила задавання потоку пішоходів аналогічні правилам задавання потоку агентів у бібліотеці моделювання процесів.

Опис агентів:

➤ Main – головний агент моделі, який об'єднує всіх інших агентів. Цей агент описує повну роботу всієї моделі.

➤ Bus113A – агент, який описує властивості автобуса, що перевозить людей у системі. Він має свій параметр «Час появи 113», який фіксує час появи агента в системі. Агент має свою модель із 2D/3D – текстурою. Цей агент показаний на рис. 5.

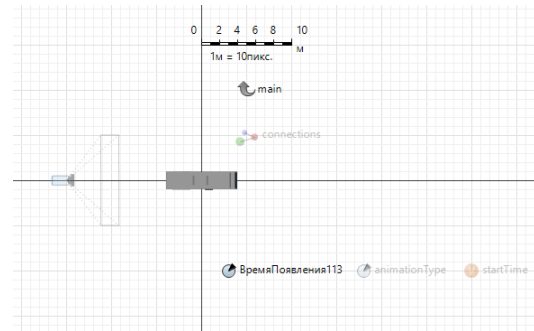


Рис. 5. Модель агента ➤ Bus113A

Fig. 5. Bus113A ➤ agent model

➤ Bus146A – агент, який описує властивості автобуса, що перевозить людей у системі. Він схожий з агентом ➤ Bus113A і має такий самий параметр – «Час появи 146».

➤ Car – агент, який описує властивості автомобілів, що рухаються у системі. Цей агент схожий з агентами ➤ Bus146A та ➤ Bus113A. Має властивість «Час появи» і п'ять текстур різного кольору. Агент представлений на рис. 6.

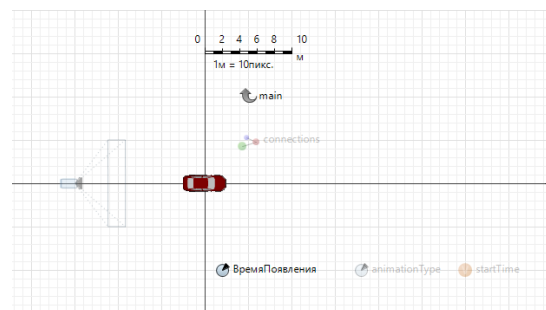


Рис. 6. Модель агента ➤ Car

Fig. 6. Car ➤ agent model

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

🚗 Vehicle – це агент без текстури, який слугує для того, щоб доповнювати агенти 🚗 Car, 🚌 Bus146A, 🚌 Bus113A та розширювати їх функціонал. Має камеру (camera), параметр «AnimationType» та змінну «StartTime».

🚶 Пішохід – агент, який описує властивості пішохода. Він схожий з агентом 🚗 Car, проте не доповнюється агентом 🚗 Vehicle і має свою текстуру.

В імітаційній моделі використано такі елементи:

1. Елемент «Дорога» є графічним елементом розмітки простору, це безперервна дорога (тобто така дорога, яка не містить перехрестя).

2. За допомогою спеціального елемента «Масштаб» можна задати масштаб анімації моделі, тобто відношення розміру об'єкта на анімації моделі до натурального розміру об'єкта, який моделюють. Фактично масштаб задають як співвідношення пікселів анімації та фізичної одиниці довжини.

3. За допомогою елемента розмітки простору «Перехрестя» можна поєднувати дві або більше дороги. Використовуючи дороги, перехрестя й інші елементи розмітки простору, можна створювати дорожні мережі для моделей бібліотеки дорожнього руху. Відображені на перехресті білі точкові лінії – з'єднувачі смуг – задають дозволені напрямки руху транспорту на (рис. 7).

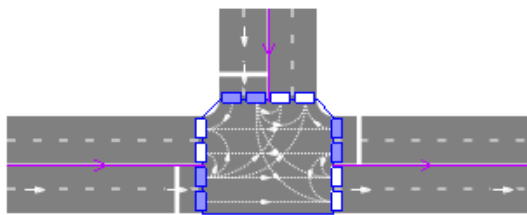


Рис. 7. Перехрестя

Fig. 7. Crossroad

4. За допомогою елемента розмітки простору «Автобусна зупинка» можна відобразити автобусну зупинку на узбіччі дороги в напрямку руху (рис. 8).

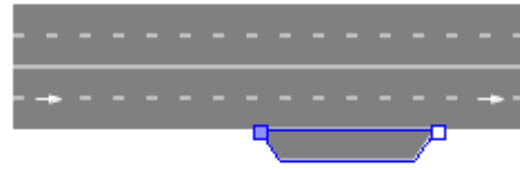


Рис. 8. Автобусна зупинка

Fig. 8. Bus stop

5. За допомогою елемента розмітки простору «Паркування» можна відобразити однорядні паркувальні місця, розташовані на узбіччях дороги.

Паркування може бути паралельне (машини паркують в одну лінію з іншими припаркованими машинами) або перпендикулярне – це задають у властивості «Тип паркування» (рис. 9).

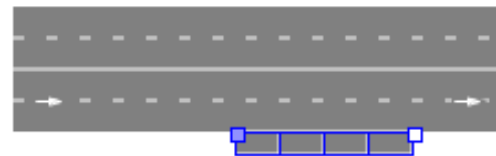


Рис. 9. Паркування

Fig. 9. Parking


1. 🚗 CarSource – створює автомобілі й намагається помістити їх у зазначеному місці дорожньої мережі (на обраній дорозі або паркувальному місці).


2. 🗑️ CarDispose – видаляє машини з моделі.


3. 🚗 CarMoveTo – блок, який керує рухом автомобіля. Автомобіль може їхати, тільки коли він перебуває у блоці CarMoveTo. Автомобіль намагається розрахувати шлях від свого поточного місця до зазначеного місця призначення, коли надходить до блока CarMoveTo. Місцем призначення можуть виступати: дорога, паркувальне місце, автобусна зупинка або стоп-лінія.


4. 🚦 TrafficLight – моделює світлофор, який керує рухом машин на перехресті або на будь-якій стоп-лінії.


ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ


5.  RoadNetworkDescriptor – опцій блок. За його допомогою розробники отримують доступ до управління всіма транспортними засобами, що перебувають в одній дорожній мережі. Блок дозволяє задавати дії, які відбуватимуться під час додавання автомобіля до дорожньої мережі, в'їзду на дорогу, зупинки автомобіля, зміни смуги тощо. Крім того, за допомогою цього блока можна відобразити затори на дорогах.


6.  PedSource – створює пішоходів. Цей блок зазвичай використовують як початкову точку діаграми пішохідного процесу.


7.  PedSink – видаляє пішоходів. Цей блок зазвичай відображає кінцеву точку діаграми пішохідного процесу.


8.  PedGoTo – змушує пішоходів йти до заданої точки простору.


9.  PedEnter – поміщає вже створених раніше пішоходів у модельоване середовище.


10.  PedExit – видаляє пішоходів із модельованого середовища.


11.  Delay – затримує агентів на заданий період часу.

12.  Queue – зберігає агентів у певному порядку. Моделює чергу агентів, які чекають приймання об'єктами, заданими в потоковій діаграмі.

13.  SelectOutput – направляє агентів в один з двох вихідних портів залежно від виконання заданої умови.

14.  SelectOutput5 – направляє агентів в один із п'яти вихідних портів залежно від виконання заданих умов.

15.  Pickup – додає агентів до вмісту агента-контейнера.

16.  DropOff – видаляє обраних агентів з агента-контейнера й посилає їх далі.

17. 3D-вікно – це елемент, що задає на діаграмі агента область, у якій під час запуску моделі буде відображатися тривимірна анімація цього об'єкта.

18. Область перегляду. За допомогою цього елемента можна виділити на діаграмі типу агента деякі області, що містять логічно відокремлені групи елементів або ділянки діаграми. Здавши такі області, можна легко перемикатися

між ними під час виконання моделі за допомогою спеціальних засобів навігації. Це дозволить швидко переходити до тієї або іншої ділянки діаграми агента.

19. Гістограма – це елемент, що відображає дані, зібрані об'єктом (на одній гістограмі можуть одночасно відображатися дані відразу декількох таких об'єктів). Вісь X завжди масштабується таким чином, щоб вмістити всі дані. Масштаб по осі Y також вибирається автоматично, таким чином, щоб висота найвищого стовпця дорівнювала висоті області діаграми.

Початок руху автомобіля починається в одному з блоків CarSource (рис. 10).

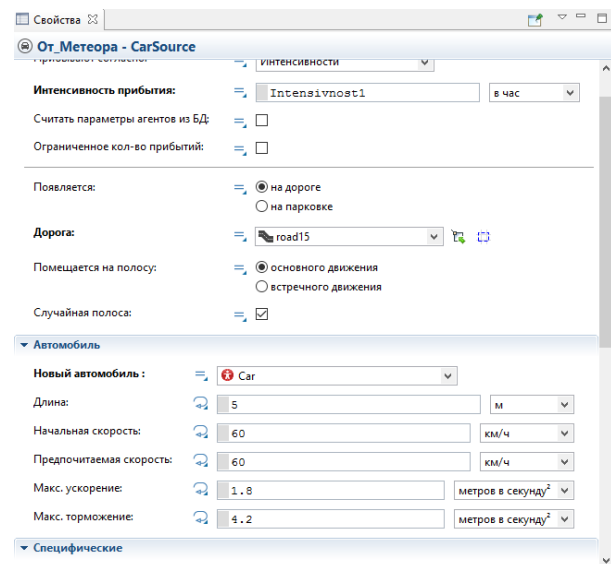


Рис. 10. Властивості блока CarSource

Fig. 10. CarSource block properties

У кожному з блоків CarSource можна вказати початкову дорогу або паркувальне місце, на яких будуть з'являтися автомобілі. Потрібно обрати тип автомобіля (агента, який відповідає за автомобіль), вказати початкові дані транспорту (початкову швидкість, середню швидкість, тощо), задати інтенсивність потоку.

Після цього потік потрапляє до блока SelectOutput5, який розподіляє, куди буде рухатися той чи інший автомобіль. у блоці SelectOutput5 є п'ять виходів зі своїми ймовірностями використання, що показано на рис. 11.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

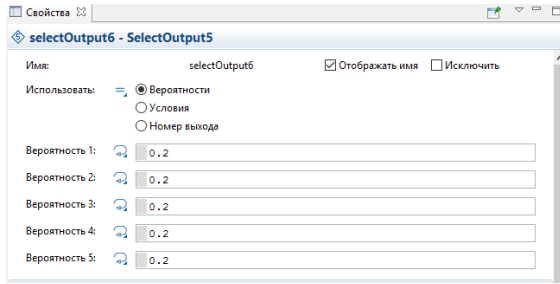


Рис. 11. Властивості блока SelectOutput5

Fig. 11. Properties of the SelectOutput5 block

Після обрання шляху автомобіль потрапляє до блока SelectOutput, який за властивостями схожий із блоком SelectOutput5, але має лише дві ймовірності з виходами:

1) за першою ймовірністю, автомобіль потрапляє до блока CarMoveTo, у властивостях якого вказано, до якої кінцевої дороги йому потрібно рухатися. Після приїзду до кінця обраної дороги автомобіль потрапляє до блока CarDispose, який видаляє його із системи;

2) За другою ймовірністю, автомобіль потрапляє до блока SelectOutput5, а після нього до блока CarMoveTo, у якому вказано місце паркування. Якщо немає вільного для паркування місця, то автомобіль іде далі за логікою. Якщо місце вільне, то автомобіль паркується і потрапляє до блока Delay, у якому вказано, скільки йому потрібно очікувати. Після потрібного очікування автомобіль іде далі за логікою моделі.

Після пункту 2 автомобіль знову потрапляє до блока вибору шляху, де, за ймовірністю обирає блок CarMoveTo. Автомобіль рухається до потрібної дороги, після чого видаляється із системи.

Логіку проїзду автомобілів у системі показано на рис. 12.

Після запуску моделі всі автомобілі рухаються за правилами дорожнього руху.

Такі блоки потрібні для того, щоб у процесі експерименту була можливість змінювати параметри (наприклад, параметр появи кількості автомобілів у системі).

У системі наявні елементи TrafficLight, які вже були описані. Налаштування таких блоків було повністю взято з реального життя для чистоти експерименту. Приклад налаштування показано на рис. 13.

Основну карту і логіку моделі показано на рис. 12–14.

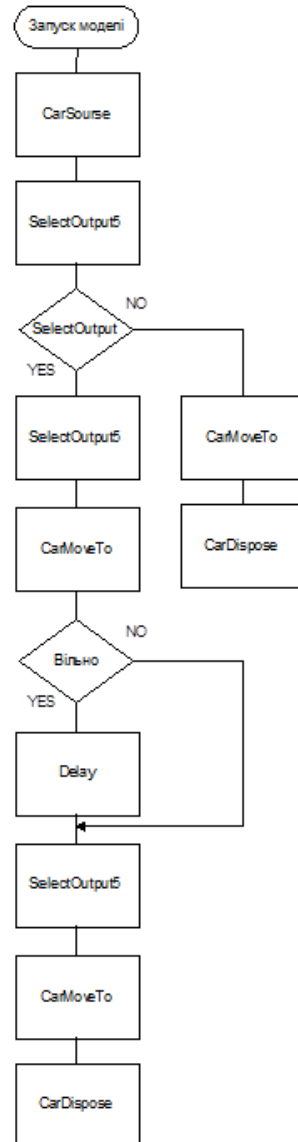


Рис. 12. Схема логіки проїзду автомобілів

Fig. 12. Scheme of the car passage logic

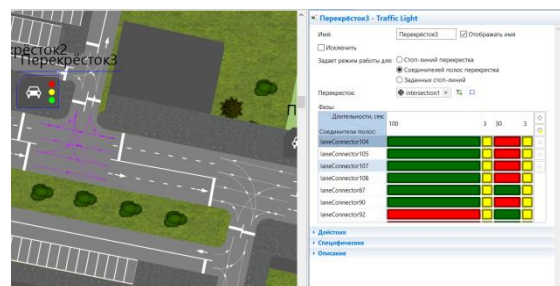


Рис. 13. Властивості блока TrafficLight

Fig. 13. TrafficLight block properties

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ



Рис. 14. Дорожня карта моделі

Fig. 14. Road map of the model

Результати

Експеримент повинен показати, які фактори найбільше впливають на появи заторів і збільшення навантаження на транспортну мережу. Для більш точних показників, кожен експеримент будемо проводити 5 разів. Час тестування – 1 година.

Експеримент 1. Провести експеримент у звичному режимі роботи транспортної мережі, без чинників, які впливають на систему.

Основні вхідні дані:

- кількість автомобілів у системі (табл. 1);
- кількість пішоходів у системі – 300 чоловік на годину;

- інтервал появи автобусів – кожні 10 хвилин;
- загальна кількість місць в автобусі – 45.

Таблиця 1

Кількість автомобілів у системі

Table 1

Number of cars in the system

Напрямок руху	Кількість появи легкових автомобілів
Від_Метеора Від_Макарова	200
Від_Кірова Від_Дафі	300
Від_Суворова	30
Від_Янгеля	70

Маємо статистику роботи моделі, для порівняння з іншими експериментами.

За динамікою проїзду автомобілів можна побачити, що модель працює стабільно, без просядань, стрімкого росту навантаження. Результати одного з експериментів показано на рис. 16.

Експеримент №	Час проїзду авто	Час проїзду 146 автобуса	Час проїзду 113 автобуса	Час знаходження пішоходів у системі	Середня постійна кількість пішоходів	Кількість авто у системі	Середня постійна кількість авто
1	210,09	364,31	449,94	601,10	50,79	1043	81,79
2	206,42	357,69	496,32	558,75	45,20	1012	71,88
3	204,65	428,41	497,30	597,55	48,99	977	75,44
4	220,92	354,39	467,93	674,08	55,88	973	73,19
5	201,57	414,41	458,30	652,60	54,79	1010	79,80
Середнє значення:	208,73	383,84	473,96	616,82	51,13	1003,00	76,42

Рис. 15. Результати експериментів

Fig. 15. The results of experiments

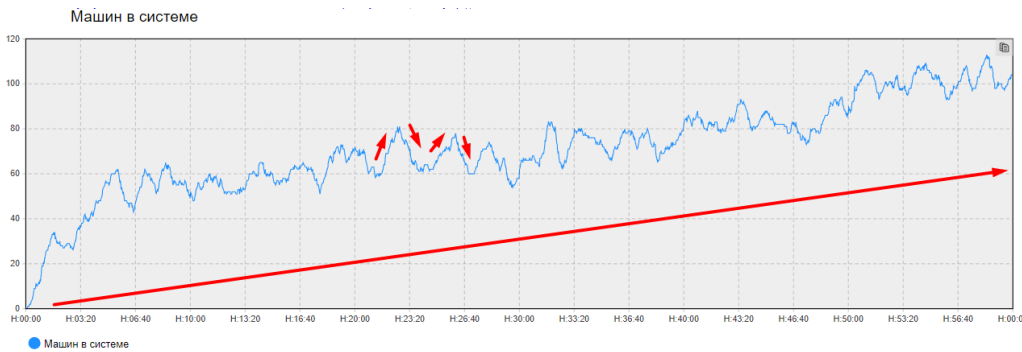


Рис. 16. Динаміка проїзду авто

Fig. 16. Car passage dynamics

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

A	B	C	D	E	F	G	H
Експеримент №	Час проїзду авто	Час проїзду 146 автобуса	Час проїзду 113 автобуса	Час знаходження пішоходів у системі	Середня постійна кількість пішоходів	Кількість авто у системі	Середня постійна кількість авто
1	393,16	630,12	624,25	869,98	42,95	991	148,34
2	391,12	611,41	666,03	909,63	65,56	1228	143,22
3	440,48	668,03	681,88	912,61	64,99	1199	145,18
4	441,55	663,61	713,30	903,59	73,78	1194	154,58
5	520,41	867,42	778,30	1009,31	86,39	1035	148,86
Середнє значення:	437,34	688,12	692,75	921,02	66,734	1129,40	148,04

Рис. 17. Результати експериментів

Fig. 17. The results of experiments

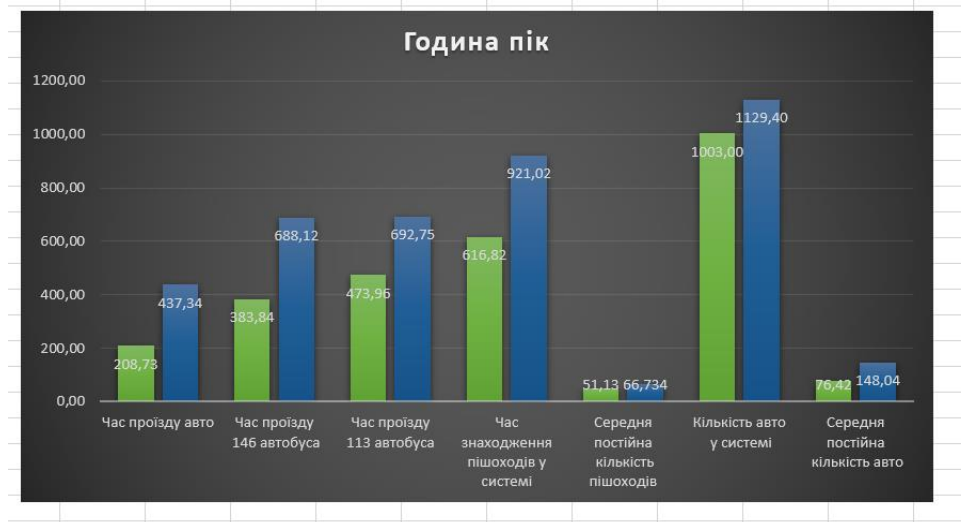


Рис. 18. Порівняння експериментів

Fig. 18. Comparison of experiments

Висновок: під час розбору графіка проїзду можна побачити зростання й падіння тренду, що є коректним. Основне зростання зумовлено тим, що в системі є місця для паркування автомобілів. Такі автомобілі теж вважають «Автомобілями в системі».

Ці результати будемо вважати результатами правильної роботи моделі.

Експеримент 2. Збільшити кількість автомобілів за кожним основним напрямком на 100, імітуючи «Годину пік». Вихідні дані:

- кількість автомобілів у системі (табл. 2)
- кількість пішоходів у системі – 300 чоловік на годину;
- інтервал появи автобусів – кожні 10 хвилин;
- загальна кількість місць в автобусі – 45.

Таблиця 2

Кількість автомобілів у системі

Table 2

Number of cars in the system

Напрямок	Кількість появи легкових авто
Від_Метеора Від_Макарова	300
Від_Кірова Від_Дафі	400
Від_Суворова	30
Від_Янгеля	70

На рис. 18 можна побачити стрімке зростання часу в кожному параметрі, у деяких зростання досягло понад 45 %.

Висновок: зі збільшенням кількості автомобілів у системі збільшується й час проходження

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

системи транспортом. Зростає час очікування й проходження системи для пішоходів, оскільки автобуси стоять у заторах і не можуть вчасно прибути до зупинки.

Під час проведення експериментів було виявлено, що в разі звичайної роботи транспортної мережі швидкість проїзду всього виду транспорту задовільна. У випадку появи чинників, які створюють велике навантаження, збільшується час проїзду всього виду транспорту. Було виявлено такі фактори, які можуть вплинути на оптимальну роботу мережі навіть під великим навантаженням:

1. Для уникнення великого скупчення людей на зупинках:

– у час, коли трафік починає збільшуватися (у ранці й вечері), зменшити інтервал між автобусами. Таким чином час очікування на зупинках зменшиться, а бюджет автопарку збільшиться;

– збільшити кількість місць в автобусі (оновлення автопарку);

– надавати можливість пішоходам використовувати альтернативний транспорт, наприклад, електросамокати;

– організувати окремі смуги для руху міського транспорту;

– побудувати метро;

2. Для уникнення заторів на дорогах:

– у час, коли трафік починає збільшуватися (у ранці й вечері) змінювати фази перемикання світлофорів таким чином, щоб навантажені ділянки дороги проїжджати швидше;

– заохочувати автомобілістів пересідати на міський транспорт у годину пік;

– розширювати основні навантажені дороги/перехрестя.

Наукова новизна та практична значимість

Новим у роботі є створення загальної методології імітаційного моделювання процесів та вдосконалення формалізації методу агентного моделювання.

Усі результати, отримані в роботі, є новими й актуальними, зокрема, запропонована модель агента-учасника дорожнього руху, що відображає основні аспекти поведінки водіїв. Також виконано програмну реалізацію моделі агента, придатну для дослідження транспортних систем. Усі дослідження виконано на основі реальної транспортної системи.

Висновки

У цій статті запропоновано методику вирішення проблем заторів засобами імітаційного моделювання. Було побудовано модель на основі реальної транспортної мережі. Проведено ряд експериментів з імітацією різних проблем, які можуть виникнути на дорозі. За зібраними статистичними даними розроблено рекомендації для оптимізації руху.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Боев В. Д. *Компьютерное моделирование* : пособие для практических занятий, курсового и дипломного проектирования в AnyLogic7. Санкт-Петербург : ВАС, 2014. 432 с.
2. Боев В. Д. *Моделирование в среде AnyLogic* : учебное пособие для вузов. Юрайт, 2017. 168 с.
3. Боев В. Д. *Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World* : учебное пособие. Санкт-Петербург, 2019. 346 с.
4. *Вільна енциклопедія Wikipedia*. URL: <https://uk.wikipedia.org>
5. Вионенко Л. Ф., Михайлов М. В., Першозванска Т. Н. *Імітаційне моделювання* : підручник і практикум для академічного бакалаврату. Москва, 2017. 283 с.
6. Задорожний В. М. *Аналітико-імітаційні дослідження систем та мереж масового обслуговування* : монографія. Омск, 2010. 280 с.
7. *Імітаційне моделювання*. URL: http://ni.biz.ua/5/5_3/5_32577_imitatsionnoe-modelirovanie.html
8. *Как Ford использует имитационное моделирование при разработке беспилотных автомобилей*. URL: <https://nfp2b.ru/2020/04/02/kak-ford-ispolzuet-imitatsionnoe-modelirovanie-pri-razrabotke-bespilotnyh-avtomobilej/>

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

9. Куприяшкин А. Г. *Основы моделирования систем* : учеб. пособие. Норильск : НИИ, 2015. 135 с.
10. *Міністерство інфраструктури України*. URL: <https://mtu.gov.ua/timeline/Dorozhne-gospodarstvo.html>
11. Першаков В. М., Белятинський А. О., Степанчук О. В., Кротов Р. В. *Дослідження транспортних потоків в аспекті заторюваних станів дорожнього руху* : монографія. Київ : НАУ, 2015. 177 с.
12. *Система Actor Pilgrim*. URL: <http://simulation.su/static/actor-pilgrim-full-info.html>
13. Строгалева В. П., Толкачева И. О. *Имитационное моделирование*. Москва, 2017. 296 с.
14. *AnyLogic*. URL: <https://www.anylogic.ru/>
15. Borshchev A., Grigoryev I. *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 8*. URL: <https://www.anylogic.ru/resources/books/big-book-of-simulation-modeling/>
16. *Methodology for TRITIA transport model*. Transport Research Institute. 2019. 43 p.
17. Novikov A., Eremin S., Kulev A. Formation of recommendations for the selection of types of connections for different types of crossroads based on the generalized imitation model. *MATEC Web of Conferences ICMTMTE*. 2019. Vol. 298. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929800047>

A. V. HORBOVA^{1*}, O. D. MERZLYI^{2*}

^{1*}Dep. «Computer Information Technologies», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail alexandra.gorbova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5612-2715

^{2*}Dep. «Computer Information Technologies», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail zver343434@gmail.com, ORCID 0000-0002-5219-5028

Research of Automobile Flows by Imitation Simulation

Purpose. Road transportation has become a very important part of the transportation process and interaction with all modes of transport, carrying out the transportation of goods and passengers. Due to the increase in traffic flows in the transport network, the problem of their rational organization is urgent. However, taking into account the influence of various factors, such as the congestion of the road section, the condition of the road, this problem cannot be solved using analytical models based on graph models. The purpose of solving the problem is to develop a safe traffic model by the method of simulation of coordinated traffic flows in the urban road network and to develop a computer simulation system necessary to achieve this purpose. **Methodology.** To search for effective strategies for controlled traffic flows in a megalopolis, optimal solutions for the design of the road network and traffic management, it is necessary to take into account a wide range of traffic flow characteristics, the regularities of the influence of external and internal factors on the dynamic characteristics of a mixed traffic flow. The use of modeling and the creation of an adequate model of traffic flow is an urgent task in the process of organizing and managing traffic. The research methodology will make it possible to create an integrated approach to solving problems of the given type and will contain a symbiosis of theoretical and experimental research. **Findings.** During the experiments, it was found that with the normal operation of the transport network, the travel speed of the entire mode of transport is satisfactory. With the appearance of factors creating a large load, the travel time of the entire mode of transport increases. We have identified the factors that can affect the optimal operation of the network, even under heavy load. **Originality.** For the first time the general methodology of simulation modeling was created and the formalization of the agent-based modeling method was improved. **Practical value.** The results of the work are used as the basis for a system of simulation modeling of traffic flows, which makes it possible to analyze the properties of existing and projected transport hubs. The system is implemented in the form of a software package that can be used in public administration institutions, design organizations and consulting companies involved in the design and reorganization of traffic patterns. The proposed agent model can be used as part of more complex simulation models of organizational and technical systems.

Keywords: traffic flow; simulation modeling; graph model; traffic management strategy; road network

REFERENCES

1. Boev, V. D. (2014). *Kompyuternoe modelirovanie: posobie dlya prakticheskikh zanyatiy, kursovogo i diplomnogo proektirovaniya v AnyLogic7*. Saint Petersburg: VAS. (in Russian)
2. Boev, V. D. (2017). *Modelirovanie v srede AnyLogic: uchebnoe posobie dlya vuzov*. Yurayt. (in Russian)
3. Boev, V. D. (2019). *Modelirovanie sistem. Instrumentalnye sredstva GPSS World: uchebnoe posobie*. Saint Petersburg. (in Russian)
4. *Free encyclopedia Wikipedia*. Retrieved from <https://uk.wikipedia.org> (in Ukrainian)
5. Vionenko, L. F., Mikhailov, M. V., & Pershozvanska, T. N. (2017). *Imitacijne modeljuvannja: pidruchnyk i praktykum dlja akademichnogo bakalavratu*. Moscow. (in Ukrainian)
6. Zadorozhny, V. M. (2010). *Analitiko-imitacijni doslidzhennja sy`stem ta merezh masovogo obslugovuvannya: monografiya*. Omsk. (in Ukrainian)
7. *Simulation modeling*. Retrieved from http://ni.biz.ua/5/5_3/5_32577_imitatsionnoe-modelirovanie.html (in Ukrainian)
8. *Kak Ford ispolzuet imitatsionnoe modelirovanie pri razrabotke bespilotnykh avtomobiley*. Retrieved from <https://nfp2b.ru/2020/04/02/kak-ford-ispolzuet-imitatsionnoe-modelirovanie-pri-razrabotke-bespilotnyh-avtomobilej/> (in Russian)
9. Kupriyashkin, A. G. (2015). *Osnovy modelirovaniya sistem: uchebnoe posobie*. Norilsk: NIL. (in Russian)
10. *Ministry of Infrastructure of Ukraine*. Retrieved from <https://mtu.gov.ua/timeline/Dorozhne-gospodarstvo.html> (in Ukrainian)
11. Pershakov, V. M., Bieliatynskyi, A. O., Stepanchuk, O. V., & Krotov, R. V. (2015). *Doslidzhennja transportnykh potokiv v aspekti zatorovykh staniv dorozhnjogho rukhu: monografija*. Kiev: NAU. (in Ukrainian)
12. *System Actor Pilgrim*. Retrieved from <http://simulation.su/static/actor-pilgrim-full-info.html> (in Russian)
13. Strogalev, V. P., & Tolkacheva, I. O. (2017). *Imitatsionnoe modelirovanie*. Moscow. (in Russian)
14. *AnyLogic*. Retrieved from <https://www.anylogic.ru/> (in Russian)
15. Borshchev, A., & Grigoryev, I. *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 8*. Retrieved from <https://www.anylogic.ru/resources/books/big-book-of-simulation-modeling/> (in English)
16. *Methodology for TRITIA transport model*. (2019). Transport Research Institute. (in English)
17. Novikov, A., Eremin, S., & Kulev, A. (2019). Formation of recommendations for the selection of types of connections for different types of crossroads based on the generalized imitation model. *MATEC Web of Conferences* (Vol. 298, pp. 1-10). DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929800047> (in English)

Надійшла до редколегії: 28.05.2021

Прийнята до друку: 01.10.21