

1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ОРГАНІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

1.1 Розвиток автомобільного транспорту

Поява вантажного автотранспорту в великій кількості призвело до суперечливих результатів. З одного боку автомобільний транспорт, забезпечив небувалу гнучкість і швидкість транспортного обслуговування населення, доставку вантажів «від дверей до дверей». У будь-якій країні розвиток автомобільного транспорту підштовхувало розвиток практично всіх галузей економіки. Крім того, і сам транспорт став однією з провідних галузей. На сьогоднішній день функціонування вантажних перевезень немислимо без автомобільного транспорту, він грає роль свого роду кровоносної системи в організмі країни. У міжміських і міжнародних сполученнях автомобільний транспорт має вагому складову. На зорі автомобілізації вантажний автомобіль давав неймовірну свободу маршрутів перевезень, і значне підвищення ефектиності перевезень за рахунок скорочення часу на доставку. Міжміський вантажний автомобіль пов'язував роз'єднані раніше території і викликав розширення міст, дозволяючи швидко доставляти з передмість до міста. З іншого боку, крім каталітичного ефекту на економіку та підвищення мобільності перевезень автомобілізація несе з собою і негативні наслідки, пов'язані з високою аварійністю і смертністю в результаті ДТП, величезної кількості шкідливих викидів в атмосферу, шумового забруднення, і втрат часу внаслідок перевантаження ВДМ. Останній фактор обумовлений тим, що для функціонування автомобільного транспорту необхідна відповідна інфраструктура, розвиток якої вимагає набагато більших ресурсів, ніж виробництво вантажних автомобілів. Тому кількість доріг і рівень їх пропускної здатності не встигає за темпами зростання вантажного автомобільного парку. Особливо гостро ця проблема стоїть в містах, де можливості розвитку транспортної інфраструктури сильно обмежені. Через перевантаження ВДМ міст виникають транспортні затори,

які паралізують рух на значних територіях. Затори не тільки звели нанівець основна перевага вантажного автомобіля - його високу мобільність, а й привели до неефективності системи автомобільних перевезень як такої [1,2]. В таких умовах можна говорити про те, що автомобіль став виконувати функції протилежні початковим, замість підвищення швидкості доставки вантажів він ускладнює рух по ВДМ і перешкоджає економічному розвитку автопідприємства.

Фахівці з США виділяють 7 базових причин виникнення заторів, які можуть поєднуватися один з одним в різних комбінаціях [3].

Ці 7 причин можна розділити на 3 групи:

1) Зовнішні причини

- Дорожні пригоди (ДТП, поломка),
- Проведення дорожніх робіт, - погодні умови,

2) Рівень транспортного попиту

- Щоденні коливання в рівні інтенсивності руху,
- Коливання, пов'язані з проведенням різного роду заходів,

3) Фізичні параметри доріг

- Технічні засоби організації руху,
- Зміни в пропускній здатності (звуження доріг).

Також в [3] відзначається, що зазначені причини мають деяку взаємозалежність, наприклад, погана погода може викликати ДТП, що виникають затори можуть викликати поломку автомобіля через перегрів, регулярні затори можуть стати причиною зміни попиту на вантажні перевезення автотранспортом і.т.д.

На рис. 1.1 представлена схема, яка відображає взаємозв'язок зазначених причин утворення заторів.

Рисунок 1.1. Схема взаємодії причин утворення заторів

Таким чином, впливаючи на одну з причин можна знизити негативний вплив інших. За результатами багаторічних досліджень зарубіжні фахівці прийшли до висновку, що основною причиною виникнення заторів завжди є високе завантаження. Вплив виникнення подій, погодних умов, дорожніх робіт може бути нівельовано запасом пропускної здатності. Тому основний напрямок боротьби з заторами має бути зосереджена на регулюванні співвідношення попиту на доставки і пропозиції у вигляді дорожньої інфраструктури з метою підтримки її завантаження на допустимому рівні. Оскільки стримування навантаження вимагає серйозних заходів і вкрай утруднено, виникає необхідність опрацювання дій оперативного характеру для найкращого використання наявної інфраструктури і зниження впливу інших факторів. До таких дій належить все, що стосується управління транспортними потоками, а також заходи щодо якнайшвидшої ліквідації наслідків ДТП, грамотна організація дорожніх робіт, попередження обмерзання і своєчасне інформування про погодні умови.

За різними оцінками наслідки від заторів для українських міст складають від 3 до 6% їх ВРП. Ця величина складається з багатьох складових, це і втрати часу працездатним населенням, втрати бізнесу від несвоєчасної доставки вантажів, прискорений знос ТЗ, підвищена витрата ПММ і так далі, аж до погіршення стану здоров'я водіїв і пасажирів. Встановлено, що вираженість психовегетативних порушень у водіїв знаходиться в прямій залежності від тривалості перебування в транспортних заторах [4].

На сьогоднішній день не існує загальноприйнятої методики оцінки наслідків заторів, але не виникає сумнівів в тому, що ці наслідки завдають відчутної шкоди у всіх сферах функціонування міст. Найбільш повний перелік рекомендацій по оцінці наслідків від заторів наведено в [5], а в [6] присутній більш докладний опис розрахунків окремих складових.

Крім заторів на ВДМ зі збільшенням парку вантажних автомобілів виникає проблема їх тимчасового зберігання та паркування. Ця проблема

яскраво проявляється в центральних частинах великих міст, коли через відсутність паркувальних місць до 25% від спостережуваних транспортних потоків можуть привертати автомобілі намагаються знайти місце для парковки.

Зазначені фактори складають класичний набір наслідків масової автомобілізації. Крім них, в останні десятиліття все частіше звучить ще один приклад негативних наслідків автомобілізації. Це той факт, що некерована автомобілізація в кінцевому підсумку призводить до втрати містами своїх якостей, повсюдне використання автомобіля в межах міста робить негативний вплив і на конфігурацію міст, стиль життя і соціальні відносини. Подібне сталося з багатьма містами США, особливо тими, які бурхливо росли в 1970-1980 роках. Як за зовнішнім виглядом, так і в соціальному плані такі міста є тип населених місць, що різко відрізняється від міст, де можливо пряме людська взаємодія і активне громадське життя. У таких містах сформувалися розвинені мережі фрівеєв і магістральних вулиць з розташованими вздовж них комерційними підприємствами, а також великі передмістя. Політика реконструкції міст під потреби приватних легкових автомобілів і вантажних перевізників не змогла досягти своєї основної мети: заторів не зменшилося. Побудувавши сотні миль фрівеєв і гігантські паркувальні споруди, які домінують не тільки в приміських ландшафтах, але і в міських центрах, ці агломерації страждають від заторів не менше, ніж міста з куди більш скромними дорожніми мережами [1].

1.2 Аналіз транспортних потоків як об'єкта управління

З позицій класичних систем управління дорожнім рухом (світлофорне регулювання, АСКДР) транспортний потік розглядається як основний об'єкт управління. Його характеристики (інтенсивність, швидкість, склад) приймаються як вихідні дані для проектування. У ролі об'єкта управління транспортний потік має такі властивості як: - нестационарність;

- Стохастичність;

- Статистична стійкість;
- Неповна керованість;
- Взаємопов'язаність.

Керуючі впливи на потік можуть оцінюватися на основі різних моделей описують його поведінку, від найпростіших гідродинамічних аналогій до мікромоделей, що відтворюють поведінку окремих водіїв. Однак, транспортний потік на тій чи іншій ділянці ВДМ не чисто фізичне явище, а результат соціально-економічних взаємодій в суспільстві. Кожен водій кожного ТЗ має конкретну мету здійснення ним доставки вантажу. Залежно від задач кожна поїздка має свій рівень необхідності, і кожен користувач транспортної системи може вибирати варіанти дій в таких аспектах процесу здійснення доставки вантажу:

- Робити або не робити доставку;
- Вид транспорту для здійснення доставки;
- Час початку доставки;
- Маршрут руху.

Крім варіантів дій безпосередньо перед і в процесі здійснення доставки, користувач транспортної системи може вибирати пункти відправлення / призначення, тобто місце розташування, місце роботи, місця для ремонту, відпочинку і т.д. Таким чином, управління транспортною системою в загальному, і транспортними потоками зокрема має відбуватися з урахуванням цих соціально-економічних чинників.

Одним з перших факторів викликав інтерес у фахівців з транспорту був вибір маршруту руху, оскільки ВДМ міста, як правило, надає кілька можливих варіантів маршруту для здійснення поїздки. Коли мережа вільна маршрутом з мінімальними витратами, як правило, є найкоротший по відстані маршрут. У процесі завантаження ВДМ транспортними потоками час руху з того чи іншого маршруту збільшується. У транспортному моделюванні це збільшення описується функцією відбиває зміна затримки при проїзді ділянки мережі від інтенсивності руху по ньому, яка в

англомовній літературі зазвичай називається volume-delay function (VDF). Таким чином, поїздка кожного нового вантажного автомобіля викликає збільшення затримки для всіх автомобілів, що використовують той же маршрут в той же час, особливо сильно це проявляється при наближенні рівня завантаження до пропускної спроможності ділянок цього маршруту.

У 1952 р Джон Уордроп (John Wardrop) сформулював для принципу розподілу потоків на мережі [20]:

- Рівноважний розподіл, при якому час руху для кожної поїздки на всіх маршрутах однаково і ніхто з учасників руху не може зменшити час своєї поїздки, переключившись на інший маршрут (User Equilibrium).

- Розподіл, при якому сумарний час руху всіх транспортних засобів на мережі мінімально (System Optimum).

Однак, ще раніше, в 1950 р подібне явище було сформульовано Джоном Нешем в рамках теорії ігор [21]. Апарат теорії ігор в подальшому отримав широке поширення в транспортній науці за кордоном [22, 23], а також в дослідженнях вітчизняних авторів, наприклад для аналізу систем міського пасажирського транспорту [24]. У термінах теорії ігор взаємодія агентів (учасників гри) в Відповідно до першого принципу Уордропа називається некооперативного грою. Взаємодія з другим принципом відповідно кооперативної, коли гравці діють спільно для максимізації виграшу (в разі транспорту мінімізації затримок). Взаємодія агентів при наявності деякого керуючого органу описується грою Штакельберга (Stackelberg game). У такій грі керуючий орган виступає в ролі лідера і має можливість впливати на інших гравців для досягнення своєї мети, а гравці вже підлаштовуються під ці дії відповідно до своїх цілей. Тобто ця гра описує взаємодію, умовно кажучи, дорожньої адміністрації і простих учасників дорожнього руху. Дорожня адміністрація прагне мінімізувати сумарні затримки на ВДМ за допомогою методів організації дорожнього руху, а водії прагнуть мінімізувати власний час поїздки, змінюючи свою поведінку під впливом застосовуваних заходів. Також існує модифікація гри Штакельберга (inverse

Stackelberg game), в якій лідер анонсує то, як він буде реагувати на дії інших гравців, і, знаючи їх реакцію, може оптимізувати свої дії. Випадок, при якому досягається системний оптимум, називається монопольним грою. У даній грі описується ситуація коли дорожня адміністрація має можливість наказувати поведінку учасників руху і розподіляє потоки відповідно до другого принципом Уордропа.

У реальному транспортної мережі більш-менш великого міста при відсутності систем управління розподілом потоків ситуація являє собою стохастичне рівноважний розподіл. Водії вибирають маршрут руху виходячи з досвіду попередніх поїздок або по найкоротшій відстані. В таких умовах можливості транспортної мережі використовуються недостатньо ефективно, водії просто не знають який маршрут в даний момент забезпечить найкоротший термін руху і вибирають маршрути покладаючись на досвід. Досвід поїздок по одному і тому ж маршруту в різні дні може показувати істотна відмінність в часі поїздки. Таким чином, водії змушені вибирати час початку поїздки орієнтуючись на максимальний час поїздки, щоб не запізнитися в пункт призначення. Очевидно, що для підвищення ефективності використання ВДМ необхідно направляти водіїв в об'їзд заторів по альтернативних маршрутах, підвищуючи рівномірність їх завантаження. З цією метою стали з'являтися різні системи інформування водіїв про ситуацію на дорозі від повідомлень по радіо до рекомендації найкоротшого по часу маршруту в персональному навігаційному пристрої. Одним з варіантів донесення інформації до водіїв є динамічні інформаційні табло (ДІТ). Визначення оптимальних місць установки ДІТ і алгоритмам управління ними присвячені багато робіт як зарубіжних [25,26], так і вітчизняних дослідників [27,28]. Установка ДІТ на ключових розвилках маршрутів безсумнівно дасть позитивний ефект. Однак, очевидно, що в рамках великого міста неможливо забезпечити рівномірне завантаження альтернативних маршрути для більшості кореспонденцій тільки за допомогою ДІТ. Це зажадає установки табло практично на кожному перехресті, і відповідно колосальних витрат.

Більш доцільним видається засновувати систему інформування на індивідуальних пристроях за типом навігатора. Питання відмінностей в економічній ефективності даних варіантів вимагає додаткового опрацювання, але можна однозначно сказати, що варіант з індивідуальними пристроями дозволить організувати систему управління набагато більш гнучко. Проте, навіть за умови досягнення повної інформованості учасників руху про час руху з того чи іншого маршруту транспортні потоки прагнуть до рівноважного розподілу за першим принципом Уордропа. Однак, як відомо, може існувати розподіл, що забезпечує менші загальні затримки на ВДМ, тобто системно оптимальне згідно з другим принципом Уордропа. Дослідженням можливостей впровадження системно-оптимального управління рухом транспортних потоків присвячені багато робіт, в основному зарубіжних авторів, більш детально описані в 2 чолі. Основною перешкодою для впровадження цього принципу управління є те, що оптимальні маршрути запропоновані системою управління можуть не збігатися з уявленнями водіїв про найкоротших маршрутах. Відповідно деякі з них не дотримуватимуться рекомендацій, що знижує ефект від такого розподілу. Таким чином, властивості транспортного потоку як об'єкта управління, такі як нестаціонарність, стохастичність і статистична стійкість багато в чому формуються соціально-економічними факторами, і при необхідності можуть бути схильні до коригування.

1.3 Перспективні способи організації транспортних систем міст

Сучасні тенденції розвитку транспортних систем, а точніше підходів до транспортного обслуговування населення, в містах розвинених країн показують, що замість набору альтернатив у вигляді систем різних видів транспорту з їх параметрами (інтервалами, швидкістю, вартістю і т.д.), на перше місце виходить поняття мультимодальної мобільності у вигляді єдиного сервісу, який передбачає планування і здійснення поїздки в режимі «онлайн» з урахуванням всіх можливих альтернатив, включаючи такі як кар-

шерінг, кар-пулінг, велопрокат і т.д. [29,30]. Це викликано високим рівнем поточних потреб в переміщеннях і прогнозом їх подальшого зростання до 3 разів до 2050 р. [31]. При цьому доступність транспорту повинна бути забезпечена для всіх категорій населення [32].

Класичний підхід до управління дорожнім рухом, коли «при управлінні рухом транспортних потоків ми зобов'язані виходити з того, що інформація про справжні наміри водіїв відсутній, що установка на автомобілях нових електронних технічних коштів не передбачається і що всі керуючі пристрої встановлюються тільки на дорожньої мережі» [33], на якому базується більшість сучасних систем управління дорожнім рухом, очевидно, застарів. Крім того, управління дорожнім рухом в класичному розумінні має справу з наслідками з соціально-економічних взаємодій індивідуумів виражаються у вигляді потоків автомобілів між різними пунктами. При цьому рух кожного автомобіля по ВДМ визначається особливостями особистості його водія, що вносить значну частку стохастичності як в процес формування транспортного потоку, так і в його внутрішні процеси (обгони, перестроювання, дистанція між автомобілями і т.д.), що істотно ускладнює можливості управління в рамках класичного підходу.

Також світове співтовариство прийшло до розуміння того, що «століття неконтрольованого доступу до високо завантажених міських дорогах підійшов до кінця» [19]. Практично всі розробляються стратегії розвитку транспортних систем міст передбачають наявність систем справляння плати, величина якої залежить від рівня завантаження мережі. Ця особливість обумовлена базовими економічними законами, які забезпечують баланс всередині соціально-економічних систем, але до сих пір майже не застосовуються у сфері міських транспортних систем [34]. При цьому існує справедлива критика вирішення проблеми шляхом справляння плати в пікові періоди, заснована на тому, що доступ до доріг у зручний час отримуватимуть більш забезпечені верстви населення [35]. Як будь-яка

проблема, яка зачіпає практично все населення міст, введення плати за користування транспортною інфраструктурою навіть в години пік, завжди буде мати як чимало прихильників, так і чимало супротивників. Однак, більшість фахівців все-таки прийшли до єдиної думки, що без заходів з управління попитом транспортна система великого міста не може бути стабільною і надійною. Як і в будь-якій іншій ситуації, де мають місце обмежені суспільні блага і перевищення попиту над пропозицією погіршує умови для всіх споживачів (наприклад, доступ на пляж, виставку, будь-які масові видовищні заходи і т.д.), в якості альтернативи фінансовим заходам з управління попитом виступають заходи адміністративного та фізичного стримування.

У сучасному розумінні управління доступом (access management) - процес забезпечення доступу до земельних ділянок за умови збереження якісних умов руху транспортних потоків: пропускну здатності, безпеки і швидкості руху. Управління доступом в такому розумінні ґрунтується на суворій ієрархії вулиць і доріг, що не дозволяє стрибкоподібного зростання потоків на магістралях за рахунок прямого доступу від об'єктів генерації потоків. Включає в себе: контроль за розміщенням перетинів і місцевих проїздів з метою забезпечення пропускну здатності і безпеки руху; регулювання зв'язку громадських вулиць і приватних місцевих проїздів з вулицями, дорогами і швидкісними магістральними дорогами [36]. Таким чином, такий підхід також спрямований на транспортний потік в цілому, що накладає ряд обмежень, пов'язаних зі згаданими властивостями транспортного потоку.

З розширенням можливостей сучасних інформаційних і комунікаційних технологій, заходи управління доступом мають значний потенціал розвитку, дозволяючи перейти до регулювання доступу на рівні окремого користувача.

Крім того, світові тенденції показують прагнення до автоматизації процесів схильних до впливу людського фактора практично у всіх сферах

діяльності, не виняток і автомобільний транспорт. У сучасних автомобілях з'являється все більше систем спрощують водіння. Сюди відносяться як давно відомі системи активної безпеки (антиблокувальна, курсової стійкості і т.д.), так і нові розробки прагнуть дозволити автомобілю пересуватися в автоматичному режимі без участі водія. На автомобілі серійного виробництва вже встановлюються системи автоматичного гальмування при виявленні перешкоди, автоматичного підрулення при необхідності вписатися в поворот, системи адаптивного круїз-контролю, що забезпечують рух в колоні і ін. Вже проводяться випробування повністю автоматичних автомобілів, здатних пересуватися по міській ВДМ в загальному потоці. Також в розвинених країнах спостерігаються тенденції відмови від володіння автомобілем і користування прокатними транспортними засобами, це дозволяє вирішити проблему нестачі паркувальних місць і використовувати автомобіль тільки тоді, коли він необхідний. Це зменшує необхідність в транспорті загального користування та призводить до так званої системи персонального транспорту. Більшість проектів по системам персонального транспорту припускали створення спеціальної інфраструктури (направляючих рейок), що було основним недоліком цих систем изза необхідності високих капіталовкладень, проте при автоматизації управління автомобілем така необхідність відпадає і можна використовувати наявну ВДМ. Якщо керування транспортним засобом автоматизується, то вибір маршруту руху такого автомобіля по мережі тим більше повинен бути автоматизований, і повинен виконуватися центром управління з метою мінімізації сумарних затримок.

Таким чином, ідеальною моделлю транспортної системи майбутнього є повністю автоматична система, що забезпечує переміщення людей в спеціальних транспортних засобах різної місткості без необхідності створення виділеної інфраструктури. З сучасної точки зору можна виділити ряд недоліків такої системи:

- Повна автоматизація переміщення вантажу пред'являє високі вимоги

до надійності системи, тому що збої в роботі або хакерські атаки можуть привести до катастрофічних наслідків;

- Міська система персонального транспорту з загальними транспортними засобами не знімає необхідність володіння транспортом для доставки за межі міста;

- Система позбавляє людину задоволення від водіння автомобіля і можливості самовираження через автомобіль.

Можливо, в майбутньому проблема надійності і безпеки подібної автоматизованої транспортної системи буде знята за рахунок розвитку інформаційних технологій, але поки вона залишається істотним обмеженням для впровадження таких систем. Подолати зазначені недоліки дозволить проміжний варіант, при якому керування автомобілем частково залишається під контролем водія. При цьому транспортний засіб для пересування в системі продовжує бути звичайним автомобілем, або у власності, або взятим на прокат. Автоматизованим повинен стати вибір маршруту, який розраховується в центрі управління відповідно до мінімізацією затримок. Однак, це не усуне можливість утворення заторів, оскільки в розпорядженні водія залишається такий фактор, як час початку поїздки. Вибираючи одне й те саме час поїздки, водії скупчуються на «вузьких» ділянках ВДМ, ускладнюючи рух один одному. Як згадувалося вище, дорожній рух відноситься до систем, продуктивність яких погіршується при перевищенні попиту над пропозицією, т. Е. Утворення затору знижує пропускну спроможність ділянки ВДМ в порівнянні з рівномірним рухом потоку через ту саму ділянку. Це підтверджує найпростіший експеримент проведений в програмному комплексі імітаційного моделювання AIMSUN. Розглянуто ділянку дороги, на якому відбувається звуження проїзної частини з двох до однієї смуги, через дану ділянку проходять 500 автомобілів. При вільному доступі перед звуженням утворюється затор і загальний час проїзду становить 16 хв 3 сек, а якщо регулювати інтенсивність потоку на рівні пропускну здатності однієї смуги, не допускаючи утворення затору, ті ж

автомобілі проїжджають за 14 хв 33 сек. [37].

Таким чином, стримування потоків для підтримки рівномірного руху дасть вигоду всім учасникам руху. Перші спроби застосування цього ефекту здійснювалися в США, де в 1966 р був впроваджений перший дослідний зразок системи регулюючої в'їзд на автомагістраль [38]. В англійській літературі принцип регулювання в'їзду на магістраль називається *ramp metering*. Надалі цей принцип набув широкого поширення [39,40,41]. У вітчизняній практиці теж пророблялися питання застосування цього принципу управління, наприклад В.В. Сильянова [42]. У відділі безпеки руху та зимового утримання доріг ГіпродорНІІ під керівництвом А.П. Васильєва і М.С. Фрімштейна була розроблена перша в Україні система автоматичного регулювання руху на автомобільних магістралях (АРДАМ) [43]. Ця велика і важлива тема зажадала розробки теорії автоматизованого управління дорожнім рухом, апаратури для постійного спостереження за ним. Перший в СРСР проект системи «АРДАМ» був розроблений для автомагістралі Москва - Рига. З цією метою були створені і випробувані спеціальні пересувні лабораторії для оцінки стану доріг та метеоумов, розроблений проект забезпечення зв'язку, створена апаратура для збору і передачі інформації та інше обладнання і прилади [44], однак, система не отримала широкого впровадження на практиці.

Таким чином, можна сказати, що метод *ramp metering* реалізує локальне управління часом початку поїздки в масштабі одного або групи в'їздів на автомагістраль. Базовою ідеєю даної роботи є дослідження можливості масштабування цього принципу на ВДМ будь-якого розміру. Сама ідея такого масштабу зображення не є новою, раніше вже робилися спроби поширення принципу стримування на великі ділянки міської транспортної мережі за допомогою настройки світлофорного регулювання, що обмежує потоки на вході в певну зону. Посилання на такі роботи можна знайти вже в огляді стратегій управління дорожнім рухом початку 90-х рр. минулого століття [45]. Там же відзначаються і недоліки такого підходу:

- Погіршення умов руху навколо контрольованої зони;
- Необхідність мати світлофори на всіх можливих маршрутах;
- Провокування водіїв на порушення ПДР;
- В затори на підходах до контрольованій зоні можуть потрапляти водії не планують в'їжджати в цю зону;

- Оскільки, як правило, дана міра застосовується для регулювання доступу до центральної частини міста в ранковий пік, в період вечірнього піку вона втрачає сенс.

Таким чином, щоб розробити систему управління дорожнім рухом, яка позбавлена зазначених недоліків необхідно наказувати водіям час початку руху до виїзду на ВДМ, що дозволить запобігти утворенню заторів, а також наказувати маршрут руху для оптимального використання ресурсів ВДМ. Розглядаючи такі заходи як спрямовану дію з метою зниження затримок за рахунок підтримки транспортного потоку в певному стані, можна сказати, що має місце управління формуванням транспортних потоків. При реалізації у вигляді єдиної системи управління таке рішення дозволить замість реальних заторів на ВДМ формувати віртуальні черги, час очікування в яких буде істотно менше втраченого в заторах. Також такий підхід дозволить виключити чинник соціальної напруженості властивий застосування систем заснованих на стягування плати в пікові періоди.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ

2.1. Розгляд транспортної системи

Оскільки система наземного транспорту в містах належить до класу складних систем, зважаючи на наявність у складі системи людей, які керують транспортними засобами і що впливають на процес формування транспортних потоків, закономірним вибором з можливих підходів до її дослідження є системний аналіз. Центральною проблемою системного аналізу є проблема прийняття рішення. Що стосується завданням дослідження, проектування та управління складними системами проблема прийняття рішення пов'язана з вибором певної альтернативи в умовах різного роду невизначеності. Невизначеність обумовлена мноюкритеріальністю завдань оптимізації, невизначеністю цілей розвитку систем, неоднозначністю сценаріїв розвитку системи, недостатністю апріорної інформації про систему, впливом випадкових факторів в ході динамічного розвитку системи та іншими умовами. З огляду на дані обставини, системний аналіз можна визначити як дисципліну, що займається проблемами прийняття рішень в умовах, коли вибір альтернативи вимагає аналізу складної інформації різної фізичної природи [46].

Традиційний підхід до управління дорожнім рухом заснований на поданні керованої системи у вигляді сукупності наступних елементів:

- Транспортної мережі зі своєю топологією, як правило, представленої у вигляді графа, ребра якого мають характеристики у вигляді пропускну здатності, швидкості і т.д .;
- Схеми організації дорожнього руху у вигляді обмежень і правил;
- Набору елементів, що управляють із змінними параметрами (Світлофори, керовані знаки);

- Транспортного навантаження у вигляді значень інтенсивності транспортного потоку або у вигляді матриці кореспонденцій.

В даному випадку завдання управління зводиться до відшукування таких параметрів керуючих елементів, при яких критерій якості роботи системи, як правило рівень затримок, буде мінімальним. При вичерпанні можливостей оптимізації параметрів роботи керуючих елементів і схеми організації руху, залишається тільки два шляхи вирішення проблеми, або нарощування щільності, зв'язності транспортної мережі та пропускної здатності її елементів, або зниження навантаження на наявну. Останнє в зарубіжній літературі отримало назву «управління попитом» (demand management). В рамках традиційного підходу цей напрямок вже не можна віднести до системи управління транспортними потоками, воно є вищою системою і регулює загальний обсяг попиту на пересування за наявною мережі.

З позицій системного аналізу управління транспортними потоками може бути розглянуто в більш широкому контексті. Навантаження на транспортну мережу розглядається вже не як кількість автомобілів, що пересуваються з однієї точки в іншу, а як поїздка певного індивідуума, що має певну мету і свої характеристики. Таке уявлення навантаження дає можливість враховувати в системі управління нові параметри, пов'язані з вибором виду транспорту, часу здійснення поїздки. Як зазначено в попередньому розділі, індивідуум при здійсненні поїздки володіє наступними ступенями свободи:

- Вибір здійснювати поїздку чи ні,
- Вибір пункту призначення поїздки (для культурно-побутових і рекреаційних поїздок),
- Вибір виду транспорту або їх комбінацій,
- Вибір часу здійснення поїздки,
- Вибір маршруту руху (при виборі особистого автомобіля).

Така різноманітність альтернатив вносить значну частку невизначеності в процес формування транспортних потоків і суттєво

ускладнює процес прийняття рішень про застосування того чи іншого керуючого впливу. З точки зору традиційного підходу серед перерахованого цілеспрямованого управління піддається тільки вибір маршруту руху на особистому автомобілі, і то не в повній мірі, а лише за допомогою інформування про дорожню ситуацію і рекомендації маршрутів. Крім цілеспрямованого управління система робить непрямий вплив на всі інші варіанти вибору за допомогою зворотного зв'язку, коли індивідууми співвідносять свої переваги з ситуацією в системі.

Існують методи впливу на переваги індивідуумів економічними заходами, що дозволяють досягти бажаного розподілу рішень із зазначених варіантів вибору. Ці заходи полягають у вирівнюванні узагальненої вартості поїздок, наприклад, між особистим і суспільним транспортом, або вартості поїздок в різний час доби. Реалізуються вони за допомогою податків, зборів, мит (податок на транспортні засоби, податок на паливо, плата за паркування, плата за в'їзд на певні магістралі і території), або навпаки дотацій для зниження вартості проїзду в громадському транспорті. Перераховані заходи відносяться до категорії управління попитом.

Таким чином, з позицій системного аналізу, центральна ідея даної роботи полягає в розширенні кордонів розгляду системи управління транспортними потоками, обліку взаємозв'язків із зовнішніми системами і включенні в контур управління одного з пунктів категорії управління попитом - розподілу поїздок в часі, а також в підвищенні ступеня контролю за розподілом потоків по маршрутами руху до рівня жорсткого регулювання, що зменшує рівень невизначеності при прийнятті управлінських рішень.

2.2. Оцінка впливу розповсюдження потоків на ефективність функціонування міжміських вантажних перевезень

Приклад з [37] показує різницю в часі проїзду автомобілів через ділянку звуження при неконтрольованому доступі і при упорядкуванні доступу дозволяє провести аналогію між відмінністю двох типів розподілу

потоків по маршрутам і розподілом потоку в часі. Тобто, як у випадку відсутності контролю над розподілом потоків існує деяка «ціна анархії», так і в разі розподілу потоку в часі існує щось подібне. Дане явище описав Вільям Вікрам - основоположник ідеї реалізації оптимального розподілу потоків за допомогою введення плати за проїзд по певних ділянках [63]. Він розглядав одиночне звуження (bottleneck) по якому рухається певне число автомобілів, які прагнуть приїхати в пункт призначення в один і той же час t^* . Пропускна здатність ділянки не дозволяє проїхати всім в один час і відповідно утворюється затор. Як і в реальній ситуації деякі водія виїжджають раніше і прибувають в пункт призначення до необхідного часу, ті хто виїжджають пізніше спізнюються, і лише невелика частина водіїв приїжджає точно в термін, відчуваючи при цьому максимальні затримки через затор. Таким чином, в системі встановлюється рівновага коли витрати на вчинення поїздки сумарно з витратами внаслідок раннього прибуття або запізнення для всіх водіїв однакові і ніхто не може їх зменшити змінивши час виїзду, при цьому час раннього прибуття має меншу питому вартість, ніж час запізнення (рисунок 2.1).

Рисунок 2.1 Вартість відхилення від часу точного прибуття

C - вартість відхилення від часу точного прибуття t^* , β і γ - питомі вартості раннього прибуття і запізнення відповідно

У такій ситуації, подібно розподілу за маршрутами відповідно до першого принципу Уордропа, водії діють самостійно, прагнучи мінімізувати загальний час своєї поїздки. При цьому можливий і інший варіант розподілу, коли водії «домовляються» між собою для досягнення мінімуму тривалості поїздки, для чого необхідно не допускати утворення затору. В такому випадку хтось добровільно приїжджатиме дуже рано, хтось пізно, а деяка частина точно вчасно, при цьому вона буде більше ніж в разі відсутності

домовленості. Важко собі уявити, щоб в реальному житті мала місце така «домовленість» між водіями. Тоді, як і запропонував У. Вікрам, виникає думка врівноважити загальні вартості поїздок водіїв з допомогу введення додаткової плати: чим ближче час прибуття до бажаного тим вища плата. У такому випадку досягається найбільша вигода: і дорога експлуатується максимально ефективно, і держава отримує додатковий прибуток [64]. Ідея введення мит для отримання оптимального розподілу потоків не припиняла опрацьовуватися і висвітлюватися в літературі протягом усього періоду з моменту її появи, але в останні роки отримала новий розвиток у зв'язку з удосконаленням систем електронної оплати [65], також з огляду на різні додаткові фактори. Наприклад, деякі автори розглядають визначення оптимальних мит з урахуванням просторової топології мережі [66], або з урахуванням руху транспорту загального користування [67]. Можна сказати, що на сьогоднішній день даний напрямок розвитку систем управління дорожнім рухом є одним з домінуючих.

Таким чином, контроль над розподілом по маршрутам і за часом початку поїздки дозволить забезпечити значне підвищення ефективності міжміських вантажних перевезень.

За аналогією з «коефіцієнтом Браесса», для різниці між часом поїздки при неконтрольованому і контрольованому доступі, було б корисно провести дослідження умов її виникнення і залежно від рівня навантаження. Для стислості назвемо цю різницю «коефіцієнт Вікрам». Очевидно, що шукане явище буде виникати при високій щільності транспортних потоків, коли значення функції VDF починає різко зростати. Характеристики цього явища, в свою чергу, повинні визначатися формою математичного опису функції VDF. Однак всі розглянуті функції VDF ґрунтуються на рівні завантаження, тобто щодо поточного навантаження до пропускної спроможності, яка вважається постійною. Результат отримується при використанні VDF - це або час руху через ділянку мережі одного автомобіля або його середня швидкість. При цьому, функції VDF не дають можливості визначити скільки

автомобілів фактично проїхало через ділянку, тобто не описують явище зниження пропускної здатності при переході транспортного потоку з вільного в заторова стан, що є ключовим моментом в наявності ефекту від стримування потоків. Таким чином, аналіз ефективності стримування потоку і визначення величини «коефіцієнта Вікрам» на основі існуючих функцій VDF дасть обмежений результат прямо залежить від поведінки конкретної функції після рівня навантаження 1. Крім того, функція VDF тільки побічно враховує затримки на регульованих перехрестях, а також не враховує вплив завантаженості інших ділянок.

Первісною роллю функцій VDF була приблизна оцінка часу поїздки з того чи іншого маршруту, що було досить для цілей транспортного планування. Більш точний опис процесу руху автомобілів по ділянці дороги і ВДМ слід шукати в теорії транспортних потоків. Класична теорія транспортних потоків, що бере свій початок з роботи Гріншільдса в 1935 р, також не дає задовільного опису явища зниження пропускної здатності при переході транспортного потоку з вільного в заторова стан. Багато дослідників, аналізуючи емпіричні дані про рух потоків, робили спроби описати їх в рамках класичної теорії. В Україні наука про транспортні потоки в значній мірі представлена роботами В.Ф. Бабкова, А.П. Буслаєва, В.В. Зирянова І.А. Лубашевський, В.Н. Луканіна, В.В. Сильянова, В.І. Швецова, М.В. Яшиній, і ін. Так, для класифікації автотранспортних потоків В.Ф. Бабков в 1970-х роках [68] ввів поняття вільного, частково-пов'язаного, пов'язаного і насиченого потоків. Ця класифікація також ґрунтувалася на аналізі відповідних фрагментів фундаментальної (основний) діаграми. Труднощі в описі фазових переходів в рамках класичної теорії транспортних потоків привели до появи ряду альтернативних теорій. В роботі [69] описується використання стохастичного підходу до опису транспортного потоку з елементами моделі перколяційного типу. Однак результати експериментів на основі запропонованої клітинної моделі показали, що швидкості потоків монотонно зменшуються при збільшенні сумарної

щільності, що не відображаючи явище зниження пропускної здатності, хоча воно згадується в тексті.

Серед альтернативних теорій найбільш відомою і часто згадується в літературі є 3-х фазна теорія транспортного потоку, яку запропонував в кінці 90-х рр. Борис Кернер - радянський вчений емігрував до Німеччини в 1992 р. Теорія трьох фаз фокусується головним чином на фізиці щільного транспортного потоку на швидкісних автомагістралях. І описує три фази транспортного потоку: вільний потік F , синхронізований потік S і широкий рухомий кластер (затор) J , в той час як класичні теорії, що базуються на фундаментальній діаграмі транспортного потоку, розглядають дві фази: вільний потік і так званий щільний потік [70]. У російськомовній літературі дана теорія досить докладно описана в навчальному посібнику під редакцією А. В. Гаснікова [71], яке, по видимому, представляє найбільш повний огляд сучасного стану теорії транспортних потоків серед вітчизняних видань. Таким чином, теорія трьох фаз Б. Кернера на сьогоднішній день найбільш адекватно описує процеси фазових переходів в транспортному потоці. Також вона не тільки підтверджує наявність, а й пояснює причини ефекту зниження пропускної здатності при переході потоку з вільного в заторова стан. Не вдаючись в подробиці теорії, відзначимо, що при утворенні затору, або в термінах теорії «широкого рухомого кластера», пропускна здатність дороги може приймати значення між q_{th} і q_{out} (рисунок 2.2), які в будь-якому випадку менше вихідної пропускної здатності в умовах вільного потоку q_{max} .

Феномен зниження пропускної здатності в стані затору згадується у вітчизняній літературі, наприклад при вивченні руху потоків в Лефортовський тунелі [72], однак не вдалося виявити проведених досліджень саме на цю тему. У зарубіжних же джерелах цього явища приділяється набагато більше уваги. Спочатку зусилля дослідників були спрямовані на оцінку зниження пропускної здатності на швидкісних магістралях, наприклад [73]. За даними різних авторів величина зниження пропускної здатності магістралі при утворенні затору може досягати від 5 до 25%, але більшість

дослідників сходяться на значенні 9-10%. Слід зазначити, що це збігається з результатами пробного експерименту на імітаційній моделі, описаного в 1 главі (що дозволяє говорити про високу адекватності використовуваного програмного комплексу). Практичним результатом досліджень зниження пропускної здатності є впровадження згаданих в 1 главі систем контролю доступу на магістралі (ramp metering), що показують високу ефективність.

Рисунок 2.2 Три фази транспортного потоку в координатах потік-щільність

Пізніші дослідження зарубіжних авторів спрямовані на вивчення ефекту зниження пропускної здатності на мережі магістралей і на вулично-дорожньої мережі [74]. Однак, як і раніше не існує єдиної думки щодо поняття «пропускна здатність мережі», що в своїх дослідженнях зазначає і А.Ю. Михайлов [75,76]. При цьому, незважаючи на розбіжності у визначенні поняття пропускної здатності мережі, факт її зниження при перевантаженні підтверджується численними дослідженнями. В рамках даної роботи під пропускною спроможністю мережі будемо розуміти максимальну кількість кореспонденцій, які може обслужити мережу при відомих пропускних спроможностях ділянок і заданої гіпотези зміни матриці кореспонденції згідно з визначенням А.Ю. Михайлова. Для аналізу роботи ВДМ дослідники ввели поняття узагальненої фундаментальної діаграми в цілому по всій мережі, вперше це поняття з'явилося в кінці 60-х рр. 20-го століття [77]. Результати недавніх досліджень доводять, що фундаментальна діаграма для мережі існує. Проводилися як теоретичні дослідження, що визначають параметри фундаментальної діаграми для абстрактної гомогенної мережі, що показують, що вона залежить від топології мережі, параметрів ОДР і не залежить від патернів завантаження [78], так і дослідження емпіричних даних, що говорять, що продуктивність реальної мережі істотно залежить від

характеру навантаження [79,80]. Наприклад, в [81] проводиться аналіз поведінки ТП на моделі великої ділянки ВДМ центральній частині Чикаго, і відзначається, що в реальності пропускна здатність мережі виявляється істотно менше теоретичної. Серед зарубіжних дослідників в цій галузі варто виділити Карлоса Даганзо і Хані Махмасані. Питанню зниження пропускної здатності мережі при перевантаженні і мережевий фундаментальної діаграмі за останні роки присвячено багато з робіт даних авторів і їх послідовників. Короткий огляд цих робіт можна знайти в [79,81]. Серед вітчизняних фахівців дослідження мережевої фундаментальної діаграмі проводив В.В. Зирянов для ділянки ВДМ центральній частині Ростова-на-Дону [82], результати досліджень підтвердили існування такої залежності.

Таким чином, на основі аналізу закономірностей поведінки щільних потоків на ВДМ, можна зробити висновок, що можливий вплив розподілу потоків по часу початку поїздки буде істотно залежати від безлічі локальних факторів, властивих кожному конкретному випадку. До таких факторів належать: топологія мережі, параметри регулювання, шаблон навантаження, особливості поведінки водіїв, наявність і розташування різних перешкод і т.д. Розробка підходів до опису та моделювання поведінки потоків в мережах дозволяють більш детально оцінити ефективність ВДМ є актуальним завданням і потребує більш глибоких дослідженнях. Однак якщо для ВДМ в цілому можна застосувати поняття фундаментальної діаграми, то і застосовне поняття VDF, тобто функції зміни загальної затримки в мережі в залежності від зростання її завантаженості. Очевидно, що така залежність буде відрізнятися для кожного поєднання зазначених чинників, проте для цілей цієї роботи є достатнім вказати на її існування.

2.3. Математична модель оцінки ефективності управління транспортним потоком

Розглянемо більш докладно приклад який приводить У.Вікрі, в якому певна кількість автомобілів прагне прибути в пункт призначення в певний

час. В цьому випадку система, як зазначалося раніше, буде прагнути до рівноважного стану, коли час раннього прибуття або запізнення в сумі з часом в дорозі будуть однакові для кожного водія. Незважаючи на те, що в реальній ситуації міського руху не всім потрібно потрапити в один час в одне місце і для кожного існує своя оцінка вартості раннього прибуття і запізнення, даним прикладом все ж можна описати ранкову годину пік, коли значна маса автомобілів переміщається від спальних до ділових районів. Будемо вважати, що обсяг навантаження день у день постійний і система також прагне до рівноваги. На рисунку 2.3 проілюстровано зміну різних параметрів в ході процесу завантаження умовного ділянки ВДМ імітує навантаження ранкової години «пік». Графік а являє зміна попиту на поїздки з даного ділянки. Значення навантаження x_{max} відповідає рівню завантаження рівному 1, тобто навантаження дорівнює пропускну спроможності ділянки. Слід зазначити, що в застосовуваній тут термінології рівень навантаження відповідає рівню попиту, тобто числу ТС бажаючих проїхати по ділянці, а рівень завантаження - відношення інтенсивності до пропускну спроможності. Моменти часу t_1 і t_2 показують коли рівень попиту почав перевищувати пропускну здатність і коли закінчив відповідно.

Графік б показує рівень рівноважної вартості поїздки C_p і зміна в співвідношенні витрат на рух по ділянці і витрат пов'язаних з раннім прибуттям або запізненням в місце призначення. З графіка зміни вартості поїздки видно як змінюється структура вартості поїздки залежно від часу виїзду. На початку водій вільно пересувається по мережі і досягає пункту призначення набагато раніше необхідного часу, потім зі збільшенням навантаження збільшується і час руху, і нарешті з'являється момент часу $t_{точ}$, виїхавши в який водій прибуде в пункт призначення точно вчасно, однак зазнавши при цьому максимальну затримку в процесі руху.

Далі потік знижується разом з часткою затримки при русі, але збільшується вартість часу запізнення. У якийсь момент виїхав останнім водій знову проїде по вільній мережі, значно запізнившись до бажаного часу,

при цьому вартість цього запізнення для нього буде дорівнює затримок в русі, які він би випробував виїхавши в тточ.

Значення вартості $C_{св}$ відображає час поїздки по ділянці в вільних умовах. Графік в відображає залежність часу прибуття від часу відправлення. При русі в умовах низького завантаження цей графік мав би лінійний вид. Графік z показує зміну ефективності роботи даної ділянки з урахуванням явища зниження пропускної здатності при виникненні затору. Затор виникає в момент часу t_1 коли навантаження на ділянку перевищує пропускну здатність. Коли навантаження стає знову рівній пропускної здатності в момент t_2 , ефективність роботи ділянки продовжує перебувати на зниженому рівні до певного моменту t_3 , коли накопичилися черзі роз'їжджаються.

Рисунок 2.3 Зміна параметрів в ході процесу завантаження ділянки шляху при відсутності контролю над формуванням транспортних потоків

Розглянемо тепер той же приклад, але з директивним формуванням потоку. Завдання формування потоку полягає в тому, щоб не допустити утворення затору і зниження пропускної спроможності та ефективності роботи мережі. На рисунку 2.4 зображені ті ж графіки, але з урахуванням підтримки потоку на рівні пропускної здатності. Шаблон зміни навантаження (графік а) не змінився. На графіку б в структурі витрат на поїздку з'являється вартість часу примусового очікування. Це час показує наскільки повинні бути затримані автомобілі бажуючі виїхати на ділянку після моменту часу t_1 . Для кожного наступного автомобіля час затримки буде збільшуватися до моменту t_2 (на графіках ці моменти не збігаються, тому що графік б також показує частку витрат від часу запізнення). Завдяки підтримці потоку на рівні максимальної ефективності витрати на безпосередньо рух по ділянці залишаються постійними. Оскільки потік підтримується в такому стані

протягом усього розглянутого періоду, істотно знижуються загальні витрати на вчинення поїздок, на графіку цю різницю показують значення $C_{до}$ и $C_{після}$.

Це ж показує графік в, де крива залежності часу прибуття від часу відправлення зміщується вправо в діапазоні максимального навантаження, це означає, що час $t_{точ}$ стає ближче до бажаного часу прибуття, тобто скорочується рівноважний час руху по ділянці. Графік з відповідно показує, що потік підтримується на рівні максимальної ефективності, час $t_q = 0$ відповідає моменту коли віртуальна черга із затриманих автомобілів зникає.

Очевидно, що в реальному житті люди мотивовані на вибір часу виїзду не тільки витратами безпосередньо часу. Ті, хто виїжджають і прибувають раніше, очевидно не сидять під дверима, а можуть почати займатися чимось для них корисним, в свою чергу ті, хто виїжджають пізніше і спізнюються мотивовані, наприклад, бажанням подовше поспати, зробити ранкову пробіжку, встигнути вигуляти собаку і т.д. І лише ті, для кого запізнення більш критично, і хто не може або не хоче починати роботу раніше змушені прагнути точно до потрібного часу і більше всіх страждають від зниження пропускної здатності в заторі.

Рисунок 2.4 Зміна параметрів в ході процесу завантаження ділянки шляху при наявності контролю над формуванням транспортних потоків

Таким чином, виходячи з проведених аналогій в описі функціонування окремої ділянки і мережі в цілому за допомогою узагальненої діаграми і мережевий VDF в загальному вигляді одержувану вигоду від управління часом початку поїздок можна описати таким чином:

де Δw - різниця між затримкою при русі без стримування і зі стримуванням потоків, $w_{\text{общ}}$ - затримка при русі без стримування, $w_{\text{дв}}$ - затримка руху при стримуванні, обумовлена щільністю транспортного потоку, $w_{\text{сд}}$ - затримка від безпосередньо стримування, $f(x)$ - функція зміни затримки від інтенсивності руху, $x(t)$ - крива зміни попиту на поїздки по ділянці, $x_{\text{опт}}$ - рівень завантаження, при якому ефективність роботи ВДМ максимальна, $t_{\text{опт}}$ - час руху по ділянці при завантаженні $x_{\text{опт}}$, $h_{\text{опт}}$ - часовий інтервал між автомобілями при рівні завантаження $x_{\text{опт}}$, t_1 - час початку перевищення рівня попиту над пропускною спроможністю ВДМ, t_2 - час закінчення перевищення попиту над пропускною здатністю, $t_q = 0$ - час коли черга затриманих ТЗ зникає.