

«Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
(повне найменування вищого навчального закладу)  
Факультет інженерії машин, споруд та технологій  
(назва факультету)  
Автомобілів  
(повна назва кафедри)

## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

**магістр**

(освітній рівень)

на тему: Підвищення ефективності використання вулично-дорожньої мережі міста на основі керування транспортними потоками (на прикладі міста Львів)

Виконав: студент 6 курсу, групи МНм-61  
спеціальності 275 «Транспортні технології»  
(шифр і назва спеціальності)

Студент

(підпис)

Храпко О.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Дзюра В.О.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Цьонь О.П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Зав. каф.

(підпис)

Ляшук О.Л.

(прізвище та ініціали)

м. Тернопіль – 2021

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інженерії машин, споруд та технологій

Кафедра Автомобілів

Освітній рівень магістр

Напрямок підготовки \_\_\_\_\_

(шифр і назва)

Спеціальність 275.03 Транспортні технології (на автомобільному транспорті)

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри О.Л. Ляшук

«06» вересня 2021 р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

*Храпку Олександрю Сергійовичу*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення ефективності використання вулично-дорожньої мережі міста на основі керування транспортними потоками (на прикладі міста Львів)

керівник проекту (роботи) \_\_\_\_\_

Дзюра Володимир Олексійович, к.т.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «06» вересня 2021 року № 4/7-742

2. Термін подання студентом проекту (роботи) \_\_\_\_\_

грудня 2020 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) \_\_\_\_\_

Характеристики регульованих перехресть ВДМ міста Львова; Кількість транспортних засобів, що Перетинають перехрестя в години «пік».

3. Проектно-рекомендаційний розділ; 4 Охорона праці і безпека в надзвичайних ситуаціях

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Теоретичний розділ. 2. Аналітико-дослідницький розділ;

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Схема взаємодії причин утворення заторів; Перелік заходів по боротьбі з заторами – 3 слайди;

Схема взаємодії керуючого суб'єкта з користувачем в процесі формування транспортного потоку при традиційній схемі управління – 2 слайди; Зміна параметрів в ході процесу завантаження ділянки ВДМ при відсутності контролю над формуванням транспортних потоків – 2 слайди;

Структурна схема системи керування формуванням транспортних потоків;

Структурна схема системи керування формуванням транспортних потоків.



## ЗМІСТ

<b>РЕФЕРАТ</b>	6
<b>ВСТУП</b>	7
<b>1. ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ</b>	
1.1. Розвиток автомобільного транспорту та пов'язаних з цим проблем	10
1.2. Розвиток методів організації руху і боротьби з заторами	14
1.3. Аналіз транспортного потоку як об'єкта управління	22
1.4. Перспективні способи організації транспортних систем міст	25
1.5. Висновки та постановка задач на кваліфікаційну роботу магістра	29
<b>2. АНАЛІТИКО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ</b>	
2.1. Розгляд транспортної системи з позицій системного аналізу	30
2.2. Підходи до оцінки впливу розподілу потоків за часом поїздки на ефективність функціонування ВДМ	33
2.3. Опис математичної моделі оцінки ефекту від управління формуванням транспортного потоку	36
2.4. Підходи до підвищення ефективності роботи ВДМ	41
<b>3. ПРОЕКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ</b>	
3.1. Розробка структурної схеми системи керування формуванням транспортних потоків	42
3.2. Модель для використання в системі керування	44
3.3. Оцінка цільової функції	45
3.4. Блок-схема алгоритму роботи системи керування формуванням транспортних потоків	49
3.5. Реалізація основного алгоритму роботи системи управління формуванням транспортних потоків в AIMSUN	50

<b>4. ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ</b>	
4.1 Освітлення автомобільних доріг	58
4.2 Захист цивільного населення	63
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ</b>	66
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ</b>	67

## РЕФЕРАТ

до кваліфікаційної роботи магістра на тему:

«Підвищення ефективності використання вулично-дорожньої мережі міста на основі керування транспортними потоками (на прикладі міста Львів)»

Кваліфікаційна робота складається із чотирьох розділів розрахунково-пояснювальної записки формату А4 і 10 слайдів графічного матеріалу.

Кваліфікаційна робота присвячена визначенню показників ефективності використання вулично-дорожньої мережі міста на основі керування транспортними потоками.

В теоретичному розділі здійснено аналіз розвитку автомобільного транспорту та пов'язаних з цим проблем та методів організації руху і боротьби з заторами, а також аналіз транспортного потоку як об'єкта управління.

В аналітико-дослідницькому розділі розглянуто транспортну систему з позицій системного аналізу, при цьому використавши підходи до оцінки впливу розподілу потоків за часом поїздки на ефективність функціонування ВДМ. Проведено опис математичної моделі оцінки ефекту від управління формуванням транспортного потоку використавши підходи до підвищення ефективності роботи ВДМ.

В проектно-рекомендаційному розділі розроблено структурну схему системи керування формуванням транспортних потоків. Розроблено модель для використання в системі керування з оцінкою цільової функції. Розроблено блок-схему алгоритму роботи системи керування формуванням транспортних потоків. Здійснено реалізацію основного алгоритму роботи системи управління формуванням транспортних потоків в середовищі AIMSUN.

Розглянуті також питання з охорони праці і безпеки в надзвичайних ситуаціях.

**Ключові слова:** перехрестя, оцінка, якість, показники, моделювання, критерії, транспортні засоби, організація дорожнього руху, розмітка.

## ВСТУП

Сучасний рівень транспортного навантаження на вулично-дорожню мережу (ВДМ) великих міст в даний час

викликає ряд проблем пов'язаних з невідповідністю кількості транспорту, що виїжджає на ВДМ можливостям самої ВДМ. Основною проблемою є зниження швидкостей руху по ділянках ВДМ до значень, при яких функціонування наземного транспорту стає вкрай неефективним. Різниця між часом руху в вільних умовах і в години «пік» може становити 6-8 разів і більше. Крім втрат часу такий режим руху викликає значне збільшення обсягу шкідливих викидів.

Крім того, слід враховувати рівень стресу, спитиваемий водіями в таких умовах руху. При цьому рівень автомобілізації населення російських міст продовжує рости. Спостерігається тенденція розростання годин пік і підвищення інтенсивності руху в міжпіковий період. Такі умови переміщення по ВДМ починають впливати на темпи загальноекономічного розвитку міста та якість життя в ньому. Втрати від транспортних заторів для великих міст за різними оцінками становлять близько 3-4% ВВП.

Західні країни зіткнулися з подібними проблемами 30-40 років тому.

На початку основним напрямком вирішення даних проблем було екстенсивний розвиток ВДМ, будівництво нових доріг і розв'язок. Потім стало розвиватися напрямок підвищення ефективності використання наявної ВДМ за допомогою різних методів організації та управління дорожнім рухом. Однак подібні заходи по поліпшенню умов руху викликали все більший приплив нових поїздок, що в підсумку знову призводило до виникнення заторів.

Таким чином, як би не була розвинена і опрацьована система управління транспортними потоками, вона є всього лише інструментом підвищення пропускної здатності наявної ВДМ за допомогою якісного управління. Це підвищення має певну межу, і при навантаженні перевищує цю межу затори все одно виникнуть. Більшість фахівців все-таки прийшли до єдиної думки, що без

заходів з управління попитом транспортна система великого міста не може бути стабільною і надійною. Комплексний підхід до управління транспортною системою міста неминуче вимагає заходів по обмеженню числа поїздок на особистому транспорті та перерозподіл їх на транспорт загального користування та інші альтернативи. В першу чергу це економічні заходи, підвищення різних податків, стягування плати за проїзд по магістралях, платна парковка і т.д., які викликають закономірне невдоволення у автомобілістів. На противагу економічним можна виділити заходи фізичного стримування, такий принцип широко застосовується на великих магістралях, де доступ до них безкоштовний, але регулюється, не допускаючи перевантажень. Також подібні заходи застосовуються в масштабах мережі, стримуючи потоки на кордонах деякої проблемної зони за допомогою світлофорів.

Такі рішення, однак, не ліквідують затори, а переміщують їх в більш «зручні» місця. Ефективність таких заходів зі стримування потоків обумовлена зниженням пропускної здатності дороги при розсмоктуванні затору в разі окремої магістралі, і можливістю виникнення мережевого затору (перевищення довжиною черги довжини перегону) у разі мережі в цілому. Дослідження в області підвищення ефективності роботи ВДМ мають високу актуальність, особливо за допомогою методів управління попитом.

Розглядаючи заходи по обмеженню в'їзду як спрямовану дію з метою зниження затримок за рахунок підтримки транспортного потоку в певному стані, можна сказати, що має місце управління формуванням транспортних потоків. Ефективність таких заходів на мережевому рівні вивчена мало, і вимагає проведення спеціальних досліджень.

При здійсненні поїздки індивідуум 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.

При рівні попиту перевищує можливості транспортної мережі, свобода вибору маршруту і часу початку руху неминуче приводить до утворення транспортних заторів і істотного зниження ефективності використання наявної ВДМ.

# 1. ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1. Розвиток автомобільного транспорту та пов'язаних з цим проблем

Поява автомобіля в масовій доступності призвело до суперечливих результатів. З одного боку автомобільний транспорт, особливо в особистому користуванні, забезпечив небувалу гнучкість і швидкість транспортного обслуговування населення, доставки 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 міст немислимо без автомобільного транспорту, він грає роль свого роду кровоносної системи в організмі міста. У міжміських і міжнародних сполученнях автомобільний транспорт також має вагому складову.

На зорі автомобілізації особистий автомобіль для окремої людини давав неймовірну свободу пересувань, і значне підвищення якості життя за рахунок скорочення часу на поїздки. Автомобіль пов'язував роз'єднані раніше території і викликав розширення міст, дозволяючи швидко добиратися з передмість в центр.

З іншого боку, крім каталітичного ефекту на економіку та підвищення мобільності населення 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 автомобілів. Тому кількість доріг і рівень їх пропускної здатності не встигає за темпами зростання 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 автомобіля - його високу мобільність, але і 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 і мобільності населення він ускладнює рух по ВДМ і перешкоджає економічному розвитку.

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 пропускну 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 поїздки і.т.д.

На малюнку 1.1 представлена схема відображає взаємозв'язок зазначених причин утворення заторів.

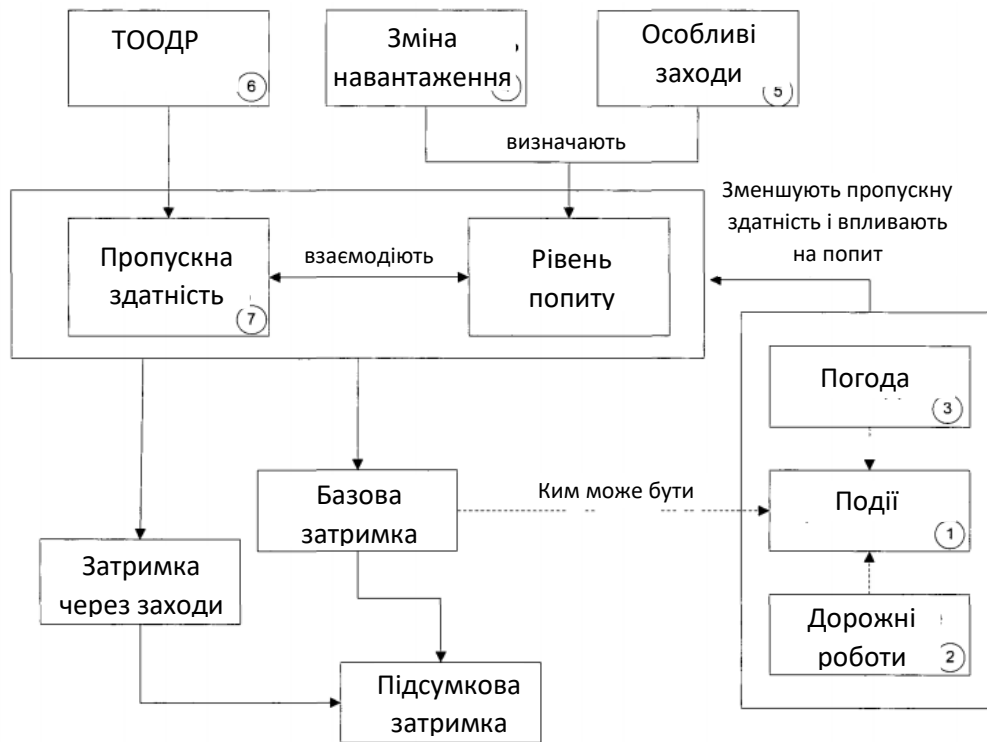


Рисунок 1.1. Схема взаємодії причин утворення заторів

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 пропускнуої здатності. Тому основний напрямок боротьби з заторами має бути зосереджена на регулюванні співвідношення попиту на поїздки 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 російських 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 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 становити 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 містом 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 формувалися розвинені мережі фрівеєв і магістральних вулиць з розташованими вздовж них комерційними підприємствами, а також великі передмістя.

Громадський транспорт деградував в систему послуг, що надаються в рамках соціального забезпечення тим, у кого немає автомобіля або хто неспроможний ним користуватися. Пішохідний рух неефективно або неможливо внаслідок значних відстаней між пунктами призначення, відсутність зручних тротуарів, необхідності перетинати широкі вулиці і величезні паркінги. 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, аніж міста з куди більш скромними дорожніми мережами [1].

## **1.2. Розвиток методів організації руху і боротьби з заторами**

Безперечно, основним інструментом організації дорожнього руху в сучасних умовах є світлофор. Перший пристрій для регулювання руху на дорогах стало прообразом сучасного світлофора з'явилося ще до винаходу автомобіля - в 1868 р в Лондоні. Однак, пропрацювавши близько місяця, воно вибухнуло, поранивши керуючого їм поліцейського. Після цього інциденту світлофор знову з'явився тільки в 1910-х рр. в США вже на основі електричної підсвічування.

З тих пір світлофор залишається головним виконавчим елементом систем управління дорожнім рухом. В системі світлофорного регулювання існують 4 параметра управління:

- послідовність фаз,
- тривалість фаз,
- тривалість циклу,
- зрушення між початком фаз на різних перехрестях.

За час що минув з моменту появи світлофорного регулювання пройдений шлях його розвитку від локального жорсткого однопрограми регулювання на окремому перехресті до автоматизованих систем управління цілою мережею

перехресть з використанням складних алгоритмів і штучного інтелекту. Спочатку світлофор призначався тільки для забезпечення безпеки при роз'їзді конфліктуючих напрямків. Потім, у міру збільшення транспортного навантаження стало зрозуміло, що робота світлофора впливає на ефективність роботи перехрестя.

Спочатку режими стали підганяти під транспортну ситуацію емпіричним шляхом, потім почали з'являтися методи аналітичного розрахунку параметрів регулювання, найвідомішим з яких став метод Вебстера.

Аналітичні розрахунки не дозволяли розраховувати оптимальні режими регулювання більш ніж для одного перехрестя. Якісний стрибок у розвитку методів розрахунку параметрів регулювання, що дозволяє оптимізувати режими більш ніж для одного перехрестя стався після появи комп'ютерів в кінці 50-х рр. Тоді з'явилися методи на основі оптимізації результатів моделювання, основним таким методом став TRANSYT [7], який продовжує розвиватися і до цього дня у вигляді програмних продуктів з розрахунку параметрів регулювання [8]. Поява TRANSYT дозволило розраховувати оптимальні плани координації для груп перехресть при різних параметрах навантаження. Наступним кроком розвитку стало використання в контурі управління зворотного зв'язку з потоком за допомогою детекторів транспорту, і впровадження таких методів як TRANSYT в систему управління для розрахунку планів координації в режимі онлайн на основі зібраних детекторами даних (системи SCOOT, SCATS).

Подальшим етапом розвитку систем, що працюють на принципі зворотного зв'язку з потоком, стали адаптивні системи, що використовують різні алгоритми самонавчання, що імітують поведінку живих організмів [9], і нейромережеві технології [10,11].

На сьогоднішній день найбільш передові системи управління дорожнім рухом засновані на використанні вбудованої транспортної моделі, яка ітеративно прогнозує параметри руху на деякий період, і реалізують попереджувальні дії, що управляють. Такий підхід в зарубіжній літературі називається «методом котиться горизонту» (rolling horizon) або MPC (Model

Predictive Control). Якість роботи таких систем багато в чому залежить від використовуваної транспортної моделі. Режим роботи онлайн і великі розміри контрольованої мережі вимагають від таких моделей високій швидкості розрахунку, що призводить до суттєвого їх спрощення. Як правило, це макромодель транспортного потоку з різними модифікаціями для обліку затримок на регульованих перехрестях. Розробники таких систем прагнуть використовувати для прогнозування ситуації якомога точніші моделі, переходячи на рівень мезо і мікро моделювання. Це вимагає ще більших обчислювальних ресурсів. Однак, з огляду на швидкість росту обчислювальних можливостей комп'ютерів за останній час, можна припустити, що проблема нестачі обчислювальних ресурсів не є лімітуючою і буде так чи інакше вирішена. Інша сторона питання ефективності роботи таких систем - це визначення оптимальних керуючих впливів на основі прогнозованих в моделі показників.

У багатьох сучасних роботах присвячених системам управління дорожнім рухом наголошується на тому, що пошук набору строго оптимальних керуючих впливів для навіть невеликої групи перехресть - нездійсненне завдання.

Причиною є наявність безлічі випадкових факторів роблять задачу оптимізації нездійсненим математично. Для визначення прийняттого рішення вдаються до різних евристичних процедур пошуку, що, як відомо, не гарантує оптимальності.

Крім вимог до властивостей моделі та процедури пошуку набору керуючих впливів, для ефективною роботи таких систем значна увага має приділятися якості зібраних даних про поточні умови руху в контрольованій мережі. Це вимагає наявності в системі величезної кількості детекторів транспорту і надійних алгоритмів обробки даних.

У західних країнах вже в 70-х рр. минулого століття стали робитися спроби інтегрування системи світлофорного регулювання з системою розподілу потоків по мережі [12]. Таке поєднання ще більше ускладнює завдання пошуку оптимальних керуючих впливів, в тому числі з-за необхідності враховувати реакцію водіїв на рекомендацію маршруту. На сьогоднішній день існують



поодинокі приклади впровадження таких систем на практиці, опрацювання теоретичних аспектів триває багатьма дослідниками, наприклад [13]. В [14] також наголошується, що в області управління дорожнім рухом в цілому характерний великий розрив між теоретичними проробками і реально впроваджуються системами.

І, нарешті, найперспективніші розробки в галузі управління транспортними потоками засновані на використанні активної взаємодії транспортних засобів за допомогою спеціального бортового обладнання, як між собою, так і з елементами ТСОДД і центром управління. Такі системи отримали назву кооперативні системи

[15,16,17]. В даний час практично всі провідні світові наукові співтовариства в сфері транспорту ведуть інтенсивні дослідження в даному напрямку.

Сучасні системи управління дорожнім рухом вже розглядаються як компоненти загальної Інтелектуальної транспортної системи (ІТС). ІТС - це система, що інтегрує сучасні технології управління з телематикою і призначена для автоматизованого пошуку та прийняття найбільш ефективних сценаріїв управління транспортною системою і її елементами для забезпечення мобільності при встановленому рівні якості обслуговування користувачів транспортною системою [18].

ІТС на сьогоднішній день - це вершина розвитку технологій управління транспортною системою, при цьому компоненти ІТС продовжують розвиватися.

За рахунок комбінації підсистем управління окремими складовими, ІТС спрямована на досягнення синергетичного ефекту в забезпеченні ефективної та надійної роботи всієї транспортної системи, і зокрема, рішенні проблеми транспортних заторів. Однак, як показує світовий досвід, ще ніде не вдалося повністю вирішити проблему заторів, тобто гарантовано запобігати їх появі, навіть за рахунок найсучасніших технологій управління.

Представлене розгляд етапів розвитку систем управління дорожнім рухом не претендує на повноту і докладність опису, воно спрямоване на те, щоб

відстежити основну тенденцію розвитку і показати, що як би не була розвинена і опрацьована система управління транспортними потоками, вона є всього лише інструментом підвищення пропускної спроможності наявної ВДМ за допомогою якісного управління. Це підвищення має пределеніє межа, і при навантаженні перевищує цю межу затори все одно виникнуть. Якщо не брати до уваги заходи по екстенсивному розвитку ВДМ, то в такому випадку починають застосовуватися технології управління попитом на пересування, які вже належать переважно до соціально-економічних заходів, ніж до технічних.

Тому транспортні системи сучасних великих міст не можна розглядати як чисто технічні системи. Повний спектр використовуваних у світовій практиці заходів по боротьбі з заторами представлений в таблиці 1.

Таблиця 1 – Перелік заходів по боротьбі з заторами

Напря́м діяльності	Сфера діяльності	Заходи
1	2	3
Розвиток інфраструктури	ВДМ	Будівництво нових доріг; Розширення існуючих доріг; Підвищення зв'язності мережі; Будівництво розв'язок в різних рівнях.
	Транспорт загального користування	Будівництво нових ж/д ліній; Організація нових маршрутів ТОП; Будівництво нових ліній швидкісного автобуса; Поліпшення обслуговування на існуючій мережі; Організація особливих маршрутів центр-периферія; Будівництво перехоплюючих парковок.

1	2	3
	Вантажний транспорт	<p>Організація смуг тільки для вантажного тр-ту;</p> <p>Розвиток інших видів транспорту для вантажних перевезень.</p>
Розвиток систем оперативного регулювання	ВДМ	<p>Поліпшення геометричних параметрів перетинів (каналізування);</p> <p>Організація одностороннього руху;</p> <p>Оптимізація світлофорного регулювання;</p> <p>Введення заборони паркування;</p> <p>Впровадження реверсивних смуг;</p> <p>Управління доступом на магістралі;</p> <p>Управління потоками на магістралях за допомогою знаків змінної інформації;</p> <p>Системи інформування та навігації;</p> <p>Системи безконтактного збору плати;</p> <p>Системи інформування про погодні умови;</p> <p>Системи ліквідації наслідків інцидентів (ДТП, поломка);</p> <p>Планування проведення особливих заходів, а також дорожніх робіт;</p> <p>Виявлення та ліквідація «вузьких» місць.</p>
	Організація нових маршрутів	<p>Відстеження переміщення рухомого складу;</p> <p>Поліпшення розкладу руху;</p> <p>Впровадження виділених смуг для ТОП;</p> <p>Організація пріоритетного проїзду перехресть;</p> <p>Інформування пасажирів про рух ТОП в реальному часі;</p>

1	2	3
		Організація експрес маршрутів; Організація обслуговування за запитом; Гнучкі системи оплати проїзду.
	Вантажний транспорт	Відстеження переміщення рухомого складу; Інформування про рух рухомого складу і вантажів в реальному часі; Системи ідентифікації вантажних автомобілів.
	Альтернативи для здійснення поїздок	Зміна часу поїздки; Зміна графіка роботи; Віддалена робота; Пропаганда пішохідною навігацією і на велосипеді; Тарифне регулювання; Кампанії по навчанню населення правильному вибору транспортних альтернатив

З наведеної таблиці можна зробити висновок, що заходи спрямовані на боротьбу з заторами охоплюють вельми різноманітні сфери діяльності. При цьому варто відзначити, що навіть в зарубіжній літературі поняття затору не має однозначного визначення [19], що також розмиває кордони переліку заходів, спрямованих на його страння. Проте, очевидно, що отримати значний результат в боротьбі з заторами можна тільки при комплексному впливі, що підтверджують практично всі огляди з проблеми транспортних заторів останніх десятиліть, наприклад [5,6,19]. Однак, рішення завжди буде являти собою компроміс між двома крайніми станами:

- повністю автомобільний місто, де весь попит на поїздки задовольняється власними автомобілями і де є досить інфраструктури щоб забезпечити рух без заторів;

- місто вільне володіння від автомобілів, де всі поїздки задовольняються транспортом загального користування і немоторізовані засобами пересування.

Прагнення до першого варіанту було характерно для багатьох міст США до 80-х рр. 20 століття, коли уряд всіляко заохочувала використання особистого транспорту і створювало для нього все більше інфраструктури. Такий напрям призводить до втрати міським середовищем своїх початкових якостей - зручності життя для людини. Після розуміння цього факту з'явилося на прямок прагнення впасти в іншу райність, тобто повністю прибрати автомобілі з міста. Таке рішення також не витримує критики, оскільки автомобіль це значуще досягнення цивілізації, яке забезпечує людині високу мобільність, а також відіграє важливу роль в життєзабезпеченні міст, і повна відмова від нього доцільний [1].

В рамках даної роботи розглядаються можливості розвитку технологій управління рухом транспортних потоків на ВДМ міст, проте через неможливість їх розгляду поза контекстом заходів з розвитку ВДМ і заходів соціально-економічного характеру, останні також будуть згадуватися в міру необхідності.

### 1.3. Аналіз транспортного потоку 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 і пасажир кожного ТЗ має конкретну мету здійснюється ним поїздки. Залежно від мети кожна поїздка має свій рівень необхідності, і кожен користувач транспортної системи може вибирати варіанти дій в таких аспектах процесу здійснення поїздки:

- робити або не робити поїздку;
- вид транспорту для здійснення поїздки;
- час початку поїздки;
- маршрут руху при русі на особистому автомобілі.

Крім варіантів дій безпосередньо перед і в процесі здійснення поїздки, користувач транспортної системи може вибирати пункти відправлення призначення, тобто місце проживання, місце роботи, місця для задоволення культурно-побутових потреб 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 на особистому автомобілі, 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 англійській літературі зазвичай називається volume-delay function (VDF).

Таким чином, поїздка кожного нового 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 два принципи 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).

У реальному транспортній 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 маршрутів для більшості кореспонденції 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 цих видів 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.

#### **1.4. 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 «он лайн» 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

стохастичности 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 усередині соціально-економічних систем, але до сих пір майже не застосовуються в 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 будуть отримувати 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 фіскальним 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: пропускної спроможності, 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

пропускної 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 через необхідність 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 людей 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 особистим транспортом для поїздок за межі міста;

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

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 в 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 стягуванні плати в пікові періоди.

## 1.5 Висновки та постановка задач на кваліфікаційну роботу магістра

Провівши аналіз розвитку автомобільного транспорту та пов'язаних з цим проблем та методів організації руху і боротьби з заторами, а також аналіз транспортного потоку як об'єкта управління можна зробити постановку задач до кваліфікаційної роботи магістра:

- необхідно розглянути транспортну систему з позицій системного аналізу, при цьому використавши підходи до оцінки впливу розподілу потоків за часом поїздки на ефективність функціонування ВДМ;
- провести опис математичної моделі оцінки ефекту від управління формуванням транспортного потоку використавши підходи до підвищення ефективності роботи ВДМ;
- розробити структурну схему системи керування формуванням транспортних потоків;
- розробити модель для використання в системі керування з оцінкою цільової функції;
- розробити блок-схему алгоритму роботи системи керування формуванням транспортних потоків;
- здійснити реалізацію основного алгоритму роботи системи управління формуванням транспортних потоків в середовищі AIMSUN.

## 2. АНАЛІТИКО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1. Розгляд транспортної системи з позицій системного аналізу

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

дослідженню 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 багатокритеріальністю 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 пропускної 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 кореспонденції.

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

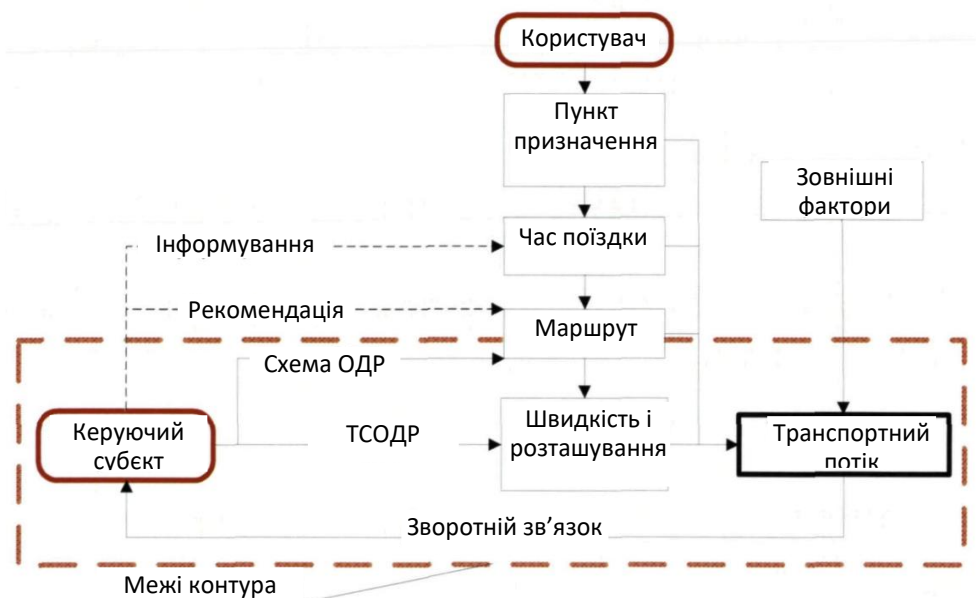
схеми організації руху, залишається тільки два шляхи вирішення проблеми, або нарощування щільності, зв'язності транспортної мережі та пропускної здатності її елементів, або зниження навантаження на наявну. Останнє в зарубіжній літературі отримало назву «управління попитом» (demand management). В рамках 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 надає опосередкований вплив на всі інші варіанти вибору за допомогою зворотного зв'язку, коли індивідууми співвідносять свої переваги з ситуацією в системі (рисунк 2.1).



Рисунк 2.1. Схема взаємодії керуючого суб'єкта з користувачем в процесі формування транспортного потоку при традиційній схемі управління

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 (рисунк 2.2), 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

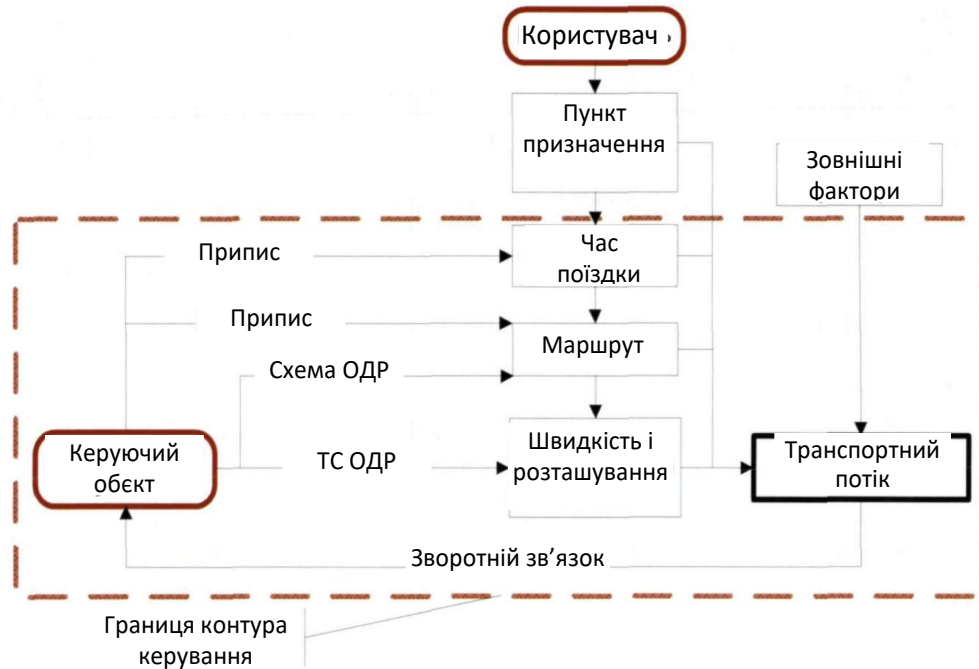


Рисунок 2.2. Схема взаємодії керуючого суб'єкта з користувачем в процесі формування транспортного потоку при запропонованій схемі управління

## 2.2. Підходи до оцінки впливу розподілу потоків за часом поїздки на ефективність функціонування ВДМ

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 в разі 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 ділянок [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 водії виїжджають раніше і прибувають в пункт призначення до необхідного часу, ті хто виїжджають пізніше спізнюються, і лише невелика частина водіїв приїжджає точно в строк, 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 2.3), де  $C$  - вартість відхилення від часу точного прибуття  $t^*$ ,  $P_i$  - питомі вартості раннього прибуття і запізнення відповідно).

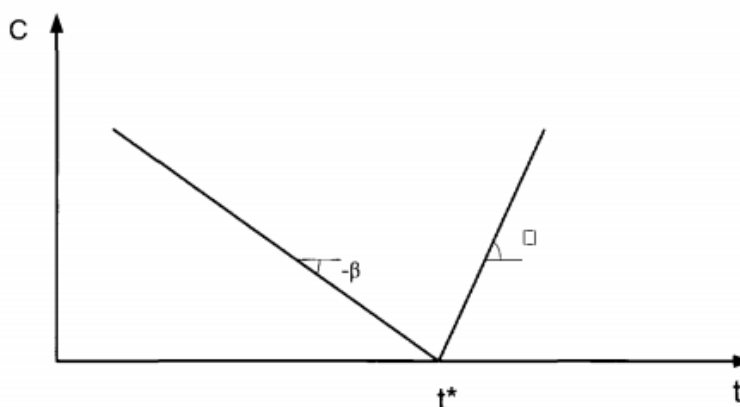


Рисунок 2.3. Вартість відхилення від часу точного прибуття

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 зрівноважити 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 всього періоду з моменту її появи, але в останні роки отримала новий розвиток в 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 використання наявної ВДМ.

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 назовемо 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 пропускнуої 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 пропускнуої здатності при переході транспортного потоку з вільного в заторовий стан. Багато дослідників, аналізуючи емпіричні дані про рух потоків, робили спроби описати їх в рамках класичної теорії.

### **2.3 Опис математичної моделі оцінки ефекту від управління формуванням транспортного потоку**

Розглянемо більш докладно приклад приводиться 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 малюнку 2.4 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 ділянці. Значення навантаження  $x$  та  $x$  відповідає рівню завантаження рівному 1, тобто навантаження дорівнює пропускну спроможність ділянки.

Слід зазначити, що в застосовуваної 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  $t_{T04}$ , 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 вільної мережі, значно запізнившись до бажаного часу, при цьому вартість цього запізнення для нього буде дорівнює затримок в русі, які він би випробував виїхавши в  $t_{T04}$ .

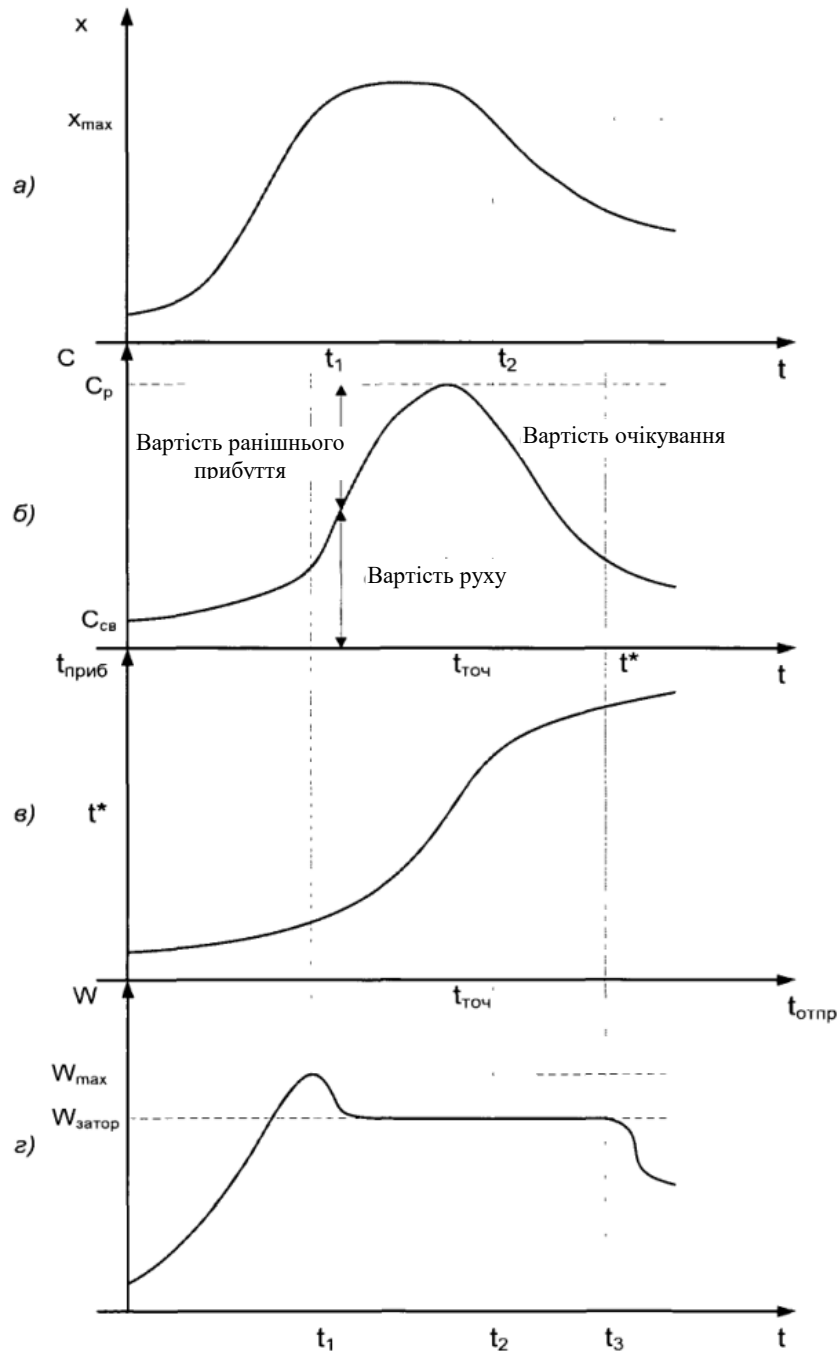


Рисунок 2.4. Зміна параметрів в ході процесу завантаження ділянки ВДМ при відсутності контролю над формуванням транспортних потоків

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 г 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.

Розглянемо тепер той же приклад, але з директивним формуванням потоку. Задача формування потоку полягає в тому, щоб не допустити утворення затору і зниження пропускної здатності та ефективності роботи мережі. На малюнку 2.5 зображені ці ж графіки, але з урахуванням підтримання потоку на рівні пропускної здатності. Шаблон зміни навантаження (графік а) не змінився. На графіку б у структурі витрат на поїздку з'являється вартість часу примусового очікування. Це час показує, наскільки повинні бути затримані автомобілі, які бажають виїхати на ділянку після моменту часу  $t_j$ . Для кожного останнього автомобіля час затримання збільшується до моменту  $t_2$  (на графіках ці моменти не спадають, так як графік б також показує долю витрат від часу оподаткування). Завдяки підтриманню потоку на рівні максимальної ефективності витрати на прямий рух на ділянці залишаються постійними. Оскільки транспортний потік підтримується в такому стані протягом усього розглядуваного періоду, істотно зменшуються загальні витрати на переміщення, на графіку цю різницю показують значення  $C_{до}$  і  $C_{г}$  після.

Це ж показує графік, де крива залежності часу прибуття від часу відправлення зміщується вправо в діапазоні максимального навантаження, це означає, що час  $t_{T04}$  стає ближчим до бажаного часу прибуття, тобто. скорочується рівноважний час руху дільницею. Графік г відповідно показує, що потік підтримується лише 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 лише витратами часу. Ті, хто виїжджають і прибувають раніше, очевидно не сидять під дверима, а можуть почати займатися чимось для них корисним, у свою чергу ті, хто виїжджають пізніше і спізнюються мотивовані, наприклад, бажанням довше поспати, зробити ранкову пробіжку, встигнути вигуляти собаку і т.д. І лише ті, для кого запізнення критичніше, і хто не може або не хоче

починати роботу раніше змушені прагнути точно до потрібного часу і найбільше страждають від зниження пропускної спроможності в заторі.

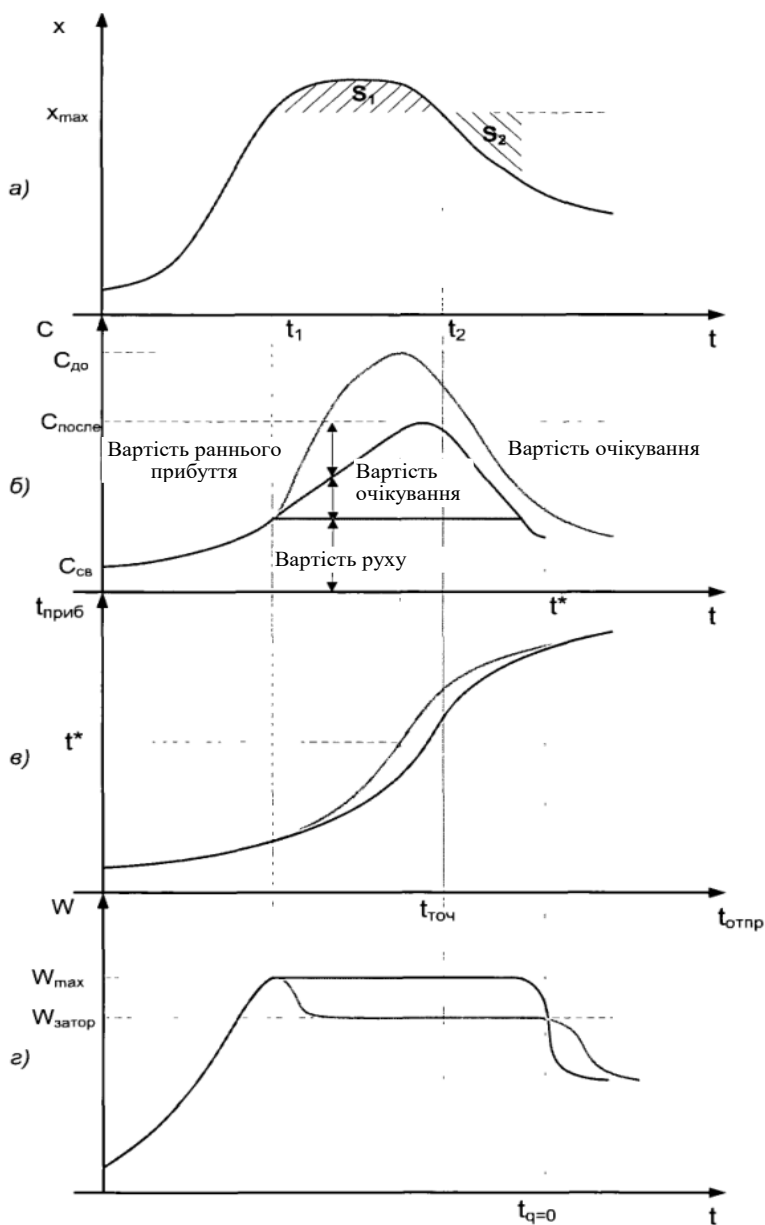


Рисунок 2.5. Зміна параметрів у процесі процесу завантаження ділянки ВДМ при наявності контролю над формуванням транспортних потоків



## 2.4. Підходи до підвищення ефективності роботи ВДМ

Закономірно, що останні роботи в галузі потоків на ВДМ спрямовані на пошук можливості керування транспортною ситуацією у мережі для забезпечення її максимальної пропускної спроможності. Наприклад, [83,84 і 85] пропонується ділити велику ВДМ на гомогенні ділянки, визначати для кожного свою форму фундаментальної діаграми і управляти потоками так, щоб на цих ділянках не відбувалося перевищення пропускної здатності. Подібні пропозиції описані у вітчизняній роботі [86], де мережа також ділиться на деякі райони (кластери) та система управління прагне не допускати утворення заторів. У [87] розглядаються питання розподілу пропускної спроможності між різними видами транспорту задля досягнення максимально ефективної реалізації всіх кореспонденції (пасажирів) за рахунок різних заходів.

Багато з розглянутих робіт прямо чи опосередковано вказується те що, що підтримувати на ВДМ навантаження, відповідну максимуму її пропускної спроможності, традиційними методами управління дуже трудно. Найбільш дієвими із традиційних є системи інформування про ситуацію на ВДМ.

Наприклад, [88] пропонується впровадити в систему інформування рекомендації як маршруту, так і часу виїзду, і автори висловлюють надію, що кооперація на основі цієї інформації дозволить пом'якшити проблему транспортних заторів. Безсумнівно, поінформованість учасників руху дозволить потокам рівномірніше розподілятися по ВДМ, що забезпечить суттєві переваги. Але такі заходи не здатні запобігти появі заторів, користувачі не зацікавлені в кооперації для досягнення системного оптимуму, а спонукати їх до такої поведінки можна тільки за допомогою динамічної тарифікації, як спочатку і пропонував У. Вікрі. Заходи фіскального характеру, як відомо, є вкрай непопулярними, а втрати від зниження пропускної спроможності в мережах під час перевантаження настільки великі, що не можуть ігноруватися. Отже існують вагомні підстави розглянути можливість директивного управління часом початку поїздки в масштабах усієї мережі.

### 3. ПРОЕКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1. Розробка структурної схеми системи керування формуванням транспортних потоків

Система управління дорожнім рухом, що охоплює територію в масштабах великого міста і тим більше з урахуванням приміських територій, повинна забезпечувати гнучкість управління, реагуючи на всі локальні ситуації, і в той же час підтримувати цільові показники ефективності всієї мережі. У традиційних системах управління, що реагують на результати довільного формування транспортних потоків, поєднання цих двох завдань на великих мережах дуже утруднено. Досягнення загальномережевого оптимуму вимагає величезних обчислювальних ресурсів, які зі збільшенням обсягу мережі зростають по експоненті, а оптимізація управління окремих перехрестях і магістралях не призводить до досягнення загального оптимуму. Для вирішення цього завдання у світовій практиці зазвичай застосовують ієрархічну будову системи управління, розбиваючи її на кілька рівнів, як за територією охоплення, так і за рівнем деталізації [89,23]. Найчастіше, на вирішення завдання пошуку оптимальних керуючих впливів використовується деяка модель підконтрольної ВДМ. Системи останнього покоління засновані на моделях динамічного перерозподілу (DTA - Dynamic Traffic Assignment), наприклад PTV OPTIMA [90]. Однак, навіть для них зробити якісний прогноз розвитку транспортної ситуації для великої мережі на період більше 10-15 хвилин виявляється дуже важко.

Хороші результати в цьому плані показує метод «управління на прогнозуючих моделях», що в зарубіжній літературі називається MPC (Model Predictive Control) [91]. Цей метод заснований на принципі «горизонту, що котиться», коли з певним тимчасовим кроком модель прогнозує поведінку системи на деякий тривалий період часу і приймає керуючі впливи на основі цього прогнозу, потім після закінчення часу кроку прогноз повторюється з урахуванням поточних даних, таким чином постійно відсуваючи горизонт

прогнозування. Цей підхід почав розвиватися на початку 60-х років для управління процесами та обладнанням у нафтохімічному та енергетичному виробництві, для яких застосування

Традиційні методи синтезу були дуже утруднені у зв'язку з винятковою складністю їх математичних моделей. У вітчизняній практиці подібний метод застосовується при синтезі алгоритмів керування літальними апаратами. У роботі [92] наголошується, що методи управління на прогнозуючих моделях є для складних нелінійних багатовимірних об'єктів управління найбільш економічними в обчислювальному плані і найчастіше поки що єдино можливим оптимальним управлінням у реальному часу. Для сфери управління дорожнім рухом застосування даного підходу запропоновано [93], де описується його застосування для управління світлофорним об'єктом.

У зарубіжній літературі МРС підхід стосовно сфери управління дорожнім рухом отримав більший розвиток [89,94,95].

Враховуючи зазначені переваги в управлінні складними нелінійними системами цей метод обраний основою для побудови запропонованої системи управління формуванням транспортних потоків.

Таким чином, система управління формуванням транспортних потоків складатиметься з наступних елементів:

- Модель транспортних потоків на підконтрольній ВДМ;
- Блок оцінки цільової функції;
- блок виробітку керуючих впливів;
- Блок оцінки поточного стану.

Взаємозв'язок перелічених елементів показано рисунку 3.1.

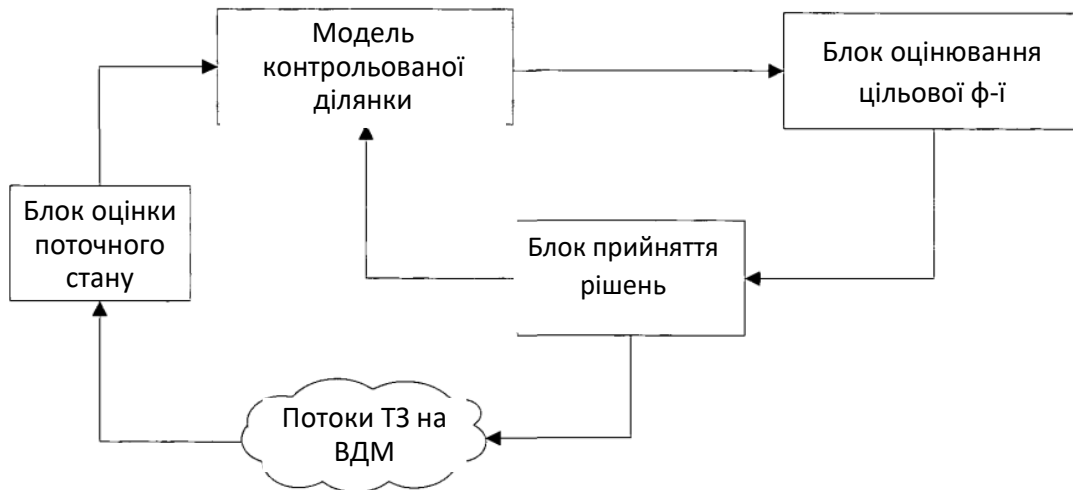


Рисунок 3.1. Структурна схема системи керування формуванням транспортних потоків

Перелічені складові далі будуть розглянуті докладніше.

### 3.2. Модель для використання в системі керування

Модель, як відображення реального об'єкта завжди є компромісом між точністю відтворення поведінки об'єкта та рівнем деталізації. Найбільшу деталізацію та точність забезпечують мікромоделі дорожнього руху, відтворюючи динаміку та особливості поведінки кожного автомобіля у мережі. Застосування моделі такого рівня для управління рухом великої агломерації найбільш ресурсомістке. Менш складними є клітинні моделі, у яких розташування кожного автомобіля кожному кроці моделювання визначається конкретної «клітиною». І найменш складними та ресурсомісткими є моделі засновані на фундаментальній діаграмі транспортного потоку, що оперують лише середніми характеристиками швидкості, щільності та інтенсивності, так звані макромоделі або LWR-моделі (аббревіатура від прізвищ основоположників моделей такого типу Лайтхілла, Уїзема та Річардса).

Макромоделі в контурі керування широко застосовуються в традиційних системах керування дорожнім рухом, таких як OPAC, PRODYN, CRONOS, RHODES, MOTION та ін, де керуючі дії носять колективний характер, тобто.

призначені не окремому автомобілю, які визначеної просторово-часової сукупності. У пропонованій системі керуючі впливи спрямовані на кожен окремий автомобіль і підвищення якості прогнозування дозволить підвищити ефективність роботи системи. Найкращим варіантом при практичному застосуванні системи буде наявність у контурі управління мікромоделі підконтрольної ВДМ на кшталт Aimsun Online [96]. Хоча моделі такого типу найвибагливіші до обчислювальних ресурсів, навіть сучасні можливості обчислювальних пристроїв, наприклад суперкомп'ютерів, дозволять реалізувати можливість розрахунків у режимі онлайн, а якщо врахувати тенденції їх розвитку, то можна сказати, що обчислювальні ресурси не відіграватимуть обмежувальну роль.

Таким чином, для побудови системи керування формуванням транспортних потоків може бути використана модель будь-якого ступеня складності за наявності необхідних обчислювальних ресурсів.

### **3.3 Оцінка цільової функції**

У традиційних системах керування дорожнім рухом цільовою функцією можуть бути різні показники але, як правило, основним, з яким корелюють всі інші, є сумарна затримка всіх ТЗ або загальний час перебування в мережі. Як зазначається в [75] з посиланням на різні джерела, сумарна затримка найбільше підходить для економічної оцінки ефективності ОДД у масштабах цілої ВДМ або міського району. У разі насичених мереж, коли завданням управління стає мінімізація ймовірності виникнення затору, найбільш прийнятними керувати мережею є показники, засновані на довжині черги.

Метою запропонованої системи є недопущення утворення заторів. Виходячи з цього логічно припустити, що як цільова функція повинна використовуватися умова неперевикнення інтенсивністю на кожній ділянці його пропускної спроможності. Однак, по-перше, потік на межі пропускної спроможності вкрай нестабільний і різко зростає ймовірність утворення затору,

по-друге, продуктивність ВДМ загалом не є максимальною в такому режимі. Відповідно необхідно підтримувати потік на рівні трохи нижче пропускнуої здатності, що забезпечує стабільність та максимальну продуктивність. Найбільш часто зустрічається оцінка такого стану потоку, коли інтенсивність руху становить 85-90% пропускнуої спроможності. При цьому суворих обґрунтувань цього значення у літературі не зустрічається. Вочевидь, що таке граничне значення може бути однаковим всім випадків, так як пропускна здатність залежить від багатьох факторів. Тоді доцільно проводити експериментальну оцінку такого порогового рівня завантаження на моделі. При цьому як показник використовувати не інтенсивність руху як таку, а різницю між вхідним і вихідним потоком, тобто допустиме число автомобілів на перегоні ВДМ, що є щільністю потоку в абсолютному значенні.

Однак, показник транспортної роботи запропонований у [97] не цілком адекватно описує продуктивність ВДМ. Перемноження числа автомобілів на годину на час у дорозі та довжину цього шляху дає розмірність автомобіле-кілометрів. У такому вигляді він успішно використовується для опису продуктивності рухомого складу у вантажних та пасажирських перевезеннях. У процесі функціонування ВДМ під час перевантаження відбувається спад інтенсивності та зростання часу руху, при цьому зростання часу відбувається значно швидше. Оскільки протяжності маршрутів кореспонденції залишаються постійними, вплив на показник транспортної роботи надають інтенсивність потоку, що пройшов, і час витрачений на проїзд.

Як показано у розділі 2, функціонування ділянки дороги та ВДМ загалом може бути описане подібним чином за допомогою фундаментальної діаграми. Розглянемо поведінку показника транспортної роботи з прикладу абстрактного ділянки дороги (чи ВДМ). На малюнку 3.2 представлені графіки фундаментальної діаграми (графік а), функції VDF, що відображає витрати часу (графік б), та графік транспортної роботи (в), отриманий перемноженням значень інтенсивності потоку та часу руху. Після перевищення пропускнуої спроможності час руху різко зростає, фактична інтенсивність знижується, але не так різко, при

максимальне значення результуючого графіка транспортної роботи знаходиться в зоні заторового стану транспортних потоків. Таким чином, цей показник не підходить для визначення цільової функції запропонованої системи.

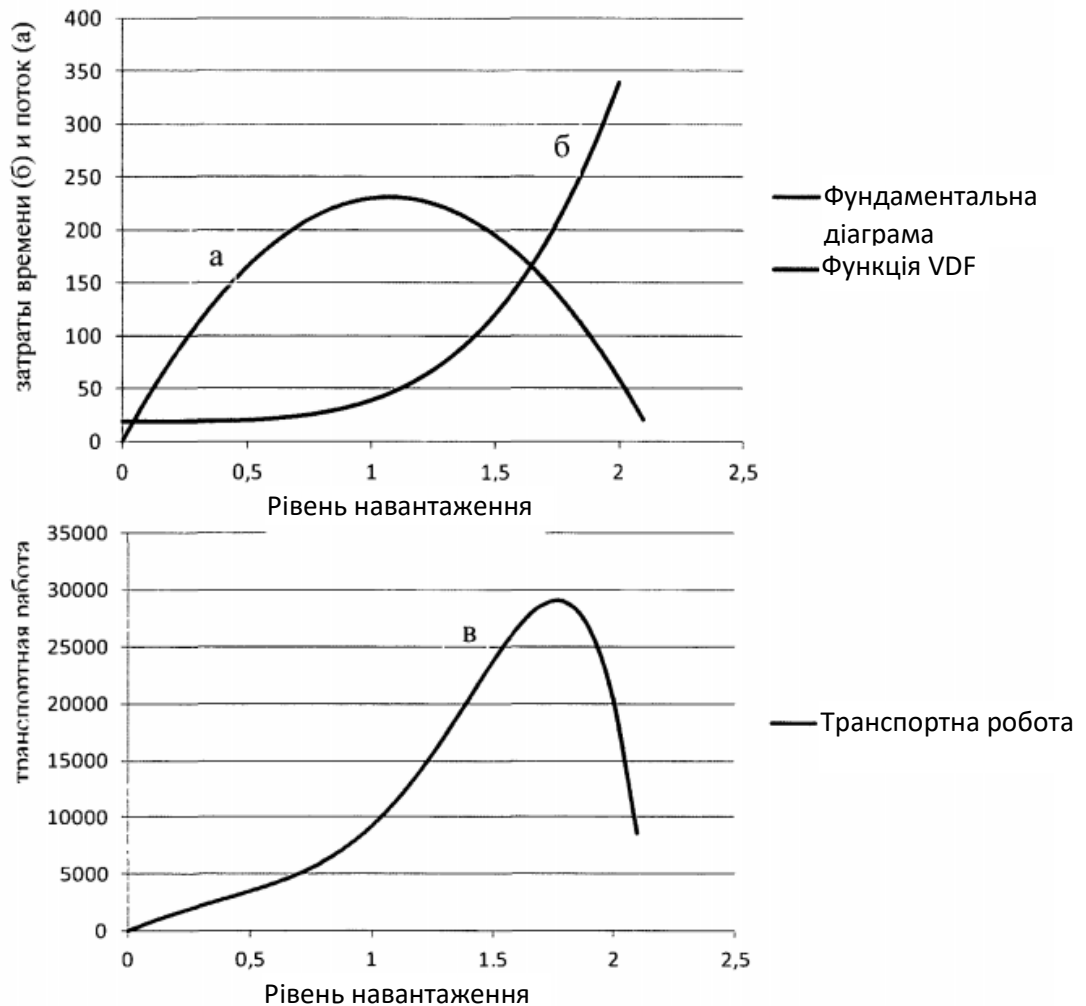


Рисунок 3.2. Зміна транспортної роботи під час завантаження ВДМ

Очевидно, що максимальна продуктивність мережі повинна перебувати у зоні вільного стану транспортного потоку (ліва частина діаграми). Для опису продуктивності витрати часу на рух необхідно не максимізувати як у розглянутому показнику, а навпаки мінімізувати. Мінімуму витрат часу відповідатиме максимальна швидкість руху. Таким чином, пропонується замість витрат часу включати до розрахунку показника ефективності швидкість руху.

Такий показник, що має розмірність авто-кілометрів на годину, не зустрічається у вітчизняній практиці при оцінці ефективності транспортних мереж. У зарубіжних джерелах він з'явився наприкінці 90-х років.

минулого століття для оцінки продуктивності окремих ділянок магістралей [98], де він розглядається як аналогія потужності в механічних системах. Пізніше такий показник почали застосовувати з метою оцінки ефективності ВДМ загалом під час реалізації різних заходів [99]. Для оцінки продуктивності ВДМ цей показник застосовується у роботах пов'язаних із мережевою фундаментальною діаграмою.

Слід зазначити, що підсумовування значення показника для кожного маршруту кожної кореспонденції не дає можливості оцінити максимальну ефективність роботи мережі, оскільки для кожного зі шляхів будь-якої кореспонденції існують деякі «вузькі місця», де відбуватиметься зниження продуктивності, тоді як інші ділянки можуть бути використані іншими кореспонденціями. Для подолання цього недоліку пропонується підсумовувати показник щодо кожної ділянки мережі.

Оскільки характер навантаження впливає на продуктивність мережі, бажаний показник має бути оцінений для кожного шаблону навантаження на ВДМ. Зміна продуктивності в залежності від зростання навантаження може бути проаналізована за допомогою засобів моделювання. Поступово збільшуючи рівень навантаження згідно з обраним шаблоном можна визначити момент, що відповідає максимальному значенню продуктивності розглянутої ВДМ. Однак, при оцінці сумарного показника може виникнути ситуація, коли на якійсь ділянці виникає затор, але подальше збільшення навантаження на мережу дає підвищення загальної суми за рахунок зростання потоків на інших більш вільних ділянках. У такому разі пропонується перед підсумовуванням відстежувати зміни показника для кожної ділянки та у разі її зниження фіксувати індивідуальний параметр максимально допустимої щільності потоку на цій ділянці. Тоді ті значення щільності транспортних потоків на ділянках мережі, які зафіксовані до моменту зниження індивідуального чи загального показника



продуктивності, будуть пороговими, перевищення яких спричинить зниження ефективності роботи ВДМ.

### 3.4 Блок-схема алгоритму роботи системи керування формуванням транспортних потоків

Згідно із запропонованою структурною схемою системи керування формуванням транспортних потоків розроблено алгоритм її роботи, представлений малюнком 3.3. Як вихідні дані приймається ВДМ з її характеристиками, зокрема допустимими значеннями щільності потоків кожному ділянці, крок проведення перерахунку прогнозу розвитку транспортної ситуації  $T_p$ , час проведення наступного розрахунку  $T_c$ , спочатку рівний 0.

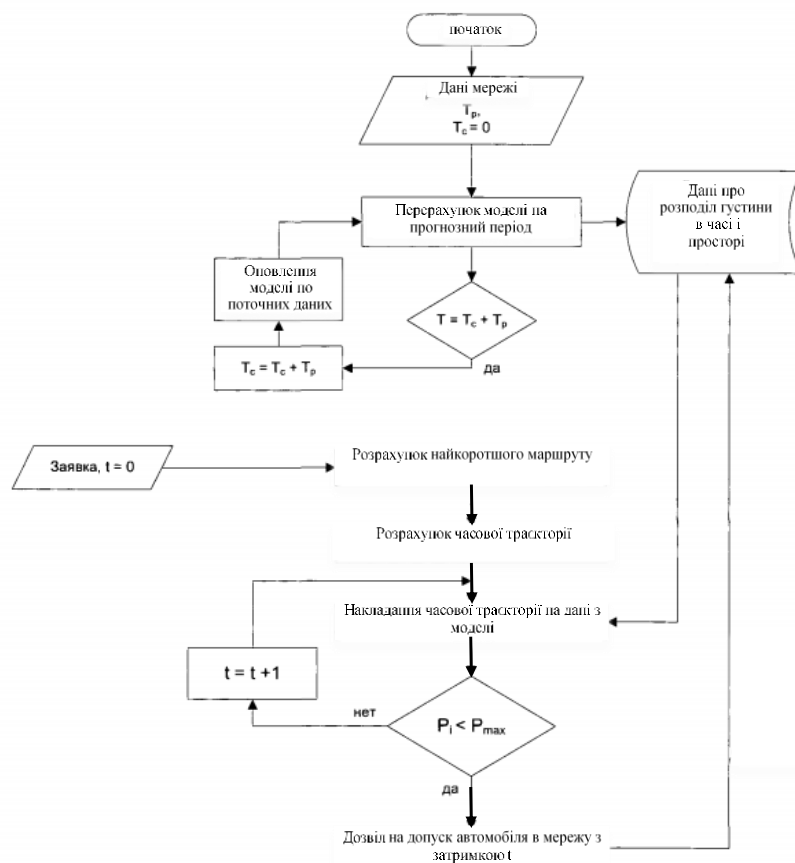


Рисунок 3.3. Алгоритм роботи запропонованої системи керування формуванням транспортних потоків

При появі кожного нового транспортного засобу в мережі (нової заявки на поїздку) для неї призначається час затримки  $t$ , визначається найкоротший у поточних умовах маршрут руху та заснована на поточних даних тимчасова траєкторія руху транспортного засобу за цим маршрутом. Із сукупності таких траєкторій формується модель розвитку транспортної ситуації по всій мережі. Таким чином, можна спрогнозувати скільки ТЗ перебуватиме на якійсь ділянці ВДМ на кожному кроці часу.

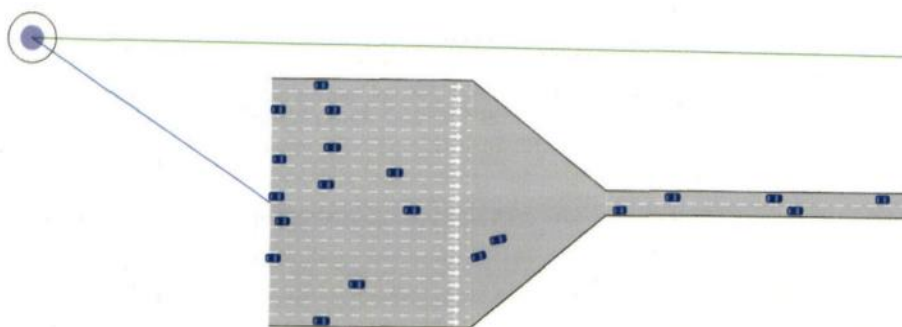
Відповідно, якщо при накладенні тимчасової траєкторії нового ТЗ на дані з моделі розрахункова щільність  $\rho_j$  перевищить максимальну щільність на якійсь із ділянок і виникне ймовірність утворення затору, то дане ТЗ підлягає затримці на один крок (наприклад, 1 секунду), потім показники щільності знову порівнюються. Коли  $\rho_j$  перестане перевищувати  $\rho_{max}$  кількість кроків зсуву визначить необхідну затримку  $t$  даного ТЗ. Його траєкторія з необхідним зрушенням складається з даними моделі для обліку при обробці наступних заявок.

### **3.5 Реалізація основного алгоритму роботи системи управління формуванням транспортних потоків в AIMSUN**

Для проведення експериментів у програмному комплексі AIMSUN було розроблено підпрограму мовою програмування Python, що дозволяє впровадити необхідну логіку управління. У проведених експериментах управлінню піддавалося лише час доступу до мережі, маршрути руху призначалися вбудованими засобами програмного комплексу. Згідно із запропонованим підходом управління на прогнозуючих моделях, підпрограма будувала власну модель розвитку ситуації на

розглянутої мережі. Ця модель є сукупністю вже згаданих тимчасових траєкторій, що дозволяють оцінити кількість автомобілів на кожному перегоні ВДМ відповідно до середніх фактичних часів проїзду. Розроблена підпрограма працює в такий спосіб. Під час запуску імітації підпрограма становить модель

мережі на основі часів руху у вільних умовах, для перегонів головної дороги перед нерегульованими перехрестями цей час залежить лише від довжини та дозволеної швидкості, для перегонів другорядної дороги час руху збільшується за допомогою деякого коефіцієнта. Час руху на перегонах перед регульованими перехрестями визначається з урахуванням тривалості циклу та фази регулювання. Таким чином, на момент запуску імітації побудована найпростіша модель, що дозволяє оцінити час руху за тим чи іншим маршрутом. Обсяг попиту поїздки задається з допомогою матриць кореспонденції, інтервали між появою автомобілів визначаються з урахуванням обраного закону розподілу внутрішніми засобами програмного комплексу. У цій ситуації поява автомобіля розглядається як заявка на поїздку, для якої визначатиметься необхідність та тривалість затримки. Автомобіль, що з'являється, вже володіє набором характеристик, має пункт призначення і маршрут руху розрахований внутрішніми засобами програмного комплексу. Тому для реалізації логіки управління, що передбачає затримку автомобіля на місці паркування до виїзду на ВДМ, в моделі були створені спеціальні буферні ділянки на яких відбувається накопичення автомобілів, що затримуються. Приклад такої ділянки представлений малюнку 3.4.



Малюнок 3.4. Буферна ділянка для накопичення затриманих автомобілів, що використовується в моделі

З появою транспортного засобу підпрограма зчитує інформацію про пункт призначення і маршрут руху, далі прораховує його тимчасову траєкторію, тобто. інформацію про те, на якому перегоні мережі перебуватиме цей автомобіль

згідно з розрахованими даними про часи проїзду. Дані про цю траєкторію додаються в модель мережі, що розглядається, і автомобіль отримує дозвіл на рух. Зчитуючи таким чином інформацію про пункти призначення та маршрути руху кожного автомобіля, підпрограма формує модель розвитку транспортної ситуації. Далі згідно з принципом управління на прогнозуючих моделях з деякою періодичністю відбувається перерахунок внутрішньої моделі за поточними даними, нові часи руху по перегонах визначаються вже за фактичними даними за минулий період, для кожного автомобіля, що знаходиться в мережі, заново розраховується його траєкторія на основі оновлених даних про часи руху. Таким чином, внутрішня модель приводиться у відповідність до реальної ситуації, що дозволяє точніше прогнозувати рух нових заявок по мережі. Періодичність перерахунку залежить від точності внутрішньої моделі, у проведених експериментах крок перерахунку змінювався від 4 до 10 хвилин.

Для кожної нової заявки при розрахунку тимчасової траєкторії та її накладення на дані внутрішньої моделі, кількість автомобілів на перегонах у кожний момент часу порівнюється з розрахованими раніше допустимими значеннями. Якщо отримане значення перевищує допустиме, тимчасова траєкторія даного автомобіля послідовно зсувається на один крок і знову порівнюється до тих пір, поки порогові значення не будуть дотримані. Кількість кроків зсуву визначає час необхідної затримки цього автомобіля. Це значення присвоюється автомобілю як атрибут, яке траєкторія зі зрушенням додається у внутрішню модель і враховується при розрахунку затримок для наступних заявок. Підпрограма відстежує коли закінчиться призначений час затримки та випускає автомобіль. Затримка автомобілів у разі відбувається з допомогою призначення автомобілю незначної швидкості руху (0,1-0,5 км/год). Значення розрахованих затримок сумуються визначення підсумкових показників роботи.

Експеримент порівнює результати функціонування різних фрагментів ВДМ за наявності та відсутності описаного управління за критерієм сумарного часу перебування автомобілів у мережі.

Кількісні показники сумарного перебування автомобілів у мережі виводяться вбудованими засобами програмного комплексу, причому допоміжні буферні ділянки не беруть участь у зборі статистики. Значення загальної примусової затримки сумуються з даними часу перебування автомобілів у мережі.

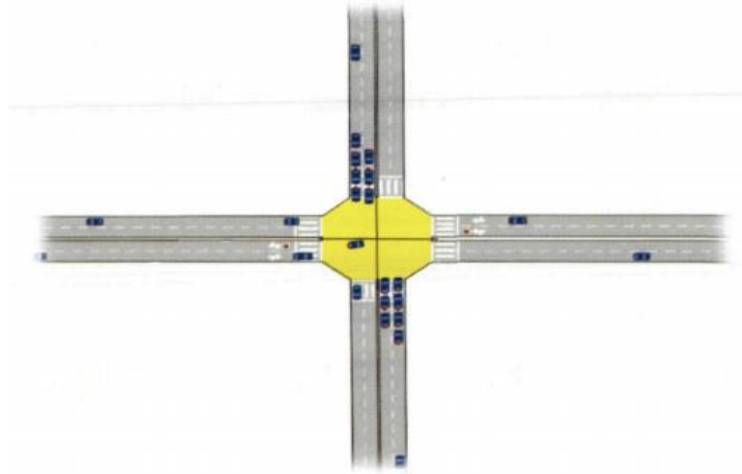
Для всіх досліджуваних об'єктів застосовувався один профіль зміни навантаження, що імітує ранковий час пік: з інтервалом 20 хв навантаження зростало від 50 до 120 %, а потім знижувалася, загальний період моделювання склав 4 години. Період максимального навантаження 120 % становив 40 хв. За 100% було прийнято потоки, що відповідають максимуму продуктивності, що оцінюється на підготовчому етапі.

Перший об'єкт являє собою ділянку дороги, що має спочатку дві смуги для руху, потім звужується до однієї смуги. Зображення моделі ділянки наведено малюнку 3.5.



Малюнок 3.5. Ділянка звуження

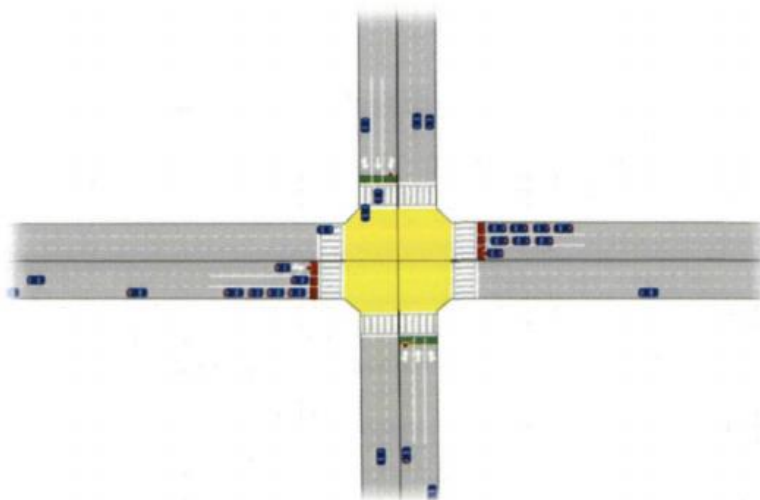
Нерегульований перехрестя являє собою перетин двох доріг під прямим кутом. Кожна дорога має дві смуги руху в кожному напрямі. На перехресті дозволені всі маневри, крім розвороту. Співвідношення обсягу попиту на головній дорозі та другорядній 95/5. Співвідношення прямого та поворотних потоків на всіх підходах однакове і становить 80% прямо, 15% праворуч та 5% ліворуч. Зображення моделі нерегульованого перехрестя наведено малюнку 3.7.



Малюнок 3.6. Нерегульоване перехрестя

Регульоване перехрестя утворене перетином двох вулиць під прямим кутом, кожна вулиця має по 3 смуги руху. На перехресті дозволено всі напрямки руху, крім розвороту, рух прямо дозволений з усіх смуг, поворотні потоки рухаються з крайніх смуг.

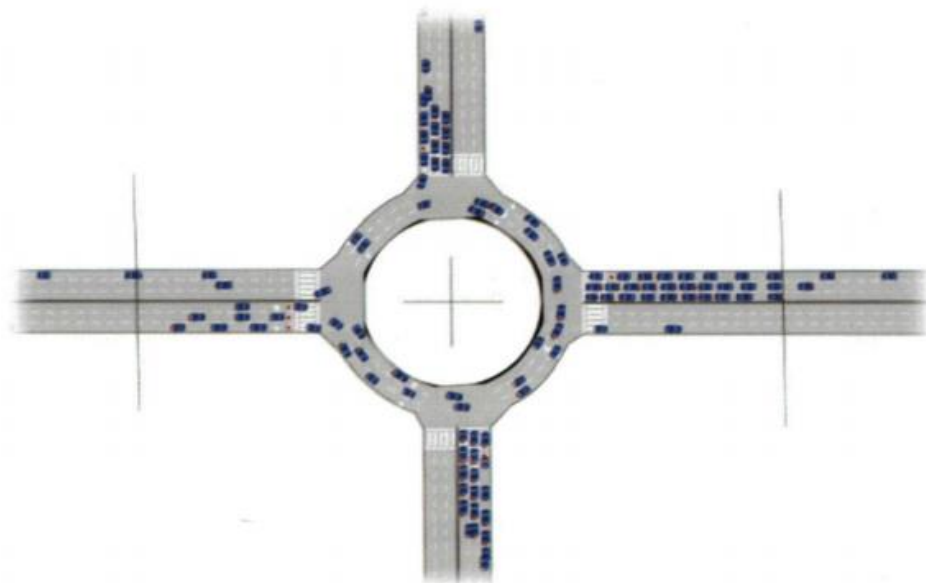
Співвідношення обсягу навантаження за підходами однакове. Співвідношення прямого та поворотних потоків на всіх підходах також однакове і становить 80% прямо, 15% праворуч та 5% ліворуч. Режим регулювання має 2 фази тривалістю по 45 с, з яких 36 с основний такт та 9 с проміжний. Тривалість циклу складає 90 с. Зображення моделі регульованого перехрестя наведено малюнку 3.7.



Малюнок 3.7. Регульоване перехрестя

Кільцеве перетин утворено двома дорогами мають по 3 смуги руху в кожному напрямку, діаметр центрального острівця становить 50 м. Кільцева проїжджа частина також має 3 смуги руху.

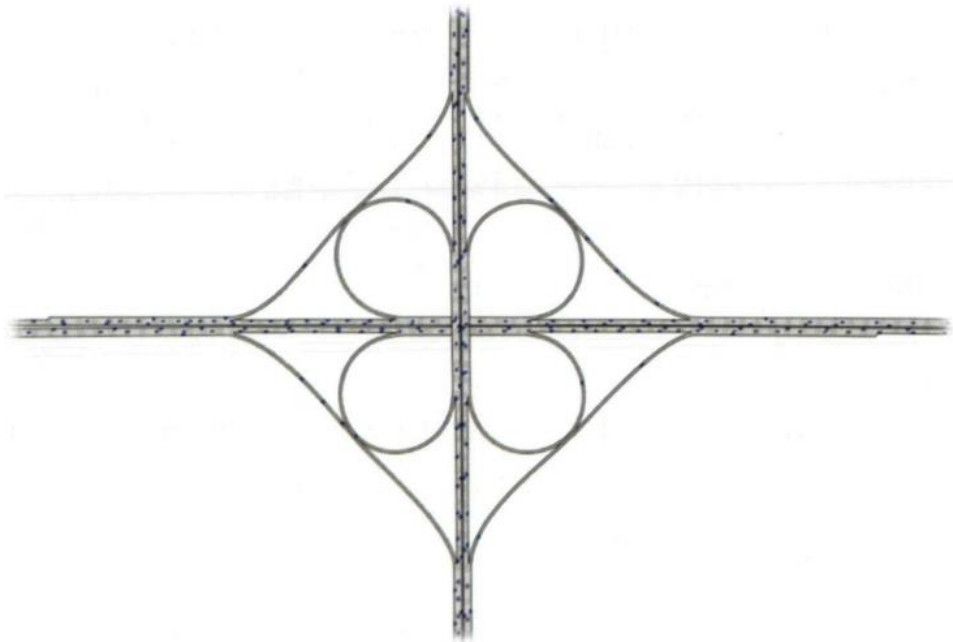
Пріоритет мають автомобіль, що рухаються по кільцю. Співвідношення обсягу навантаження за підходами однакове. Зображення моделі кільцевого перетину наведено малюнку 3.8.



Малюнок 3.8. Кільцевий перетин

Розв'язка в різних рівнях являє собою перетин двох магістралей, що мають 2 смуги руху по основному ходу в кожному напрямку. У місцях поворотних з'їздів проїжджа частина розширюється до 3 смуг. Радіус внутрішніх лівоповоротних з'їздів складає 60 м-коду.

Співвідношення обсягу навантаження за підходами однакове. Співвідношення прямого та поворотних потоків на всіх підходах також однакове і становить 80% прямо, 15% праворуч та 5% ліворуч. Зображення моделі розв'язки у різних рівнях наведено малюнку 3.9.



Малюнок 3.9. Розв'язка типу «повний лист конюшини»

Усереднені по всіх прогонах результати експериментів із зазначеними об'єктами наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Результати досліджень для різних об'єктів

Ділянка ВДМ	Сумарний час в дорозі до заходів, год.	Сумарний час в дорозі після заходів, хв.	Зниження у %
Звуження з 2-х до 1-ї смуги руху	386,7	182,5	52,8
Нерегульоване перехрестя	1252,26	1237,2	1,2
Регульоване перехрестя	1262,6	1268,9	-0,5
Кільцеве перехрестя	4504,6	2918,9	35,2
Розв'язка типу «лист конюшини»	4279,5	2242,5	47,6

Окремо взяті регульоване та нерегульоване перехрестя не показали зниження затримок. У цьому інтерес представляє проведення цього



експерименту з деякою ділянкою ВДМ має кілька перетинів різних типів. Для експерименту був обраний фрагмент ВДМ Центрального району Санкт-Петербурга, що включає 1 кільцеве, 15 нерегульованих та 25 регульованих перетинів. Дані щодо параметрів регулювання та навантаження на цю мережу взяті з матеріалів виконаного раніше проекту з удосконалення ОДД у цьому районі. Навантаження відповідає вечірній годині пік з 18.00 до 19.00. Зображення моделі досліджуваного фрагмента ВДМ наведено малюнку 3.10.

Результат експерименту із фрагментом реальної ВДМ показав зниження сумарного часу перебування у мережі на 18,1 %. Проведені експерименти носять характер попередньої оцінки, їх чисельні результати досить приблизно відображають можливу ефективність запропонованої системи. Це зумовлено як похибками у відтворенні поведінки транспортних засобів потоків програмним комплексом, і недосконалістю програмної реалізації запропонованого методу. Однак отримані результати експериментів показують значний позитивний ефект і спільно з теоретичним обґрунтуванням можуть бути переконливим підтвердженням ефективності запропонованої системи управління.

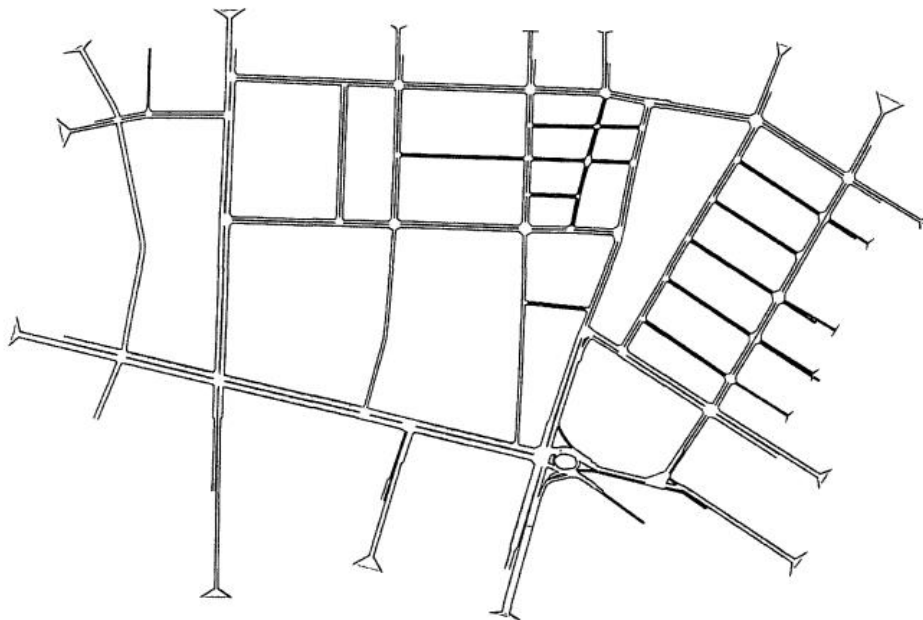


Рисунок 3.10. Досліджуваний фрагмент ВДМ м. Львова

## 4. ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Освітлення автомобільних доріг

Організація раціонального освітлення необхідних місць автомобільних доріг забезпечує безпеку руху й вирішує питання охорони праці.

Освітлювальні покриття рекомендується застосовувати для виділення пішохідних переходів (типу «зебра»), зупинок автобусів, перехідно-швидкісних смуг, додаткових смуг на підйомах, смуг для зупинок автомобілів, проїзної частини в тунелях і під шляхопроводами, на залізничних переїздах, малих мостах і інших ділянках, де перешкоди погано видно на тлі дорожнього покриття.

Стаціонарне електричне освітлення на автомобільних дорогах варто передбачити на ділянках у межах населених пунктів, а при наявності можливості використання існуючих електричних розподільних мереж - також на більших мостах, автобусних зупинках, перетинаннях доріг I і II категорій між собою й із залізницями, на всіх сполучених відгалуженнях вузлів перетинань і на підходах до них на відстані не менше 250 метрів, на кільцевих перетинаннях і на під'їзних дорогах до промислових підприємств або їхніх ділянок при відповідному техніко-економічному обґрунтуванні.

Якщо відстань між сусідніми освітлюваними ділянками становить менше 250 метрів, рекомендується влаштовувати безперервне висвітлення дороги, що виключає чергування освітлених і неосвітлених ділянок. Яскравість поверхні або покриття дороги  $L$  – відношення сили світла, випромінюваного в розглянутому напрямку, до площі освітленої поверхні, кд/м<sup>2</sup> :

$$L = I / S ; \quad (4.1)$$

За одиницю сили світла прийнята кандела (кд). Сила світла - величина, що оцінює просторову щільність світлового потоку, яка , у межах представляє з

себе відношення потоку  $d\Phi$  до тілесного кута  $d$  якого світловий потік поширюється

$$I = d\Phi / d\omega; \quad (4.2)$$

Поза населеними пунктами середня яскравість покриття ділянок автомобільних доріг, у тому числі великих і середніх мостів, повинна бути  $0,8$  кд/м<sup>2</sup> на дорогах I категорії,  $0,6$  кд/м<sup>2</sup> на дорогах II категорії, а на сполучних відгалуженнях у межах транспортних розв'язок –  $0,4$  кд/м<sup>2</sup>. Відношення максимальної яскравості покриття проїзної частини до максимального не повинне перевищувати 3:1 на ділянках доріг I категорії, 5:1 на дорогах інших категорій. Одним з показників освітленості є показник засліпленості  $X$  - критерій оцінки сліпучої дії створюваної освітлювальною установкою.

$$X = (S - I)100; \quad (4.3)$$

$$S = U_1 / U_2; \quad (4.4)$$

де  $U_1, U_2$  – видимість об'єкта спостереження відповідно при екрануванні й при наявності близьких джерел у полі зору. Видимість характеризує здатність ока сприймати об'єкт; залежить від освітленості, розміру об'єкта, його яскравості, контрасту об'єкта з фоном, тривалості експозиції. Видимість визначається числом граничних контрастів у контрасті обсягу з фоном:

$$U = K / K_{гран}; \quad (4.5)$$

де  $K$  – контраст об'єкта з фоном;  $K_{гран}$  – граничний контраст, тобто найменший помітний оком контраст при невеликому зменшенні якого об'єкт стає нерозрізненим.

Контраст об'єкта з фоном вважається більшим при значеннях  $K$  більше 0,5 (об'єкт і фон розрізняються за яскравістю); середнім при значеннях  $K$  від 0,2 до 0,5 і малим при значеннях  $K$  менш 0,2 (об'єкт і фон мало відрізняються за яскравістю).

Показник засліпленості установок зовнішнього висвітлення не повинен перевищувати 150.

Середня горизонтальна освітленість проїздів довжиною до 60 м під шляхопроводами й мостами в темний час доби повинна бути 15лк, а відношення максимальної освітленості до середньої - не більше 3:1.

Висвітлення ділянок автомобільних доріг у межах населених пунктів варто виконувати відповідно до вимог СНІП П-4-79, а висвітлення автодорожніх тунелів відповідно до вимог СНІП П-44-78.

Освітлювальні установки перетинань автомобільних і залізничних доріг в одному рівні повинні відповідати нормам штучного висвітлення, регламентованих системою стандартів безпеки праці на залізничному транспорті.

Опори світильників на дорогах, як правило, варто розташовувати за брівкою земляного полотна. Дозволяється розташовувати опори на розділовій смузі шириною не менш 5 м з установкою огорожень.

Включення висвітлення ділянок автомобільних доріг варто робити при зниженні рівня природної освітленості до 15 - 20 лк, а відключення - при його підвищенні до 10 лк.

У нічний час варто передбачати зниження рівня зовнішнього висвітлення протяжних ділянок автомобільних доріг (довжиною понад 300 м) і під'їзди до мостів, тунелів і перетинань автомобільних доріг з автомобільними й залізничними дорогами шляхом вимикання не більше половини світильників. При цьому не допускається відключення підряд двох світильників, а також розташованих поблизу відгалуження, примикання, вершини кривої в поздовжньому профілі радіусом менш 300 м, пішохідного переходу, зупинки суспільного транспорту на кривій у плані радіусом менш 100 м.

Електропостачання освітлювальних установок автомобільних доріг слід здійснювати від електричних розподільних мереж найближчих населених пунктів, або мереж найближчих виробничих підприємств.

Електропостачання освітлювальних установок залізничних переїздів треба, як правило, здійснювати від електричних мереж залізниць, якщо ці ділянки залізничної колії обладнані поздовжніми лініями електропостачання, або лініями електроблокування.

Керування мережами зовнішнього висвітлення варто передбачати централізованим дистанційним або використати можливості установок керування зовнішнім висвітленням найближчих населених пунктів, або виробничих підприємств. Проекти автомобільних доріг I - IV категорій у частині безпеки руху й охорони праці повинні узгоджуватися з органами Державтоінспекції МВС України.

Для освітлювальних установок вулиць і доріг категорії В, а також освітлювальних установок, рівень висвітлення яких регламентується нормами середньої освітленості, найменша висота розташування світильників за умовами обмеження засліпленості повинна прийматися по таблиці 4.1.

Світильники зовнішнього висвітлення, які встановлюють на стінах будинків, не повинні засвілювати вікна житлових будинків. В установках зовнішнього висвітлення при середній яскравості дорожнього покриття  $0,4 \text{ кд/м}^2$  і більше й середньої освітленості  $4 \text{ лк}$  і більше варто застосовувати переважно світильники з газорозрядними джерелами світла.

Над проїзною частиною вулиць, доріг і площ світильники повинні встановлюватися на висоті не менш  $6,5 \text{ м}$ .

Висота підвісу світильників при їхньому розташуванні над контактною мережею трамвая повинна бути не менше  $8 \text{ м}$  від рівня голівок рейок, при розташуванні над контактною мережею тролейбуса - не менше  $9 \text{ м}$  від рівня проїзної частини.

Таблиця 4.1 – найменша висота розташування світильників за умовами обмеження засліпленості

Світлорозподіл світильників	Найбільший світловий потік ламп у світильниках, встановлених на одній опорі, лк	Найменша висота установки світильників, м	
		При лампах накаливання	При газорозрядних лампах
Напівшироке	Менш 5000	6,5	7
	від 5000 до 10000	7	7,5
	більше 10000 до 20000	7,5	8
	більше 20000 до 30000	–	9
	більше 30000 до 40000	–	10
	більше 40000	–	11,5
Широке	Менш 5000	7	7,5
	від 5000 до 10000	8	8,5
	більше 10000 до 20000	9	9,5
	більше 20000 до 30000	–	10,5
	більше 30000 до 40000	–	11,5
	більше 40000	–	13

Мінімальна висота установки світильника в парапетах мостів і шляхопроводів не обмежується за умови забезпечення захисного кута не менш 10° й виключення можливості доступу до ламп без застосування спеціального

інструмента. У транспортних тунелях повинні застосовуватися світильники із захисним кутом не менш  $10^{\circ}$ . Висота їхнього розташування повинна бути не менш 4м.

У пішохідних тунелях повинні використовуватися світильники: а) із захисним кутом не менш  $15^{\circ}$  – для люмінесцентних ламп сумарною потужністю не більше 80 Вт і ламп ДРЛ потужністю не більше 125 Вт; б) з матованими й молочними розсіювачами без відбивачів - для ламп ДРЛ потужністю не більше 125 Вт.

#### **4.2. Захист цивільного населення**

Забезпечення захисту населення і територій у разі загрози та виникнення надзвичайних ситуацій є одним з найважливіших завдань держави.

Головною метою захисту населення і територій під час надзвичайних ситуацій є забезпечення реалізації державної політики у сфері запобігання і ліквідації їх наслідків, зменшення руйнівних наслідків терористичних актів та воєнних дій. Основними завданнями захисту населення і територій під час НС є:

- розроблення і реалізація нормативно-правових актів, додержання державних технічних норм та стандартів з питань забезпечення захисту населення і територій від наслідків надзвичайних ситуацій;

- забезпечення готовності органів управління, сил і засобів до дій, призначених для запобігання надзвичайних ситуацій та реагування на них;

- розроблення та забезпечення заходів щодо запобігання виникненню звичайних ситуацій;

- збирання та аналітичне опрацювання інформації про надзвичайні ситуації;

- прогнозування та оцінка соціально-економічних наслідків надзвичайних ситуацій, визначення на основі прогнозу потреби в силах, матеріально-технічних фінансових ресурсах;

- створення, раціональне збереження і використання резервів фінансових

матеріальних ресурсів, необхідних для запобігання надзвичайних ситуацій та імітування на них;

- здійснення державної експертизи, нагляду і контролю в галузі захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій;

- оповіщення населення про загрозу та виникнення надзвичайної ситуації несвоєчасне та достовірне інформування його про наявну обстановку і вжиті заходи;

- організація захисту населення (персоналу) та надання безкоштовної медичної допомоги.

З метою захисту населення, зменшення втрат та шкоди економіці в разі виникнення надзвичайних ситуацій має проводитися спеціальний комплекс заходів.

Оповіщення та інформування, яке досягається завчасним створенням і підтримкою в постійній готовності загальнодержавної, територіальних та об'єктових систем оповіщення населення.

Спостереження і контроль за довкіллям, продуктами харчування і водою забезпечується створенням і підтримкою в постійній готовності загальнодержавної і територіальних систем спостереження і контролю з включенням до них існуючих сил та засобів контролю незалежно від підпорядкованості. Укриття в захисних спорудах, якому підлягає усе населення відповідно до приналежності (працююча зміна, населення, яке проживає в небезпечних зонах, тощо), досягається створенням фонду захисних споруд.

Евакуаційні заходи, що проводяться в містах та інших населених пунктах, які мають об'єкти підвищеної небезпеки, а також у воєнний час, основним способом захисту населення є евакуація і розміщення його у позаміській зоні.

Інженерний захист проводиться з метою виконання вимог ІТЗ із питань забудови міст, розміщення будівель, будинків, інженерних споруд та інше. Медичний захист проводиться для зменшення ступеня ураження людей, своєчасного надання допомоги постраждалим та їх лікування, забезпечення епідемічного благополуччя в районах надзвичайних ситуацій.



Біологічний захист включає своєчасне виявлення чинників біологічного зараження, їх характеру і масштабів, проведення комплексу адміністративно-господарських, режимно-обмежувальних і спеціальних протиепідемічних та медичних заходів.

Хімічний захист включає заходи щодо виявлення і оцінки радіаційної обстановки, організацію і здійснення дозиметричного та хімічного розроблення типових режимів радіаційного захисту, забезпечення індивідуального захисту, організацію і проведення спеціальної обробки.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В роботі здійснено аналіз розвитку автомобільного транспорту та пов'язаних з цим проблем та методів організації руху і боротьби з заторами, а також аналіз транспортного потоку як об'єкта управління.

Розглянуто транспортну систему з позицій системного аналізу, при цьому використавши підходи до оцінки впливу розподілу потоків за часом поїздки на ефективність функціонування ВДМ.

Проведено опис математичної моделі оцінки ефекту від управління формуванням транспортного потоку використавши підходи до підвищення ефективності роботи ВДМ.

Розроблено структурну схему системи керування формуванням транспортних потоків.

Розроблено модель для використання в системі керування з оцінкою цільової функції.

Розроблено блок-схему алгоритму роботи системи керування формуванням транспортних потоків.

Здійснено реалізацію основного алгоритму роботи системи управління формуванням транспортних потоків в середовищі AIMSUN.

Розглянуті також питання з охорони праці і безпеки в надзвичайних ситуаціях.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Вучик, В. Р. Транспорт в городах, удобных для жизни, / пер. с англ. А. Калинина под научн. ред. М. Блинкина.: Территория будущего; Москва; 2011.
2. Ставничий, Ю. А. Транспортные системы городов / Ю. А. Ставничий - М: Стройиздат, 1990. - 224 с.
3. Traffic Congestion and Reliability, Trends and Advanced Strategies for Congestion Mitigation, Cambridge Systematics, Inc., 2005, [http://www.ops.fhwa.dot.gov/congestion\\_report/](http://www.ops.fhwa.dot.gov/congestion_report/)
4. Кунделеков, А.Г. Влияние транспортных заторов на психовегетативный статус водителей общественного транспорта с учетом возраста и стажа работы // Фундаментальные исследования. - 2012. - № 12 (часть 1). - стр. 82-85;
5. Litman T. A., Smart Congestion Relief: Comprehensive Analysis Of Traffic Congestion Costs and Congestion Reduction Strategies, Victoria Transport Policy Institute, 2013, [http://www.vtpi.org/cong\\_relief.pdf](http://www.vtpi.org/cong_relief.pdf)
6. TTI's 2012 Urban Mobility Report Powered by INRIX Traffic Data, <http://tti.tamu.edu/documents/mobility-report-2012.pdf>.
7. Robertson D.I. Transyt: a traffic network study tool. Road Research Laboratory report. LR 253. Crowthome, Berkshire, 1969, p. 37.
8. Программный комплекс TRANSYT. [Электронный ресурс] / Режим доступа: [https://www.trlsoftware.co.uk/products/junction\\_signal\\_design/transyt](https://www.trlsoftware.co.uk/products/junction_signal_design/transyt)
9. Prothmann H., Organic Traffic Control, Dissertation, Karlsruher Institut fur Technologie, 2011.
10. Chong Y., Quek C, Loh P. A novel neuro-cognitive approach to modeling traffic control and flow based on fuzzy neural techniques. / Expert Systems with Applications, Vol. 36, Issue 3, Part 1, pp. 4788-4803, 2009.
11. Srinivasan D., Choy M. C, Cheu R. L. Neural Networks for Real-Time Traffic Signal Control. / IEEE transactions on intelligent transportation systems, vol. 7, no. 3, pp. 261-272. 2006.

12. Gershwin S.B., Tan H.N. Hybrid optimization: optimal static traffic control constrained by drivers' route choice behavior. Decision and Control including the 17th Symposium on Adaptive Processes, 1978 IEEE Conference on (Vol.17).

13. Zuurbier F. S. Intelligent Route Guidance. Ph.D. thesis. Delft University of Technology, Netherlands, 2010.

14. Papageorgiou M., Diakaki, C, Dinopoulou, V., Kotsialos A., Wang, Y. (2003) 'Review of road traffic control strategies.', Proceedings of the IEEE., 91 (12). pp. 2043-2067.

15. The future of traffic management, State of the Art, Current Trends and Perspectives for the Future, 2012 TrafficQuest, [http://www.traffic-quest.nl/images/stories/documents/State\\_of\\_the\\_Art/the\\_future\\_of\\_traffic\\_management.pdf](http://www.traffic-quest.nl/images/stories/documents/State_of_the_Art/the_future_of_traffic_management.pdf)

16. Wang M., Daamen W., Hoogendoorn S. P., Van Arem B. Rolling horizon control framework for driver assistance systems. Part II: Cooperative sensing and cooperative control. / Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 40, pp. 290-311,2014.

17. Monteil J., Billot R., El Faouzi N., Towards cooperative traffic management: methodological issues and perspectives. / Proceedings Australasian Transport Research Forum 2011.

18. Горев, А. Э. Основы теории транспортных систем: учеб. пособие / А. Э. Горев; СПбГАСУ - СПб., 2010. - 214 с.

19. Managing Urban Traffic Congestion, ECMT, 2007, <http://www.internationaltransportforum.org/Pub/pdf/07Congestion.pdf>

20. Wardrop J. G. Some theoretical aspects of road traffic research. In Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Pt. II, volume 1, pages 325-378, 1952.

21. Теория игр с примерами из математической экономики: Пер. с францМ.:Мир, 1985.-200 с, ил. 22. Koch R., Skutella M. Nash equilibria and the price of anarchy for flows over time. // Algorithmic Game Theory. Lecture Notes in Computer Science Vol. 5814, 2009, P. 323-334.

23. Taale H. Integrated Anticipatory Control of Road Networks A gametheoretical approach // Ph.D. Thesis, Netherlands: GA Delft, 2008. 24. Корягин,

М. Е. Равновесные модели системы городского пассажирского транспорта в условиях конфликта интересов / М. Е. Корягин. - Новосибирск: Наука, 2011. - 140 с.

25. Toledo T., Beinhaker R. Evaluation of the potential benefits of advanced traveler information systems// Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations. Vol. 10(4), 2006. P. 173-183

26. Жанказиев, С. В. Научные основы и методология формирования интеллектуальных транспортных систем в автомобильно-дорожных комплексах городов и регионов : диссертация ... доктора технических наук : 05.22.01 / Жанказиев Султан Владимирович; [Место защиты: Моск. гос. автомобил.-дорож. ун-т (техн. ун-т)].- Москва, 2012.- 287 с.

27. Воробьев, А. И. Формирование методики оптимизации телематического комплекса технических средств интеллектуальной системы маршрутного ориентирования : диссертация ... кандидата технических наук : 05.22.01 / Воробьев Андрей Игоревич; [Место защиты: Моск. гос. автомобил.-дорож. ун-т (техн. ун-т)].- Москва, 2010.- 196 с.

28. A sustainable future for transport - Towards an integrated, technology-led and user-friendly system, European Commission, 2009 - 26 pp.  
[http://ec.europa.eu/transport/media/publications/doc/2009\\_future\\_of\\_transport\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/transport/media/publications/doc/2009_future_of_transport_en.pdf).

29. Digital-Age Transportation: The Future of Urban Mobility, Deloitte Services LP, 2012, <http://dupress.com/wp-content/uploads/2012/12/Digital-Agetransportation.pdf>

30. The Future of Urban Mobility 2.0 Full study, 2014  
<http://www.adlittle.com/future-of-urban-mobility.html>

31. Improving transport accessibility for all: guide to good practice -ECMT, 2006,  
<http://www.internationaltransportforum.org/IntOrg/ecmt/pubpdf/06TPHguide.pdf>

32. Иносэ, Х Управление дорожным движением, пер. с англ. / Х. Иносэ, Т. Хамада; под ред. М. Я. Блинкина. - М.: Транспорт, 1983. - 248 с.

33. Экономическая теория / Под ред. Дж. Итуэлла, М. Милгейта, П. Ньюмена: Пер. с англ. / Науч. ред. чл.-корр. РАН В.С. Автономов. - М.: ИНФРА-М, 2004. - XII, 931 с.

34. Using Pricing to Reduce Traffic Congestion, The Congress of the United States, Congressional Budget Office, 2009, <http://www.cbo.gov/sites/default/files/cbofiles/ftpdocs/97xx/doc9750/03-11-congestionpricing.pdf>

35. Zuurbier F., Zuylen H., Hoogendoorn S., Chen Y. A generic approach to generating optimal controlled prescriptive route guidance in realistic traffic networks.

85th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., 2006.

36. Зедгенизов, А.В., Управление доступом к улично-дорожной сети / А.В. Зедгенизов, А.Б. Куприянова, Р.Ю. Лагерев, А.Г. Левашев, А.Ю. Михайлов, М.И. Шаров. - Иркутск: ИрГТУ, 2009. - 71 с.

37. Белов, А.В. Контроль доступа на ВДМ как средство управления дорожным движением // Актуальные проблемы безопасности дорожного движения: матер, междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов/СПбГАСУ. - СПб., 2012. - С.48-51.

38. Дрю, Д. Теория транспортных потоков и управление ими / Д. Дрю -М.: Транспорт, 1972. - 424 с.

39. Kirschfink H. Collective traffic control on motorways, Heusch/Boesefeldt GmbH, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.112.5337&rep=rep1&type=pdf>

40. Varaiya P. Congestion, ramp metering and tolls. Phil. Trans. R. Soc. A (2008) 366, [http://paleale.eecs.berkeley.edu/~varaiya/papers\\_ps.dir/RSTA20080015.pdf](http://paleale.eecs.berkeley.edu/~varaiya/papers_ps.dir/RSTA20080015.pdf)

41. Zhang L., Levinson D. Optimal freeway ramp control without origindestination information // Transportation Research Part B 38, 2004. P. 869-887.

42. Сильянов, В. В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организация движения Текст. / В. В. Сильянов. - М.: Транспорт, 1977. 303 с.

43. Методическое руководство по стратегии управления транспортными потоками в системах автоматизированного регулирования движения на автомобильных магистралях (АРДАМ) / М.: Государственный дорожный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт ГипродорНИИ, 1980. - 87с

44. Васильев А.П. История организации и становления отраслевой дорожной науки в системе Росавтодора и ФГУП «Росдорнии» // Дороги и Мосты, № 2, 2008 С. 273-289

45. Quinn D., A Review of Queue Management Strategies, DRIVE II PROJECT V2016 : PRIMA VERA, 1992, <http://www.its.leeds.ac.uk/projects/primavera/delivl.pdf>

46. Антонов, А.В. Системный анализ. Учеб. для вузов/А.В. Антонов. - М.: Высш. ШК., 2004.- 454 С: ил.

47. Roughgarden T. Selfish Routing and the Price of Anarchy. 2006. <http://theory.stanford.edu/~tim/papers/optima.pdf>

48. Braess D. On a paradox of traffic planning. Transportation Science, 39(4), 2005.

49. Spiess H. (1990). Conical volume-delay functions. Transportation Science, 24(2), pp.153-158.

50. Lebacque J.P. (1996). Instantaneous travel times for macroscopic traffic flow models. CERMICS Report 59-96.

51. Akcelik R. (1991). Travel time functions for transport planning purposes: Davidson's function, its time-dependent form and an alternative travel time function. Australian Road Research 21 (3), pp. 49-59.

52. Buisson C, Lebacque J. P., Lesort J. B. Travel Times Computation for Dynamic Assignment Modelling. EURO Working group on transportation. 1996.

53. Singh R. Improved Speed-Flow Relationships: Application to Transportation Planning Models. 7th TRB Conference on Application of Transportation Planning Methods, 1999.

[http://www.mtc.ca.gov/maps\\_and\\_data/datamart/research/bostonl.htm](http://www.mtc.ca.gov/maps_and_data/datamart/research/bostonl.htm)

54. Smith J. M., Cruz F.R.B. Deterministic and Stochastic Travel Time Estimation Formulas, 2005.
55. Dowling R., Skabardonis A. Urban Arterial Speed-Flow Equations For Travel Demand Models. // Innovations in Travel Modeling Conference, 2006.
56. Olstam J. J., Matstoms P. New V/D-functions on the way. Preliminary function for urban road environments based on a new method // VTI rapport 571, 2007.
57. Singh R. Improved Speed-Flow Relationships: Application to Transportation Planning Models. 7th TRB Conference on Application of Transportation Planning Methods. 1999.
58. Aimsun Users Manual, TSS-Transport Simulation Systems, S.L.
59. ОДМ «Руководство по прогнозированию интенсивности движения на автомобильных дорогах» 2003.
60. Rapoport A., Kugler T., Dugar S., Gisches E. J. Choice of routes in congested traffic networks: Experimental tests of the Braess Paradox // Games and Economic Behavior. 2009. V. 65 P. 538-571
61. Bloy K. An Investigation into Some Aspects of Braess' Paradox. 2006. [http://www.inro.ca/en/pres\\_pap/international/ieug06/6-3\\_Keith\\_Bloy.pdf](http://www.inro.ca/en/pres_pap/international/ieug06/6-3_Keith_Bloy.pdf)
62. Гасникова, Е.В., Моделирование динамики макросистем на основе концепции равновесия, дисс. на соиск. ученой степени канд. физ.-мат. наук. 05.13.18, МФТИ.М., 2012.
63. Vickrey W.S. Congestion theory and transport investment, American Economic Review 59, 1969. pp. 251 - 260.
64. Yperman I., Logghe S., Immers B. Dynamic congestion pricing in a network with queue spillover // Proceedings of the 12th World Congress on Intelligent Transport Systems. 2005.
65. Arnott R. The Economic Theory of Urban Traffic Congestion: A Microscopic Research Agenda // Working Papers in Economics, Boston College, 2001 [http://escholarship.bc.edu/econ\\_papers/114](http://escholarship.bc.edu/econ_papers/114)
66. Fosgerau M., De Palma A., Karlstrom A., Small K. Trip timing and scheduling preferences, 2012, <http://www.hal.archives-ouvertes.fr/hal-00742267>



67. Daganzo C F., Gonzales E. J., Gayah V. V. Traffic Congestion in Networks, and Alleviating it with Public Transportation and Pricing // Institute of Transportation Studies University of California, Berkeley, 2011.

68. Бабков, В.Ф. Автомобильные магистрали. М.: Транспорт, 1974.

69. Буслаев, А.П. Вероятностные и имитационные подходы к оптимизации автодорожного движения. А.П.Буслаев, А.В.Новиков, В.М.Приходько, А.Г.Таташев, М.В.Яшина. М.: Изд-во «Мир», 2003. - 368 с

70. Kerner B. S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-Phase Traffic Theory // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

71. Гасников, А.В. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учебное пособие / А. В. Гасников, С. Л. Кленов, Е. А. Нурминский, Я. А. Холодов, Н. Б. Шамрай; под ред. А.В. Гасникова - М.: МФТИ, 2010.-360 с