

А.О. Мартинович, П.О. Гуменюк

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ РУХУ НА КЕРОВАНИХ ПЕРЕХРЕСТЯХ

Робота присвячена моделюванню транспортних потоків на керованих перехрестях, зокрема вивчення їх динаміки, взаємодії між транспортними засобами, впливу сигналів світлофорів та стратегій керування рухом на ефективність перехрестя. Розроблені моделі дозволять прогнозувати ефективність різних стратегій керування, виявляти проблемні ситуації та шукати шляхи їх усунення. Результати моделювання можуть бути використані для покращення руху на керованих перехрестях у реальних умовах. Це може призвести до зменшення заторів, затримок та покращення пропускної здатності перехрестя, що сприятиме підвищенню якості руху та зручності для водіїв та пасажирів. Крім того, отримані результати можуть бути використані при проектуванні та плануванні розвитку транспортних мереж та інфраструктури.

Ключові слова: моделювання, Python, транспортні потоки, регулювання, перехрестя.

A. Martynovych, P. Humeniuk

MODELING OF TRAFFIC FLOWS IN THE STUDY OF TRAFFIC AT CONTROLLED INTERSECTIONS

This work is devoted to the modeling of traffic flows at controlled intersections, in particular, the study of their dynamics, interaction between vehicles, the impact of traffic signals and traffic control strategies on the efficiency of the intersection. The developed models will make it possible to predict the effectiveness of various control strategies, identify problem situations and look for ways to eliminate them. The modeling results can be used to improve traffic at controlled intersections in real-world conditions. This can lead to reduced congestion, delays, and improved intersection capacity, which will improve traffic quality and convenience for drivers and passengers. In addition, the results obtained can be used in the design and planning of transport networks and infrastructure development.

Key words: modeling, Python, traffic flows, regulation, intersection.

Постановка проблеми. Розвиток міст зумовлює зростання кількості транспортних засобів, що призводить до збільшення транспортних потоків і підвищення навантаження на керовані перехрестя. Відправна точка вирішення проблеми полягає в розумному керуванні рухом, що дозволить забезпечити максимальну ефективність транспортної системи і зменшити затримки.

Моделювання транспортних потоків на регульованих перехрестях є важливою темою, що має значну актуальність в галузі автоматизації управління. Регульовані перехрестя, як правило, обладнані світлофорами або знаками зупинки, які управляють потоком транспортних засобів і пішоходів, і ефективність цих засобів регулювання може мати значний вплив на затори, безпеку та екологічну стійкість.

Розробляючи точні моделі транспортних потоків на регульованих перехрестях, можна краще зрозуміти фактори, які сприяють заторам і затримкам, і визначити стратегії для поліпшення транспортного потоку і скорочення часу в дорозі. Ці моделі також можна використовувати для оцінки впливу різних стратегій управління, таких як оптимізація часу сигналів світлофора або впровадження інтелектуальних транспортних систем.

Крім того, моделювання транспортних потоків на регульованих перехрестях важливе для проектування та планування транспортної інфраструктури. Ці моделі можна використовувати для прогнозування майбутніх обсягів руху і планування відповідної кількості та розташування перехресть, а також для визначення оптимального дизайну перехресть для забезпечення максимальної безпеки та ефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз потоків транспорту на керованих перехрестях допомагає зрозуміти, як розподіляється рух на перехресті, виявити проблеми перевантаження, заторів або недостатньої потужності на перехресті [1]. Одним з підходів до дослідження транспортних потоків на керованих перехрестях є імітаційне моделювання. Ці моделі дозволяють створити віртуальну модель перехрестя, де можна симулювати різні сценарії руху транспорту та вивчити їх вплив на пропускну здатність, час очікування та інші показники ефективності [2-4].

Імітаційні моделі зазвичай базуються на детальному моделюванні поведінки окремих транспортних засобів, їх реакції на сигнали світлофорів, правила дорожнього руху та інші фактори. Ці моделі враховують різні змінні, такі як густина руху, типи транспортних засобів, швидкість руху, поведінку водіїв тощо. Вони можуть бути використані для тестування різних сценаріїв регулювання світлофорів, встановлення пріоритетів руху, оптимізації сигналізації та інших аспектів керування рухом на перехрестях.

Сучасний рівень моделювання руху на керованих перехрестях характеризується використанням мікросимуляції та врахування розуміння поведінки водіїв. Мікросимуляція є потужним інструментом для моделювання руху транспорту на перехрестях. Вона враховує поведінку окремих транспортних засобів та пішоходів, їх взаємодію та реакцію на зміни у рухових умовах. Це дозволяє отримати докладні дані про пропускну спроможність, швидкість руху, затримки та інші параметри на перехрестях. Сучасні моделі враховують можливість водіїв змінювати смуги руху на перехрестях, що впливає на потік транспорту та пропускну спроможність, що дає можливість точніше відтворювати реальні умови руху на перехрестях.

Моделі враховують розміщення транспортних засобів, пішоходів та інших учасників руху на перехрестях. Це дозволяє аналізувати взаємодію між ними та визначати можливі конфліктні ситуації. Деякі сучасні моделі відтворюють індивідуальні особливості водіїв, такі як їхні навички, рівень досвіду, поведінку та прийняття рішень, що дозволяє точніше відтворювати реальну ситуацію на дорозі та аналізувати вплив цих факторів на рух транспорту.

Майбутнє моделювання руху на керованих перехрестях характеризується такими тенденціями, як використання штучного інтелекту (ШІ), використання даних в реальному часі, розвиток системи "розумних" перехрестів та впровадження екологічних аспектів.

Існують спеціалізовані програмні засоби для моделювання транспортних потоків на керованих перехрестях, наприклад, AIMSUN, VISSIM, PARAMICS [5-7], однак вони є досить складними у використанні і вони є комерційним програмним забезпеченням, що може вимагати значних витрат.

Постановка завдань. Метою роботи є моделювання транспортних потоків при дослідженні руху на керованих перехрестях, а також застосування комп'ютерного моделювання для аналізу та оптимізації транспортних потоків.

Викладення основного матеріалу. Запропонована модель проїзду перехрестя включає чотири сценарії.

Моделювання проїзду перехрестя зі світлофором окремими автомобілями. Моделюється ситуація, коли окремі автомобілі прибувають до світлофора протягом 1-хвилинних інтервалів і обчислюється середній час очікування автомобілів.

Час прибуття автомобілів моделюємо, як рівномірно розподілену випадкову величину на інтервалі $[0, 60]$ (тобто кожен окремий автомобіль має однакову ймовірність прибути у будь-який момент часу протягом хвилини).

Проведемо симуляції для значення greenTime (час зеленого кольору на світлофорі), починаючи з 0.6 секунди і з кроком 0.2 секунди (до 59.4 секунди) і для кожного значення greenTime обчислимо середнє значення для 20 незалежних прогонів моделі (прибуття автомобілів). Залежність очікування однією машиною від відношення часу зеленого кольору до загального часу світлофора наведена на рисунку 1.

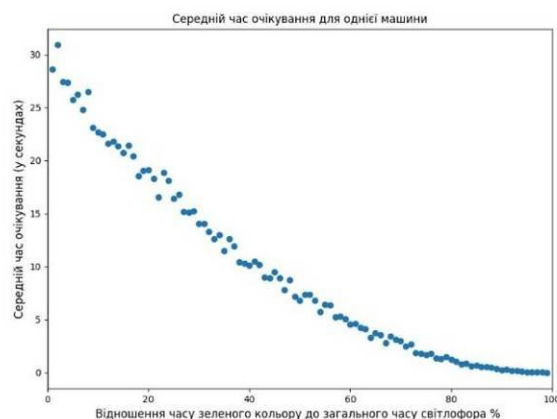


Рис. 1. Залежність очікування однією машиною від відношення часу зеленого кольору до загального часу світлофора.

З графіка видно, що коли відношення часу зеленого кольору до загального часу світлофора (greenTime %) низьке, середній час очікування становить приблизно 30 секунд. Так відбувається, оскільки загальний час червоного кольору становить близько 60 секунд, а очікуваний час прибуття автомобіля - 30 секунд, отже, в середньому кожен автомобіль має очікувати близько 30 секунд до того, як світлофор знову загориться зеленим.

Аналогічно, коли відношення часу зеленого та червоного кольору становить 50-50, середній час очікування знаходиться між 5 та 10 секундами. В цьому випадку ми можемо очікувати, що половина автомобілів прибуває між 0-30 секунд з часом очікування 0, а інша половина прибуває між 30-60 секунд з середнім часом очікування 15 секунд, що веде до загального середнього часу очікування 7,5 секунд.

Нарешті, коли світлофор майже все час вмикає зелений колір, середній час очікування становить близько 0 секунд, як і очікувалося.

Моделювання проїзду перехрестя зі світлофором транспортним потоком. Автомобілі, що прибувають, розглядаємо, як випадкову змінну Пуассона, і знову розглядаємо середній час очікування автомобіля на основі трьох змінних:

1. Швидкість прибуття автомобілів: від 2 до 38 за хвилину.
2. Частка зеленого часу (%) від 60-секундного інтервалу (світлофор зелений).
3. Швидкість пропуску автомобіля: кількість автомобілів, які можуть проїхати на світло за секунду, коли горить зелене світло.

Визначаємо функцію `calculateAverageWait(numcars, limit, redTime)`, яка обчислює середній час очікування для автомобілів, враховуючи кількість автомобілів, що прибули, ліміт автомобілів, які можуть проїхати через світлофор за секунду і час червоного світла.

Встановлюємо три різні типи змінних: час зеленого світла, швидкість прибуття автомобілів і посекундна швидкість для автомобілів. Визначаємо `gateVals` як список можливих значень швидкості прибуття автомобілів (від 2 до 40, з кроком 2), `passVals` як список можливих значень кількості автомобілів, які можуть проїхати через світлофор за секунду (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5), і `grVals` як список можливих значень відсотка зеленого світла від часу світлофора (0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7).

Проводимо дві різні симуляції з використанням цих змінних:

- перша симуляція змінює швидкість прибуття автомобілів та відсоток зеленого світла у часі роботи світлофора;
- друга симуляція змінює швидкість прибуття автомобілів і швидкість, з якою вони можуть проїхати через світлофор (транспортний потік).

Результати моделювання швидкості прибуття автомобілів та відсотку зеленого світла у часі роботи світлофора представлені на рисунку 2.

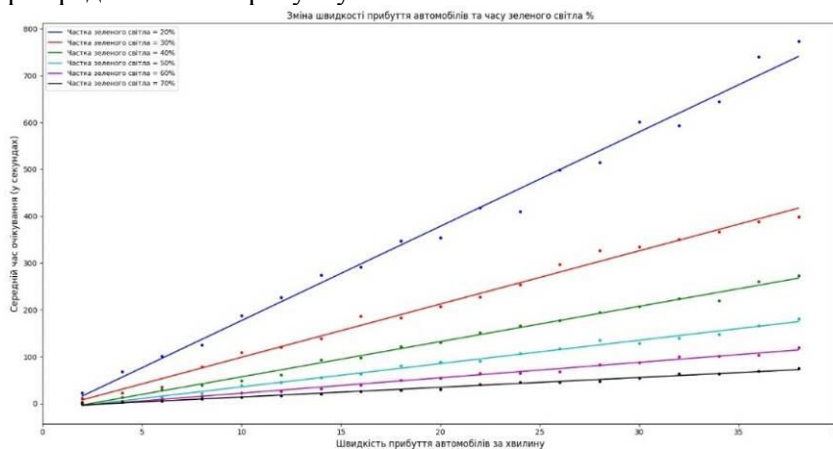


Рис. 2. Залежність часу очікування проїзду перехрестя зі світлофором від частки зеленого світла та швидкості прибуття автомобілів.

Коли автомобілі прибувають швидше, середній час очікування збільшується. Це означає, що чим більше автомобілів прибуває за певний період часу, тим довше автомобілі мають чекати перед світлофором. Однак, градієнт або темп зростання середнього часу очікування залежить від

відсоткового співвідношення між часом, коли світиться зелене світло, і часом, коли світиться червоне світло.

Наприклад, якщо зелене світло горить протягом 60% часу, а червоне світло - протягом 40% часу, то обмеження на кількість автомобілів, які можуть проїхати за зеленого світла, буде більшим, ніж у випадку, коли зелене світло горить лише 30% часу. Таким чином, чим більший відсоток зеленого світла, тим більше автомобілів можуть проїхати за цей час, і менше автомобілів мають чекати.

Отже, градієнт або швидкість зростання середнього часу очікування залежить від того, наскільки тривало горить зелене світло.

Для обчислення середнього часу очікування для групи автомобілів з різною швидкістю прибуття та іншими змінними використовується функція `calculateAverageWait`. Потім будується графік результатів за допомогою Matplotlib (рис. 3).

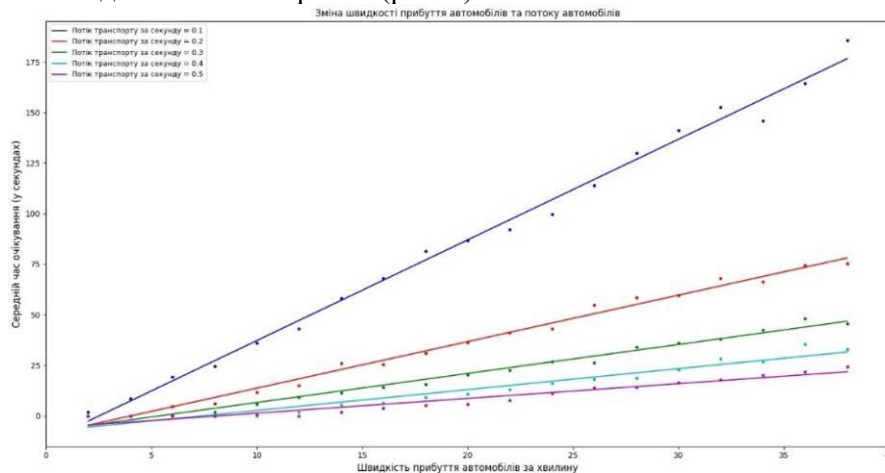


Рис. 3. Залежність часу очікування проїзду перехрестя зі світлофором від щільності потоку та швидкості прибуття автомобілів.

При зміні значення швидкості проходження автомобілів (транспортний потік), а не відсотку часу, протягом якого горить зелене світло, спостерігається подібна залежність. Зміна швидкості проходження автомобілів впливає на середній час очікування і градієнт залежить від цієї швидкості.

Наприклад, якщо автомобілі можуть проїхати світлофор за секунду з швидкістю 0.1, то обмеження на кількість автомобілів, які можуть проїхати за зеленого світла, буде меншим, ніж при швидкості 0.5. Таким чином, коли швидкість проходження автомобілів зростає, градієнт або темп зростання середнього часу очікування також зростає. Це означає, що зі збільшенням швидкості проходження автомобілів середній час очікування буде збільшуватися швидше.

Моделювання проїзду перехрестя зі світлофором та можливістю блокування перехрестя. За базову взято другу модель та додано можливість блокування перехрестя. Під час інтенсивного руху (тобто великої кількості автомобілів) транспортні розв'язки часто блокуються, оскільки автомобілі або залишаються на перехресті, коли світло стає червоним, або продовжують проїжджати після того, як світло стає червоним і, отже, блокують зустрічний рух.

Використаємо ймовірність блокування (p), тобто, коли автомобілі прибувають на світлофор, то з ймовірністю p , перехрестя блокується, тому, навіть якщо є зелене світло, усі автомобілі повинні чекати повних 60 секунд (`greenTime + redTime`) до того, як вони матимуть можливість просунутися (або знову бути заблокованими з ймовірністю p).

За результатами моделювання побудовано графіки залежності середнього часу очікування (в секундах) для кожного автомобіля від швидкості прибуття автомобілів за хвилину – рисунок 4.

Зі зростанням ймовірності блокування перехрестя середній час очікування автомобілів значно збільшується. Іншими словами, коли існує більша ймовірність блокування, автомобілі довше чекають на перехресті, щоб проїхати.

Крім того, варіабельність часу очікування (розкид значень) також збільшується при зростанні ймовірності блокування. Це означає, що коли перехрестя частіше блокується, час очікування автомобілів стає менш прогнозованим і може значно варіюватись від одного автомобіля до іншого навколо певної середньої лінії.

Тобто, ймовірність блокування перехрестя має суттєвий вплив на час очікування автомобілів, збільшуючи як середній час очікування, так і його варіабельність.

Моделювання проїзду перехрестя зі світлофором з врахуванням інтенсивності руху.
Основні припущення щодо транспортного потоку:

1. Швидкість, з якою автомобілі можуть проїжджати на зелене світло, зменшується, оскільки трафік стає щільнішим – чим щільніший трафік тим в цілому всі автомобілі рухаються на перехресті повільніше.

2. Ймовірність того, що інші автомобілі заблокують перехрестя на зелене світло, також зростає зі щільністю руху. У більш інтенсивному трафіку більша ймовірність того, що автомобілі в кінцевому підсумку заблокують, коли відповідне світло стане червоним.

3. Якщо автомобілі й блокують перехрестя, то не на весь період зеленого світла, а на певний проміжок часу.

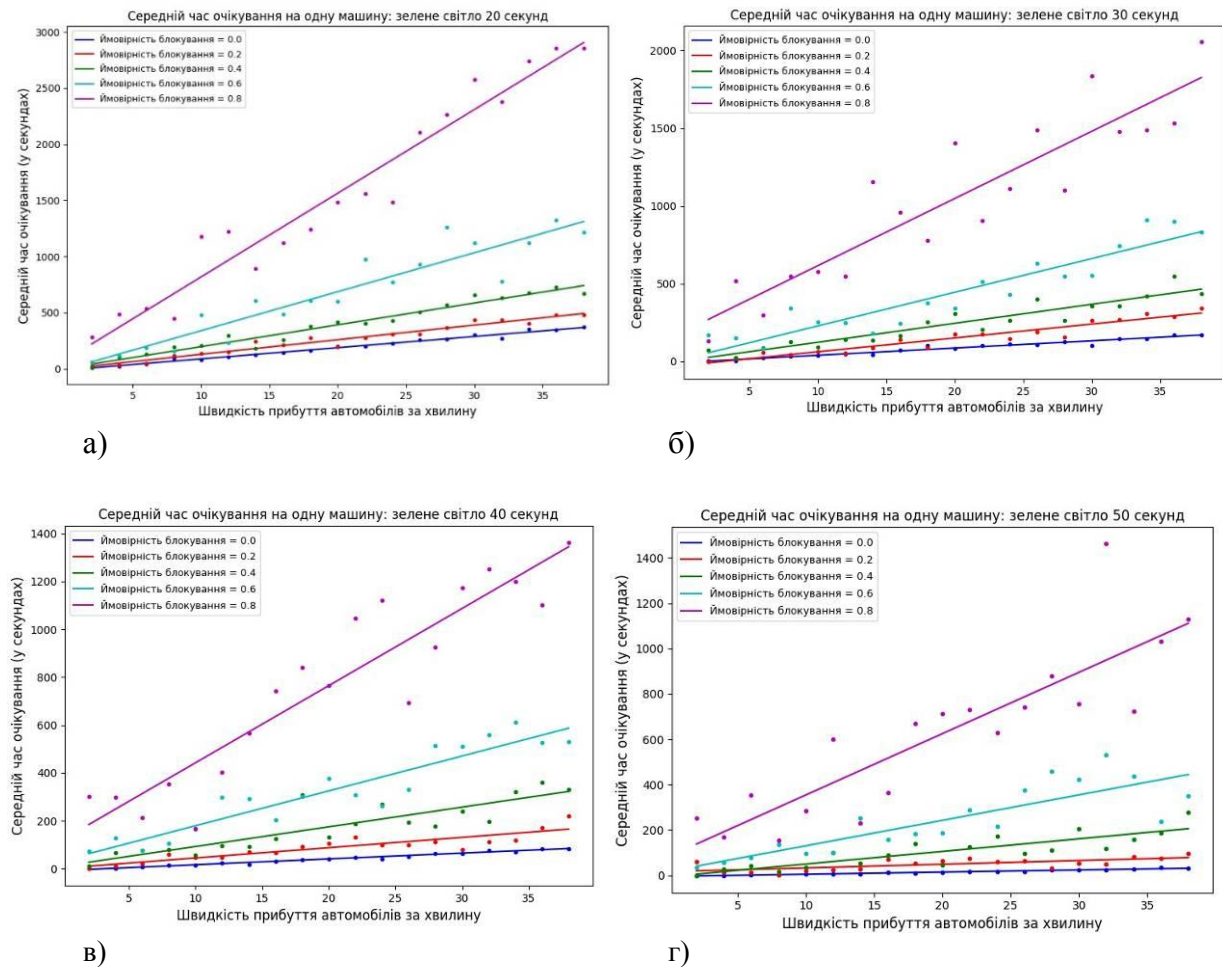


Рис. 4. Залежність часу очікування автомобіля від швидкості прибуття автомобіля для різних значень ймовірності блокування (p): а), б), в), г) – час зеленого світла на світлофорі 20,30,40,50 секунд відповідно.

В моделі передбачено три типи дорожніх умов: легкий, середній та інтенсивний:

Невеликий рух (L):

- швидкість прибуття автомобілів: 8 автомобілів за хвилину,
- швидкість пропуску автомобіля: 1 автомобіль за секунду при зеленому сигналі світлофора,
- ймовірність блокування: 0,05,
- час блокування: 5% періоду зеленого світла.

Середній трафік (М):

- швидкість прибуття автомобілів: 12 автомобілів за хвилину,
- швидкість пропуску автомобіля: 0,9 автомобіля за секунду, коли горить зелене світло (90% від нормального показника),
- ймовірність блокування: 0,2,
- час блокування: 20% періоду зеленого світла.

Інтенсивний рух (Н):

- швидкість прибуття автомобілів: 20 автомобілів за хвилину,
- швидкість пропуску автомобіля: 0,72 автомобіля за секунду, коли горить зелений сигнал світлофора (72% від нормального показника),
- ймовірність блокування: 0,45,
- час блокування: 50% періоду зеленого світла.

Моделювання щохвилинне протягом одногодинного періоду. 60-хвилинний період розділено на п'ять різних підперіодів:

1. 5 хв
2. 15 хвилин інтенсивного руху
3. 20 хвилин із середнім трафіком
4. 15 хвилин інтенсивного руху
5. 5 хв

Для кожного 1-хвилинного періоду модель додає нову кількість автомобілів до черги очікування на основі швидкості прибуття та використовує функцію runTraffic, щоб:

- змодельовати ймовірність того, що перехрестя заблоковано,
- обчислити кількість автомобілів, які можуть проїхати,
- оновити час очікування для кожного автомобіля, який проїжджає,
- обчислити середній час очікування автомобілів, які проїхали за цей період,
- прибрати з черги машини, що проїхали,
- оновити час очікування для кожного з автомобілів, які все ще стоять у черзі.

Для кожного хвилинного інтервалу для автомобілів, які не проїхали на світло, додаємо 60 секунд до їх загального часу очікування.

Модель запускає симуляцію для 1000 ітерацій, і для кожної ітерації імітується 60 хвилин руху. Відстежується кількість автомобілів, що чекають на перехресті, кількість автомобілів, що проїхали, середній час очікування для автомобілів і час очікування для кожного автомобіля, що проїхав.

На рисунку 5 представлено розмір черги та кількість автомобілів, що пройшли перехрестя за 60 секунд.

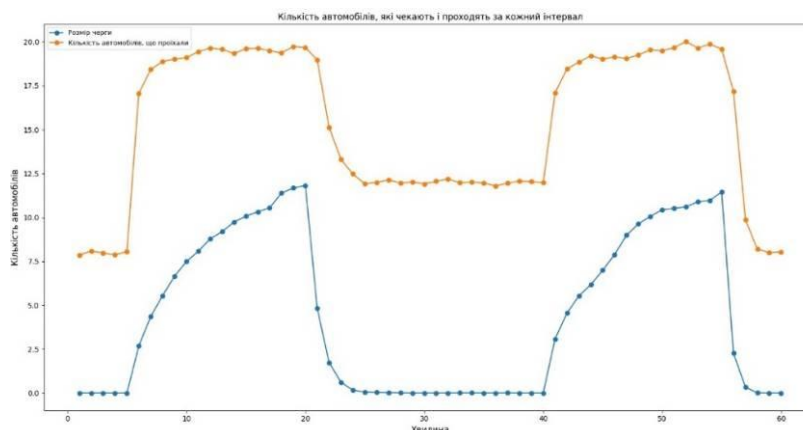


Рис. 5. Розмір черги та кількість автомобілів, що пройшли перехрестя за 60 секунд.

Аналізуючи дані, представлені на рисунку 5, можемо побачити, що кількість автомобілів, що очікують, майже нульова, коли рух автомобілів є слабким або середнім, і практично всі автомобілі можуть проїхати за визначений час. Однак, в інтенсивний період руху, розмір черги постійно зростає до максимального значення приблизно 12-13 автомобілів. Це свідчить про те, що

в інтенсивний трафік більша кількість автомобілів змушена чекати і більше автомобілів накопичуються в черзі перед світлофором.

Аналізуючи автомобілі, які проїжджають перехрестя, бачимо, що у кожній з умов дорожнього руху є досить стабільні, але різні показники пропуску. Це означає, що швидкість руху автомобілів через перехрестя залежить від умов руху, таких як інтенсивність руху, тривалість зеленого світла і ймовірність блокування.

Також варто зазначити, що невеликий шум може бути спричинений ймовірністю блокування перехрестя. Це означає, що іноді деякі автомобілі можуть блокувати рух інших, що може призвести до збільшення часу очікування для деяких автомобілів.

На рисунку 6 представлено середнє значення та медіана часу очікування протягом 1000 тестів.

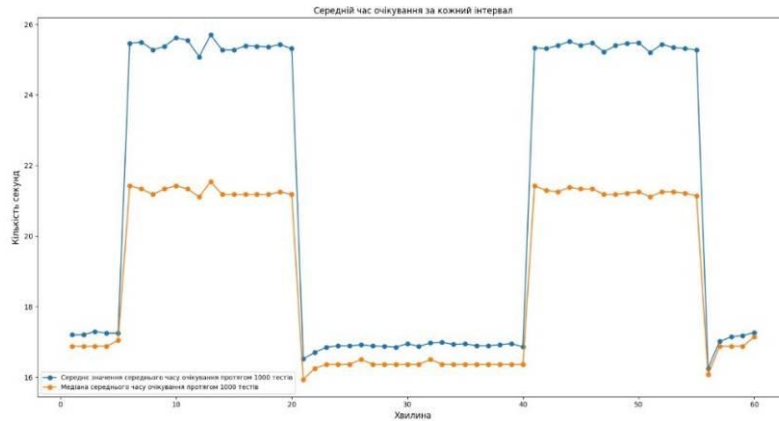
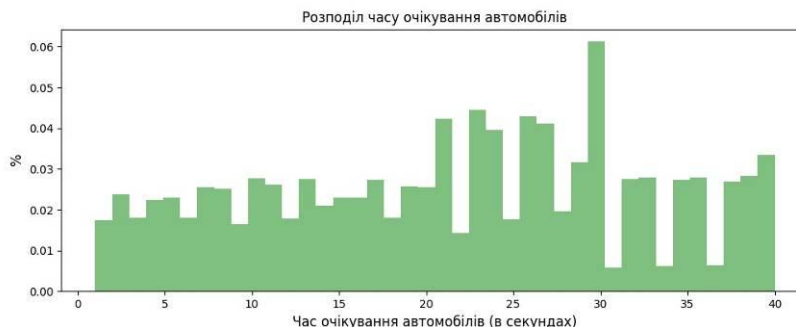


Рис. 6. Середнє значення та медіана часу очікування протягом 1000 тестів.

Аналізуючи середні значення середнього часу очікування протягом 1000 тестів (рис. 6) можна зробити наступні спостереження: значення середнього часу очікування коливаються від 16 до 25 секунд; більшість значень знаходиться в діапазоні від 16 до 17 секунд або від 25 до 26 секунд. Є кілька значень, які виділяються, такі як 25.575 і 16.257. Ці значення можуть бути результатом блокування перехрестя, які призводять до високого чи низького часу очікування. Загалом, середні значення середнього часу очікування стабільні протягом 1000 тестів, що свідчить про стійкість та передбачуваність показника в даній моделі.

На рисунку 7 наведений розподіл часу очікування між усіма автомобілями.



а)



б)

Рис. 7. Розподіл часу очікування між усіма автомобілями: а – звичайний; б – кумулятивний варіант.

Аналізуючи розподіл часу очікування між усіма автомобілями, виявлено, що близько 90% автомобілів очікують не більше 40 секунд. Це свідчить про те, що більшість автомобілів успішно проходять перехрестя протягом розумного часу, а ті, що очікують, роблять це не занадто тривало. Дані результати надають краще розуміння процесу переходу автомобілів через перехрестя та демонструють стабільність та передбачуваність в середньому часу очікування.

Висновки. Таким чином, моделювання транспортних потоків при дослідженні руху на керованих перехрестях є ефективним інструментом для аналізу та оптимізації руху транспорту на перехрестях. Використання таких моделей дозволяє виявити потенційні проблеми в русі транспорту на керованих перехрестях, такі як затори, затримки, недостатня пропускна здатність, тощо.

Результати моделювання можуть бути використані для покращення руху на керованих перехрестях у реальних умовах. Розроблені моделі дозволять прогнозувати ефективність різних стратегій керування, виявляти проблемні ситуації та шукати шляхи їх усунення. Це може призвести до зменшення заторів, затримок та покращення пропускної спроможності перехрестя, що сприятиме підвищенню якості руху та зручності для водіїв та пасажирів. Крім того, отримані результати можуть бути використані при проектуванні та плануванні розвитку транспортних мереж та інфраструктури.

Список використаних джерел:

1. Transportation Research Board. (2010). Highway Capacity Manual (HCM). Washington, DC: National Academies Press.
2. Papageorgiou, M., Diakaki, C., & Dinopoulou, V. (Eds.). (2003). "Applications of advanced technology in transportation: proceedings of the Ninth International Conference on Applications of Advanced Technology in Transportation", May 26-30, 2002, Athens, Greece. Springer Science & Business Media.
3. Ben-Akiva, M. E., & Lerman, S. R. (Eds.). (1998). "Discrete choice analysis: theory and application to travel demand". MIT Press.
4. Hermann Kopetz. Traffic Flow Dynamics: Data, Models, and Simulation. Springer, 2008.
5. Jaime Barceló, Jordi Casas. Dynamic network simulation with AIMSUN / Dept. of Statistics and Operations Research, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, Spain. 2013.
6. VISSIM 4.0 [user manual] Visual Solutions Inc, 487 Groton Road, Westford, MA 01886. 2010. 494 с.
7. Paramics Technical Report. URL: <http://www.paramics-online.com> (дата звернення 25.05.2023).