

DOI: 10.32347/2076-815x.2024.86.284-299

УДК 625.7; 711

Івасенко В.О.,
vitaliy.ivasenko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4795-5731,
к.т.н., професор **Завальний О.В.**,
azavalniy@i.ua, ORCID: 0000-0002-6191-2893,
Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова

МЕТОДИ ТРАНСПОРТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЯК ІНСТРУМЕНТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИ СТВОРЕННІ МОДЕЛІ БЕЗПЕКИ РУХУ У НАСЕЛЕНИХ ПУНКТАХ

Розглянуто методи транспортного моделювання, які можуть бути використані як інструменти дослідження для створення моделі безпеки руху у населених пунктах. Досліджено методологію та інструменти транспортного моделювання, включаючи мікроскопічні, мезоскопічні та макроскопічні моделі. У результаті дослідження запропоновано використання методу імітаційного мікромоделювання для оцінки рівня безпеки при аналізі існуючих рішень або на етапі проектування нових елементів вулично-дорожньої мережі в містах.

Ключові слова: транспортне моделювання, безпека руху, імітаційне мікромоделювання, моделі безпеки руху.

Постановка проблеми

В умовах сучасного міста, при наявності інтенсивного руху та зростаючої складності транспортних систем гостро постає проблема планування дорожнього руху із точки зору зменшення кількості дорожньо-транспортних пригод до можливого мінімуму.

Транспортне моделювання є одним із інструментів у дослідженні та розробці моделей дорожнього руху у населених пунктах. Він дозволяє аналізувати та прогнозувати різноманітні аспекти транспортних систем, такі як потоки трафіку, поведінку водіїв, вплив дорожніх умов, взаємодію між різними учасниками дорожнього руху та вплив різних містобудівельних факторів. Використовуючи транспортне моделювання, можна ідентифікувати потенційні небезпеки, оцінити ефективність запропонованих заходів безпеки, що зменшують ризики аварій та покращують безпеку руху у містобудуванні.

В даній статті буде представлений короткий огляд і порівняння методів транспортного моделювання як одного із інструментів експериментального дослідження моделі дорожнього руху у населених пунктах.

Класифікація методів транспортного моделювання

Транспортне моделювання використовується для аналізу та планування транспортних систем у містобудуванні, і воно включає різноманітні методи. Можна виділити основні категорії методів моделювання які застосовуються для аналізу та прогнозування поведінки транспортних систем, планування нових інфраструктур і покращення існуючих: мікроскопічне, мезоскопічне, макроскопічне, динамічне та статичне моделювання.

Метод мікроскопічного моделювання. Мікроскопічне моделювання транспорту зосереджується на детальному відтворенні поведінки окремих учасників дорожнього руху, таких як водії, пішоходи, велосипедисти. [1] Цей підхід дозволяє моделювати дуже точно кожну взаємодію між учасниками руху та їхнє середовище. До основних особливостей даного методу можна віднести:

- детальну поведінку учасників – даний метод зосереджується на детальному моделюванні поведінки кожного учасника руху. Кожен агент (автомобіль, пішохід, велосипедист) вважається окремим елементом із власними характеристиками, такими як швидкість, напрямок, та індивідуальними рішеннями, наприклад, коли і де змінювати смугу руху або зупинятися

- реалістичні взаємодії - враховуються складні взаємодії між учасниками руху, такі як обгони, реакції на світлофори, уникнення зіткнень, та відповідь на раптові зміни умов дорожнього руху. Вони також можуть включати взаємодії з дорожньою інфраструктурою

- використання просторових даних - для точного відображення геометрії доріг, включаючи кількість смуг, типи перехресть, наявність пішохідних переходів тощо. Це дозволяє агентам взаємодіяти з середовищем у спосіб, який відповідає реальному дорожньому руху

- моделювання автономних транспортних засобів - Мікроскопічне моделювання також є ідеальним інструментом для аналізу впливу нових технологій, таких як автономні транспортні засоби. Воно дозволяє досліджувати, як змінюється поведінка дорожнього руху при введенні транспортних засобів з автономним управлінням, адаптуючи їх поведінку до існуючих умов дорожнього руху. [2]

Для цього методу використовується наступне програмне забезпечення:

- VISSIM: Широко використовується для мікросимуляції транспортних потоків з детальною візуалізацією і можливістю інтеграції з іншими транспортними технологіями. [3]

- SUMO (Simulation of Urban MObility): Відкритий програмний код, що дозволяє дослідникам та розробникам моделювати різноманітні транспортні системи та їх компоненти.

Переваги методу:

- Висока точність моделювання індивідуальної поведінки.
- Здатність до детального аналізу складних взаємодій і динамічних змін у транспортній системі.

Обмеження методу:

- Велика потреба в обчислювальних ресурсах для симуляції великих масштабів.
- Необхідність великої кількості деталізованих даних для точного моделювання.

Метод мезоскопічного моделювання. Це проміжний рівень між мікроскопічним і макроскопічним, який інтегрує елементи обох підходів. Цей підхід інтегрує деякі деталі мікроскопічного моделювання, такі як динаміка окремих транспортних засобів, з агрегованими характеристиками, характерними для макроскопічних моделей. [4] Це дозволяє балансувати між детальністю та обчислювальною вимогливістю, роблячи мезоскопічне моделювання особливо підходящим для середніх і великих транспортних мереж. До основних особливостей даного методу можна віднести:

- пакетну обробку трафіку - використання пакетного підходу до обробки транспортних засобів. Транспортні засоби агрегуються в групи або "пакети", що переміщуються разом через транспортну мережу. Це дозволяє моделювати деталі поведінки на мікрорівні без необхідності трекінгу кожного індивідуального транспортного засобу, що значно знижує обчислювальні вимоги.

- моделювання потоків трафіку - моделі даного типу зазвичай використовуються для моделювання потоків трафіку, де важливо розуміти динаміку трафіку і затори. Ці моделі можуть адаптуватися до змін у потоках, таких як збільшення або зменшення трафіку під час пікових годин, забезпечуючи динамічніший аналіз, ніж макроскопічні моделі.

- сегментацію дороги - дороги у мезоскопічному моделюванні діляться на сегменти, які можуть мати різні атрибути, такі як пропускна здатність або обмеження швидкості. Кожен сегмент аналізується окремо, що дозволяє детальніше розглядати різні частини транспортної мережі.

- змінні швидкості та щільності - швидкість і щільність трафіку можуть змінюватися залежно від умов руху. Модель дозволяє імітувати ці зміни, реагуючи на загальні умови дорожнього руху і впливаючи на швидкість переміщення пакетів транспортних засобів

Для цього методу використовується наступне програмне забезпечення:

- Aimsun Next. Aimsun Next є гнучким інструментом, який підтримує мікро-, макро- та мезоскопічне моделювання. Це дозволяє користувачам

моделювати весь спектр транспортних систем від індивідуальних транспортних засобів до широких мережеских потоків. Aimsun використовується для планування, проектування та оптимізації дорожнього руху та транспортних систем на різних рівнях. [5]

- DynaMIT. Розроблений MIT, DynaMIT є потужним інструментом для динамічного моделювання та аналізу транспортних систем. Ця система зосереджена на реалістичному відтворенні змін у транспортних потоках і може використовувати мезоскопічні моделі для прогнозування поведінки трафіку та управління ним в реальному часі.

- Paramics Modeller. Пропонує рішення, що підтримує мезоскопічне моделювання, дозволяючи ефективно аналізувати середні та великі транспортні мережі. Це програмне забезпечення використовується для планування міст, оптимізації транспортних потоків та аналізу впливу нових дорожніх проектів.

Переваги методу:

- Баланс деталізації та швидкості: моделі методу надають досить детальну інформацію про рух транспорту без потреби в трекінгу кожного окремого транспортного засобу, як у мікроскопічному моделюванні. Це робить його швидшим і менш вимогливим до обчислювальних ресурсів у порівнянні з повністю мікроскопічними моделями.

- Гнучкість у моделюванні транспортних потоків: мезоскопічні моделі можуть адекватно відтворювати зміни у трафіку, які відбуваються в різний час доби, забезпечуючи аналіз пікових та міжпікових періодів, що дуже корисно для планування та управління транспортними системами.

- Ефективне використання даних: здатність інтегрувати дані з різних джерел, включаючи статистику макроскопічного трафіку та деталізовані спостереження з мікроскопічного моделювання, дозволяє використовувати мезоскопічні моделі для широкого спектру аналітичних завдань.

Обмеження методу:

- Менша деталізація порівняно з мікроскопічними моделями: хоча мезоскопічні моделі і забезпечують більшу швидкість обчислень, вони не можуть відтворити деякі складні поведінкові патерни окремих учасників руху з тією ж точністю, що й мікроскопічні моделі.

- Обмежена здатність моделювання окремих подій: мезоскопічне моделювання може не відтворювати деталі окремих дорожніх інцидентів, таких як аварії або нестандартні маневри водіїв, які критично важливі для деяких видів дорожніх досліджень.

- Компроміс між швидкістю та точністю: під час вибору мезоскопічного моделювання доводиться іноді жертвувати точністю заради більшої швидкості та меншої вимогливості до обчислювальних ресурсів, що

може бути не прийнятним для деяких деталізованих аналітичних завдань.

Метод макроскопічного моделювання. Зосереджений на аналізі загальних потоків трафіку та розподілу переміщень у транспортних мережах на великих територіях. [6] Агрегує індивідуальні елементи транспорту (такі як автомобілі, пішоходи) в ширші потоки, що дозволяє моделювати поведінку на рівні системи та фокусується на широких, агрегованих характеристиках потоку трафіку, як-от щільність, швидкість та об'єм трафіку. [7] Основні особливості макроскопічного моделювання:

- агрегування даних - в основі макроскопічного моделювання лежить агрегування даних про окремі транспортні засоби в загальні потоки або щільності. Це дозволяє аналізувати великі транспортні системи без необхідності звернення до деталей кожного учасника дорожнього руху

- математичні моделі потоку трафіку - макроскопічне моделювання часто використовує диференційні рівняння для опису зміни стану трафіку, які описують взаємодію між щільністю, швидкістю та потоками транспортних засобів. Наприклад, моделі Лайтхілла-Вітема та Річардса (LWR) або моделі з використанням фундаментальних діаграм потоку.

- фокус на загальні характеристики - макроскопічні моделі зосереджені на таких характеристиках, як загальні швидкості, час поїздки, та загальна щільність трафіку, замість деталізації окремих маневрів або поведінкових реакцій учасників дорожнього руху.

- ефективність у великомасштабних аналізах - через агрегацію даних і відносну простоту математичних моделей макроскопічне моделювання є особливо ефективним для аналізу великих транспортних мереж, таких як міські агломерації або регіональні транспортні системи.

Для цього методу використовується наступне програмне забезпечення:

- TransCAD — це програмне забезпечення, що використовується для транспортного планування і аналізу. Воно об'єднує географічні інформаційні системи (ГІС) з функціональністю транспортного моделювання, дозволяючи ефективно аналізувати транспортні потоки і вплив різних транспортних стратегій.

- EMME — це досить відомий і широко використовуваний інструмент для макроскопічного моделювання, який забезпечує детальний аналіз та планування міського та регіонального транспорту. Він включає різні модулі для прогнозування попиту на транспорт, аналізу мережі та оцінки ефективності транспортних проектів.

- VISUM від компанії PTV Group — це комплексний інструмент для транспортного моделювання, який використовується для аналізу, планування та оптимізації широких мереж різних видів транспорту. Це дозволяє аналізувати

транспортні потоки, розраховувати час поїздок та вплив транспортних змін на загальну транспортну систему.

- CUBE використовується для комплексного планування та моделювання транспорту на регіональному і міському рівнях. Програма дозволяє розробляти детальні моделі транспортної мережі, включаючи макроскопічне моделювання потоків та попиту.

- OMNITRANS є ще одним інструментом для макроскопічного моделювання, який використовується для планування та аналізу транспортних систем. Він надає засоби для моделювання різних аспектів транспортних мереж, включаючи попит на транспорт, розподіл трафіку та оцінку проектів.

Переваги методу:

- Ефективність обробки: макроскопічне моделювання дозволяє аналізувати великі мережі з високою обчислювальною ефективністю, оскільки воно агрегує дані про індивідуальні транспортні засоби в загальні потоки, що знижує обчислювальне навантаження.

- Широкий огляд мережі: дозволяє планувальникам отримати узагальнену картину потоків трафіку та їхньої поведінки на великих ділянках, таких як міські агломерації або цілі регіони, що корисно для стратегічного планування.

- Визначення заторів та потреб в інфраструктурі: здатність аналізувати загальні потоки та щільності допомагає визначити "вузькі місця" в транспортній мережі та планувати вдосконалення інфраструктури для підвищення ефективності.

- Сценарне моделювання: макроскопічне моделювання ідеально підходить для оцінки впливу різних політик або змін у транспортній мережі, дозволяючи моделювати наслідки, як-от нові дороги, зміни у транспортному розкладі чи введення плат за в'їзд в місто.

Обмеження методу:

- Недостатня деталізація: основним недоліком макроскопічного моделювання є його нездатність враховувати індивідуальну поведінку транспортних засобів та пішоходів, що може бути критично важливим у деяких сценаріях, наприклад, при детальному аналізі дорожньо-транспортних пригод або для розробки систем управління трафіком.

- Загальні припущення: макроскопічні моделі часто базуються на загальних припущеннях про поведінку потоків, які можуть не відображати реальні варіації чи динаміку транспортних потоків в певних умовах.

- Чутливість до вхідних даних: результати макроскопічного моделювання сильно залежать від якості та точності вхідних даних. Неточні або застарілі дані можуть призвести до помилкових висновків і планів дій.

- Обмежена адаптивність: макроскопічне моделювання не завжди здатне адекватно реагувати на раптові зміни у дорожніх умовах або на екстрені ситуації, що може обмежувати його застосування у сценаріях кризового реагування.

Метод динамічного моделювання. Даний метод використовує моделі що враховують зміни у транспортній системі в реальному часі та адаптуються до них. Зокрема можна виділити динамічні моделі присвоєння трафіку (DTA): Враховують часові коливання в попиті на транспорт та реакцію на зміни в дорожніх умовах. Це включає зміни маршрутів, часові затримки та вибір транспортного засобу. Особливостями даного методу є:

- часова залежність - динамічні моделі враховують, що умови дорожнього руху та попит на транспорт змінюються протягом дня. Це дозволяє моделювати пікові години, міжпікові періоди та інші зміни, які впливають на транспортну мережу.

- розширена взаємодія - динамічні моделі здатні відтворювати складні взаємодії між різними учасниками дорожнього руху, такими як автомобілі, пішоходи та громадський транспорт, враховуючи їхні реакції на зміни в трафіку та на світлофорах.

- використання великих даних і сенсорів - сучасні динамічні моделі інтегрують дані з різноманітних джерел, таких як GPS-трекери, камери спостереження, сенсори швидкості, що надають велику кількість даних про актуальні умови руху.

- адаптивність - Одна з ключових переваг динамічних моделей полягає в їхній здатності адаптуватися до поточних умов та виконувати коригування в управлінні трафіком в реальному часі, наприклад, змінюючи сигналізацію світлофорів або рекомендації GPS-навігаторам.

Для цього методу використовується наступне програмне забезпечення:

- AIMSUN також використовується для динамічного моделювання, пропонуючи інструменти для мікроскопічного, мезоскопічного та макроскопічного моделювання. Це програмне забезпечення широко використовується для планування та аналізу міських транспортних систем, дозволяючи моделювати та аналізувати реакції на зміни в транспортній мережі.

- DynusT (Dynamic Urban Systems for Transportation) — це програма для динамічного присвоєння трафіку, яка дозволяє моделювати динаміку мережі транспортних потоків з високою точністю, використовуючи динамічні методи присвоєння та симуляцію.

- Paramics дозволяє проводити динамічну симуляцію транспортних потоків, аналізуючи імпакт різних транспортних стратегій та управління. Це засіб ефективно використовується для розробки і тестування управлінських

рішень у міських умовах.

- TransModeler є ще одним програмним засобом, який може виконувати динамічне присвоєння трафіку та моделювання. Він використовується для дослідження взаємодії між різними видами транспорту і дозволяє моделювати різні транспортні умови та їхній вплив на трафік.

Переваги методу:

- висока реалістичність: динамічне моделювання дозволяє точно відтворювати поведінку транспортних потоків, реагуючи на зміни в реальному часі, що забезпечує високу реалістичність сценаріїв.

- гнучкість у реагуванні на зміни: моделі можуть швидко адаптуватися до змін у попиті на транспорт, заторах, дорожніх аваріях та інших непередбачених подіях, забезпечуючи можливість оперативного втручання та оптимізації.

- підтримка рішень щодо управління трафіком: динамічне моделювання допомагає планувати та виконувати стратегії управління трафіком, такі як регулювання часу світлофорів, розподіл трафіку та навігаційні рекомендації.

- підвищення ефективності транспортних систем: за допомогою аналізу динамічних моделей можна зменшити затори, оптимізувати час поїздки та покращити загальну ефективність транспортної мережі.

Обмеження методу:

- складність розробки та калібрування: розробка та калібрування динамічних моделей може бути складним та часомістким процесом, що вимагає глибоких знань та високої точності даних.

- залежність від якості вхідних даних: якість динамічних моделей значною мірою залежить від точності та актуальності вхідних даних, що може вимагати регулярного оновлення і перевірки даних.

- обмеження застосування в деяких сценаріях: у деяких випадках динамічні моделі можуть бути занадто складними або дорогими для реалізації, особливо в малих або менш розвинених регіонах.

Метод статичного моделювання: Традиційний метод, що припускає стабільність умов руху на певний часовий період. Статичні моделі присвоєння трафіку базуються на припущенні, що умови дорожнього руху не змінюються протягом аналізованого періоду, тому вони корисні для планування заходів на основі середніх умов. До основних особливостей даного методу можна віднести:

- середній попит і пропозицію: статичне моделювання зазвичай базується на аналізі середнього попиту на транспортні послуги та пропозиції транспортних засобів за певний, часто довший, часовий період. Наприклад, це

може бути середня кількість поїздок, що здійснюються протягом години пік або протягом цілого дня.

- фіксовані параметри: моделі не враховують зміни у трафіку або поведінці учасників руху, які можуть відбутися в різні моменти часу. Всі параметри, такі як швидкість трафіку, інтенсивність руху, пропускна спроможність доріг, вважаються фіксованими.

- спрощене представлення мережі: транспортна мережа моделюється на основі загальних шляхів переміщення без детального врахування тимчасових змін, таких як дорожні роботи, аварії або сезонні коливання.

- матрицю поїздок: основним інструментом статичного моделювання є матриця поїздок, яка вказує на кількість поїздок між різними точками мережі для стандартного періоду часу. Ця матриця служить основою для розрахунків розподілу трафіку.

Для цього методу використовується наступне програмне забезпечення:

- TransCAD - це ПС-орієнтоване програмне забезпечення для транспортного планування, яке інтегрує транспортні функції з геопросторовим аналізом. [7] Воно широко використовується для статичного моделювання, зокрема для створення матриць поїздок, моделювання попиту на транспорт та аналізу мережі.

- EMME - потужне програмне рішення для макроскопічного планування транспортних систем, що використовується в багатьох містах та регіонах для аналізу попиту та пропозиції у транспортній мережі. Воно дозволяє виконувати різноманітні статичні аналізи, включаючи моделювання розподілу трафіку та оптимізацію маршрутів.

- CUBE від компанії Citilabs є ще одним важливим інструментом для статичного моделювання, який забезпечує комплексне рішення для транспортного планування та аналізу. Він дозволяє моделювати всі види транспорту, включаючи громадський транспорт, автомобільний рух та немоторизовані переміщення.

- VISUM від PTV Group — це інтегроване рішення для планування транспортних мереж, яке широко використовується для статичного моделювання. [8] Воно включає функції моделювання попиту, присвоєння трафіку та аналізу мережі, забезпечуючи можливості для детального планування та оцінки транспортних проектів.

Переваги методу:

- спрощеність та доступність: статичне моделювання є відносно простішим для розуміння та використання, оскільки воно не вимагає складних алгоритмів для моделювання змін у часі, що робить його доступним для широкого кола планувальників та інженерів.

- ефективність для довгострокового планування: цей метод ефективно використовується для довгострокового планування інфраструктурних проектів, таких як будівництво нових доріг або розширення існуючих мереж, оскільки він дозволяє оцінювати потреби на основі загальних потоків та трендів.

- коштовність: статичні моделі, зазвичай, вимагають менше обчислювальних ресурсів порівняно з динамічними моделями, що знижує витрати на аналіз та обладнання.

Обмеження методу:

- недостатня динаміка: статичне моделювання не може адекватно відображати зміни в патернах трафіку, які відбуваються протягом дня або у відповідь на тимчасові події, такі як дорожні роботи чи аварії.

- загальні припущення: модель заснована на загальних припущеннях і середніх значеннях, що можуть не враховувати локальні особливості або унікальні умови, що складаються в певних частинах транспортної мережі.

- обмеження в прийнятті оперативних рішень: статичні моделі не придатні для використання в умовах, які вимагають швидкого реагування на зміни у транспортній системі, як це потрібно, наприклад, для управління трафіком у реальному часі.

Застосування та призначення методів транспортного моделювання

Представимо завдання, які можна вирішувати, використовуючи методи моделювання транспортних потоків: [10]

- прогнозувати пасажирські і автомобільні потоки по вуличним, а також дорожнім мережам країни, області, регіону або певного міста;

- прогнозувати кількість дорожньо-транспортних пригод із урахуванням інших факторів вулично-дорожньої мережі;

- детально аналізувати зміни пасажирських / автомобільних потоків при реалізації різних рішень, пов'язаних зі зміною містобудівної або транспортної інфраструктури;

- формувати оптимальні режими світлофорного регулювання на різних об'єктах вулично-дорожньої мережі;

- вибудовувати черговість будівництва об'єктів містобудівної та транспортної інфраструктури;

- оптимізувати роботу міського транспорту.

Призначення, з точки зору практичного застосування і вирішення конкретних завдань, з'являється у моделей тільки в складі спеціальних програмних комплексів. Таким чином, класифікувати за призначенням представляється можливим тільки готове програмне забезпечення для моделювання транспортних потоків. [11] З цієї позиції існуючі програмні

продукти розділимо на застосовувані для:

- попереднього (скетч) планування, в тому числі, домережеві методи;
- стратегічного планування (прогнозування);
- тактичного планування і управління (макро- і мезомоделі);
- планування роботи окремих видів транспорту (вантажний, таксі та інший);
- детального аналізу руху потоків (мікро- і мезомодельовання);
- оптимізації параметрів координованого світлофорного регулювання, в тому числі в автоматизованих системах управління дорожнім рухом;
- розрахунку геометричних параметрів і параметрів регулювання на окремих перехрестях;
- аналізу руху пішохідних потоків;
- оцінки рівня безпеки руху.

Варто відзначити, що останнім часом спостерігається тенденція об'єднання інструментів для вирішення декількох завдань в єдиному програмному комплексі або взаємопов'язаному сімействі продуктів одного розробника. Також з'являється багато програмних модулів стикування між поширеними продуктами різного призначення для спрощення процесу введення і обміну даними. Таким чином, важким виявляється віднесення багатьох програмних продуктів до однієї з перерахованих категорій за призначенням.

Підсумовуючи, з точки зору розглянутої вище інформації, маємо можливість зробити розділення моделей на наступні типи: аналітичні макромоделі, аналітичні мікромоделі, імітаційні макромоделі, імітаційні мікромоделі.

Зі збільшенням складності транспортних мереж та систем організації руху одним із основних методів оцінки та оптимізації різних систем організації дорожнього руху (ОДР) виступає мікроскопічне імітаційне моделювання. Результати мікромодельовання руху служать підґрунтям для розбудови кіберфізичних систем дорожнього руху. Моделювання вулично-дорожньої мережі, (ВДМ) у свою чергу, дозволяє проведення інженерного аналізу і подальшого затвердження найефективнішого (з точки зору вартості, безпеки руху, пропускної спроможності та інших факторів) інженерного рішення.

Важливо відмітити, що підвищення точності оцінки рівня безпеки руху на етапі проектування елементів ВДМ дає не тільки коректний вибір методу моделювання у сукупності із конкретною реалізацією моделі, але й комплекс заходів щодо адаптації вибраної реалізації методу моделювання під конкретний тип елементу вулиць і доріг населених пунктів. [12]

Метод імітаційного мікромодельовання як інструмент аналізу і

оцінки заходів підвищення безпеки руху у міському просторі

Імітаційні моделі дозволяють виконати тестування ще не збудованого об'єкта, змоделювати різні можливі сценарії його роботи, провести ряд експериментів, пов'язаних з різними позаштатними ситуаціями, перевіривши при цьому стійкість роботи даного об'єкта в подібних ситуаціях.

При використанні даного методу динамічні процеси системи й оригіналу підміняються процесами, імітованими алгоритмом моделі, з дотриманням тих же співвідношень тривалостей, логічних і тимчасових послідовностей, як і в реальній системі. [13] Як в процесі імітації функціонування досліджуваної системи, так і під час проведення експерименту з самим оригіналом, фіксуються певні події і стани, за якими обчислюються потім необхідні характеристики якості функціонування досліджуваної системи (рівень затримок, середня швидкість, число зупинок, рівень завантаження). Кожен експеримент з моделлю має в основі випадкове число, що визначає подальший розвиток подій в моделі. Статистично достовірні результати можуть бути отримані тільки шляхом усереднення результатів по декількох реплікацій (прогонів) моделі. Число прогонів визначається відповідно до положень теорії планування експерименту.

Структуру імітаційної мікромоделі можна уявити через взаємодію елементів системи ВАДС (водій-автомобіль-дорога-середовище) [14].

Водій. Даний елемент системи містить вищеописані моделі поведінки при русі в потоці (проходження за лідером, зміни смуги, вибору розриву в потоці), також враховується притаманний водієві час реакції, бажана швидкість руху, ступінь дотримання обмеження швидкісного режиму і інші поведінкові характеристики.

Автомобіль. Елемент автомобіль описується в основному фізичними габаритами (довжина і ширина), тягово-швидкісними характеристиками, приналежністю до якого-небудь класу, пасажиромісткістю.

Дорога. В рамках даного елемента системи описуються всі параметри інфраструктури, організації та управління рухом. Сюди входять геометричні параметри ВДМ (число і ширина смуг, радіуси поворотів, ухили), параметри ОДР (напрямки по смугах, заборона маневрів, обмеження швидкості, виділені смуги), параметри управління (режими світлофорного регулювання, параметри роботи автоматизованих систем управління дорожнім рухом).

Середовище. У поняття середовища в імітаційному моделюванні входить вплив на транспортні потоки погодних умов в частині обмеження видимості і зниження зчпних якостей покриття. Ці фактори призводять до зниження швидкості руху і збільшення дистанції між автомобілями.

Таким чином, програмні комплекси мікромоделювання імітують рух

транспортних потоків на рівні взаємодії елементів системи ВАДС [15].

Можна виділити основні фактори, за наявності яких застосування мікромодельовання буде виправданим при формуванні моделі безпеки руху. До них відносимо:

- Складність і висока інтенсивність трафіку. Коли мережа характеризується складними трафічними взаємодіями та високою інтенсивністю руху, мікромодельовання дозволяє детально проаналізувати поведінку окремих учасників руху, включаючи різні маневри, зміни смуги руху, і як ці дії впливають на безпеку дорожнього руху.

- Часті дорожньо-транспортні пригоди. На ділянках доріг з високим рівнем дорожньо-транспортних пригод мікромодельовання може бути використане для ідентифікації основних причин аварійності, аналізу поведінкових факторів водіїв та пішоходів, та розробки цільових заходів з підвищення безпеки.

- Впровадження нових технологій. При введенні нових технологій, таких як автономні транспортні засоби або інтелектуальні транспортні системи, мікромодельовання дозволяє оцінити, як ці нововведення вплинуть на поведінку та безпеку всіх учасників руху.

- Розробка та переосмислення дорожньої інфраструктури. Для аналізу впливу існуючої або запланованої дорожньої інфраструктури на безпеку руху, мікромодельовання допомагає визначити найбільш ризиковані точки та запропонувати конструктивні зміни, такі як покращення освітленості, організація дорожнього руху або модифікація дорожніх знаків.

- Детальні симуляції руху. Коли потрібно виконати детальні симуляції для підготовки тренінгів, відпрацювання надзвичайних ситуацій або демонстрації планів евакуації, мікромодельовання надає точні та візуально зрозумілі засоби для оцінки і планування.

Висновок.

Розглянуто можливості різних методів транспортного моделювання за допомогою сучасних систем автоматизації, а також основні переваги та обмеження для кожного із методів моделювання. Враховуючи проведене дослідження було виявлено, що для аналізу рівня безпеки існуючих рішень елементів вулично-дорожньої мережі та під час розробки моделі безпеки руху у населених пунктах найбільш використовуваним є метод імітаційного мікромодельовання. В той же час, застосування комплексу заходів щодо адаптації вибраної реалізації даного методу під конкретний тип елемента ВДМ суттєво впливає на підвищення точності результатів оцінки безпеки руху у містах.

Список джерел

1. Gipps, P.G. (1981). "A behavioural car-following model for computer simulation." *Transportation Research Part B*, 15(2), P. 105-111.
2. Treiber, M., & Kesting, A. (2013). "Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation." Springer, P. 205-243.
3. Fellendorf, M., & Vortisch, P. (2010). "Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM." In: Barcelo, J. (Ed.), *Fundamentals of Traffic Simulation. International Series in Operations Research & Management Science*, 145, Springer, P. 63-93.
4. Mahmassani, H.S. (2001). "Dynamic Network Traffic Assignment and Simulation Methodology for Advanced System Management Applications." *Networks and Spatial Economics*, 1, P. 267-292.
5. AIMSUN Next (2020). "AIMSUN User's Manual.", P. 78-140.
6. Godfrey, J.W. (1969). "The Mechanism of a Road Network." *Traffic Engineering & Control*, 11(7), P. 323-327.
7. Сидоренко О.Ю., Лазарєв Л.А. (2017). "Макроскопічні моделі транспортних потоків для міських мереж." *Вісник ХНУРЕ*, 3(62), С. 80-90.
8. Caliper Corporation. (2020). "TransCAD User's Guide." URL: <https://www.scribd.com/document/369276858/218535426-Transcad-User-Manual-4-5-pdf> (Accessed: 15 April 2024).
9. PTV Group. (2022). "VISUM User Manual." URL: <https://www.scribd.com/document/582217970/PTVVisum2022-Manual> (Accessed: 11 April 2024).
10. Севрук В.В. (2013). "Сучасні методи моделювання транспортних потоків. С. 68-102.
11. Горбенко А.О., Левченко К.М. (2019). "Аналіз мікроскопічних моделей транспортних потоків для визначення показників ефективності." *Науковий вісник НУБіП України*, 1(5), С. 90-105.
12. Томашевський О.В., Іваненко О.С. (2018). "Моделювання транспортних потоків на макроскопічному рівні: проблеми та шляхи вирішення." *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія: Математика, Механіка*, 2(4), С. 110-125.
13. Горбенко А.О., Левченко К.М. (2019). "Аналіз мікроскопічних моделей транспортних потоків для визначення показників ефективності." *Науковий вісник НУБіП України*, 1(5), С. 90-105.
14. Кульбашна Н.І. СИСТЕМНИЙ ПІДХІД В ЕРГОНОМІЧНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ УМОВ РУХУ НА ДОРОЗІ / Н.І. Кульбашна, К.О. Сорока, І.Е. Линник // *Кибернетика и системный анализ: міжнар. наук.-техн. журн.* - Київ: Ін-т. кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2019. – № 3. – С. 90–98.
15. Кристопчук, М.Є. Ефективність пасажирської транспортної системи приміського сполучення: дис. ... к. т. н. / М.Є. Кристопчук. – Харків: ХНАМГ, 2009. – 214 с.

PhD student **Vitalii Ivasenko**,
Candidate of Technical Sciences, Professor **Oleksandr Zavalny**,
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

METHODS OF TRANSPORT MODELLING AS RESEARCH TOOLS IN CREATING TRAFFIC SAFETY MODELS IN URBAN AREAS

In a modern city with heavy traffic and increasing complexity of transportation systems, the issue of traffic planning to minimize the number of road accidents becomes particularly acute.

Transport modelling is one of the tools used in the research and development of traffic models in urban areas. By using transport modelling, it is possible to identify potential hazards and evaluate the effectiveness of proposed safety measures that reduce accident risks and improve traffic safety in urban planning.

Existing transport modelling methods, including microscopic, mesoscopic, macroscopic, dynamic, and static, have been examined. An analysis of the main characteristics of each method was conducted, along with the software that supports their implementation, evaluating the advantages and limitations of each method as research tools in creating traffic safety models in urban areas.

As a result of the study, the simulation micromodelling method was proposed for assessing safety levels when analyzing existing solutions or during the design phase of new elements of the street and road network in cities. Key factors have been identified that justify the use of micromodelling when forming a traffic safety model.

Based on the research, it was found that for assessing the safety level of existing solutions for street and road network elements and during the development of a traffic safety model in urban areas, the simulation micromodelling method is the most appropriate. At the same time, applying a set of measures to adapt the chosen implementation of this method to a specific type of street and road network element significantly improves the accuracy of traffic safety assessment results in cities.

Keywords: transport modelling; traffic safety; simulation micromodelling; traffic safety models.

REFERENCES:

1. Gipps, P.G. (1981). "A behavioural car-following model for computer simulation." *Transportation Research Part B*, 15(2), P. 105-111. {in English}
2. Treiber, M., & Kesting, A. (2013). "Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation." Springer, P. 205-243. {in English}
3. Fellendorf, M., & Vortisch, P. (2010). "Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM." In: Barcelo, J. (Ed.), *Fundamentals of Traffic Simulation*.

International Series in Operations Research & Management Science, 145, Springer, P. 63-93. {in English}

4. Mahmassani, H.S. (2001). "Dynamic Network Traffic Assignment and Simulation Methodology for Advanced System Management Applications." *Networks and Spatial Economics*, 1, P. 267-292. {in English}

5. AIMSUN Next (2020). "AIMSUN User's Manual.", P. 78-140. {in English}

6. Godfrey, J.W. (1969). "The Mechanism of a Road Network." *Traffic Engineering & Control*, 11(7), P. 323-327. {in English}

7. Sydorenko, O.Y., & Lazarev, L.A. (2017). "Macroscopic Models of Traffic Flows for Urban Networks." *Visnyk KhNURE*, 3(62), P. 80-90. {in Ukrainian}

8. Caliper Corporation. (2020). "TransCAD User's Guide." URL: <https://www.scribd.com/document/369276858/218535426-Transcad-User-Manual-4-5-pdf> (Accessed: 15 April 2024). {in English}

9. PTV Group. (2022). "VISUM User Manual." URL: <https://www.scribd.com/document/582217970/PTVVisum2022-Manual> (Accessed: 11 April 2024). {in English}

10. Sevruk, V.V. (2013). "Modern Methods of Traffic Flow Modelling." P. 68-102. {in Ukrainian}

11. Horbenko, A.O., & Levchenko, K.M. (2019). "Analysis of Microscopic Models of Traffic Flows to Determine Efficiency Indicators." *Scientific Bulletin of NUBiP of Ukraine*, 1(5), P. 90-105. {in Ukrainian}

12. Tomashevskiy, O.V., & Ivanenko, O.S. (2018). "Modeling of Traffic Flows at the Macroscopic Level: Problems and Solutions." *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series: Mathematics, Mechanics*, 2(4), P. 110-125. {in Ukrainian}

13. Horbenko, A.O., & Levchenko, K.M. (2019). "Analysis of Microscopic Models of Traffic Flows to Determine Efficiency Indicators." *Scientific Bulletin of NUBiP of Ukraine*, 1(5), P. 90-105. {in Ukrainian}

14. Kulbashna, N.I., Soroka, K.O., & Lynnyk, I.E. (2019). "Systemic Approach in Ergonomic Support of Road Traffic Conditions." *Cybernetics and Systems Analysis*, 3, P. 90-98. {in Ukrainian}

15. Krystopchuk, M.Ye. (2009). *Efficiency of the Passenger Transport System of Suburban Connections [PhD dissertation]*. Kharkiv: KhNAMG, 214 p. {in Ukrainian}