



KAPITEL 8 / CHAPTER 8⁸

INNOVATIVE APPROACHES TO DETERMINING THE RANGE OF TRANSPORT FLOW PARAMETER VARIATIONS IN THE URBAN NETWORK

DOI: 10.30890/2709-2313.2025-37-01-005

Вступ

Сучасні міста стикаються з дедалі більшими викликами, пов'язаними із зростанням інтенсивності дорожнього руху, що призводить до значного перевантаження вулично-дорожньої мережі (ВДМ). Це спричиняє зростання кількості заторів, збільшення затримок у русі транспорту, підвищення рівня забруднення повітря та зниження ефективності роботи міського транспорту загалом. Традиційні методи управління дорожнім рухом вже не здатні забезпечити належну гнучкість і швидкість реагування на динамічні зміни в умовах трафіку. У цьому контексті актуальність дослідження визначається необхідністю впровадження інноваційних підходів до управління транспортними потоками на основі математичного моделювання та прогнозування ситуацій на дорогах. Застосування мікро- та макромоделей, а також побудова фундаментальних діаграм транспортного потоку дають змогу точно визначати критичні параметри руху та ефективно реагувати на їх зміни в реальному часі.

Важливою складовою є розробка систем підтримки прийняття рішень (СППР), які дозволяють оперативно і ефективно управляти дорожнім рухом, забезпечуючи зменшення заторів, зниження рівня шуму та викидів шкідливих речовин. Урахування складних умов руху та прогнозування появи «вузьких місць» на транспортних магістралях робить запропоновані моделі актуальними для великих міст, де проблема перевантаженості мережі є особливо гострою. Таким чином, дослідження методів і моделей управління дорожнім рухом є важливим кроком до підвищення ефективності транспортної системи,

⁸Authors: Abramova Ludmila

Number of characters: 42091

Author's sheets: 1,05



покращення екологічної ситуації та забезпечення сталого розвитку міського середовища.

Методологічні основи визначення параметричного керуючого впливу на дорожній рух (ДР) для системи підтримки прийняття рішень (СППР) було розроблено на підставі фундаментальних транспортних моделей.

Формування керуючого впливу при управлінні ДР виконується лише при наявності інформації щодо параметрів транспортних і пішохідних потоків та характеру дорожніх умов, у яких відбувається рух. На основі досліджень організації ДР розроблені численні показники та критерії для його опису, проте досі немає єдиного загальновизнаного комплексу параметрів ДР у процесі управління. До найбільш часто застосованих параметрів ДР відносяться: інтенсивність руху, склад транспортного потоку (ТП), щільність потоку транспортних засобів, швидкість руху, тривалість затримок руху. Коливання інтенсивності руху ТП призводить до негативних наслідків на ВДМ, таких як збільшення затримки транспортних засобів, дорожньо-транспортних подій (ДТП) та забруднення повітряного басейну, підвищення рівня шуму із додатковими витратами палива. Інтенсивність впливає на всі ці параметри, причому зі збільшенням інтенсивності її негативний вплив посилюється, коли фактична інтенсивність руху ТП на ВДМ наближається до максимально можливої. Тобто інтенсивність руху ТП є первинним параметром при дослідженні процесу ДР, тоді як цей процес є основним змінним в транспортній системі міста. Інші параметри є вторинними або похідними і фактично відображають умови та швидкісні режими ДР.

Для управління ДР на транспортній мережі міст в усьому світі використовуються системи управління, алгоритми функціонування яких засновані на моделях ТП. При цьому вимоги до точності і адекватності моделей досить високі. Транспортне моделювання дозволяє вирішувати завдання при проектуванні нових і модернізації існуючих систем управління і схем ОДР, а також усувати надзвичайні ситуації на ВДМ.

На даний момент часу накопичилася величезна кількість матеріалів,



присвячених транспортній проблемі, які реферуються в таких відомих наукових журналах як «Transportation Research», «Physical Review E», «Review of modern physics», «Transportation Science».

Незважаючи на те, що понад півстоліття провідні відомі фахівці в галузі математичного моделювання ДР інтенсивно працюють в цьому напрямку, проблему передзаторового і заторового режимів руху ще до кінця не досліджено [1-3] і вона є основною при управлінні ДР у великих містах.

8.1. Аналіз транспортних макромоделей потоку

Вибір типу технології управління залежить від постановки завдання і цілі управління ДР. Результати проведеного аналізу математичного забезпечення відомих систем управління свідчать, що до його складу належать моделі взаємозалежності основних параметрів ТП та параметрів руху окремих транспортних засобів, що впливають на пропускну спроможність ВДМ [4].

Взаємозв'язок інтенсивності та пропускну спроможності на ВДМ визначається рівнем обслуговування руху [5], який визначає ефективність функціонування ВДМ та впливає на ефективність управління ДР (таблиця 1). Дані таблиці 1 доводять, що до ділянок автомобільної дороги, які обслуговують рух в режимі перевантаження, відносяться ділянки автомобільної дороги з рівнем обслуговування D , E або F .

Тому було розглянуто основу моделювання ТП, яка формується на підставі макро- та мікромоделей. Відомі перші макроскопічні моделі (гідродинамічні), в яких ТП розглядається подібним потоку стисливої рідини (М. Лайтхілл і Дж. Уїзем, П. Річардс, LWR) [6, 7], та перші мікроскопічні моделі (слідування за лідером), які описують рух кожного автомобіля (А. Решель, Л. Пайнс).

В моделях LWR наводиться опис функціональної залежності (рівняння стану) між інтенсивністю потоку (N), швидкістю (V) і щільністю (q):

$$N = V \cdot q \quad (1)$$



Таблиця 1 – Характеристика рівнів обслуговування руху

Рівень обслуговування руху	Коефіцієнт завантаження z	Коефіцієнт швидкості руху c	Коефіцієнт насичення рухом p	Характеристика потоку автомобілів	Стан потоку	Емоційне завантаження водія	Зручність роботи водія	Економічна ефективність роботи дороги
A	$< 0,20$	$> 0,90$	$< 0,10$	автомобілі рухаються в вільних умовах, взаємодія між автомобілями відсутня	вільний рух одиночних автомобілів з великою швидкістю	низьке	зручно	неефективна
B	$0,20 - 0,45$	$0,70 - 0,90$	$0,10 - 0,30$	автомобілі рухаються групами, здійснюється багато обгонів	рух автомобілів малими групами (2 - 5 од.), обгони можливі	нормальне	мало зручно	мало ефективна
C	$0,45 - 0,70$	$0,55 - 0,70$	$0,30 - 0,70$	у потоці ще існують великі інтервали між автомобілями, обгони неможливі	Рух автомобілів великими групами (5 - 14 од.), обгони ускладнені	високе	незручно	ефективна
D	$0,70 - 0,90$	$0,40 - 0,55$	$0,70 - 1,00$	суцільний потік автомобілів, що рухаються з малими швидкостями	колонний рух автомобілів з малою швидкістю, обгони неможливі	дуже високе	дуже незручно	неефективна
E	$0,90 - 1,00$	$< 0,40$	$1,00$	потік рухається із зупинками, виникають затори, режим пропускної спроможності	щільний	дуже високе	дуже незручно	неефективна
F	$> 1,00$	$0,30$	$1,00$	повна зупинка руху, затори	понад щільний	вкрай високе	небезпечно	неефективна

Джерело: [8-9].



де N – інтенсивність ТП, авт./год;

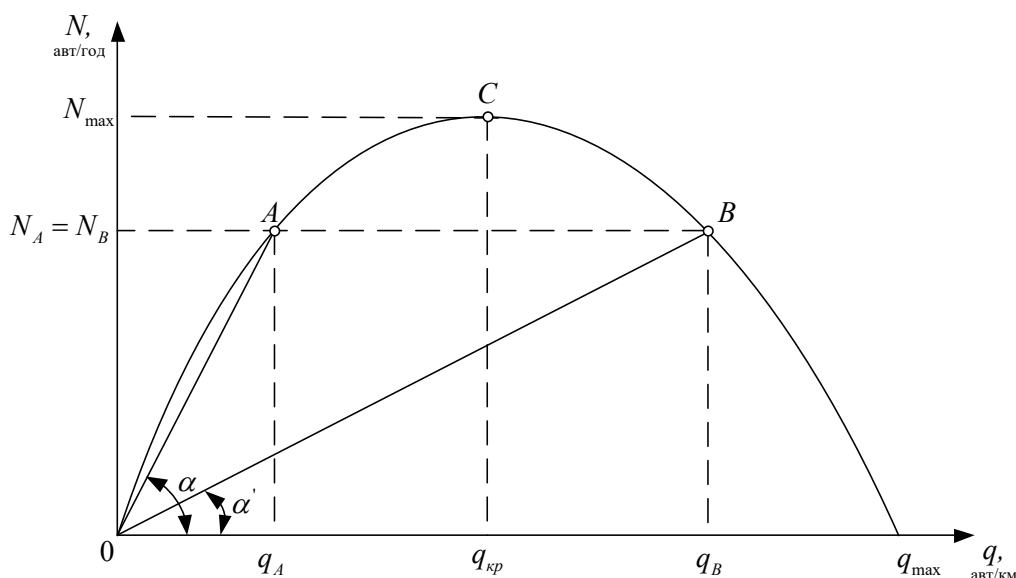
V – швидкість руху, км/год;

q – щільність ТП, авт./км.

Графічна інтерпретація залежності (1) відома як фундаментальна діаграма ТП, яка дозволяє не тільки визначати параметри ТП, а й межі переходу ТП з одного стану в інший (вільний-синхронізоване-стислий), що дозволяє обґрунтувати і визначити рівні завантаження ВДМ.

Основними обмеженнями при виборі способу побудови фундаментальної діаграми є недостатній обсяг даних для моделей вищого порядку, що обмежує їх практичне застосування.

На підставі цього вважаємо, що модель LWR і її відомі аналоги добре підходять для управління ДР (рисунок 1).



Умовні позначення: N_A, N_B - інтенсивність ТП відповідно у точках A і B ;

q_A, q_B - щільність ТП відповідно у точках A і B .

Рисунок 1 – Фундаментальна діаграма ТП

Джерело: [10].

Відомі та досліджені [11] наступні стани ТП, а саме: вільний стан, синхронізований та стислий, природа яких впливає на рівні завантаження ВДМ. У зоні вільного руху (т. 0 – т. A) автомобілі рухаються у вільних умовах, коли взаємодія між автомобілями відсутня; частково зв'язаний рух на ділянці т. A –



т. *C* сприяє руху автотранспортних засобів (АТЗ) групами, при наявності маневрів обгонів; при зв'язаному русі в потоці ще існують великі інтервали між автомобілями, але обгони ускладнені (зона т. *C* – т. *B*); у насиченому потоці, коли суцільний потік автомобілів рухається з малими швидкостями, існує перехід до щільного руху, коли потік рухається із зупинками та виникають затори (зона т. *B* – т. q_{max}).

Досліджені основні емпіричні властивості переходу від вільного до щільного стану ТП, що полягають у наступному:

- перехід до щільного ТП є переходом *F-S* (free flow - synchronized flow), від вільного через синхронізований стан до стислого;

- перехід *F-S* може бути як спонтанним так і викликаним зовнішнім обуренням близько одного і того ж місця на дорозі – «вузького місця»;

Тому згідно з [11] існуючі моделі щільного потоку можна розділити на два класи:

1. Моделі типу LWR, в яких перехід до щільного ТП, виникає не в результаті нестійкості стану, а за рахунок існування точки, в якій досягається максимум інтенсивності на фундаментальній діаграмі;

2. Моделі типу «Дженерал Моторс» (ДМ), в якій перехід до щільного потоку пов'язаний з невизначеністю модельних рішень близько критичної щільності ТП. Детальний огляд цього класу моделей наведено в [12].

Порівняльний аналіз моделей довів, що моделі LWR-типу не дозволяють дослідити зміну параметрів щільного потоку (права сторона діаграми), тоді як моделі ДМ-класу надають можливість визначити параметри руху ТП при підвищеній щільності з урахуванням невизначеності його параметрів [13]:

- швидкість поширення «ударних хвиль», які виникають назустріч руху ТП при збільшенні щільності;

- максимальна щільність ТП (бампер до бампера);

- критична щільність ТП при максимальній інтенсивності ТП.

Тому можливо припустити, що залежність (1) не є безперервною і має складну структуру з двох гілок, і як наслідок цього форма фундаментальної



діаграми може мати декілька форм представлення – трапецієвидну, трикутну, складну (нелінійну справа) і розірвану справа в точках, де змінюється рівень завантаження дороги та відбуваються скачки зміни щільності ТП [14].

Тоді дані вимірювань в лівій частині фундаментальної діаграми (в зоні вільного руху) можуть бути апроксимовані прямою лінією, в той час як дані в правій частині фундаментальної діаграми (в зоні ускладненого руху) мають значний розкид та невизначеність. Цей розкид залежить від розбіжностей значень інтенсивності і швидкості ТП, що створює відповідну невизначеність фундаментальної діаграми в правій частині.

На підставі того, що результати теоретичного аналізу фундаментальної діаграми ТП поки що не дозволяють отримати і прогнозувати зміну параметрів ТП, але надають змогу враховувати той факт, що інтенсивність руху ТП в певних дорожніх умовах обмежена не тільки станом ТП, а й нормативною пропускною спроможністю ВДМ, якій відповідають оптимальні значення швидкості і щільності ТП. У свою чергу, управління ДР спрямоване на забезпечення сприятливих умов руху ТП, які можливо визначити на підставі фундаментальної діаграми ТП із урахуванням нормальних та складних умов руху. Нормальними умовами руху слід вважати такі, які допускають рух зі швидкістю $V > V_o$ при щільності $q < q_o$, при цьому V_o та q_o , відповідно оптимальна швидкість руху ТП та оптимальна щільність ТП. Ділянки, що не відповідають нормальним умовам руху і на яких ТП змушений рухатися з обмеженою швидкістю $V < V_o$, при зростанні щільності до $q > q_o$, слід відносити до ділянок зі складними умовами руху. Якщо в нормальних умовах руху основним показником, що визначає інші характеристики ТП, є інтенсивність, тоді мета управління ДР полягає у забезпеченні поточної інтенсивності ТП при визначенні швидкості правилами дорожнього руху. Тобто, контролюючи інтенсивність ТП в області допустимих значень (при нормальних умовах руху), можливо здійснити сталий рух ТП на ВДМ та забезпечити пропускну спроможність ВДМ. Тоді область виникаючої невизначеності інтенсивності визначається системою обмежень:

$$N_{\min} < N_{\text{пот}} < N_{\max} \quad (2)$$



де $N_{\text{пот}}$ – поточна інтенсивність ТП, авт/год;

$N_{\text{max}}, N_{\text{min}}$ – відповідно максимальна та мінімальна інтенсивність ТП на ділянці ВДМ, авт/год.

А мету прийняття рішення у даному випадку можливо навести як

$$N_{\text{max}}(t) \rightarrow \text{opt} \quad (3)$$

Тому для дослідження параметрів ТП, які дозволяють враховувати коливання інтенсивності транспортних потоків пропонуємо побудову фундаментальних діаграм для перегонів ВДМ, на яких виникають ускладненні умови руху. Аналіз фундаментальної діаграми доводить, що одному і тому ж значенню інтенсивності відповідають різні щільності ($q_A < q_B$) і, як наслідок, різні швидкості ($V_A > V_B$). Причому V_A відповідає швидкості ТП без перешкод, а V_B зменшується, тому що зі збільшенням щільності ТП виникає «ударна хвиля», яка спрямована назустріч руху основному потоку, зменшуючи його швидкість. Отже, параметр «швидкість ударної хвилі» має істотний вплив на параметри ТП і вимагає визначення при побудові фундаментальної діаграми. На підставі наведених доводів вважаємо, що трикутна форма діаграми найбільш пристосовна до практичних досліджень визначення взаємозв'язку параметрів ТП.

8.2. Розробка методики побудови області невизначеності параметрів транспортного потоку

При виборі форми фундаментальної діаграми ми керувалися досвідом вчених групи Беркли (University of California, Berkeley) [10, 14] в управлінні дорожнім рухом, який свідчить, що коли ТП рухається в вільному режимі, щільність і інтенсивність прагнуть до максимуму і визначають точку C , отже ліву частину діаграми можна описати рівнянням та формалізувати ідентифікацію фундаментальної діаграми ТП (рисунок 2).

$$N_{\text{max}} = V \cdot q_{\text{кр}} \quad (4)$$



Точка $B (q_{\max}, 0)$ відповідає максимальній щільності потоку при тому, що інтенсивність і швидкість рівні 0. Тоді праву частину діаграми можна побудувати на підставі залежності:

$$N_{\max} = c \cdot (q_{\max} - q_{\text{кр}}) \quad (5)$$

де c – швидкість ударної хвилі, м/с;

$q_{\max}$ – максимальна щільність потоку, авт/км.

Отже, визначення координат точки переходу правої частини діаграми в ліву частину, можливо отримати шляхом формалізації лівої та правої частини діаграми:

$$V \cdot q_{\text{кр}} = c \cdot (q_{\max} - q_{\text{кр}}) \quad (6)$$

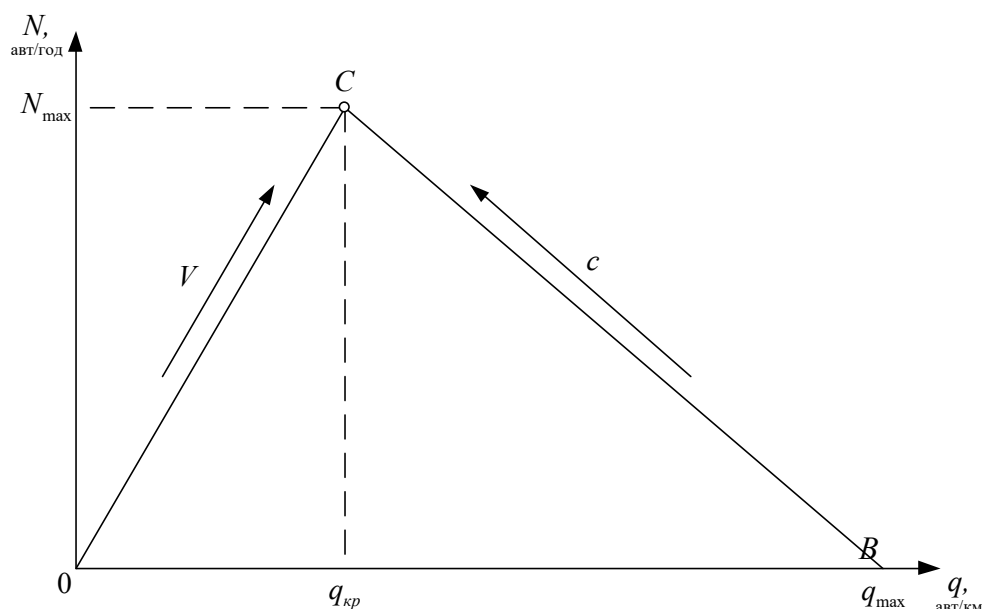


Рисунок 2 – Ідентифікація фундаментальної діаграми ТП

Авторська розробка

Але при виникненні затору рух АТЗ припиняється, щільність ТП досягає максимального значення $q_{\max}$, а інтенсивність та швидкість руху наближаються до нуля:

$$N(q) \rightarrow 0 \quad (7)$$

$$V(q) \rightarrow 0 \quad (8)$$

Припускаємо, що максимальна кількість автомобілів, які можуть пройти за



одиницю часу через перетин смуги руху дороги, дорівнює пропускній спроможності смуги дороги $P_a = N_{\max}$ [15]. Тоді щільність, що відповідає пропускній спроможності, є оптимальною щільністю $q_{\text{опт}}$, а швидкість – оптимальною швидкістю V_o .

При оперативному управлінні ДР на рівні прийняття рішень було визначено, що необхідно сформувати керуючі впливи на ТП для забезпечення пропускної спроможності ВДМ. Тому основою оперативного управління є контроль параметрів ТП з подальшим їх аналізом та застосуванням методів управління, які надають можливість змінювати інтенсивність ТП на елементах ВДМ. До них відносяться методи:

- зменшення щільності ТП на магістралях міста в пікові години;
- надання інформації для водіїв при виборі маршруту руху, а саме попередження про перешкоди на маршруті слідування, а також можливі шляхи об'їзду заторових ділянок руху;
- регулювання параметрів вхідних потоків на завантажених магістралях міста;
- динамічне управління швидкістю руху ТП для забезпечення рівномірного руху транспортних засобів і підвищення інтенсивності ТП на підходах до складних ділянок ВДМ [16];
- координація роботи світлофорних пристроїв в зонах ВДМ [17].

На підставі проведеного аналізу методів та визначення основних параметрів ТП для практичного транспортного моделювання необхідно визначити аналітичні залежності параметрів ТП, що дозволять ідентифікувати фундаментальну діаграму на емпіричних даних параметрів ТП та діючої ВДМ міста. Методичні основи для визначення параметрів руху ТП у щільному потоці за наявності рівня прийняття рішень в системі управління дорожнім рухом (СУДР) було розроблено наступним чином [18]. Побудову фундаментальних діаграм ТП необхідно розпочати з побудови моделі ділянки ВДМ у вигляді графа з координатами вузлів та параметрами перегонів (їх довжини і кількості смуг). Також відомо, що ВДМ міст складається з вулиць і доріг різних категорій, що



відрізняються планувальними параметрами та мають нормативні значення інтенсивності та швидкості руху [15]. Нормативну пропускну спроможність перегонів визначаємо за допомогою нормативних містобудівних документів, які містять параметри ВДМ міст з урахуванням вулиць і доріг різних категорій і планувальних рішень (таблиця 2). Також за таблицею визначаємо нормативну швидкість руху АТЗ на дорогах відповідної категорії з відомою розрахунковою пропускну спроможністю. Тому, вважаємо за необхідне для подальших досліджень провести визначення основних параметрів ТП для побудови фундаментальної діаграми на підставі наступних пропозицій.

Таблиця 2 – Категорії вулиць і доріг та їх параметри

Категорія вулиць і доріг	Розрахункова швидкість, км/год	Ширина смуги руху, м	Кількість смуг руху	Найбільший продольний ухил, ‰	Розрахункова інтенсивність руху, прив. од/год на смугу	Швидкість руху ТП, км/год
Магістральні дороги:						
швидкісного руху	120	3,75	6...10	30	1200	90/60
регульованого руху	80	3,5	4...6	50	800	60
Магістральні вулиці:						
безперервного руху	100	3,75	6...8	40	1200	75/55
регульованого руху	80	3,5	6...8	50	700	60/45
Магістралі районного значення	70	3,5	4...6	60	500	50/35
Вулиці і дороги місцевого значення	40...50	3,0	2...4	70...80	200-300	35/20
Проїзди	30...40	2,75...3,0	1...2	70...80	150	35/25
Пішохідні вулиці	-	0,75	необмежено	80		

Джерело: [15].

Початкові умови для побудови фундаментальних діаграм формуються на основі вимірювань, що надходять від детекторів транспорту або можуть бути отримані шляхом статистичного аналізу попередніх вимірювань.



Ідентифікація фундаментальної діаграми ТП (рисунок 2) проводиться за трьома значеннями: 1) пропускною спроможністю P ; 2) критичної щільністю $q_{кр}$, яка визначає кількість автотransпортних засобів на кілометрі перегону, коли інтенсивність руху досягає пропускної спроможності; 3) максимальною щільністю q_{max} , при якій рух повністю зупиняється.

Досягнення критичної щільності призводить до заторового стану (рисунок 2). Інший випадок спостерігається, коли затору не виникає, а існують складні умови руху. Тобто за наданим сценарієм розвитку подій маємо гірший випадок (заторів стан) та кращий випадок (рух ТП у складних умовах). Такий розкид подій на ВДМ формує невизначеність параметрів стану ТП та зумовлює складність визначення параметрів для прийняття рішень. Параметри ТП відповідно позначені «-» та «+». Тоді справедливі припущення, що:

- значення поточної інтенсивності ТП знаходиться в інтервалі визначених методом натурних спостережень пікової (N_{ex}^+) та між пікової інтенсивності ТП (N_{ex}^-) $N_{ex}^- \leq N_{nom} \leq N_{ex}^+$;

- значення пропускної спроможності – в інтервалі $P^- \leq P_{розрах} \leq P^+$ і, відповідно щільність – $q^- \leq q \leq q^+$.

Наявність розбіжностей параметрів ТП формує область невизначеності інтенсивності та щільності ТП під час виникнення «ударної хвилі», що обмежена графіками для верхньої межі (гіршого випадку) (+) та нижньої межі (кращого випадку) (-) визначених параметрів ТП в залежності від його стану. При цьому граничні параметри діапазону зміни критичної щільності $q_{кр}$ було визначено як:

$$q_{кр}^+ = \frac{N_{ex}^+}{V_n}; \quad (9)$$

де V_n – нормативна швидкість руху АТЗ, км/год.

$$q_{кр}^- = \frac{N_{ex}^-}{V_n} \quad (10)$$



Для врахування граничної концентрації транспортних засобів, що утворює «ударні хвилі», які впливають на зміну основних параметрів ТП, визначаємо саме ту інтенсивність ТП, що призводить до виникнення «ударної хвилі» в потоці:

$$N_{\min}^{-} = (V_n - c^{-}) \cdot q_{кр}^{-} \quad (11)$$

$$N_{\min}^{+} = (V_n - c^{+}) \cdot q_{кр}^{+} \quad (12)$$

В свою чергу швидкість поширення «ударної хвилі» (c) з урахуванням невизначеності визначено наступним співвідношенням:

$$c^{-} = \frac{N_{ex}^{-}}{q_{\max}^{-} - \frac{N_{ex}^{-}}{V_n}} ; \quad (13)$$

$$c^{+} = \frac{N_{ex}^{+}}{q_{\max}^{+} - \frac{N_{ex}^{+}}{V_n}} \quad (14)$$

Тоді при формалізації параметрів руху ТП у гіршому та кращому випадках було отримано опис зони невизначеності при складних умовах руху, коли необхідно втручатись до процесу управління ДР особі, що приймає рішення (ОПР). Графічне відображення наведених аналітичних залежностей представлено на рисунку 3.

На основі запропонованого методичного підходу послідовність побудови фундаментальної діаграми ТП для практичного визначення параметрів руху ТП набуває вигляду:

1. Наводимо схему ділянки транспортної мережі із визначенням відповідних топологічних параметрів (довжина l_{nep} та кількість смуг руху n).

2. Визначаємо інтенсивність ТП на ділянці за допомогою детекторів транспорту, при цьому визначаємо максимальну інтенсивність як N_{ex}^{+} , а мінімальну як N_{ex}^{-} .

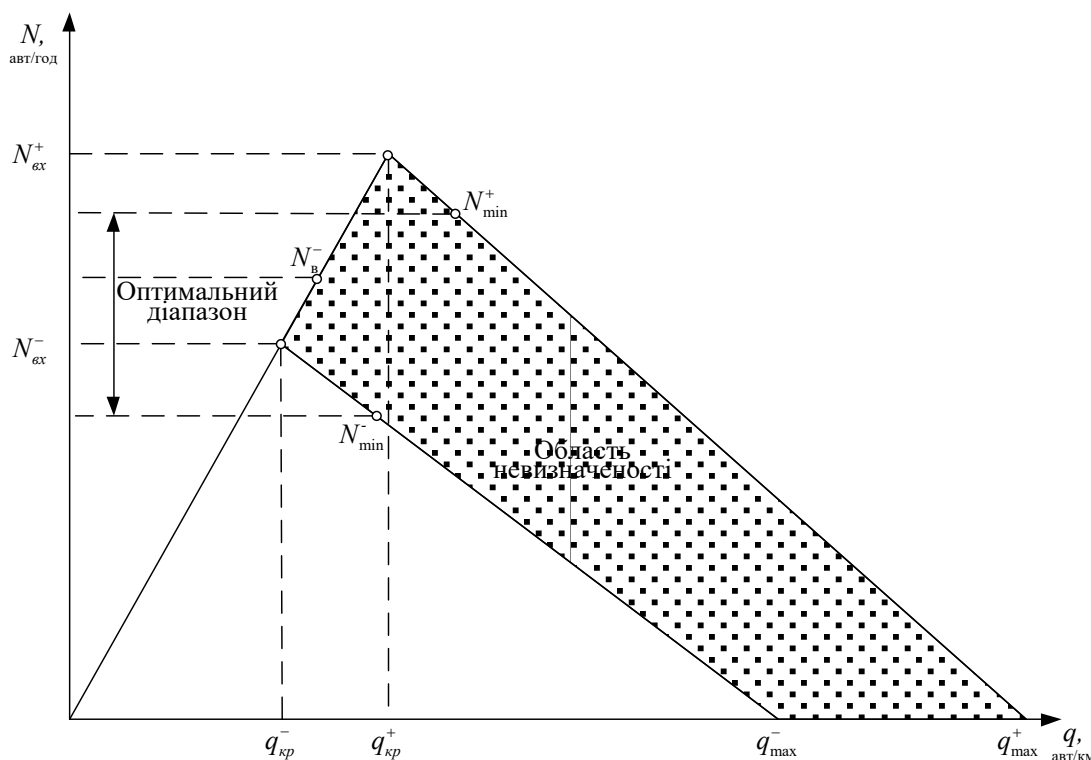


Рисунок 3 – Трикутна форма фундаментальної діаграми ТП

Авторська розробка

3. Визначаємо щільність ТП $(q_{\max}^-, q_{\min}^-)$, як максимальну кількість автотранспортних засобів (АТЗ), які розташовані на перегоні на підставі відомих значень середньої довжини АТЗ (l_a) та дистанції безпеки $(l_{\text{без}})$

$$q_{\max}^- = \frac{l_{\text{пер}}}{l_a + l_{\text{без}}} \cdot n \quad (15)$$

де n – кількість смуг руху.

При визначенні $q_{\max}^+$ ураховується, що дистанція безпеки $(l_{\text{без}})$ між АТЗ у щільному потоці зменшується майже вдвічі.

4. Із таблиці 2 обираємо нормативні значення швидкості (V_n) руху та інтенсивності ТП, що дорівнює пропускній спроможності ділянки $(P = N_{\max})$ за відповідною категорією міських вулиць та доріг.

5. На підставі залежностей (9)-(10) визначаємо критичне значення щільності ТП для максимальної $(q_{\text{кр}}^+)$ та мінімальної $(q_{\text{кр}}^-)$ інтенсивності ТП.



6. Визначаємо швидкість «ударної хвилі» (c) для обох варіантів зміни інтенсивності за залежностями (13) та (14).

7. Тоді максимальну інтенсивність для кращого варіанту дорожнього руху на перегоні (N_{ϵ}^{-}) можливо визначити за залежністю:

$$N_{\epsilon}^{-} = V_{св} \cdot q_{кр}^{\pm} \quad (16)$$

де $q_{кр}^{\pm}$ – середнє значення критичної щільності ТП для кращого та гіршого випадків.

8. Мінімальна інтенсивність ТП для кожного випадку (крива у правій частині діаграми) ($N_{\min}$) залежить від швидкості «ударної хвилі», тому її значення визначимо за залежностями (11)-(12).

У якості перевірки коректності визначення параметрів фундаментальної діаграми ТП пропонуємо розрахувати значення за формулою (16).

На підставі розрахунків проведено ідентифікацію фундаментальної діаграми ТП, та отримано діапазон зміни інтенсивності ТП, що визначає сприятливі умови ДР та забезпечує пропускну спроможність ВДМ, який визначається як $N_{\min}^{-} \leq N_{\text{пот}} \leq N_{\min}^{+}$, а саме отримане значення припустимої інтенсивності складає (N_{ϵ}^{-}), що входить до діапазону зміни інтенсивності ТП та підлягає контролю на рівні прийняття рішень.

8.3. Розробка принципової схеми системи підтримки прийняття рішень

Інформаційне забезпечення роботи ОПР з великими обсягами інформації, котра надходить, за своєю основою містить процес створення систем підтримки прийняття рішень (СППР) або Decision Support System (DSS) [19], які здійснюють глибокий аналіз інформації, що надходить з перетворенням даних в необхідну форму для прийняття рішень. Відбувається перехід від інфологічного (переважно) до синтетичного використання даних. Для DSS характерно



застосування агрегованих даних і певних правил формування та формалізації рішень, що надаються особі, що приймає рішення (ОПР). Саме в такий спосіб функціонує СППР в СУДР.

Суттєвою особливістю, що відрізняє СППР від інших інформаційних систем є безпосереднє її використання на всіх стадіях процесу прийняття рішень, що полягає у визначенні проблеми; відборі необхідної для прийняття рішення інформації; формуванні та оцінці альтернативних рішень; виборі найбільш обґрунтованого рішення і поточного контролю. Тому, завдання СППР для СУДР полягає не тільки у виборі, систематизації та відборі необхідної для формування керуючого впливу інформації, але і в формуванні конкретної, наочної інформації, що до стану ДР на ВДМ.

Дорожній рух, як основа міської транспортної системи є складним процесом, а формалізація завдання управління ТП на ВДМ ще й ускладнена по ряду причин, серед яких слід виділити наступні:

- обурюючі дії не прогнозовані та не контрольовані (дорожньо-транспортні пригоди, технічні несправності тощо);
- присутність в процесі управління ТП людини (оператор СУДР або ОПР), що сприяє невизначеності, багатокрітеріальності та суб'єктивності оцінок;
- неможливістю отримання за допомогою існуючого математичного апарату аналітичного опису процесу формування всебічно обґрунтованого рішення.

На підставі проведеного аналізу задач, які вирішує ОПР у СУДР можливо відокремити наступні властивості формування структури СППР:

- по-перше, ОПР необхідно мати доступ до інформації, яка є оцінкою транспортних ситуацій, що виникають на ВДМ під час її функціонування. Також розроблені моделі, що надають формалізований опис ДР для вибору альтернативних шляхів їх вирішення та сприяють коректному вибору керуючих дій ОПР у вигляді заходів ОДР для тієї чи іншої ситуації за обраними критеріями;
- по-друге, здійснюючи параметрично-експертний вибір, ОПР повинна мати правила вибору чи діапазон зміни параметрів управління ДР, або методику



формування керуючого впливу у разі виникнення складних умов руху транспорту на ВДМ, що призводить до зміни режимів руху ТП на елементах ВДМ.

З урахуванням задач та функцій була розроблена принципова схема СППР для СУДР (рисунок 4). Якщо мета оперативного управління, що здійснюється на рівні прийняття рішень, міститься у формуванні керуючих впливів на ДР, які спрямовані на забезпечення працездатності ВДМ, то основа оперативного управління полягає у вимірі параметрів та їх оцінці на підставі розроблених моделей.

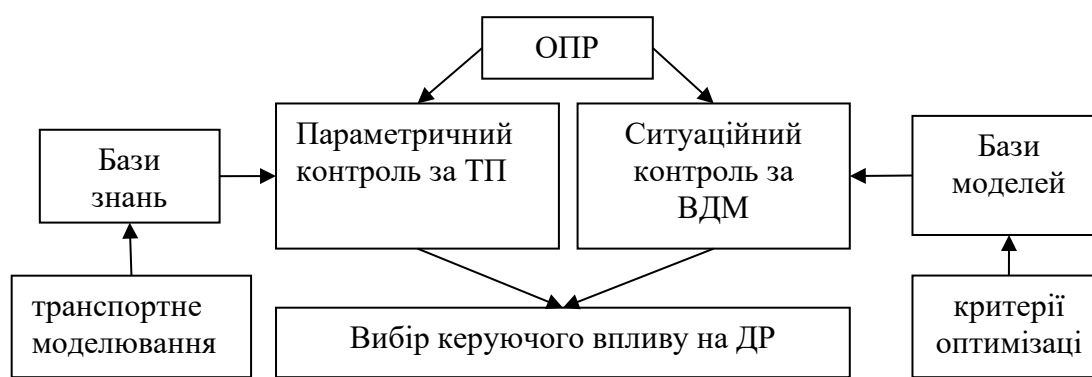


Рисунок 4 – Принципова схема СППР

Авторська розробка

Моделі для оперативного рівня у своїй спрямованості повинні надавати відповідну інформацію щодо виявлення «вузьких місць» ВДМ, які є причинами затору, визначення ділянки з наявним ризиком виникнення ДТП та формування дії ОПР згідно з технологією управління для зменшення напруги у транспортній мережі міста.

Основу дій ОПР формує СППР, що включає моделі об'єкта, бази знань, бази моделей та можливість в діалоговому режимі отримувати необхідну інформацію для оцінки існуючих альтернатив і вибору рішень. Такий підхід обумовлює наявність інтелектуальної складової в управлінні ДР та формує ознаки гібридної системи управління ДР [20].

Тоді на етапі формування СППР буде доцільно отримати кількісний



діапазон зміни інтенсивності ТП для кожного типу міських вулиць та доріг на підставі розробленого калібрування (опису) ділянок ВДМ, що надасть змогу ОПР при вимірі поточної інтенсивності у реальному часі дієвий інструмент оцінки поточної ситуації на ВДМ за коефіцієнтом завантаження дороги рухом. А у разі необхідності це можливо розглядати як первинну інформацію щодо зміни керуючих впливів на стратегічному рівні управління СУДР для забезпечення оптимальної пропускної спроможності та працездатності мережі.

Надалі це надасть ОПР можливість визначати працездатність режиму функціонування ВДМ при даній схемі управління ДР або приймати рішення щодо застосування іншого заходу ОДР для зміни параметрів об'єкту управління для забезпечення зручного та беззаторового стану ВДМ. Тому під зоною працездатності розуміємо параметри функціонування ВДМ при рівнях завантаження дороги рухом A , B , C (таблиця 1). Наявність режимів D , E та F призводить до зниження показників не тільки ефективності ДР, а транспортного процесу загалом. При цьому повинні бути створені умови, що забезпечують даний перехід. Для СУДР зазвичай прагнуть досягнення оптимального значення, як правило, декількох критеріїв, при яких виконується цілеспрямована зміна параметрів стану об'єкта управління, що залежить від конкретної ситуації на ВДМ в поточний момент часу. У запропонованій методиці ураховано, що на прийняття рішень впливає відмінність параметрів стану об'єкта управління від визначеної норми та ступінь інформованості ОПР щодо поточної інтенсивності ($N_{\text{пот}}$) ТП. Це впливає на вибір у процедурі прийняття рішень для визначення заходів, ресурсів і параметрів, які треба застосувати для досягнення $N_{\text{пот}}$ коли $N_{\text{min}}^- \leq N_{\text{в}}^- \leq N_{\text{min}}^+$ при формуванні керуючого впливу на ДР. При цьому, рішення задачі полягає у виборі послідовності дій ОПР для прийняття рішення по забезпеченню пропускної спроможності ВДМ, що сприяє підвищенню ефективності ДР.



8.4. Експериментальна розробка моделей калібрування перегонів моделі транспортної мережі міста

При дослідженнях формування системи підтримки прийняття рішень в інтелектуальних системах управління (ІСУ) була розроблена топологічна модель (ТМ) частини ВДМ. Але для рівня прийняття рішень необхідна інформація щодо зміни основних параметрів ТП на ВДМ. Поточні значення виміру параметрів повинні надходити від первинних вимірюючих пристроїв – детекторів транспорту, GPS, або з відео камер для формування баз даних. Тобто інформація моніторингу параметрів ТП полягає в основі процесу прийняття рішень для визначення керуючих впливів на дорожній рух. Але другу складову рівня прийняття рішень формують моделі взаємодії параметрів ТП, які містяться у базі моделей.

Із визначенням основних параметрів ТП у якості ваги ребра графа ТМ, було розроблено моделі калібрування для кожного перегону графа, що забезпечує оперативний рівень управління СУДР необхідною інформацією, не тільки для формування керуючих впливів, а й для визначення часу, коли потрібні зміни при управлінні ДР. Таким чином необхідна наявність поточної (реальної) інформації щодо параметрів ТП та визначення існуючих меж для їх зміни протягом часу, які можуть бути реалізовані на перегонах в залежності від їх топологічних параметрів та умов руху.

У подальших дослідженнях запропоновано розробку діаграми ТП для кожного типу міських вулиць на емпіричних даних ТП. У фаховій провідній літературі також визначається необхідність проведення аналізу вимірюваних даних та нормативних (або абстрактних) параметрів, які дозволяють визначити «вузькі місця» на ВДМ, наявність ділянок із підвищеною щільністю ТП для оцінки стану ДР у місті [21]. Наявність можливості на рівні прийняття рішень проведення порівняння модельних та реальних даних впливає на прогнозування місць виникнення транспортних заторів, або ділянок із підвищеним рівнем небезпеки. Такий підхід надає підґрунтя для визначення рівня завантаження



ділянки ВДМ та оцінки її працездатності при існуючих керуючих впливах на ДР, або необхідність зміни методу управління.

Для побудови діаграм ТП у вигляді трикутника було визначено відповідні параметри: максимальну щільність ТП на перегоні ($q_{\max}$); щільність, при якій утворюється затор ($q_{\text{зат}}$); критичну щільність, при якій ТП переходить до складних режимів руху ($q_{\text{кр}}$); реальну інтенсивність (N_p); максимальну інтенсивність ТП (модельну) за наявності існуючих дорожніх умов на перегоні ($N_{\max}$) та інтенсивність ТП, що призведе до заторового стану ($N_{\text{зат}}$) [18]. Необхідну нормативно-довідкову інформацію обрано за діючими нормативними документами міста.

Аналітичні залежності параметрів діаграми мають вигляд:

1. критична щільність ТП:

$$q_{\text{кр}} = \frac{N}{V}, \quad (17)$$

де N – інтенсивність ТП за натурними вимірами на перегоні, авт/год;

V – швидкість ТП в залежності від категорії вулиці ВДМ, км/год [15].

2. максимальну щільність ТП ($q_{\max}$) та заторову щільність ($q_{\text{зат}}$) визначаємо як максимальну кількість автотransпортних засобів (АТЗ), що можуть бути розташовані на перегоні ($l_{\text{пер}}$) із урахуванням середньої довжини АТЗ ($l_a = 5$ м) та дистанції безпеки ($2 \text{ м} < l_{\text{без}} < 4 \text{ м}$);

3. визначення $N_{\max}$ та $N_{\text{зат}}$ було проведено із урахуванням впливу швидкості «ударної хвилі» (c), яка формує ухил правої сторони діаграми, та залежить не тільки від поточної інтенсивності N , а і від різниці між $q_{\max}$ та $q_{\text{зат}}$, бо c знаходиться у прямій залежності від інтенсивності ТП та у зворотній до щільності ТП.

Об'єктом дослідження обрано ділянку транспортної мережі міста (рисунок 5). Розраховано параметри побудови діаграм ТП за перегонами ділянки ВДМ із визначенням реальної інтенсивності ТП ($\max N_p$, $\min N_p$). Швидкість руху (V) обрано у відповідності до категорії вулиці об'єкту дослідження.



Моделі калібрування у вигляді діаграм ТП для магістралей районного значення наведено на рисунку 6. Побудована модель свідчить, що реальна інтенсивність, навіть N_{min} , перевищує N_{max} за моделлю: $N_p < N_{max}$. Пояснити цей результат можливо наступним чином. Було розраховано модельні параметри за вимогами нормативних документів, а саме при дозволений швидкості руху $V=50$ км/год та за наявності двох смуг руху у кожному напрямку.

Але такі умови руху не відповідають реальним умовам руху, бо одна смуга постійно зайнята припаркованими АТЗ, що ускладнює режим пересування перегонном та зменшує швидкість руху ($V_p < 50$ км/год). Отримана модель свідчить про складні умови руху ($N_{зат} < N_p$), які не відповідають параметрам руху на магістралях районного значення та потребують керуючих впливів.

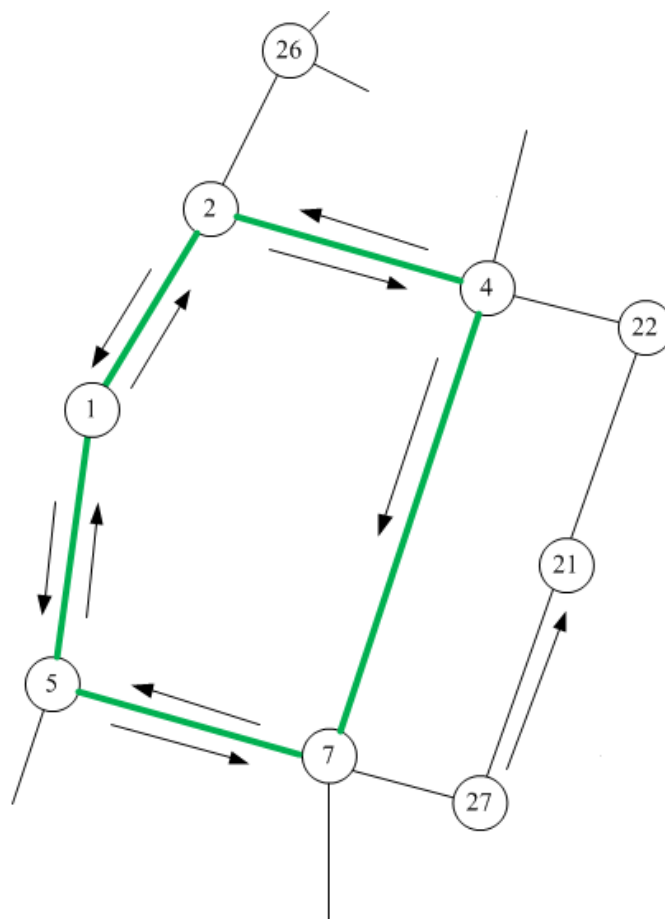


Рисунок 5 – Об'єкт дослідження

Авторська розробка

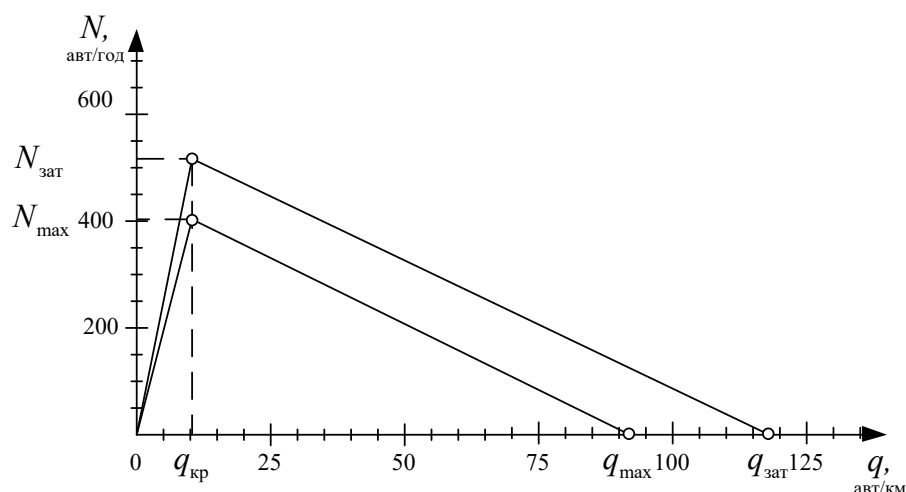
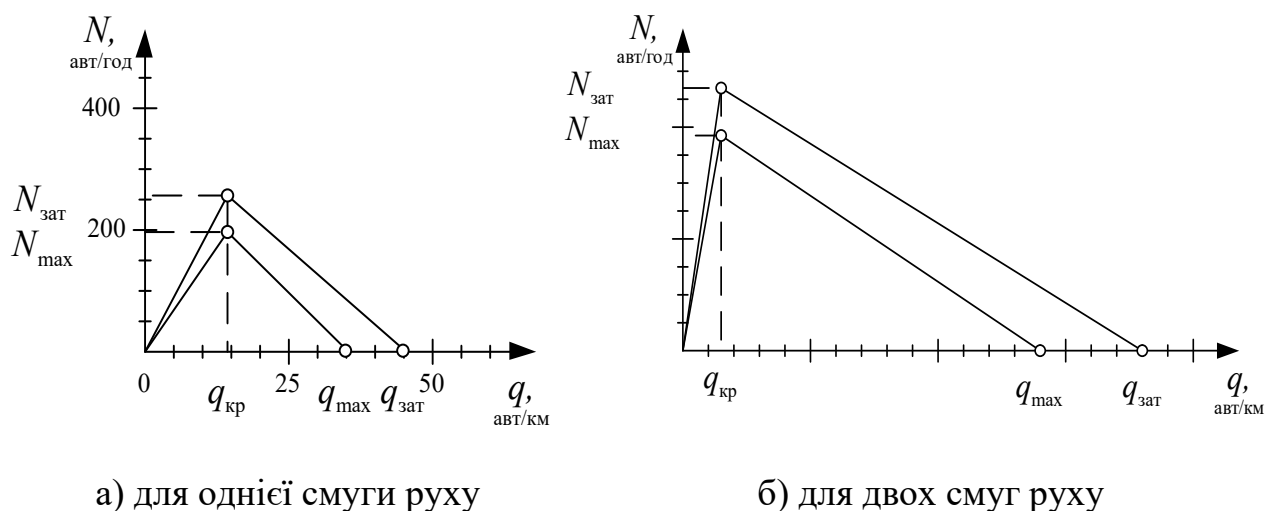


Рисунок 6 – Діаграма ТП для ділянки 2-1-5

Авторська розробка

Для моделі ТП на ділянці 2-4, яка належить до магістралі районного значення із двома смугами руху при дозволеній швидкості руху 50 км/год, було побудовано дві діаграми – для однієї смуги руху та для двох смуг руху (рисунок 7 а,б).



а) для однієї смуги руху

б) для двох смуг руху

Рисунок 7 – Діаграма ТП для ділянки 2-4

Авторська розробка

Такий підхід обумовлено також зайнятою смугою руху припаркованими АТЗ. Отриманий результат за діаграмою (рисунок 7 а) свідчить про наявність заторового режиму руху ($N_p \gg N_{зат}$) на ділянці. Реальна транспортна ситуація



підтверджує модельний експеримент. Діаграма руху ТП (рисунок 7 б) на двох смугах перегону доводить, що $N_{\max} < N_p < N_{\text{зат}}$. Саме такий діапазон зміни інтенсивності ТП необхідно утримувати засобами управління для попередження заторового стану ВДМ.

На ділянці 4-7, яка належить до вулиці місцевого значення, організовано однобічний рух транспорту при наявності двох смуг руху. Але для проїзду існує лише одні смуга, на якій швидкість руху є мінімальною $V_p < 20$ км/год. Тому постійний стан руху – заторовий, або має місце рух у щільному потоці. саме ці умови руху ТП пояснює діаграма ТП (рисунок 8), на якій визначені модельні параметри ($N_{\text{зат}} < N_p$).

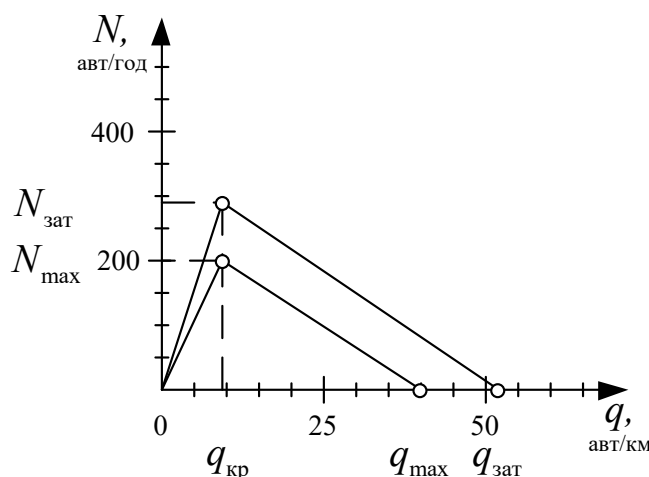
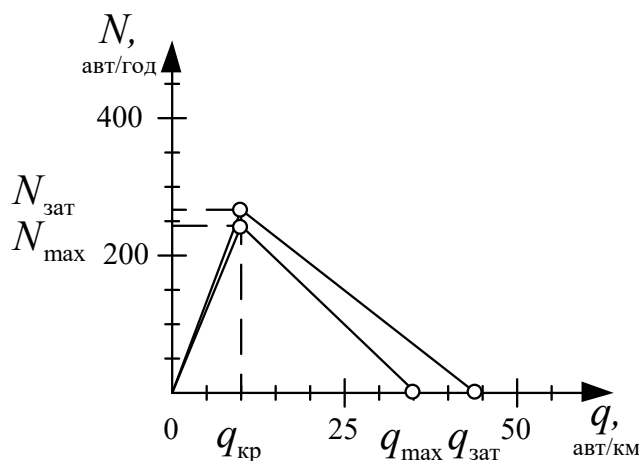


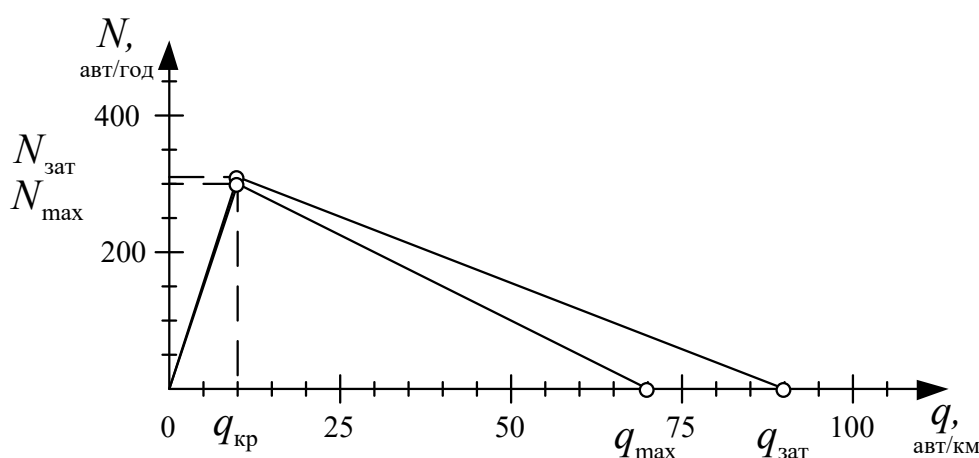
Рисунок 8 – Діаграма ТП для ділянки 4-7

Авторська розробка

На підставі отриманих результатів на рівні прийняття рішень можливо обрати керуючі дії для перегону 4-7 з метою підвищення пропускної спроможності. Ділянка 5-7 належить до вулиці місцевого значення із проектувальними нормами на дві смуги руху. Побудова діаграми ТП (рисунок 9) пояснює складні умови руху по одній смузі протягом доби. Навіть наявність двох смуг руху не впливає на покращення умов ДР на ділянці – $N_p \gg N_{\text{зат}}$. Отриманий результат доводить, що означена вулиця міста потребує або реконструкції, або розробки дієвих методів управління ДР.



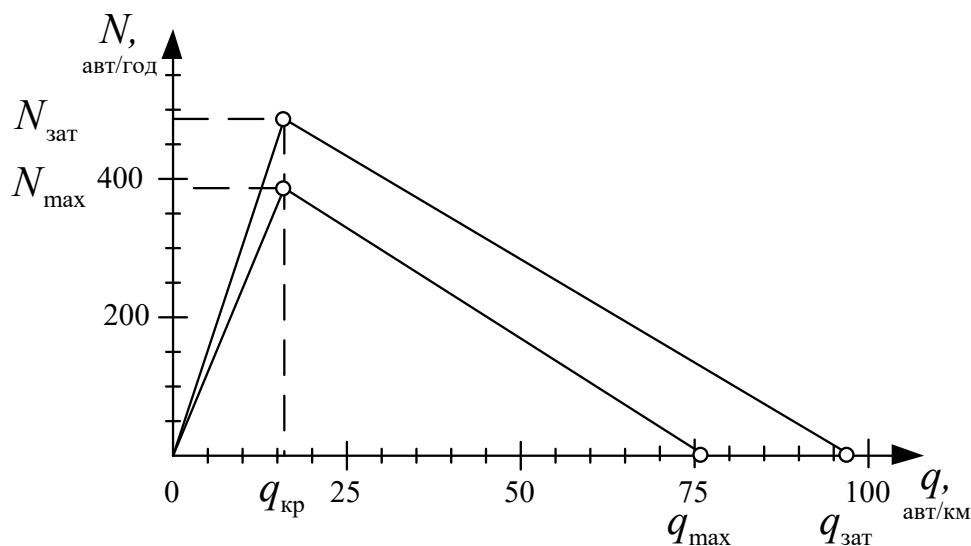
а) для однієї смуги руху



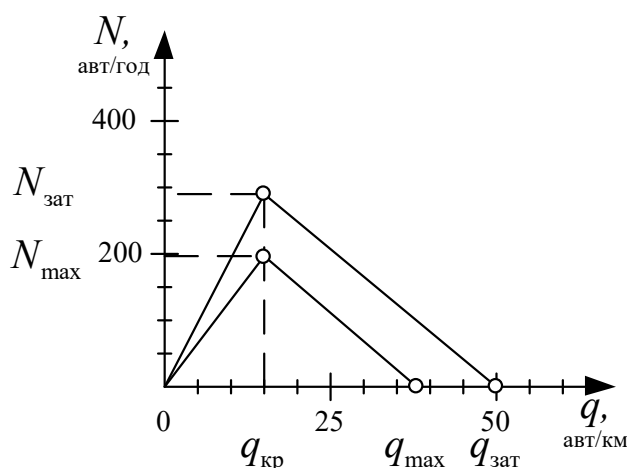
б) для двох смуг руху

Рисунок 9 – Діаграма ТП для ділянки 5-7*Авторська розробка*

Також було досліджено ділянку 27-21-22, яка складається із двох перегонів різної довжини та характеризується інтенсивністю ТП, що перевищує нормативні параметри – $N_p = 640$ авт/год (рисунок 10). Отримані результати моделювання для калібрування ТМ свідчать щодо наявності складних режимів руху на ділянках ВДМ. Визначена на перегонах поточна інтенсивність ТП у часи «пік» має більше значення N_{max} , отримане за моделлю, що відповідає реальній ситуації на вулицях міста.



а) для ділянки 27-21



б) для ділянки 21-22

Рисунок 10 – Діаграма ТП для ділянки 27-21-22

Авторська розробка

Такий підхід надає не тільки наочну інформацію стану ДР у місті, а й відокремлює ділянки ускладненого руху. Тому для ОПР запропоноване рішення підвищує швидкодію при виборі керуючого впливу (при наявності інформації щодо поточного виміру інтенсивності ТП) та надає підґрунтя для оперативного рівня щодо вибору методу управління ДР.

Таким чином, в ході експерименту було побудовано діаграми ТП для ділянок магістрального значення та вулиць міського значення – для двох та



однієї смуги руху, коли права смуга протягом дня зайнята під паркування АТЗ. При порівнянні отриманих результатів, можливо стверджувати, що необхідно ліквідувати тимчасовий паркінг для покращення умов ДР та запобігання заторів на дорозі, що впливає на підвищення пропускної спроможності ВДМ.

Висновки

У цій главі було розроблено та обґрунтовано методологічний підхід до управління дорожнім рухом (ДР) у міських умовах. Ключовим елементом аналізу є фундаментальна діаграма транспортного потоку, яка дозволяє чітко визначити взаємозв'язок між такими основними параметрами, як інтенсивність, швидкість та щільність руху. Ця діаграма є інструментом для оцінки ефективності транспортної мережі та визначення рівнів завантаженості ВДМ.

Запропоновані моделі класифікують режими руху на вільний, синхронізований і стислий, що дає можливість більш точно оцінити поведінку транспортних потоків у різних умовах. Моделі типу LWR дозволяють описати вплив інтенсивності на пропускну спроможність дороги, тоді як моделі класу General Motors (ДМ) враховують невизначеність параметрів руху у зонах критичної щільності, дозволяючи прогнозувати виникнення заторових ситуацій.

Особливу увагу приділено розробці СППР для СУДР. СППР забезпечує аналіз транспортної ситуації у реальному часі, виявляючи потенційні «вузькі місця» мережі та пропонуючи ефективні заходи щодо запобігання заторам. Система враховує поточну інтенсивність ТП, відхилення від нормативних значень і дає змогу оперативно коригувати швидкісні режими, координувати роботу світлофорів та регулювати потоки транспортних засобів на проблемних ділянках.

Побудовані діаграми для різних типів вулиць та доріг виявили значне відхилення фактичних параметрів від нормативних показників, особливо в умовах обмеженого простору через паркування транспортних засобів на смугах



руху. Це свідчить про необхідність коригування існуючих підходів до організації дорожнього руху, включаючи обмеження на паркування в критичних зонах.

Завдяки впровадженню діаграм транспортного потоку вдалося визначити області невизначеності та встановити критичні межі для параметрів ТП. Це дозволяє не лише оперативно реагувати на зміни ситуації на дорогах, а й прогнозувати розвиток подій для попередження заторів. Визначені межі щільності та інтенсивності допомагають ефективно управляти потоками на стратегічному рівні, забезпечуючи стабільну роботу ВДМ.

Таким чином, результати дослідження підтверджують дієвість запропонованого підходу до моделювання і управління дорожнім рухом. Запропонована методика є інструментом для формування керуючих впливів, що спрямовані на покращення пропускної спроможності доріг, зменшення заторів і підвищення екологічної безпеки транспортної мережі міста.