

DOI: 10.18372/2415-8151.25.16787
УДК 656.13

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ НА ВУЛИЧНО-ДОРОЖНІЙ МЕРЕЖІ МІСТ

**Степанчук Олександр Васильович¹, Лапенко Олександр Іванович²,
Чернишова Оксана Сергіївна³**

¹ д.т.н, професор, Національний авіаційний університет, Київ, Україна
e-mail: oleksandr.stepanchuk@npp.nau.edu.ua, orcid: 0000-0002-2822-3471

² д.т.н, професор, Національний авіаційний університет, Київ, Україна
e-mail: oleksandr.lapenko@npp.nau.edu.ua, orcid: 0000-0002-2029-0792

³к.т.н., доцент, Національний авіаційний університет, Київ, Україна
e-mail: oksana.chernyshova@npp.nau.edu.ua, orcid: 0000-0002-8132-2153

Анотація: Мета дослідження полягає в проведенні аналізу методів моделювання транспортних потоків на вулично-дорожній мережі міст, виявленні проблем щодо їхнього використання та впровадження в сучасних умовах розвитку й функціонування міст та життєдіяльності населення; узагальненні результатів підходів щодо існуючих моделей руху транспортних потоків по вулично-дорожній мережі міст. У дослідженні виконано опис та аналіз задач, що вирішуються за допомогою використання методології теорії транспортних потоків та дозволяють покращити умови руху транспортних засобів по магістральних вулицях міста. Здійснено обґрунтування функціональної класифікації математичних моделей транспортних потоків, де були розглянуті моделі прогнозу завантаження транспортної мережі, моделі динаміки транспортного потоку, моделі оптимізації функціонування транспортної мережі.

У статті подано та розглянуто напрямки вдосконалення системи управління транспортними потоками в цілому по вуличній мережі всього міста, а також розглянуто наукові концепції та теоретичні положення з розподілення транспортних засобів по вулично-дорожній мережі, які дозволять в режимі реального часу вирішувати задачі оптимального управління транспортними потоками.

Проведене дослідження дозволило виконати аналіз існуючих методів моделювання транспортних потоків на вулично-дорожній мережі міст і розробити загальну концепцію їхнього впровадження в систему управління міським вуличним рухом. Отриманий науковий результат є підґрунтям для подальших теоретичних і прикладних досліджень, які направлені на розробку інтелектуальної системи управління вуличним рухом.

Ключові слова: вулично-дорожня мережа; місто; транспортний потік; транспортний засіб; моделювання.

ВСТУП

Головним завданням вулично-дорожньої мережі (ВДМ) є безперешкодний пропуск транспортних і пішохідних потоків на максимальних швидкостях і забезпечення сполучення із мінімальними затримками. Таким чином, рух транспортних і пішохідних потоків повинен здійснюватися на базі чіткої організації управління міським рухом на вулично-дорожній мережі міста із застосуванням ефективних методів підвищення її функціонування.

Аналізуючи стан сучасних транспортних проблем значних і найзначніших міст України, треба відмітити необхідність створення системи управління міським рухом на вулично-дорожній мережі міст України, яка б базувалася на відповідності транспортно-пішохідної пропозиції міста до транспортно-пішохідного попиту і забезпечення умов безпеки дорожнього руху та зменшення негативного впливу автомобільного транспорту на міське середовище [1].

Управління міським вуличним рухом — це складний процес, який базується на впровадженні комплексу організаційних заходів, що потребують детального вивчення закономірностей формування транспортних і пішохідних потоків для конкретного транспортного району з урахуванням особливостей планувальної структури міста та потенціалу її вулично-дорожньої мережі.

На сьогодні за інтенсивного зростання кількості транспортних засобів виникає потреба у збільшенні витрат на покращення інфраструктури вулично-дорожньої мережі, що дозволить перетворювати її на гнучку керувану логістичну систему. Ефективність функціонування ВДМ базується на оптимальному споживанні ресурсів. Аналіз проведених досліджень показує, що обсяг витрат значно зростає, якщо не враховувати закономірностей розвитку ВДМ та можливостей розподілення транспортних потоків по ній (враховуючи переважані і недовантажені ділянки мережі).

Останнім часом транспортні потоки перейшли до нового стану, насиченого, коли локальне погіршення умов руху розповсюджується швидко по мережі і різко змінює умови руху на ній. На вулично-дорожній мережі значних і найзначніших міст транспортний потік має дуже високу чутливість до випадкових, відносно невеликих змін обставин, що виникли на проїзній частині вулиці.

На сьогодні виникла нагальна проблема для більшості міст України у необхідності створення системи управління рухом тран-

спортних і пішохідних потоків, яка б базувалася на практичному використанні методів моделювання транспортних потоків на вулично-дорожній мережі міст. Це дозволить здійснити впровадження ефективних заходів щодо миттєвого, оптимального розподілення транспортних потоків за маршрутами руху та покращить транспортну ситуацію не тільки в локальному місці, а й по всій вулично-дорожній мережі міста.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У фахових виданнях можна зустріти дуже багато вітчизняних та закордонних наукових праць, які направлені на розробку та впровадження методів моделювання транспортних та пішохідних потоків на вулично-дорожній мережі міст. В більшості — це унікальні наукові роботи, серед яких необхідно відзначити праці: А. Гасникова, Б. Гріншильдса, В. Гука, В. Долі, Д. Дрю, А. Лобашова, Н.Наумової, М. Осетріна, В. Поліщука, Є. Рейцена, Ф. Хейта, В. Філіпова та інших. Більшість цих робіт були написані в 60-80-х роках минулого століття й стали класикою теорії транспортних потоків. Але навіть за наявності такої кількості різноманітних підходів все-таки ніколи не було повністю вирішене питання транспортних проблем міст, у зв'язку з великою кількістю різноманітних факторів, які супроводжують процес забезпечення та організації руху транспортних і пішохідних потоків по вулично-дорожній мережі населених пунктів.

На сьогодні транспортні проблеми спостерігається в більшості великих міст світу. Тому покращення умов організації та управління міським рухом є основним із завдань місцевих муніципальних органів влади. Серед ефективних методів, що покладені в основу управління транспортними потоками, є різноманітні методи їхнього моделювання. Потрібно відзначити, що сучасна наука розробила дуже багато різноманітних методів моделювання транспортних потоків. Тому спробуємо провести аналіз існуючих методів моделювання транспортних потоків на вулично-дорожній мережі міст і розробити загальну концепцію їхнього впровадження в систему управління міським вуличним рухом.

МЕТА

Мета дослідження полягає в проведенні аналізу методів моделювання транспортних потоків на вулично-дорожній мережі міст, виявленні проблем щодо їхнього використання та впровадження в сучасних умовах розвитку

й функціонування міст та забезпечення життєдіяльності його населення.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Основою забезпечення ефективного функціонування системи управління транспортними потоками в місті є створення та ведення оперативного моніторингу завантаження вуличної мережі транспортними засобами та пішоходами, що дозволяє миттєво отримувати інформацію про зміни на вулично-дорожній мережі. Відомо, що рівень оперативності й ефективності управлінських рішень залежить від мінімізації часу між початком ускладнення ситуації й до прийняття відповідного управлінського рішення. Тому система управління транспортними потоками на ВДМ міста повинна бути гнучкою, що полягає в миттєвому реагуванні на локальні ситуації, і тим самим підтримувати ефективні показники роботи для всієї вуличної мережі.

Необхідно зазначити, що в сучасних системах управління дорожнім рухом, які існують саме в містах України, де відбувається фактично неконтрольоване свавільне формування транспортних потоків, вирішення цих задач дуже ускладнюється. Навіть для закордонних сучасних систем останнього покоління, які ґрунтуються на моделях динамічного розподілення (Dynamis Traffik Assignment, PTV OPTIMA та ін.), зробити якісний прогноз розвитку транспортної ситуації для крупних і найкрупніших міст дуже складно.

У сучасних системах управління дорожнім рухом цільовою функцією можуть бути різні показники. Але, як показує практика, в основному — це сумарна затримка всіх транспортних засобів (ТЗ) або загальний час перебування на мережі. Так, дійсно, сумарна затримка під час руху найбільш підходить для економічної оцінки ефективності функціонування всієї вулично-дорожньої мережі міста. Теоретичний опис поведінки насичених потоків на транспортній мережі на сьогоднішній день знаходиться в процесі створення через об'єктивні і технічні складнощі.

Ефективне регулювання транспортними потоками можливе лише на основі розуміння природи процесів, що виникають у ньому. Тому детальне вивчення причин, які викликають утворення вуличних заторів та зменшення швидкості руху транспортних засобів (ТЗ), стали першочергово необхідними. Для вирішення цієї проблеми було створено багато теорій і моделей. Математичним описом транспортних моделей займалися багато закордонних і вітчизняних вчених. Результатом

цього явища є широкий спектр моделей, які описують різні аспекти функціонування транспортного потоку.

Теорія транспортних потоків розвивалась у різних областях науки, і це дало можливість накопити великий досвід досліджень процесів руху транспортних засобів. Загальний рівень дослідження і практичного використання теорії транспортних потоків недостатній через наступні фактори [2]:

- транспортний потік є нестабільним та різноманітним, отримання об'єктивної інформації про нього є найбільш складним елементом системи управління;

- критерії якості управління дорожнім рухом суперечливі: треба забезпечити безперебійний рух ТЗ, одночасно знижуючи збитки від нього, застосовуючи обмеження на швидкість і напрямок руху;

- дорожні умови, навіть за умови стабільності, мають непередбачені відхилення природно-кліматичних параметрів;

- виконання рішення по управлінню дорожнім рухом на міських вулицях під час його реалізації у багатьох випадках є неточним і це призводить до непередбачених наслідків.

На сьогодні складності формалізації процесу руху транспортного потоку стали серйозною причиною відставання результатів наукових досліджень від вимог практики.

Ефективність управління транспортними потоками у значних і найзначніших містах базується на прийнятті оптимальних рішень з проектування вулично-дорожньої мережі та її елементів, упровадженні доцільних заходів з організації дорожнього руху, які дозволяють урахувувати широкий спектр характеристик транспортного потоку та закономірностей впливу зовнішніх і внутрішніх факторів.

Управління міськими транспортними потоками має наступні особливості [3]:

- неповне управління, навіть за наявності повної інформації про потоки і можливості інформування водіїв ТЗ про необхідні дії, носить лише рекомендований характер;

- різноманітність критеріїв якості, таких як затримка в дорозі, середня швидкість руху, прогнозоване число ДТП, об'єм шкідливих викидів в навколишнє середовище і т.п. Самі критерії якості управління дорожнім рухом дуже суперечливі. Більшість характеристик руху транспортних засобів по вуличній мережі взаємопов'язані і, розглядаючи якусь модель транспортного потоку, спиратись тільки на одну характеристику було б неправильно [4].

Як відзначено в роботі [5], ефективність управління транспортними потоками повністю залежить від проблеми визначення параме-

трів транспортних потоків у місті, а це значно пов'язано зі складнощами визначення параметрів розподілення транспортних потоків по мережі, тому що на параметри розподілу впливають наступні фактори:

- зміни в зовнішніх транспортних зв'язках;
- заборона або дозвіл на паркування автомобілів на транспортній мережі міста;
- введення нових елементів мережі: ліній метро, радіальних або кільцевих магістралей;
- будівництво нового житлового району або ємкого центру тяжіння транспорту;
- тимчасове закриття або ліквідація якогось елементу транспортної системи.

Для того, щоб отримати раціональні параметри транспортних потоків на вулично-дорожній мережі міста, необхідно використовувати математичне моделювання, яке дозволить адекватно описати поведінку учасників транспортного потоку і правильно відтворити параметри і характеристики дорожнього руху.

Розробка необхідних рекомендацій з оптимізації дорожнього руху в сучасних умовах практично неможлива без застосування методів математичного моделювання і прогнозування розвитку дорожньо-транспортних ситуацій у залежності від постійно змінних факторів, які впливають на безпеку дорожнього руху, таких як щільність, максимальна швидкість, кількість перетинів на одиниці довжини, кількість в'їздів і виїздів.

У залежності від типу прийнятих моделей, можливості застосування результатів дуже широкі:

- створення і тестування нових рішень під час організації дорожнього руху;
- оптимізація роботи вже існуючих систем організації дорожнього руху;
- пошук альтернативних шляхів організації дорожнього руху.

У моделюванні дорожнього руху існує два основних підходи — детерміністичний (динамічний) і ймовірнісний (стохастичний). В основі детерміністичних моделей лежить функціональна залежність між окремими показниками. Динамічні моделі описують як динаміку взаємодії між моделями, так і динаміку руху всього потоку в цілому. За динамічного моделювання руху транспортних потоків виділяють два класи моделей: макроскопічні і мікроскопічні. При цьому моделюється динаміка взаємодії між окремими автомобілями (мікроскопічний підхід) і динаміка руху потоку в цілому (макроскопічний підхід). Рух транспортних потоків описується цілим рядом математичних моделей [3, 6, 7, 8, 9, 10, 11,12,13], за допомогою яких можна легко

отримати ряд параметрів цього руху, але ці результати дозволяють вирішувати тільки локальні задачі на окремих ділянках ВДМ.

На відміну від детерміністичних, стохастичні моделі дозволяють дати кількісну оцінку характеру руху потоків, в яких ще можлива свобода маневрування автомобілями.

Наведемо розподіл моделей транспортних потоків, які застосовуються для вирішення задач теорії транспортних потоків (рис. 1).

Відомо, що для застосування і подальшого використання доцільних для відповідних міських умов методів управління транспортними потоками і підвищення ефективного функціонування ВДМ треба розглядати транспортний потік як імовірнісний процес у стохастичних моделях.

У ймовірнісних моделях транспортний потік розглядається як результат взаємодії транспортних засобів на елементах транспортної мережі. У роботі [2] сказано, що у зв'язку із жорстким характером організації мережі і масовим характером руху, у транспортному потоці складаються дуже виразні закономірності формування черг, інтервалів, завантаження смугами руху і т.п. Ці закономірності носять суто стохастичний характер.

Для вивчення поведінки транспортних потоків на ВДМ значних і найзначніших міст необхідні моделі, які описують потік не тільки на лінійній ділянці або в транспортному вузлі, а й на всій мережі міста в цілому.

Створення моделі потребує впровадження сучасної системи моніторингу стану й умов руху на вулично-дорожній мережі міст [14]. Звісно, на основі даних моніторингу можна збудувати статистичну модель, яка може описати зміни стану ВДМ у часі, але велике число факторів, що впливають на стан ВДМ, крім основних — інтенсивності і швидкості транспортних потоків, — роблять цю модель неефективною.

Як зазначено в роботі [15], для побудови стаціонарної усередненої моделі поведінки й функціонування ВДМ міста потрібні значні в часі спостереження за станом руху, після чого можна описати цю поведінку математично і намагатися врахувати максимальну кількість факторів, які впливають на неї. Але життєдіяльність таких моделей у часі незначна. Тобто, побудована із значними затратами модель міської транспортної системи міста, буде повністю зруйнована за незначної зміни транспортної пропозиції в системі (організація руху або будівництво нових елементів мережі).

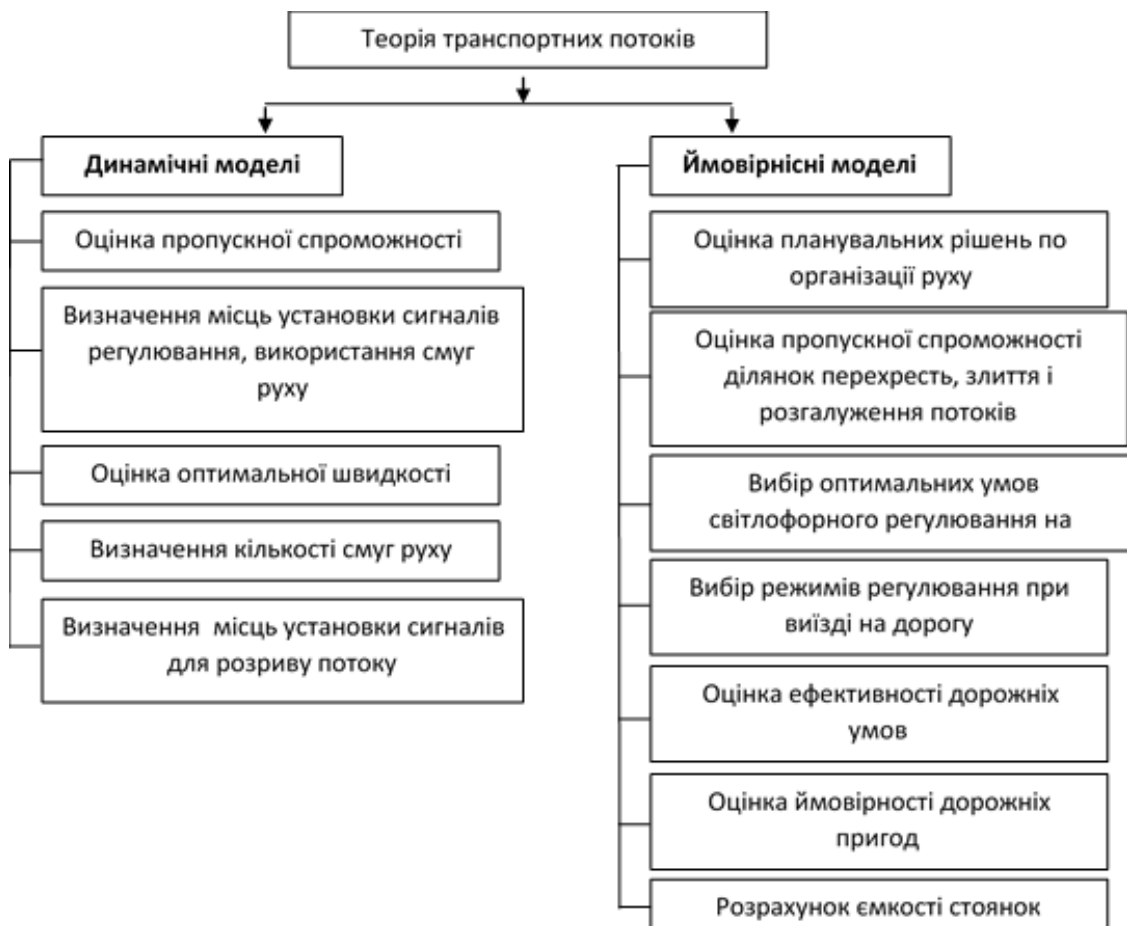


Рис. 1. Задачі, які вирішуються за допомогою теорії транспортних потоків

Професор Якимов М.Р. стверджує [16], що значення моделі можна оцінити тільки прикладним характером такого інструмента як модель. Побудувавши моделі поведінки похідних величин, не можна отримати інструмент для реалізації управлінських рішень із впливу на систему в цілому, не знаючи першочергової причини внутрішніх законів функціонування системи.

Усі існуючі моделі можна класифікувати за функцією, яку вони виконують. На основі функціонального значення моделей, враховуючи задачі, для вирішення яких вони застосовуються, умовно виділені три основні класи [17, 18] (рис. 2): моделі прогнозу завантаження транспортної мережі, моделі динаміки транспортного потоку, моделі оптимізації функціонування транспортної мережі.

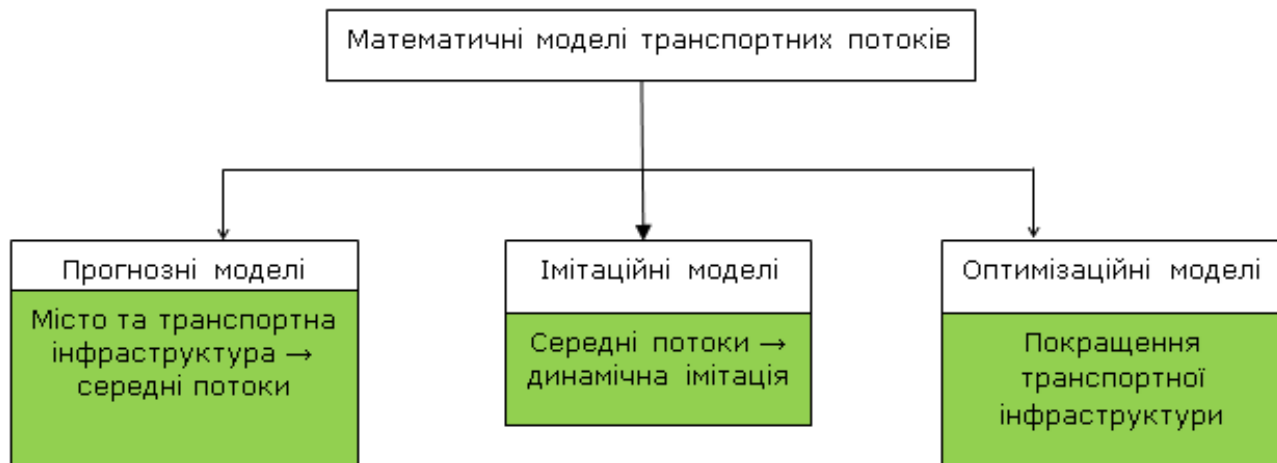


Рис. 2. Функціональна класифікація математичних моделей транспортних потоків

Моделі прогнозу завантаження транспортної мережі (прогнозні моделі) використовуються для вирішення задач за умови, коли відома конфігурація мережі, її параметри та характеристики, а також розміщення потокоутворюючих і потокопоглинаючих об'єктів у місті та обсяги утворення та поглинання потоків.

Головне завдання моделей завантаження транспортної мережі — визначити параметри транспортних і пішохідних потоків на всій ВДМ міста. Такі моделі дають можливість визначити обсяги міжрайонних переміщень, виконувати розподіл транспортних потоків мережею, розраховувати усереднені параметри функціонування транспортної мережі після зміни характеристик маршрутної мережі пасажирського транспорту, функціонального призначення території міста, кількості ділянок мережі та перехресть і т. п.

На основі названих моделей розроблені програмні продукти: VISUM, TransCAD, TRANSIMS, EMMME/2, GUBE/TRIPS [19], які сьогодні реалізуються і дозволяють вирішувати транспортні проблеми.

Моделі динаміки транспортного потоку (імітаційні моделі) максимально детально описують процес руху окремих транспортних засобів, встановлюють функціональну залежність між окремими показниками потоку, наприклад, швидкістю і дистанцією між автомобілями в потоці. Застосування таких моделей дозволяє оцінити динаміку швидкості руху, затримки на перехресті, довжину та утворення черги і т. п. Динамічні макроскопічні моделі описують процес змін транспортного потоку в часі за допомогою диференціальних рівнянь. Такі моделі дозволяють визначити зміни основних параметрів руху на ділянках транспортної мережі в часі. Тому вони застосовуються, переважно, на локальних об'єктах транспортної мережі.

Для динамічних моделей характерна велика деталізація опису руху і, відповідно, є потреба в значних обчислювальних ресурсах. Недоліком моделювання на макрорівні є те, що отриманий результат узагальнений характеристиками і недостатньо точний. Моделювання на мікрорівні потребує значних витрат часу, трудових та матеріальних ресурсів для зібрання вихідних даних.

Моделі динаміки транспортного потоку (імітаційні моделі) поділяються на моделі: макроскопічні, кінематичні та мікроскопічні, до яких, відповідно до аналізу, виконаного В роботі [18], належать моделі: LW, KK, мезоскопічна Пригожина, Павері-Фонтана, Хельбінга, прямування за лідером, оптимальної

швидкості, Трайбера та клітинних автоматів.

Програмні продукти, які дозволяють зробити відповідне моделювання — це BTS (Bottleneck Traffic Simulator), VISUM, EMMME/2, SATURN, NETCELL [16, 19].

Моделі оптимізації функціонування транспортних мереж (оптимізаційні моделі), на відміну від моделей завантаження транспортних мереж і моделей динаміки транспортного потоку, створені не для опису транспортних потоків, а для оптимізації параметрів функціонування ВДМ міста. Таким класом моделей вирішуються задачі оптимізації маршрутів міського пасажирського та вантажного транспорту, визначається оптимальна конфігурація транспортної мережі. За допомогою моделі оптимізації маршрутної мережі міського пасажирського транспорту визначається кількість маршрутів, їхня довжина та особливості проходження. Це дозволяє підвищити ефективність роботи міського пасажирського транспорту, безпеку, зручність та комфортність перевезень. Головним завданням оптимізаційних моделей є подання оптимального рішення. Ставиться умова: як зробити так, щоб усім було добре. Необхідно відзначити, що задача оптимізації дуже складна. Моделі оптимізації конфігурації транспортної мережі використовуються під час розробки генеральних планів міст для проведення аналізу та визначення територій для розміщення функціональних зон міста.

Аналізуючи подану вище інформацію, треба зазначити, що розроблені принципи моделювання базуються на вирішенні задач із забезпечення ефективного та безпечного руху транспорту. Важливо, що кожна з розглянутих математичних моделей транспортних мереж має межі свого застосування.

Сутність ефективності функціонування ВДМ включає комплекс заходів управління рухом транспорту, що дозволяє спрогнозувати оптимальний перерозподіл транспортних потоків у результаті впливу на окремі ділянки мережі факторів зміни умов руху на мережі:

- значна кількість ТЗ, що перевищує пропускну спроможність ділянки;
- виникнення дорожньо-транспортної пригоди;
- наявність «вузьких місць» на ВДМ міста;
- закриття окремих ділянок вулиць для руху транспорту;
- реконструкція окремих ділянок мережі;
- введення в експлуатацію нових ділянок;
- зміна маршрутної мережі громадського пасажирського транспорту.

Для ефективного використання вулично-дорожньої мережі необхідно ціле-

спрямовано перерозподілити транспортні потоки. В критеріях розподілення транспортних потоків треба прийняти мінімум сумарного часу проїзду транспортних засобів вулично-дорожньою мережею.

Керуючий вплив на транспортний потік можна оцінювати на основі різних моделей, що описують його поведінку, - від найпростіших гідродинамічних до мікромоделей, які відтворюють поведінку водія. Але сам транспортний потік на тій або іншій ділянці ВДМ не суто фізичне явище, а результат соціально-економічних взаємодій у суспільстві. Кожен водій і пасажир будь-якого транспортного засобу має конкретну мету здійснення поїздки. У залежності від мети, кожна поїздка має свій рівень необхідності і кожний користувач транспортної системи вибирає варіанти дій у наступному аспекті процесу здійснення поїздки:

- здійснювати або не здійснювати поїздку;
- вид транспорту для здійснення поїздки;
- час початку поїздки;
- маршрут руху.

Однією з проблем погіршення руху транспортних засобів є невизначеність водія, тому що природа транспортних потоків значною мірою обумовлена діями саме водія. Приймаючи те чи інше рішення, водій знаходиться під впливом багатьох факторів. Як правило, водій прагне якнайшвидше досягти мети поїздки за умови забезпечення безпеки руху. Управління транспортними засобами і вибір маршруту руху частково покладається на водія автомобіля, а частково — на об'єднану систему управління. Але рух автомобільного транспорту не відбувається вільно, як броунівські частки, і не обмежений, як, наприклад, для транспортних засобів, що рухаються за графіком. Рух транспортних засобів на ВДМ регулюється такими засобами регулювання дорожнього руху як дорожні знаки, світлофори, дорожня розмітка та ін. Треба акцентувати, що водії, якоюсь мірою, самі керують рухом своїх транспортних засобів і прямують при цьому до досягнення власної мети. Вони можуть також відхилятися від виконання правил дорожнього руху і порушувати їх. Вибираючи маршрут руху, водій керується такими критеріями [20]:

- забезпечення руху транспортного засобу по маршруту, що має найкоротшу відстань;
- забезпечення найменшого часу сполучення за умови обмежених дорожніх витрат;
- забезпечення найменших транспортних витрат за обмежених дорожніх умов;

- забезпечення максимально можливого рівня безпеки руху за умови наявних дорожніх умов;

- забезпечення максимальної пропускну здатності ВДМ, що характеризується рухом транспортного засобу з оптимальною швидкістю;

- забезпечення руху транспортного засобу по маршруту, який відомий водієві.

Дійсно, одним із основних факторів, що має вплив на управління транспортними потоками, є вибір маршрутів руху на індивідуальному автомобілі, оскільки вулично-дорожня мережа міста надає декілька можливих варіантів маршруту для поїздки. І коли мережа вільна або має мінімальні затримки в русі, то тоді, як правило, приймається маршрут, який має найкоротшу відстань, але, в наслідок збільшення кількості ТЗ на мережі, час руху на маршруті збільшується. Таким чином, поїздка кожного нового автомобіля викликає збільшення затримки для усіх транспортних засобів, які використовують той самий маршрут у той самий час, особливо дуже сильно це проявляється за умови наближення рівня завантаження до пропускну спроможності ділянки маршруту.

Аналізуючи особливості руху транспортних засобів на ВДМ міст, треба сказати, що маршрути руху транспортних засобів можуть бути постійними — коли водій (власник транспортного засобу) майже в один і той же час їде на роботу і в зворотному напрямку, та епізодичними — коли рух заданим маршрутом відбувається нерегулярно (один раз на тиждень, місяць і т.д.).

Таким чином, управління транспортними потоками повинно здійснюватися з урахуванням соціально-економічних факторів.

Джон Вардроп сформував два принципи розподілення транспортних потоків на мережі [21]:

- рівномірне розподілення, під час якого час руху для кожної поїздки на усіх маршрутах однаковий і ніхто з учасників руху не може зменшити час своєї поїздки, переключившись на інший маршрут;

- розподілення, під час якого сумарний час руху усіх транспортних засобів на мережі мінімальний.

Ситуація, яка склалась у значних і найважливіших містах України, а саме відсутність або невідповідність застарілої системи управління розподілення потоків, становить стохастичний рівномірний розподіл, який характеризується тим, що водій вибирає маршрут руху, виходячи із досвіду попередньої поїздки найкоротшим маршрутом руху. За таких умов

можливості вулично-дорожньої мережі використовуються недостатньо ефективно, водій самостійно не може визначити оптимальний маршрут, який забезпечить найменший час руху в ситуації, що склалася на ВДМ. Для підвищення ефективності використання ВДМ необхідно направити водія, минаючи затори, альтернативними маршрутами, підвищуючи рівномірність їхнього завантаження.

Тому ефективною моделлю управління транспортними потоками, яка дозволить оптимально розподілити транспортні потоки по вулично-дорожній мережі, повинна бути модель, яка б враховувала не тільки транспортні характеристики транспортного потоку, параметри та стан ВДМ, вплив кліматичних факторів, а й необхідні соціально-економічні фактори.

Відомо, що однією з основних проблем сучасних міст України є невідповідність історично утвореної конфігурації ВДМ та її параметрів швидкому збільшенню кількості автомобільного транспорту. За відповідних умов виникає комплекс проблем, які пов'язані з оперативним управлінням дорожнім рухом та утриманням ВДМ у належному стані, а також із вирішенням перспективних питань її розвитку та модернізації.

Під час розробки містобудівної проектно-документації необхідно мати ефективні засоби прогнозування навантажень на елементи ВДМ. Одним із таких засобів є моделювання транспортних потоків на основі моделі

рівномірного розподілу, використання якої, як підтверджує практика, дає реальний результат. Така модель базується на використанні принципів Вардропа, що включає рівномірний розподіл транспортних потоків, коли всі маршрути між парою вузлів вулично-дорожньої мережі мають однакову ціну. Особливістю цієї моделі є те, що для розподілу транспортних потоків встановлюється рівномірний стан, за якого неможливо відшукати дешевші маршрути переміщення між транспортними вузлами на вуличній мережі міста.

ВИСНОВКИ

На основі використання існуючих моделей можна наглядно відтворити комплексні процеси діяльності транспорту, спрогнозувати перерозподіл транспортних потоків у результаті зовнішнього впливу на ділянки ВДМ. Це дає можливість виявити проблемні ділянки вулично-дорожньої мережі, які є перевантаженими, і цим самим виявити наявні резерви, які можна використовувати шляхом упровадження заходів із організації дорожнього руху. Саме такий підхід дозволить збалансувати відповідність транспортного попиту транспортній пропозиції та рівномірно розподілити транспортну роботу всією ВДМ міста. Забезпечення умов оптимального завантаження ВДМ вимагає застосування заходів оперативного характеру, які направлені на найкраще використання існуючої інфраструктури та зниження впливу негативних факторів.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Степанчук О.В. Автомобільний транспорт і екологічні проблеми міст/ Степанчук О.В., Степанчук І.М. // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. 2004. № 6. С.88–92.

[2] Семенов В. Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса/ В.В. Семенов // М., Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, Препринт № 34, 2004. — 44 с.

[3] Гасников А.В. и др. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учеб. пособие / Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А., Холодов Я. А., Шамрай Н.Б. под ред. Гасников А.В. — М.: МФТИ, 2010. 362 с.

[4] Наумова Н.А. Теоретические основы и методы управления транспортными потоками средствами мезоскопического моделирования: Диссертация доктора технических наук: 05.22.10 / Наумова Наталья Александровна: Волгоградский государственный технический университет. Волгоград, 2015. 331 с.

[5] Доля В.К. и др. Транспортные потоки и

REFERENCES

[1] Stepanchuk O.V. Avtomobilnyi transport i ekolohichni problemy mist/ Stepanchuk O.V., Stepanchuk I.M. //Ekolohiia dovkillia ta bezpeka zhyttiedialnosti. — 2004. № 6. S.88-92.

[2] Semenov V. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki transportny`kh potokov megapolisa/ V.V. Semenov // M., Institut prikladnoj matematiki im. M.V. Keldy`sha, Preprint # 34, 2004. - 44 s.

[3] Gasnikov A.V. i dr. Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportny`kh potokov: ucheb. posobie / Gasnikov A.V., Klenov S.L., Nurminskij E.A., Kholodov Ya. A., Shamraj N.B. pod red. Gasnikov A.V.-M.: MFTI, 2010. 362 s.

[4] Naumova N.A. Teoreticheskie osnovy` i metody` upravleniya transportny`mi potokami sredstvami mezoskopicheskogo modelirovaniya: Dissertacziya doktora tekhnicheskikh nauk: 05.22.10 / Naumova Natal`ya Aleksandrovna: Volgogradskij gosudarstvenny`j tekhnicheskij universitet.- Volgograd, 2015.- 331 s.

[5] Dolya V.K. i dr. Transportny`e potoki i pro-

противозаторные мероприятия на сети города/ В.К. Доля, А.О. Лобашов, А.В. Прасоленко, С.Б. Дульфан/ Вісник Донецької академії автомобільного транспорту: Наук. журнал/Донецьк, ДААТ, Вип.3, 2012. С. 12-16.

[6] Bando, M., Hasebe, H., Nakayama A., Shibata, A. and Sugiyama, Y. (1995) Dynamical Model of Traffic Congestion and Numerical Simulation. *Physical Review E* p.51.

[7] Brilon, W. and Hartmann, D. (2004) Fortentwicklung und Bereitstellung eines bundeseinheitlichen Simulationsmodells für Bundesautobahnen. Research project FE01/157/2001/IRB for the Bundesanstalt für Straßenwesen (Federal Highway Research Institute, Germany), in cooperation with the Ruhr-University Bochum. Germany.

[8] Gazis, D.C., Herman, R. and Rothery, R.W. (1961) Non-linear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow. *Operations Research* 9, No.4.

[9] Hoefs, D.H. (1972) Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen. *Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* 140.

[10] Michaels, R. M. (1963). Perceptual factors in car following. *Proceedings of the Second International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow*. Paris: OECD, 44-59.

[11] Sparmann, U. (1978) Spurwechselvorgänge auf zweispurigen BAB- Richtungsfahrbahnen. *Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* 263.

[12] Theis, C. (1997) Modellierung des Fahrverhaltens an Autobahnanschlussstellen.

[13] Stepanchuk O., Bieliatynskiy A., Pylypenko O. (2020) Modelling the Bottlenecks Interconnection on the City Street Network. In: Popovic Z., Manakov A., Breskich V. (eds) VIII International Scientific Siberian Transport Forum. *TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1116. Springer, Cham-P.889-898.

[14] Степанчук О.В. Методи створення і ведення транспортно-екологічного моніторингу у містах України/ Степанчук О.В., Рейцен Є.О. // Містобудування та територіальне планування: Науково-технічний збірник. – К.: КНУБА, 2004. Вип.18. С.178-185.

[15] Гук В.И. Элементы теории транспортных потоков и проектирования улиц и дорог: Учеб. пособие/ В.И. Гук. К.: УМК ВО, 1991. 255 с.

[16] Якимов М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов: монография / М. Р. Якимов. М.: Логос, 2013. – 188 с.

[17] Лобашов О.О. Теоретичні основи формування транспортних потоків в крупних містах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.22.01 "Транспортні системи"/ О.О. Лобашов. — Харків, 2011. 40 с.

[18] Швецов В. И. Математическое моделирование транспортных потоков / В. И. Швецов. // *Автоматика и телемеханика*. 2003. С. 3–46.

[19] Яцкив И. В. Использование возможностей имитационного моделирования для анализа транспортных узлов [Электронный ресурс] / И. В. Яцкив, Е. А. Юршевич, Н. В. Колмакова – Режим доступа до ресурсу: <http://www.gpss.ru/immod05/s3/yackiv/>.

[20] Степанчук О.В. Ефективні методи розподілення транспортних потоків на вулично-

tivozatorny`e meropriyatiya na seti goroda/ V.K. Dolya, A.O. Lobashov, A.V. Prasolenko, S.B. Dul`fan/ Vi`snik Donecz`koyi akademi`yi avtomobi`l`nogo transportu: Nauk. zhurnal. Donecz`k, DААТ, Vip. 3, 2012 – S. 12-16.

[6] Bando, M., Hasebe, H., Nakayama A., Shibata, A. and Sugiyama, Y. (1995) Dynamical Model of Traffic Congestion and Numerical Simulation. *Physical Review E* 51.

[7] Brilon, W. and Hartmann, D. (2004) Fortentwicklung und Bereitstellung eines bundeseinheitlichen Simulationsmodells für Bundesautobahnen. Research project FE01/157/2001/IRB for the Bundesanstalt für Straßenwesen (Federal Highway Research Institute, Germany), in cooperation with the Ruhr-University Bochum. Germany.

[8] Gazis, D.C., Herman, R. and Rothery, R.W. (1961) Non-linear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow. *Operations Research* 9, No.4.

[9] Hoefs, D.H. (1972) Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen. *Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* 140.

[10] Michaels, R. M. (1963). Perceptual factors in car following. *Proceedings of the Second International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow*. Paris: OECD, 44-59.

[11] Sparmann, U. (1978) Spurwechselvorgänge auf zweispurigen BAB — Richtungsfahrbahnen. *Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* 263.

[12] Theis, C. (1997) Modellierung des Fahrverhaltens an Autobahnanschlussstellen.

[13] Stepanchuk O., Bieliatynskiy A., Pylypenko O. (2020) Modelling the Bottlenecks Interconnection on the City Street Network. In: Popovic Z., Manakov A., Breskich V. (eds) VIII International Scientific Siberian Transport Forum. *TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1116. Springer, Cham-P.889-898.

[14] Stepanchuk O.V. Metody stvorennia i vedenia transportno-ekolohichnoho monitorynhu u mistakh Ukrainy/ Stepanchuk O.V., Reitsen Ye.O. // *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*. – K.: KNUBA, 2004. Vyp.18. 178-185.

[15] Guk V.I. E`lementy` teorii transportny`kh potokov i proektirovaniya ulicz i dorog: Ucheb. posobie/ V.I. Guk. – K.: UMK VO, 1991. 255 s.

[16] Yakimov M. R. Transportnoe planirovanie: sozdanie transportnikh modelej gorodov: monografiya / M. R. Yakimov. – M.: Logos, 2013. 188 s.

[17] Lobashov O.O. Teoretychni osnovy formuvannia transportnykh potokiv v krupnykh mistakh: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia dokt. tekhn. nauk : spets. 05.22.01 Transportni systemy/ O.O. Lobashov. — Kharkiv, 2011. 40 s.

[18] Shveczov V. I. Matematicheskoe modelirovanie transportny`kh potokov / V. I. Shveczov. // *Avtomatika i telemekhanika*. 2003. S. 3–46.

[19] Yaczkiv I. V. Ispol`zovanie vozmozhnostej imitacionnogo modelirovaniya dlya analiza transportny`kh uzlov [Electronic Source] / I. V. Yaczkiv, E. A. Yurshевич, N. V. Kolmakova – Available at: <http://www.gpss.ru/immod05/s3/yackiv/>.

[20] Stepanchuk O.V. Efektyvni metody rozpodilennia transportnykh potokiv na vulychno-dorozhnihi merezhi v suchasnykh umovakh / Stepanchuk O.V., //

дорожній мережі в сучасних умовах / Степанчук О.В., // Вісник Інженерної академії України. К., 2013. Вип.3-4. – С.171-174.

[21] John G. Wardrop. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. / Wardrop J. G. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1952. – Part II, Volume I, pp. 325-362.

Visnyk Inzhenernoї akademii Ukrainy.-К., 2013. Вип.3-4. 171-174s.

[21] John G. Wardrop. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. / Wardrop J. G. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1952. – Part II, Volume I, pp. 325-362.

ABSTRACT

Stepanchuk O., Lapenko O., Chernyshova O. Peculiarities of using modeling methods of traffic flows in the city street network.

This study examines methods of modeling traffic flows within the city street network, identifies problems with their application and implementation in modern conditions of development and functioning of cities and livelihoods; summarizes approaches to existing models of traffic flow within the city street network. An analysis of the problems which are solved by applying the traffic flow theory can improve the conditions of movement of vehicles on highways within cities. The study identifies and analyses these problems and the methods for solving them. Functional classification of mathematical models of transport flows is substantiated, taking into account the traffic forecasting models for transport network, models of traffic flow dynamics, and models of optimization of transport network functioning.

The article discusses and concludes the directions for improving the traffic flow management systems in the general city street network, as well as scientific concepts and theoretical provisions for the distribution of vehicles in the street network, in an attempt to solve real-time problems of optimal traffic flow management.

By analyzing the existing methods of modeling traffic flows in the city street network, this study was able to develop a general concept of their implementation in an urban street traffic management system. The obtained scientific result serves as a basis for further theoretical and applied research on development of intelligent traffic control systems.

Key words: city street network; city; traffic flow; vehicle; modeling

AUTHOR`S NOTE:

Stepanchuk Oleksandr, Doctor of Technical Sciences, Professor, National aviation university, Department of architecture, Ukraine, e-mail: oleksandr.stepanchuk@npp.nau.edu.ua, orcid: 0000-0002-2822-3471

Lapenko Oleksandr, Doctor of Technical Sciences, Professor, National aviation university, Department of architecture, Ukraine, e-mail: oleksandr.lapenko@npp.nau.edu.ua, orcid: 0000-0002-2029-0792

Chernyshova Oksana, Doctor of philosophy (PhD), Associate Professor, National aviation university, Department of architecture, Ukraine, e-mail: oksana.chernyshova@npp.nau.edu.ua, orcid: 0000-0002-8132-2153

Стаття подана до редакції 01.06.2022 р.
Стаття прийнята до друку 14.06.2022 р.