

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**Факультет транспорту і будівництва  
Кафедра логістичного управління та безпеки руху на транспорті**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

**до кваліфікаційної випускної роботи**

освітній ступінь	– бакалавр	
спеціальність	– 275	Транспортні технології (за видами)
спеціалізація	– 275.03	Транспортні технології (на автомобільному транспорті)

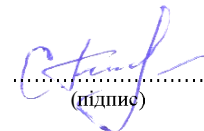
на тему: «Формування транспортних потоків та організація транспортних систем міста»

Виконав здобувач вищої освіти  
групи ОПАТ-19д



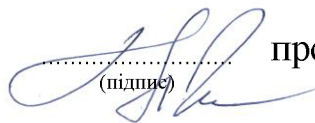
Михальський О.Д.

Керівник:

  
(підпис)

доц. Клюєв С.О.

Завідувачка кафедри:

  
(підпис)

проф. Чернецька-Білецька Н.Б.

# СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет транспорту і будівництва

Кафедра логістичного управління та безпеки руху на транспорті

освітній ступінь – бакалавр

спеціальність – 275 Транспортні технології (за видами)

спеціалізація – 275.03 Транспортні технології  
(на автомобільному транспорті)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

*Завідувач кафедри*

*проф. Чернецька-Білецька Н.Б.*

*29 травня 2023 р*

## **ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ ВИПУСКНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЕВІ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Михальському Олександрю Денисовичу

### **1. Тема роботи Формування транспортних потоків та організація транспортних систем міста.**

Керівник роботи: Ключев С.О., к.т.н., доц.

затверджені наказом університету від “30” травня 2023 року № 305/14.03-С

### **2. Строк подання здобувачем роботи 22.06.2023 р.**

### **3. Вихідні дані до роботи:**

Процес формування транспортних потоків; інформація щодо існуючих методів організації транспортних систем, робота системи управління формуванням транспортних потоків.

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

1. Аналіз існуючих методів організації транспортних систем.
2. Визначення процесу формування транспортних потоків.
3. Розробка алгоритму роботи системи управління формуванням транспортних потоків.
4. Розрахункова частина.

### **5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):**

1. Схема взаємодії причин утворення заторів - 1 слайд.
2. Структурна схема системи управління формуванням транспортних потоків- 1 слайд.
- 3 Реалізація основного алгоритму роботи системи управління - 1 слайд.
4. Алгоритм роботи системи управління формуванням транспортних потоків- 1 слайд.

## 6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 29 травня 2023 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

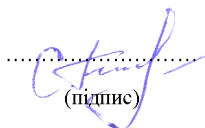
№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1	Робота з матеріалами	20.04.2023р.	
2	Пошук літературних джерел та обробка інформації	05.05.2023р.	
3	Аналіз діючих нормативних документів	10.05.2023р.	
4	Виконання технологічної частини	20.05.2023р.	
5	Виконання проектної частини	25.05.2023р.	
6	Принцип роботи та схеми	05.06.2023р.	
7	Розробка креслень та схем	13.06.2023р.	
8	Оформлення пояснювальної записки	17.06.2023р.	
9	Захист роботи	22.06.2023р.	

Здобувач вищої освіти



Михальський О.Д.  
(ініціали і прізвище)

Керівник роботи:



доц. Клюєв С.О.  
(ініціали і прізвище)

Примітки:

- 1.Форму призначено для видачі завдання студенту на виконання кваліфікаційної випускної роботи і контролю за ходом роботи з боку кафедри
- 2.Розробляється керівником кваліфікаційної випускної роботи. Видається кафедрою.

№ сторінок	Формат	Позначення	Найменування	Кіл. арк.	№екз.	Прим.
1						
2			<u>Документація загальна</u>			
3	A1	РКБ.ОПАТ-19д.012.Т1	Вихідні дані роботи	1	-	слайд
4						
5	A1	РКБ.ОПАТ-19д.012.Т2	Мета, об'єкт, предмет	1	-	слайд
6						
7	A1	РКБ.ОПАТ-19д.012.Т3	Схема взаємодії причин утворення заторів	1	-	слайд
8						
9	A1	РКБ.ОПАТ-19д.012.Т4	Структурна схема системи управління формуванням транспортних потоків	1	-	слайд
10						
11	A1	РКБ.ОПАТ-19д.012.Т5	Реалізація основного алгоритму роботи системи управління	1	-	слайд
12						
13	A1	РКБ.ОПАТ-19д.012.Т6	Алгоритм роботи системи управління формуванням транспортних потоків	1	-	слайд
14						
15	A1	РКБ.ОПАТ-19д.012.Т7	Результати розрахунку для різних об'єктів	1	-	слайд
16						
17	A1	РКБ.ОПАТ-19д.012.Т8	Висновки	1	-	слайд
18						
19	A1		<u>Разом листів</u>	7	-	
20						
21						
22						
23						

РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.	Михальський			
Перевір.				
Керівн.	Клюєв С.О.			
Н. контр.				
Затв.	Чернецька-Біл.			

Відомість  
кваліфікаційної випускної  
роботи бакалавра

Літ.	Аркуш	Аркушів
н	3	70

СНУ ім. В. Даля,  
кафедра ЛУБРТ

## РЕФЕРАТ

Робота кваліфікаційна випускна бакалавра: 70 с., 14 рис., 1 табл., 38 джер.,  
10 граф. арк. (слайдів)

Метою кваліфікаційної роботи бакалавра є організація функціонування автомобільних шляхів за рахунок впливу на процес формування транспортних потоків.

Об'єкт – транспортна система та транспортні потоки на них.

Предмет – розподіл транспортних потоків.

Методи виконання роботи – порівняльно-аналітичні, математичні.

Для забезпечення максимальної ефективності роботи ВДМ розроблена система управління з директивним регулюванням доступу на ВДМ і приписом системно-оптимального маршруту на рівні окремого ТЗ. Для реалізації такої системи необхідно законодавчо зобов'язати кожного водія перед вчиненням поїздки подавати заявку із зазначенням пункту призначення.

Результати роботи є система управління дорожнім рухом, яка регулює доступ автомобілів на автомобільні шляхи в масштабі міста або цілого регіону, яка створюється замість реальних транспортних заторів віртуальні черги, що дозволяє використовувати автомобільні шляхи максимально ефективно.

ТРАНСПОРТНИЙ ПОТОК, ВУЛИЧНО-ДОРОЖНЯ МЕРЕЖА,  
ТРАНСПОРТНИЙ ЗАСІБ, АВТОМОБІЛЬНІ ШЛЯХИ, МАРШРУТ, ВОДИЙ,  
МІСТО.

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>			
<i>Змін</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>Реферат</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>	<i>Михальський</i>						4	70
<i>Перевір.</i>								
<i>Керівн.</i>	<i>Клюєв С.О.</i>							
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>	<i>Чернецька-Біл.</i>					<i>СНУ ім. В. Даля, кафедра ЛУБРТ</i>		

## ЗМІСТ

	стор.
Вступ .....	6
1. Аналіз існуючих методів організації транспортних систем .....	8
1.1. Розвиток автомобільного транспорту .....	8
1.2. Аналіз транспортних потоків як об'єкта управління .....	12
1.3. Способи організації транспортних систем міста .....	16
2. Визначення процесу формування транспортних потоків .....	23
2.1. Розгляд транспортної системи .....	23
2.2. Розрахунок впливу розповсюдження потоків на ефективність функціонування автомобільних шляхів .....	25
3. Розробка алгоритму роботи системи управління формуванням транспортних потоків .....	33
3.1. Розробка структурної схеми .....	33
3.2. Блок-схема алгоритму роботи системи управління формуванням транспортних потоків .....	45
3.3. Реалізація основного алгоритму роботи системи управління формуванням транспортних потоків .....	46
3.4. Технологія роботи системи .....	55
3.5. Автоматичне управління одиницями рухомого складу .....	61
Висновки.....	65
Список використаних джерел.....	67

## 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, якого зазнає 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.

Основним напрямком вирішення проблем низької ефективності автомобільних шляхів був екстенсивний розвиток ВДМ, будівництво нових доріг і розв'язок. Потім стало розвиватися напрямом підвищення ефективності використання наявної ВДМ за допомогою різних методів організації та управління дорожнім рухом. Однак подібні заходи щодо поліпшення 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 цей поріг затори все одно виникнуть. Більшість фахівців все-таки прийшли до єдиної думки, що без заходів з управління попитом транспортна система

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		6

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 і 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 пропускнуої здатності дороги при розсмоктування 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.

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		7



# 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ОРГАНІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

## 1.1 Розвиток автомобільного транспорту

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, доставку вантажів «від дверей до дверей». У будь-якій країні розвиток автомобільного транспорту підштовхувало розвиток практично всіх галузей економіки. Крім того, і сам транспорт став однією з провідних галузей. На сьогоднішній день функціонування 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.

					РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		8

Затори не тільки звели нанівець основна перевага автомобіля - його високу мобільність, а й привели до неефективності системи автомобільних перевезень як такої [1,2]. В таких умовах можна говорити про те, що автомобіль став виконувати функції протилежні початковим, замість підвищення швидкості доставки вантажів 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 пропускній здатності (звуження доріг).

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

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

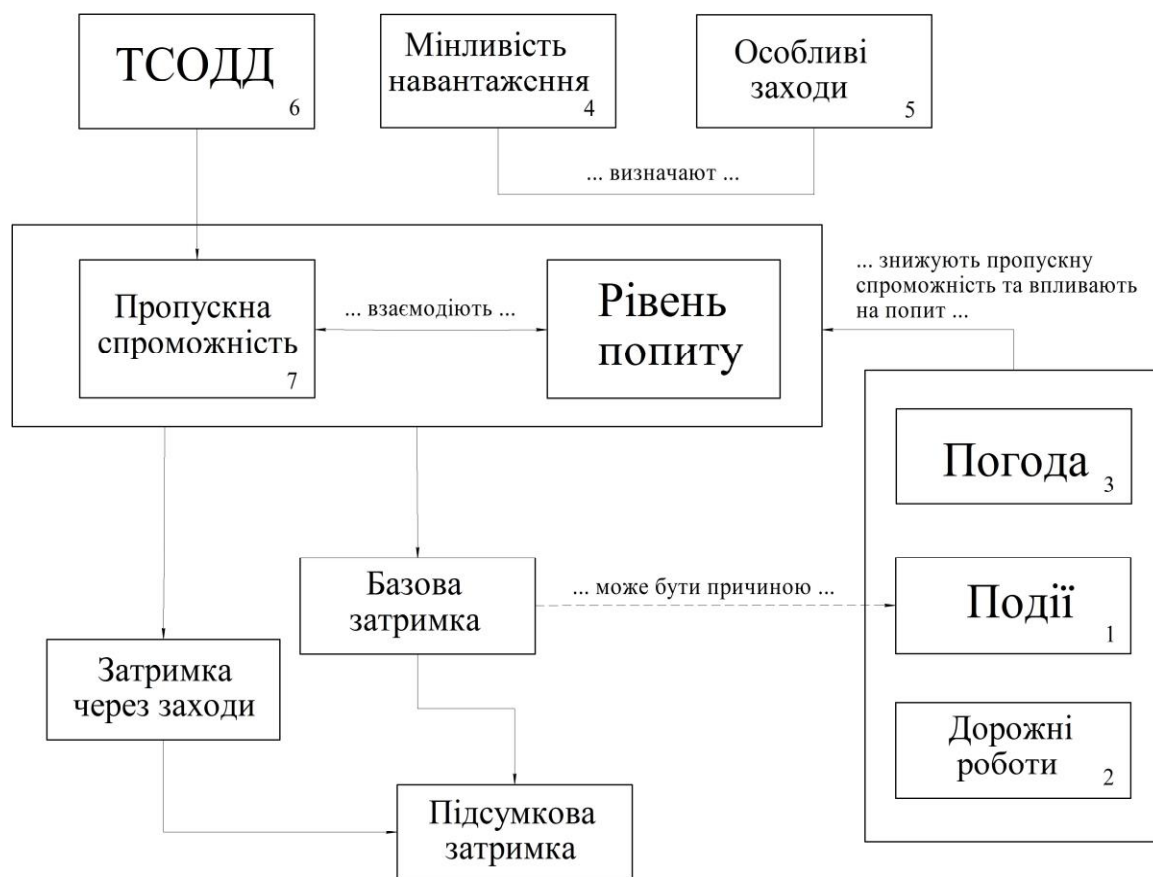


Рисунок 1.1. Схема взаємодії причин утворення заторів

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 повертати 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

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		11

сформувалися розвинені мережі фрівеев 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 фрівеев 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 Аналіз транспортних потоків як об'єкта управління

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

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

Керуючі впливи на потік можуть оцінюватися на основі різних моделей описують його поведінку, від найпростіших гідродинамічних аналогій до мікромоделей, що відтворюють поведінку окремих водіїв. Однак, транспортний потік на тій чи іншій ділянці ВДМ не чисто фізичне явище, а результат соціально-економічних взаємодій в суспільстві. Кожен водій і пасажир кожного ТЗ має конкретну мету здійснюється ним поїздки. Залежно від мети кожна поїздка має свій рівень необхідності, і кожен користувач

					РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		12

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 пропускнуої спроможності ділянок цього маршруту.

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

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

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

Однак, ще раніше, в 1950 р подібне явище було сформульовано Джоном Нешем в рамках теорії ігор [21]. Апарат теорії ігор в подальшому отримав широке поширення в транспортній науці за кордоном [22,23], а також в дослідженнях вітчизняних авторів, наприклад для аналізу систем

міського пасажирського транспорту [24]. У термінах теорії ігор взаємодія агентів (учасників гри) в Відповідно до першого принципу Уордропа називається некооперативного грою. Взаємодія з другим принципом відповідно кооперативної, коли гравці діють спільно для максимізації виграшу (в разі транспорту мінімізації затримок). Взаємодія агентів при наявності деякого керуючого органу описується грою Штакельберга (Stackelberg game). У такій грі керуючий орган виступає в ролі лідера і має можливість впливати на інших гравців для досягнення своєї мети, а гравці вже підлаштовуються під ці дії відповідно до своїх цілей. Тобто ця гра описує взаємодію, умовно кажучи, дорожньої адміністрації і простих учасників дорожнього руху. Дорожня адміністрація прагне мінімізувати сумарні затримки на ВДМ за допомогою методів організації дорожнього руху, а водії прагнуть мінімізувати власний час поїздки, змінюючи свою поведінку під впливом застосовуваних заходів. Також існує модифікація гри Штакельберга (inverse Stackelberg game), в якій лідер анонсує то, як він буде реагувати на дії інших гравців, і, знаючи їх реакцію, може оптимізувати свої дії. Випадок, при якому досягається системний оптимум, називається монопольним грою. У даній грі описується ситуація коли дорожня адміністрація має можливість наказувати поведінку учасників руху і розподіляє потоки відповідно до другого принципом Уордропа.

У реальному транспортної мережі більш-менш великого міста при відсутності систем управління розподілом потоків ситуація являє собою стохастичне рівноважний розподіл. Водії вибирають маршрут руху виходячи з досвіду попередніх поїздок або по найкоротшій відстані. В таких умовах

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		14

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 поїздки по одному і тому ж маршруту в різні дні може показувати істотна відмінність в часі поїздки. Таким чином, водії змушені вибирати час початку поїздки орієнтуючись на максимальний час поїздки, щоб не запізнитися в пункт призначення. Очевидно, що для підвищення ефективності використання ВДМ необхідно направляти водіїв в об'їзд заторів по альтернативних маршрутах, підвищуючи рівномірність їх завантаження. З цією метою стали з'являтися різні системи інформування водіїв про ситуацію на дорозі від повідомлень по радіо до рекомендації найкоротшого по часу маршруту в персональному навігаційному пристрої. Одним з варіантів донесення інформації до водіїв є динамічні інформаційні табло (ДІТ). Визначення оптимальних місць установки ДІТ і алгоритмам управління ними присвячені багато робіт як зарубіжних [25,26], так і вітчизняних дослідників [27,28]. Установка ДІТ на ключових розвилках маршрутів безсумнівно дасть позитивний ефект. Однак, очевидно, що в рамках великого міста неможливо забезпечити рівномірне завантаження альтернативних маршрути для більшості кореспонденцій тільки за допомогою ДІТ. Це зажадає установки табло практично на кожному перехресті, і відповідно колосальних витрат. Більш доцільним видається засновувати систему інформування на індивідуальних пристроях за типом навігатора. Питання відмінностей в економічній ефективності даних варіантів вимагає додаткового опрацювання, але можна однозначно сказати, що варіант з індивідуальними пристроями дозволить організувати систему управління набагато більш гнучко. Проте, навіть за умови досягнення повної інформованості учасників руху про час руху з того чи іншого маршруту транспортні потоки прагнуть до рівноважного розподілу за першим принципом Уордроба. Однак, як відомо, може існувати розподіл, що забезпечує менші загальні затримки на ВДМ, тобто системно оптимальне згідно з другим принципом Уордроба.

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		15



Дослідженням можливостей впровадження системно-оптимального управління рухом транспортних потоків присвячені багато робіт, в основному зарубіжних авторів, більш детально описані в 2 чолі. Основною перешкодою для впровадження цього принципу управління є те, що оптимальні маршрути запропоновані системою управління можуть не збігатися з уявленнями водіїв про найкоротших маршрутах. Відповідно деякі з них не дотримуватимуться рекомендацій, що знижує ефект від такого розподілу. Таким чином, властивості транспортного потоку як об'єкта управління, такі як нестаціонарність, стохастичність і статистична стійкість багато в чому формуються соціально-економічними факторами, і при необхідності можуть бути схильні до коригування.

### 1.3 Способи організації транспортних систем міста

Сучасні тенденції розвитку транспортних систем, а точніше підходів до транспортного обслуговування населення, в містах розвинених країн показують, що замість набору альтернатив у вигляді систем різних видів транспорту з їх параметрами (інтервалами, швидкістю, вартістю і т.д.), на перше місце виходить поняття мультимодальної мобільності у вигляді єдиного сервісу, який передбачає планування і здійснення поїздки в режимі «онлайн» з урахуванням всіх можливих альтернатив, включаючи такі як кар-шерінг, кар-пулінг, велопрокат і т.д. [29,30]. Це викликано високим рівнем поточних потреб в переміщеннях і прогнозом їх подальшого зростання до 3 разів до 2050 р. [31]. При цьому доступність транспорту повинна бути забезпечена для всіх категорій населення [32].

Класичний підхід до управління дорожнім рухом, коли «... при управлінні рухом транспортних потоків ми зобов'язані виходити з того, що інформація про справжні наміри водіїв відсутній, що установка на автомобілях нових електронних технічних коштів не передбачається і що всі керуючі пристрої встановлюються тільки на дорожньої мережі» [33], на якому базується більшість сучасних систем управління дорожнім рухом,

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		16

очевидно, застарів. Крім того, управління дорожнім рухом в класичному розумінні має справу з наслідками з соціально-економічних взаємодій індивідуумів виражаються у вигляді потоків автомобілів між різними пунктами. При цьому рух кожного автомобіля по ВДМ визначається особливостями особистості його водія, що вносить значну частку стохастичності як в процес формування транспортного потоку, так і в його внутрішні процеси (обгони, перестроювання, дистанція між автомобілями і т.д.), що істотно ускладнює можливості управління в рамках класичного підходу.

Також світове співтовариство прийшло до розуміння того, що «століття неконтрольованого доступу до високо завантажених міських дорогах підійшов до кінця» [19]. Практично всі розробляються стратегії розвитку транспортних систем міст передбачають наявність систем справляння плати, величина якої залежить від рівня завантаження мережі. Ця особливість обумовлена базовими економічними законами, які забезпечують баланс всередині соціально-економічних систем, але до сих пір майже не застосовуються у сфері міських транспортних систем [34]. При цьому існує справедлива критика вирішення проблеми шляхом справляння плати в пікові періоди, заснована на тому, що доступ до доріг у зручний час отримуватимуть більш забезпечені верстви населення [35]. Як будь-яка проблема, яка зачіпає практично все населення міст, введення плати за користування транспортною інфраструктурою навіть в години пік, завжди буде мати як чимало прихильників, так і чимало супротивників. Однак, більшість фахівців все-таки прийшли до єдиної думки, що без заходів з управління попитом транспортна система великого міста не може бути стабільною і надійною. Як і в будь-якій іншій ситуації, де мають місце обмежені суспільні блага і перевищення попиту над пропозицією погіршує умови для всіх споживачів (наприклад, доступ на пляж, виставку, будь-які масові видовищний захід і т.д.), в якості альтернативи фіскальним заходам з

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		17

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 здатності, безпеки і швидкості руху. Управління доступом в такому розумінні ґрунтується на суворій ієрархії вулиць і доріг, що не дозволяє стрибкоподібного зростання потоків на магістралях за рахунок прямого доступу від об'єктів генерації потоків. Включає в себе: контроль за розміщенням перетинів і місцевих проїздів з метою забезпечення 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

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		18

автомобілів, здатних пересуватися по міській ВДМ в загальному потоці. Також в розвинених країнах спостерігаються тенденції відмови від володіння автомобілем і користування прокатними транспортними засобами, це дозволяє вирішити проблему нестачі паркувальних місць і використовувати автомобіль тільки тоді, коли він необхідний. Це зменшує необхідність в транспорті загального користування та призводить до так званої системи персонального транспорту. Більшість проектів по системам персонального транспорту припускали створення спеціальної інфраструктури (направляючих рейок), що було основним недоліком цих систем изза необхідності високих капіталовкладень, проте при автоматизації управління автомобілем така необхідність відпадає і можна використовувати наявну ВДМ. Якщо керування транспортним засобом автоматизується, то вибір маршруту руху такого автомобіля по мережі тим більше повинен бути автоматизований, і повинен виконуватися центром управління з метою мінімізації сумарних затримок.

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

- Повна автоматизація переміщення 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.

Можливо, в майбутньому проблема надійності і безпеки подібної автоматизованої транспортної системи буде знята за рахунок розвитку

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		19

інформаційних технологій, але поки вона залишається істотним обмеженням для впровадження таких систем. Подолати зазначені недоліки дозволить проміжний варіант, при якому керування автомобілем частково залишається під контролем водія. При цьому транспортний засіб для пересування в системі продовжує бути звичайним автомобілем, або у власності, або взятим на прокат. Автоматизованим повинен стати вибір маршруту, який розраховується в центрі управління відповідно до мінімізацією затримок. Однак, це не усуне можливість утворення заторів, оскільки в розпорядженні водія залишається такий фактор, як час початку поїздки. Вибираючи одне й те саме час поїздки, водії скупчуються на «вузьких» ділянках ВДМ, ускладнюючи рух один одному. Як згадувалося вище, дорожній рух відноситься до систем, продуктивність яких погіршується при перевищенні попиту над пропозицією, т. Е. Утворення затору знижує пропускну спроможність ділянки ВДМ в порівнянні з рівномірним рухом потоку через ту саму ділянку. Це підтверджує найпростіший експеримент проведений в програмному комплексі імітаційного моделювання AIMSUN. Розглянуто ділянку дороги, на якому відбувається звуження проїзної частини з двох до однієї смуги, через дану ділянку проходять 500 автомобілів. При вільному доступі перед звуженням утворюється затор і загальний час проїзду становить 16 хв 3 сек, а якщо регулювати інтенсивність потоку на рівні пропускну здатності однієї смуги, не допускаючи утворення затору, ті ж автомобілі проїжджають за 14 хв 33 сек. [37].

Таким чином, стримування потоків для підтримки рівномірного руху дасть вигаш всім учасникам руху. Перші спроби застосування цього ефекту здійснювалися в США, де в 1966 р був впроваджений перший дослідний зразок системи регулюючої в'їзд на автомагістраль [38]. В англійській літературі принцип регулювання в'їзду на магістраль називається ramp metering. Надалі цей принцип набув широкого поширення [39,40,41]. У вітчизняній практиці теж пророблялися питання застосування цього принципу управління, наприклад В.В. Сильянова [42]. У відділі безпеки руху

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		20

та зимового утримання доріг ГіпродорНІІ під керівництвом А.П. Васильєва і М.С. Фрімштейна була розроблена перша в Україні система автоматичного регулювання руху на автомобільних магістралях (АРДАМ) [43]. Ця велика і важлива тема зажадала розробки теорії автоматизованого управління дорожнім рухом, апаратури для постійного спостереження за ним. Перший в ЄСРР проект системи «АРДАМ» був розроблений для автомагістралі Москва - Рига. З цією метою були створені і випробувані спеціальні пересувні лабораторії для оцінки стану доріг та метеоумов, розроблений проект забезпечення зв'язку, створена апаратура для збору і передачі інформації та інше обладнання і прилади [44], однак, система не отримала широкого впровадження на практиці.

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

- Погіршення умов руху навколо контрольованої зони;
- Необхідність мати світлофори на всіх можливих маршрутах;
- Провокування водіїв на порушення ПДР;
- В затори на підходах до контрольованій зоні можуть потрапляти водії не планують в'їжджати в цю зону;
- Оскільки, як правило, дана міра застосовується для регулювання доступу до центральної частини міста в ранковий пік, в період вечірнього піку вона втрачає сенс.

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

					<i>РКБ.ОПАТ-19δ.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		22

## 2. ВИЗНАЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ

### 2.1. Розгляд транспортної системи

Оскільки система наземного транспорту в містах належить до класу складних систем, зважаючи на наявність у складі системи людей, які керують транспортними засобами і що впливають на процес формування транспортних потоків, закономірним вибором з можливих підходів до її дослідження є системний аналіз. Центральною проблемою системного аналізу є проблема прийняття рішення. Що стосується завданням дослідження, проектування та управління складними системами проблема прийняття рішення пов'язана з вибором певної альтернативи в умовах різного роду невизначеності. Невизначеність обумовлена 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 кореспонденцій.

					РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		23



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

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		24

цілеспрямованого управління піддається тільки вибір маршруту руху на особистому автомобілі, і то не в повній мірі, а лише за допомогою інформування про дорожню ситуацію і рекомендації маршрутів. Крім цілеспрямованого управління система робить непрямий вплив на всі інші варіанти вибору за допомогою зворотного зв'язку, коли індивідууми співвідносять свої переваги з ситуацією в системі.

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

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

## **2.2 Розрахунок впливу розповсюдження потоків на ефективність функціонування автомобільних шляхів**

Приклад з [37] показує різницю в часі проїзду автомобілів через ділянку звуження при неконтрольованому доступі і при упорядкуванні доступу дозволяє провести аналогію між відмінністю двох типів розподілу потоків по маршрутам і розподілом потоку в часі. Тобто, як у випадку відсутності контролю над розподілом потоків існує деяка «ціна анархії», так і

					РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		25

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

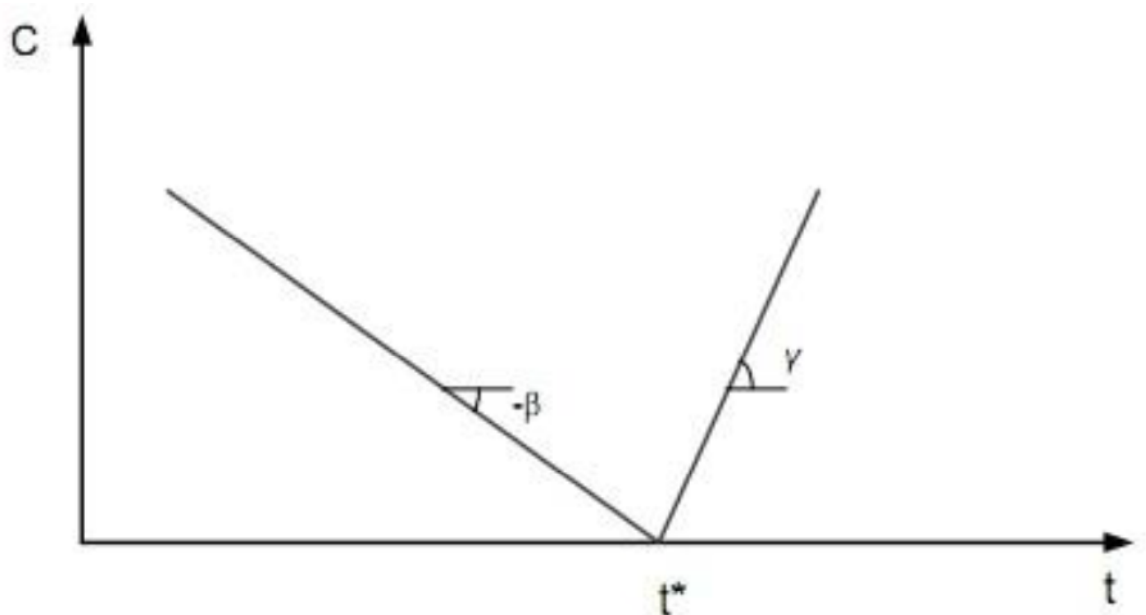


Рисунок 2.1 Вартість відхилення від часу точного прибуття

$C$  - вартість відхилення від часу точного прибуття  $t^*$ ,  $\beta$  і  $\gamma$  - питомі вартості раннього прибуття і запізнення відповідно

У такій ситуації, подібно розподілу за маршрутами відповідно до першого принципу Уордропа, водії діють самостійно, прагнучи мінімізувати загальний час своєї поїздки. При цьому можливий і інший варіант розподілу, коли водії «домовляються» між собою для досягнення мінімуму тривалості поїздки, для чого необхідно не допускати утворення затору. В такому випадку хтось добровільно приїжджатиме дуже рано, хтось пізно, а деяка частина точно вчасно, при цьому вона буде більше ніж в разі відсутності домовленості. Важко собі уявити, щоб в реальному житті мала місце така «домовленість» між водіями. Тоді, як і запропонував У. Вікрам, виникає думка врівноважити загальні вартості поїздок водіїв з допомогою введення додаткової плати: чим ближче час прибуття до бажаного тим вища плата. У такому випадку досягається найбільша вигода: і дорога експлуатується максимально ефективно, і держава отримує додатковий прибуток [64]. Ідея введення мит для отримання оптимального розподілу потоків не припиняла опрацьовуватися і висвітлюватися в літературі протягом усього періоду з моменту її появи, але в останні роки отримала новий розвиток у зв'язку з удосконаленням систем електронної оплати [65], також з огляду на різні додаткові фактори. Наприклад, деякі автори розглядають визначення оптимальних мит з урахуванням просторової топології мережі [66], або з урахуванням руху транспорту загального користування [67]. Можна сказати, що на сьогоднішній день даний напрямок розвитку систем управління дорожнім рухом є одним з домінуючих.

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

					<i>РКБ.ОПАТ-19δ.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		27

явище буде виникати при високій щільності транспортних потоків, коли значення функції VDF починає різко зростати. Характеристики цього явища, в свою чергу, повинні визначатися формою математичного опису функції VDF. Однак всі розглянуті функції VDF ґрунтуються на рівні завантаження, тобто щодо поточного навантаження до пропускної спроможності, яка вважається постійною. Результат отримується при використанні VDF - це або час руху через ділянку мережі одного автомобіля або його середня швидкість. При цьому, функції VDF не дають можливості визначити скільки автомобілів фактично проїхало через ділянку, тобто не описують явище зниження пропускної здатності при переході транспортного потоку з вільного в заторова стан, що є ключовим моментом в наявності ефекту від стримування потоків. Таким чином, аналіз ефективності стримування потоку і визначення величини «коефіцієнта Вікрам» на основі існуючих функцій VDF дасть обмежений результат прямо залежить від поведінки конкретної функції після рівня навантаження 1. Крім того, функція VDF тільки побічно враховує затримки на регульованих перехрестях, а також не враховує вплив завантаженості інших ділянок.

Первісною роллю функцій VDF була приблизна оцінка часу поїздки з того чи іншого маршруту, що було досить для цілей транспортного планування. Більш точний опис процесу руху автомобілів по ділянці дороги і ВДМ слід шукати в теорії транспортних потоків. Класична теорія транспортних потоків, що бере свій початок з роботи Гріншільдса в 1935 р, також не дає задовільного опису явища зниження пропускної здатності при переході транспортного потоку з вільного в заторова стан. Багато дослідників, аналізуючи емпіричні дані про рух потоків, робили спроби описати їх в рамках класичної теорії. В Україні наука про транспортні потоки в значній мірі представлена роботами В.Ф. Бабкова, А.П. Буслаєва, В.В. Зирянова І.А. Лубашевський, В.Н. Луканіна, В.В. Сильянова, В.І. Швецова, М.В. Яшиній, і ін. Так, для класифікації автотранспортних потоків В.Ф. Бабков в 1970-х роках [68] ввів поняття вільного, частково-пов'язаного,

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		28

пов'язаного і насиченого потоків. Ця класифікація також ґрунтувалася на аналізі відповідних фрагментів фундаментальної (основний) діаграми. Труднощі в описі фазових переходів в рамках класичної теорії транспортних потоків привели до появи ряду альтернативних теорій. В роботі [69] описується використання стохастичного підходу до опису транспортного потоку з елементами моделі перколяційного типу. Однак результати експериментів на основі запропонованої клітинної моделі показали, що швидкості потоків монотонно зменшуються при збільшенні сумарної щільності, що не відображаючи явище зниження пропускної здатності, хоча воно згадується в тексті.

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

					<i>РКБ.ОПАТ-19δ.012.ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		29

Феномен зниження пропускної здатності в стані затору згадується у вітчизняній літературі, наприклад при вивченні руху потоків в Лефортовський тунелі [72], однак не вдалося виявити проведених досліджень саме на цю тему. У зарубіжних же джерелах цього явища приділяється набагато більше уваги. Спочатку зусилля дослідників були спрямовані на оцінку зниження пропускної здатності на швидкісних магістралях, наприклад [73]. За даними різних авторів величина зниження пропускної здатності магістралі при утворенні затору може досягати від 5 до 25%, але більшість дослідників сходяться на значенні 9-10%. Слід зазначити, що це збігається з результатами пробного експерименту на імітаційній моделі, описаного в 1 главі (що дозволяє говорити про високу адекватності використовуваного програмного комплексу). Практичним результатом досліджень зниження пропускної здатності є впровадження згаданих в 1 главі систем контролю доступу на магістралі (ramp metering), що показують високу ефективність.

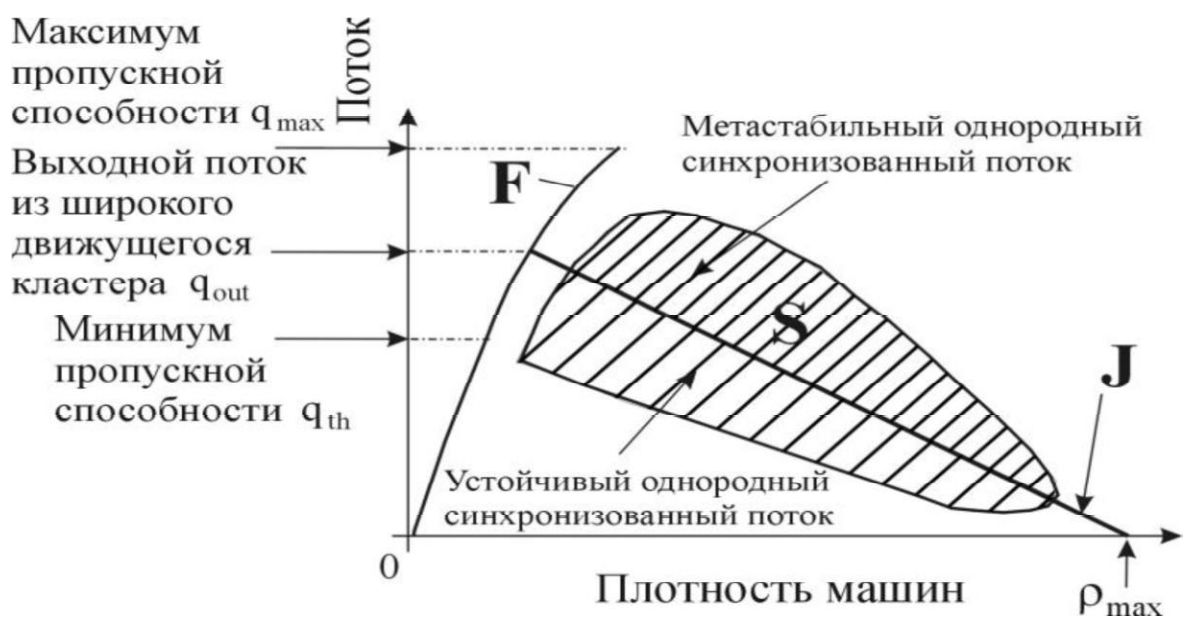


Рисунок 2.2 Три фази транспортного потоку в координатах потік-щільність

Пізніші дослідження зарубіжних авторів спрямовані на вивчення ефекту зниження пропускної здатності на мережі магістралей і на вулично-

дорожньої мережі [74]. Однак, як і раніше не існує єдиної думки щодо поняття «пропускна здатність мережі», що в своїх дослідженнях зазначає і А.Ю. Михайлов [75,76]. При цьому, незважаючи на розбіжності у визначенні поняття пропускної здатності мережі, факт її зниження при перевантаженні підтверджується численними дослідженнями. В рамках даної роботи під пропускною спроможністю мережі будемо розуміти максимальну кількість кореспонденцій, які може обслужити мережу при відомих пропускних спроможностях ділянок і заданої гіпотези зміни матриці кореспонденції згідно з визначенням А.Ю. Михайлова. Для аналізу роботи ВДМ дослідники ввели поняття узагальненої фундаментальної діаграми в цілому по всій мережі, вперше це поняття з'явилося в кінці 60-х рр. 20-го століття [77]. Результати недавніх досліджень доводять, що фундаментальна діаграма для мережі існує. Проводилися як теоретичні дослідження, що визначають параметри фундаментальної діаграми для абстрактної гомогенної мережі, що показують, що вона залежить від топології мережі, параметрів ОДР і не залежить від патернів завантаження [78], так і дослідження емпіричних даних, що говорять, що продуктивність реальної мережі істотно залежить від характеру навантаження [79,80]. Наприклад, в [81] проводиться аналіз поведінки ТП на моделі великого ділянки ВДМ центральній частині Чикаго, і відзначається, що в реальності пропускна здатність мережі виявляється істотно менше теоретичної. Серед зарубіжних дослідників в цій галузі варто виділити Карлоса Даганзо і Хані Махмассані. Питанню зниження пропускної здатності мережі при перевантаженні і мережевий фундаментальної діаграмі за останні роки присвячено багато з робіт даних авторів і їх послідовників. Короткий огляд цих робіт можна знайти в [79,81]. Серед вітчизняних фахівців дослідження мережевої фундаментальної діаграмі проводив В.В. Зирянов для ділянки ВДМ центральній частині Ростова-на-Дону [82], результати досліджень підтвердили існування такої залежності.

Таким чином, на основі аналізу закономірностей поведінки щільних потоків на ВДМ, можна зробити висновок, що можливий вплив розподілу

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		31



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

					<i>РКБ.ОПАТ-19δ.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		32

### 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ РОБОТИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ФОРМУВАННЯМ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ

#### 3.1. Розробка структурної схеми

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 для всієї мережі. У традиційних системах управління, що реагують на результати довільного формування транспортних потоків, поєднання цих двох завдань на великих мережах вельми складно. Досягнення загальномережевого оптимуму вимагає величезних обчислювальних ресурсів, які зі збільшенням розміру мережі ростуть по експоненті, а оптимізація управління на окремих перехрестях і магістралях не приводить до досягнення загального оптимуму. Для вирішення цього завдання в світовій практиці зазвичай застосовують ієрархічну будову системи управління, розбиваючи її на кілька рівнів, як по території охоплення, так і за рівнем деталізації [9,23]. У більшості випадків, для вирішення завдання пошуку оптимальних керуючих впливів використовується деяка модель підконтрольної ВДМ. Системи останнього покоління засновані моделях динамічного перерозподілу (DTA - Dynamic Traffic Assignment), наприклад PTV OPTIMA [30] 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 які прогнозують моделях», в зарубіжній літературі званий MPC (Model Predictive Control) [31]. Цей метод заснований на принципі «горизонт, що рухається», коли з певним часовим 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

					РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		33

розвиватися на початку 60-х років для управління процесами і устаткуванням в нафтохімічному і енергетичному виробництві, для яких застосування традиційних методів синтезу було вкрай утруднено у зв'язку з винятковою складністю їх математичних моделей. У вітчизняній практиці подібний метод застосовується при синтезі алгоритмів керування літальними апаратами. В роботі [12] відзначається, що методи управління на які прогнозують моделях є для складних нелінійних багатовимірних об'єктів управління найбільш економічними в обчислювальному плані і часто поки єдино можливим оптимальним управлінням в реальному часі. Для сфери управління дорожнім рухом застосування даного підходу запропоновано в [33], де описується його застосування для управління світлофорним об'єктом. У зарубіжній літературі MPC підхід стосовно до сфери управління дорожнім рухом отримав більшого розвитку [25].

З огляду на зазначені переваги в управлінні складними нелінійними системами цей метод обраний в якості основи для побудови пропонованої системи управління формуванням транспортних потоків. Таким чином, система управління формуванням транспортних потоків буде складатися з наступних елементів:

- Модель транспортних потоків на підконтрольній ВДМ;
- Блок оцінки цільової функції;
- Блок вироблення управляючих впливів; - Блок оцінки поточного стану.

Взаємозв'язок перерахованих елементів показана на рисунку 3.1.

Модель, як відображення реального об'єкта завжди є компромісом між точністю відтворення поведінки об'єкта і рівнем деталізації. Найбільшу деталізацію і точність забезпечують мікромоделі дорожнього руху, відтворюючи динаміку і особливості поведінки кожного автомобіля в мережі. Застосування моделі такого рівня для управління рухом великої агломерації найбільш ресурсомісткі. Менш складними є клітинні моделі, в яких розташування кожного автомобіля на кожному кроці моделювання

визначається конкретної «кліткою». І найменш складними і ресурсоемними є моделі засновані на фундаментальній діаграмі транспортного потоку, які оперують тільки середніми характеристиками швидкості, щільності та інтенсивності, так звані макромоделі або LWR-моделі (аббревіатура від прізвищ основоположників моделей такого типу Лайтхілла, Уізема і Річардса). Макромоделі в контурі управління широко застосовуються в традиційних системах управління дорожнім рухом, таких як OPAC, PROLYN, CRONOS, RHODES, MOTION та ін., Де керуючі впливу носять колективний характер, тобто призначені не окремому автомобілю, а їх певної просторово-часової сукупності. У запропонованій же системі, що управляють якраз спрямовані на кожен окремий автомобіль і підвищення якості прогнозування дозволить підвищити ефективність роботи системи. Ймовірно найкращим варіантом при практичному застосуванні системи буде наявність в контурі управління мікромоделі підконтрольної ВДМ зразок Aimsun Online [6]. Хоча моделі такого типу найбільш вимогливі до обчислювальних ресурсів, навіть сучасні можливості обчислювальних пристроїв, наприклад суперкомп'ютерів дозволяють реалізувати можливість розрахунків в режимі онлайн, а якщо врахувати тенденції їх розвитку, то можна сказати, що обчислювальні ресурси не будуть грати обмежує роль.

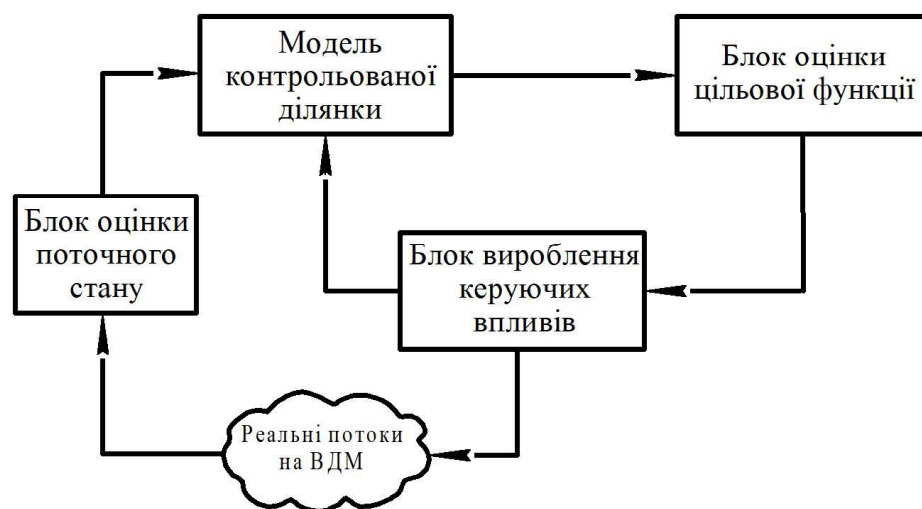


Рисунок 3.1 Структурна схема системи управління формуванням транспортних потоків

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

У традиційних системах управління дорожнім рухом цільової функцією можуть бути різні показники, як приватні, так і інтегральні, 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 більш підходить для економічної оцінки ефективності ОДР в масштабах цілої ВДМ або міського району. У разі насичених мереж, коли завданням управління стає мінімізація ймовірності виникнення затору, найбільш прийнятними для управління мережею є показники, засновані на довжині черги.

Метою пропонованої системи є недопущення утворення заторів. Виходячи з цього логічно припустити, що в якості цільової функції має використовуватися умова неперевикнення інтенсивністю на кожній ділянці його пропускної здатності. Однак, по-перше, потік на межі пропускної здатності вкрай нестабільний і різко зростає ймовірність утворення затору, по-друге, продуктивність ВДМ в цілому не є максимальною в такому режимі. Необхідне відповідне підтримувати потік на рівні трохи нижче пропускної здатності, що забезпечує стабільність і максимальну продуктивність. Найбільш часто зустрічається оцінка такого стану потоку, коли інтенсивність руху складає 85-90% від пропускної здатності. При цьому строгих обґрунтувань цього значення в літературі не зустрічається. Очевидно, що таке порогове значення не може бути однаковим для всіх випадків, тому що пропускна здатність залежить від багатьох факторів. Тоді за доцільне проводити експериментальну оцінку такого порогового рівня завантаження на моделі. При цьому в якості показника використовувати не інтенсивність руху як таку, а різницю між вхідним і вихідним потоком, тобто допустиму кількість автомобілів на перегоні ВДМ, що по суті є щільністю потоку в абсолютному значенні.

Під припустимою щільністю в свою чергу пропонується розглядати щільність, при якій досягається стійкий максимум продуктивності ВДМ при поточному шаблоні навантаження. На перший погляд продуктивність ВДМ може бути оцінена транспортної роботою. Показник транспортної роботи для економічної оцінки стану ОДР запропонований в [97] в наступному вигляді:

$$W = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m N_{ij} t_{ij} l_{ij}, \quad (3.1)$$

де  $n$  - число кореспонденцій;  $m$  - число маршрутів руху, що реалізують кореспонденцію  $j$ ;  $N$  - число транспортних засобів, що пройшли в годину пік за маршрутом  $i$  кореспонденції  $j$ , прів.ед .;  $t_{ij}$  - середні витрати часу на реалізацію кореспонденції  $i$  при використанні маршруту  $j$ , ч;  $l_{ij}$  - протяжність маршруту  $i$  кореспонденції  $j$ , км.

Як впливає з формули 3.1 значення транспортної роботи ВДМ безпосередньо пов'язано з характером навантаження. При змінах в матриці кореспонденцій змінюються маршрути слідування транспорту, завантаження окремих ділянок і їх вплив один на одного, а отже і загальні показники функціонування ВДМ. Щоб оцінити транспортну роботу потрібні дані про поточну матриці кореспонденцій, використовуваних маршрутах, частці потоків рухаються по цих маршрутах і швидкостях руху автомобілів. В сучасних умовах збір таких даних для великих ділянок мережі досить проблематичний, для оцінки транспортної роботи в кожен період потрібно проводити окремі масштабні обстеження. У запропонованій системі всі автомобілі повинні бути обладнані GPS/ГЛОНАСС передавачами і повинні повідомляти відомості про пункти призначення, це може дозволити отримувати вичерпні дані для розрахунку транспортної роботи безперервно.

Однак, показник транспортної роботи запропонований в [7] не цілком адекватно описує продуктивність ВДМ. Перемноження числа автомобілів на годину на час у дорозі і довжину цього шляху дає розмірність автомобілі-

кілометрів. У такому вигляді він успішно використовується для опису продуктивності рухомого складу в вантажних і пасажирських перевезеннях. У процес функціонування ВДМ при перевантаженні відбувається спад інтенсивності і зростання часу руху, при цьому зростання часу відбувається значно швидше. Оскільки протяжності маршрутів кореспонденцій залишаються постійними, вплив на показник транспортної роботи надають інтенсивність минулого потоку і час витрачений на проїзд. Як показано в розділі 2, функціонування ділянки дороги і ВДМ в цілому може бути описано подібним чином за допомогою фундаментальної діаграми. Розглянемо поведінку показника транспортної роботи на прикладі абстрактного ділянки дороги (або ВДМ). На рисунку 3.2 представлені графіки фундаментальної діаграми (графік а), функції VDF, що відбиває витрати часу (графік б), і графік транспортної роботи (в), отриманий перемноженням значень інтенсивності потоку і часу руху відповідно до формули 3.1. Після перевищення пропускної спроможності час руху різко зростає, фактична інтенсивність знижується, але не так різко, при цьому максимальне значення результуючого графіка транспортної роботи знаходиться в зоні заторова стану транспортних потоків. Таким чином, даний показник не підходить для визначення цільової функції пропонованої системи.

Очевидно, що максимальна продуктивність мережі повинна знаходитися в зоні вільного стану транспортного потоку (ліва частина діаграми). Для опису продуктивності витрати часу на рух необхідно не максимізувати, як в розглянутому показнику, а навпаки мінімізувати. Мінімуму витрат часу буде відповідати максимальна швидкість руху. Таким чином, пропонується замість витрат часу включати в розрахунок показника ефективності швидкість руху. Такий показник, який має розмірність автомобілі-кілометрів на годину, не зустрічається у вітчизняній практиці при оцінці ефективності транспортних мереж. У зарубіжних джерелах він з'явився в кінці 90-хх рр. минулого століття, для оцінки продуктивності окремих ділянок магістралей [8], де він розглядається як аналогія потужності

в механічних системах. Пізніше такий показник стали застосовувати для оцінки ефективності ВДМ в цілому при реалізації різних заходів [9]. Для оцінки продуктивності ВДМ даний показник застосовується в роботах пов'язаних з мережевої фундаментальної діаграмою.

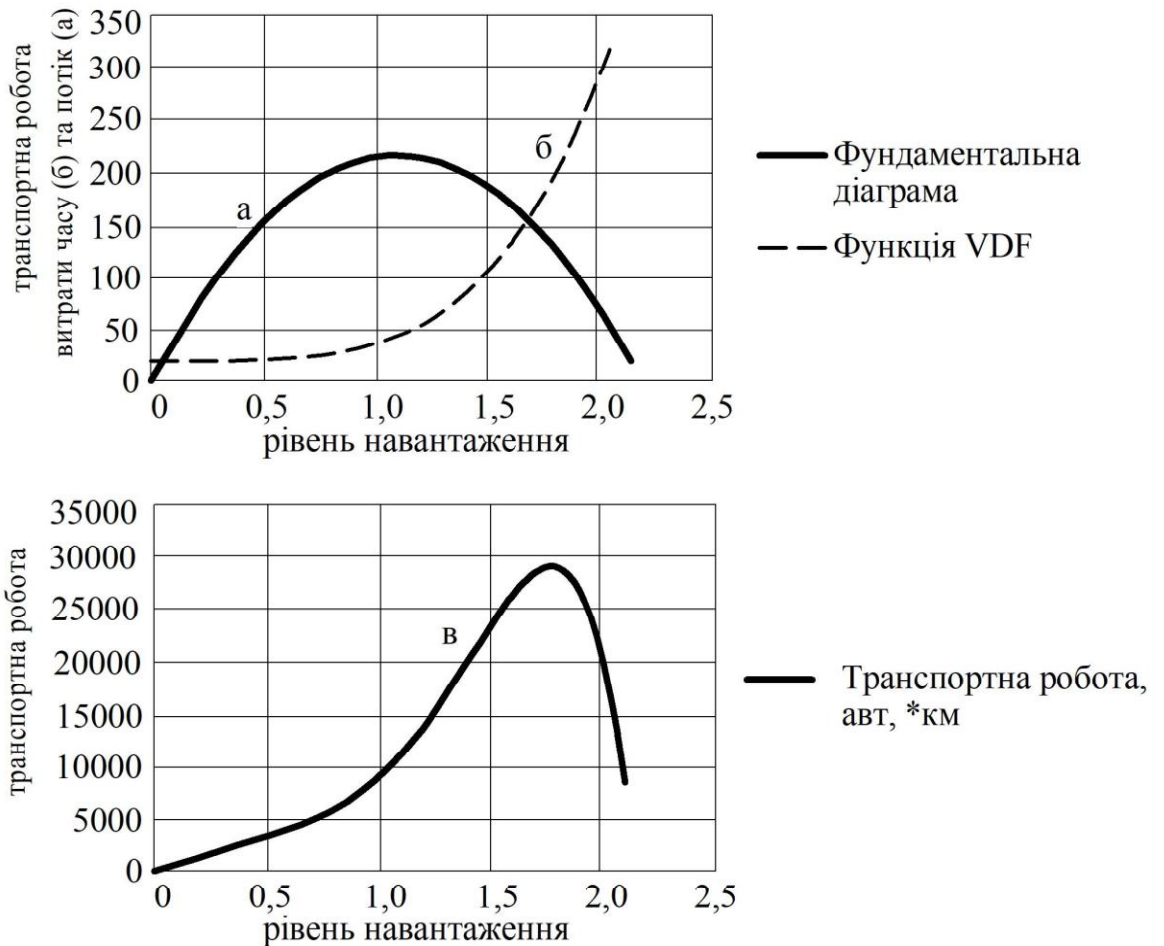


Рисунок 3.2 Зміна транспортної роботи при завантаженні ВДМ

Слід зазначити, що підсумовування значення показника для кожного маршруту кожної кореспонденції не дає можливості оцінити максимальну ефективність роботи мережі, оскільки для кожного з шляхів будь-якої кореспонденції існують деякі «вузькі місця», де і буде відбуватися зниження продуктивності, в той час як інші ділянки можуть бути використані іншими кореспонденціями. Для подолання цього недоліку пропонується підсумувати показник по кожній ділянці мережі. Оскільки характер навантаження впливає на продуктивність мережі, шуканий показник повинен бути оцінений для



кожного шаблону навантаження на ВДМ. Зміна продуктивності в залежності від зростання навантаження може бути проаналізовано за допомогою засобів моделювання. Поступово збільшуючи рівень навантаження відповідно до обраного шаблону можна визначити момент 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. В такому випадку пропонується перед підсумовуванням відстежувати зміни показника для кожної ділянки  $i$  в разі його 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 або загального показника продуктивності будуть граничними, перевищення яких спричинить зниження ефективності роботи ВДМ.

Таким чином, розрахунок показника продуктивності ВДМ пропонується проводити наступним чином:

$$W^* = \sum_{i=1}^k N_k v_k \quad (2)$$

де  $k$  - число ділянок;  $N$  - число транспортних засобів, що пройшли по ділянці  $k$ , прів.ед .;  $v_k$  - середня швидкість проходження ділянки  $k$  км / ч.

Слід зазначити, що використовуваний показник  $W^*$ , хоча і має ту ж розмірність (авт\*км/год), дещо відрізняється від використовуваного в роботах пов'язаних з мережевої фундаментальної діаграмою [79,81,82]. Оскільки в даному випадку оцінка проводиться за деякий період, необхідно помножити фактично минулий потік на середню швидкість руху, на відміну від випадку коли оцінка проводиться за 1 годину, як в зазначених роботах, де інтенсивність (авт./год) перемножується на довжини ділянок (км).

					РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ	Лист
						40
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Також як і у випадку з потоком на межі пропускної здатності, показник максимуму продуктивності повинен володіти стійкістю, тобто підтримуватися протягом тривалого періоду часу, достатнього для неодноразової реалізації всіх кореспонденцій.

Алгоритм проведення оцінки допустимих значень щільності потоків  $p_i$  наведено на рисунку 3.3. Вихідними даними для оцінки  $p_i$  є:  $n$  - число перегонів розглянутої ВДМ,  $Q$  - шаблон навантаження (матриця кореспонденцій),  $k$  - коефіцієнт збільшення навантаження,  $t$  - період дослідження. При поступовому збільшенні навантаження  $Q$  на величину  $Q \cdot k$  в процесі моделювання визначається показник продуктивності для кожного перегону ВДМ за формулою 2. Моделювання для кожного кроку збільшення навантаження проводиться протягом періоду  $t$ , достатнього щоб оцінити стійкість. Якщо при черговому збільшенні навантаження на будь-якому з перегонів спостерігається спад продуктивності, то для нього фіксується допустима щільність на рівні попереднього кроку. Далі оцінюється сумарна продуктивність всієї розглянутої ВДМ, при її зниженні в порівнянні з попереднім кроком, фіксуються показники для інших перегонів ВДМ.

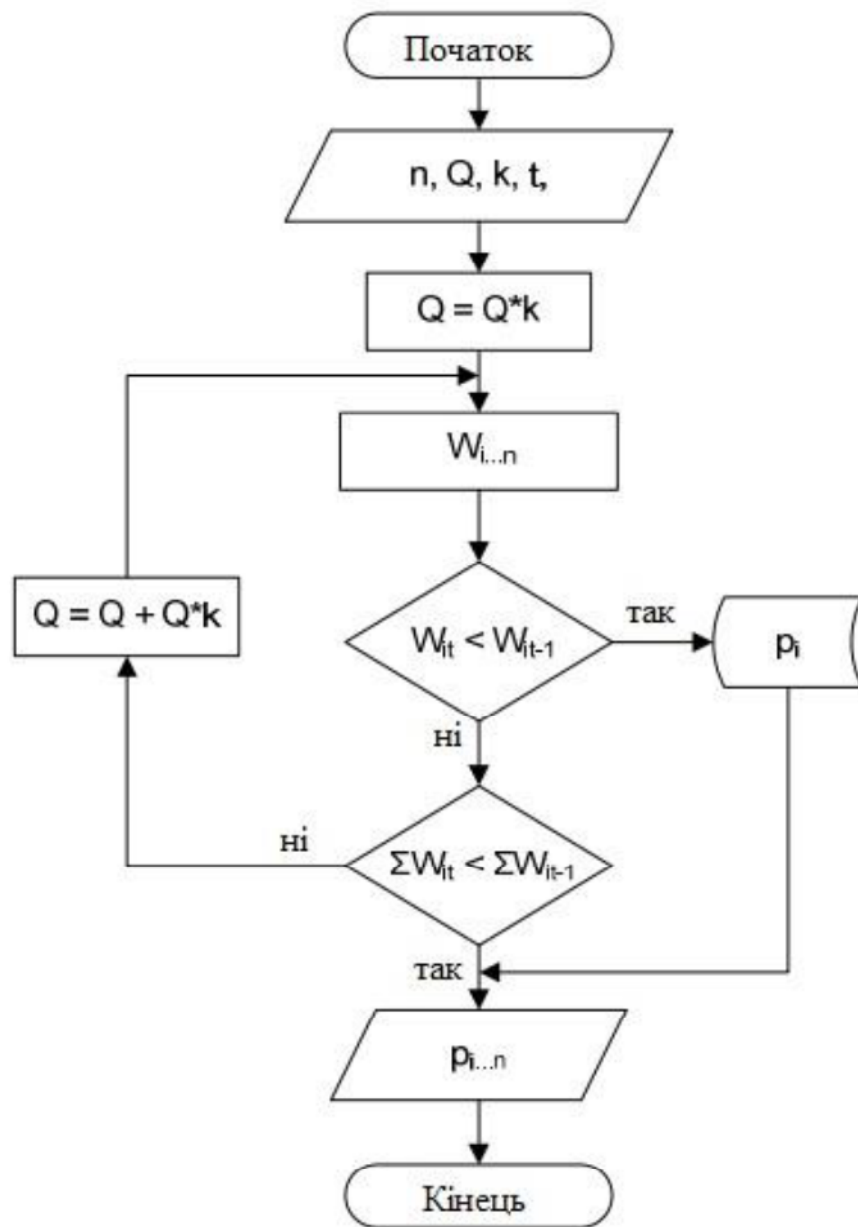


Рисунок 3.3 Алгоритм оцінки допустимої щільності на кожному перегоні ВДМ

Слід зазначити, що в такому вигляді система визначить параметри, які відповідають конкретному шаблону навантаження, який не може повністю повторюватися кожен день. Для обліку варіацій в скоєних кореспонденціях система повинна бути здатна швидко оцінити наскільки нова нехарактерна для поточного шаблону кореспонденція може вплинути на ситуацію. Також для підвищення точності розрахунку і підсумкової ефективності слід

розділяти допустимі потоки для кожного з напрямків на перехрестях. Детальне опрацювання подібних питань вимагає проведення додаткових досліджень.

Таким чином, метою управління є недопущення перевищення значень щільності потоку на якій-небудь ділянці ВДМ, які відповідають максимальній продуктивності всієї ВДМ в даних умовах. Для формалізації цільової функції необхідно виявити керовані змінні. Остаточне формулювання цільової функції наведена в наступному пункті, після розгляду керуючих впливів.

Основним керуючим впливом в запропонованій системі є затримка ТС шляхом прямого індивідуального заборони на виїзд з місця парковки, переданого через спеціальне бортове пристрій. Введемо поняття «тимчасова траєкторія», яке показує на якій ділянці мережі буде знаходитися ТЗ в кожен момент часу. Необхідність затримки виникає якщо при накладенні розрахованої тимчасової траєкторії руху транспортних засобів на дані отримані з моделі буде перевищена допустима щільність потоку на якій-небудь ділянці за маршрутом руху ТЗ, який також розраховується системою. У разі такого перевищення відбувається зрушення тимчасової траєкторії руху транспортних засобів на один крок. Потім знову оцінюються значення щільності потоку. Зрушення тимчасової траєкторії триває до тих пір поки при її накладенні на дані з моделі щільність на кожній ділянці маршруту даного ТЗ не буде перевищувати встановленого граничного значення. Відповідно, кількість кроків на яке була зрушена тимчасова траєкторія ТЗ до того як граничне значення щільності перестало бути перевищеним, і буде величиною необхідної затримки даного ТЗ.

Функціонування ВДМ істотно залежить від діючих режимів світлофорного регулювання. Безсумнівно, при практичній реалізації системи доцільно включити оптимізацію режимів світлофорного регулювання в контур управління. Завдання оптимізації режимів світлофорного регулювання є самостійною проблемою і має досить добре розвинені методи

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		43

вирішення, в тому числі спільно з розподіл потоків по мережі. Тому в рамках цього дослідження вважатимемо, що режими світлофорного регулювання в мережі входять до складу вихідних даних і не підлягають зміні.

Таким чином, під цільовою функцією розуміється мінімум суми запропонованих затримок ТЗ, за умови недопущення перевищення значень щільності потоку на якій-небудь ділянці ВДМ, які відповідають максимальній продуктивності всієї ВДМ в даних умовах. У формалізованому вигляді це буде виглядати наступним чином:

$$\sum_{j=1}^M t_j \rightarrow \min \quad 3.3)$$

за умови

$$(p_i - p_{i \max}) \leq 0 \quad 3.4)$$

де  $t$  - величина затримки для заявки на поїздку  $j$ ,  $M$  - загальне число заявок,  $p_i$  - прогнозована щільність на перегоні  $i$ ,  $p_{i \max}$  - гранична величина щільності, отримана в результаті попередньої оцінки.

Все частіше в сучасних системах управління дорожнім рухом оцінка поточної ситуації на підконтрольній ВДМ здійснюється не за допомогою стаціонарних детекторів транспорту, а шляхом відстеження переміщення ТЗ мають спеціальне обладнання, наприклад супутникові передавачі [100]. У запропонованій системі необхідною умовою є обладнання кожного ТЗ таким передавачем. Сучасні технології супутникового позиціонування з використанням наземних засобів коригування дають можливість визначати положення об'єктів з точністю до декількох сантиметрів. Для цілей пропонованої системи достатньо інформації про знаходження ТЗ на тій чи іншій ділянці ВДМ, однак для забезпечення деяких інших можливостей, наприклад контролю за дотриманням правил дорожнього руху, або для

розслідування ДТП необхідна точність повинна становити не більше 20-30 см.

Таким чином, оцінка поточного стану об'єкта управління буде здійснюватися на основі даних супутникового і наземного позиціонування з високою точністю. Це дозволить отримувати вичерпну інформацію про ситуацію на ВДМ.

### **3.2. Блок-схема алгоритму роботи системи управління формуванням транспортних потоків**

Згідно із запропонованою структурній схемі системи управління формуванням транспортних потоків був розроблений алгоритм її роботи, представлений на рисунку 3.4. В якості вихідних даних приймається ВДМ з її характеристиками, в тому числі допустимими значеннями щільності потоків на кожній ділянці, крок проведення перерахунку прогнозу розвитку транспортної ситуації  $T_p$ , момент часу проведення наступного розрахунку  $T_c$ , спочатку рівний 0.

З появою кожного нового ТЗ в мережі (нової заявки на поїздку) для неї призначається час затримки  $t$ , визначається найкоротший в поточних умовах маршрут руху і заснована на поточних даних тимчасова траєкторія руху ТЗ по цьому маршруту. Із сукупності таких траєкторій формується модель розвитку транспортної ситуації на всій мережі. Таким чином, можна спрогнозувати скільки ТС буде перебувати на якій-небудь ділянці ВДМ на кожному кроці часу. Відповідно, якщо при накладенні тимчасової траєкторії нового ТЗ на дані з моделі розрахункова щільність  $\rho_i$  перевищить максимальну щільність  $\rho_{max}$  на якомусь з ділянок і виникне ймовірність утворення затору, то дане ТЗ підлягає затримці на один крок (наприклад 1 секунду), потім показники щільності знову порівнюються. Коли  $\rho_i$  перестане перевищувати  $\rho_{max}$  кількість кроків зсуву визначить необхідний час затримки  $t$  для даного ТЗ. Його траєкторія з необхідним зсувом складається з даними з моделі для врахування при обробці наступних заявок.

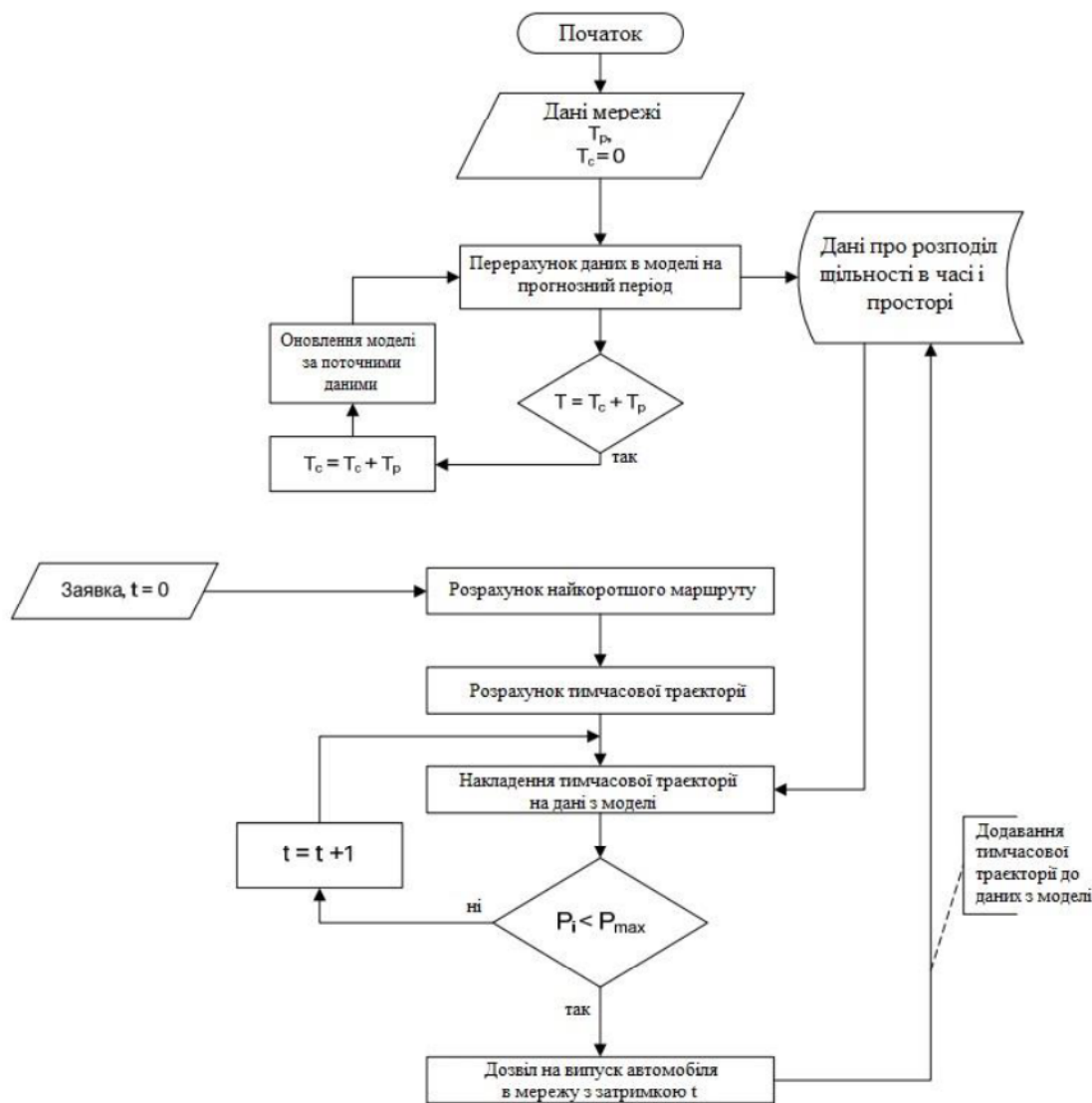


Рисунок 3.4 Алгоритм роботи запропонованої системи управління формуванням транспортних потоків

### 3.3 Реалізація основного алгоритму роботи системи управління формуванням транспортних потоків

Для проведення розрахунків в програмному комплексі AIMSUN була розроблена підпрограма на мові програмування Python, що дозволяє впровадити необхідну логіку управління. У проведених розрахунках управління піддавалося тільки час доступу до мережі, маршрути руху призначалися вбудованими засобами програмного комплексу. Відповідно до запропонованого підходу управління на які прогнозують моделях, підпрограма будувала власну модель розвитку ситуації на даній мережі. Ця

модель являє собою сукупність вже згаданих тимчасових траєкторій, що дозволяють оцінити число автомобілів на кожному перегоні ВДМ відповідно до середніх фактичними часом проїзду. Розроблена підпрограма працює наступним чином. При запуску імітації підпрограма становить модель мережі на основі часів руху в вільних умовах, для перегонів головної дороги перед нерегульованими перехрестями цей час залежить тільки від довжини і дозволеної швидкості, для перегонів другорядної дороги час руху збільшується з допомогою деякого коефіцієнта. Час руху на перегонах перед регульованими перехрестями визначається з урахуванням тривалості циклу і фази регулювання. Таким чином, на момент запуску імітації побудована найпростіша модель, що дозволяє оцінити час руху з того чи іншого маршруту.

Обсяг попиту на поїздки задається за допомогою матриць кореспонденцій, інтервали між появою автомобілів визначаються на основі обраного закону розподілу внутрішніми засобами програмного комплексу. У даній ситуації поява автомобіля розглядається як заявка на поїздку, для якої буде визначатися необхідність і тривалість затримки. З'являється автомобіль вже має набір характеристик, має пункт призначення і маршрут руху розрахований внутрішніми засобами програмного комплексу. Тому для реалізації логіки управління припускає затримку автомобіля на місці паркування до виїзду на ВДМ, в моделі були створені спеціальні буферні ділянки на яких відбувається накопичення затриманих автомобілів. Приклад такої ділянки представлений на рисунку 3.5.



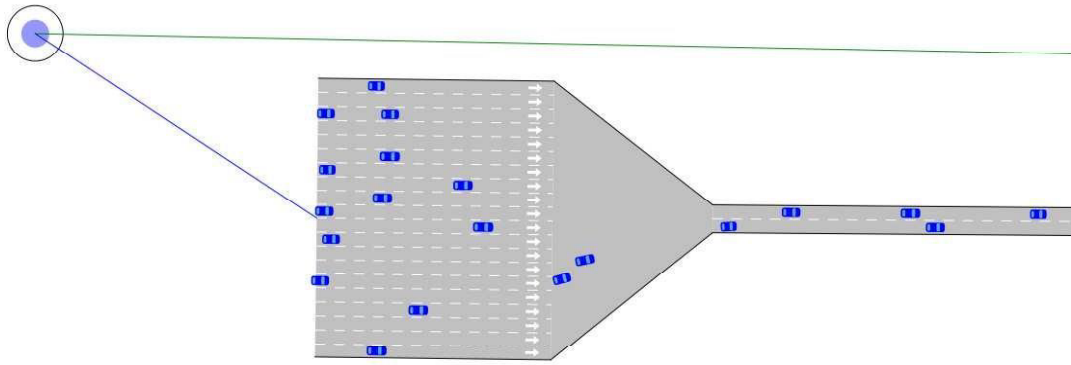


Рисунок 3.5. Буферний ділянку для накопичення затриманих автомобілів використовуваний в моделі

При появі транспортного засобу підпрограма зчитує інформацію про його пункті призначення і маршрут руху, далі прораховує його тимчасову траєкторію, тобто інформацію про те, на якому перегоні мережі буде знаходитися цей автомобіль згідно розрахованим даними про часи проїзду. Дані про цю траєкторію додаються в модель розглянутої мережі і автомобіль отримує дозвіл на рух. Зчитуючи таким чином інформацію про пункти призначення і маршрутах руху кожного автомобіля підпрограма формує модель розвитку транспортної ситуації. Далі згідно з принципом управління на які прогнозують моделях з певною 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 перебуває в мережі заново розраховується його траєкторія на основі оновлених даних про часи руху. Таким чином, внутрішня модель приводиться у відповідність з реальною ситуацією, що дозволяє точніше прогнозувати рух нових заявок по мережі. Періодичність перерахунку залежить від точності внутрішньої моделі, в проведених експериментах крок перерахунку варіювався від 4 до 10 хвилин.

Для кожної нової заявки при розрахунку тимчасової траєкторії і її накладення на дані внутрішньої моделі, що отримується число автомобілів на

перегонах в кожен момент часу порівнюється з розрахованими раніше допустимими значеннями. Якщо отримане значення перевищує допустимий, 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 даного автомобіля. Це значення присвоюється автомобілю як атрибут, а його траєкторія зі зрушенням додається у внутрішню модель і враховується при розрахунку затримок для наступних заявок. Підпрограма відстежує коли закінчиться призначений час затримки і випускає автомобіль. Затримка автомобілів в даному випадку відбувається за допомогою призначення автомобілю незначній швидкості руху (0,1-0,5 км / ч). Значення розрахованих затримок підсумовуються для визначення підсумкових показників роботи. Експеримент порівнює результати функціонування різних фрагментів ВДМ при наявності і відсутності описаного управління за критерієм сумарного часу перебування автомобілів в мережі. Кількісні показники сумарного перебування автомобілів в мережі виводяться вбудованими засобами програмного комплексу, при цьому допоміжні буферні ділянки не беруть участі в зборі статистики. Значення загальної примусової затримки підсумовуються з даними за часом перебування автомобілів в мережі. Експеримент порівнює результати функціонування різних фрагментів ВДМ при наявності і відсутності описаного управління за критерієм сумарного часу перебування автомобілів в мережі. Кількісні показники сумарного перебування автомобілів в мережі виводяться вбудованими засобами програмного комплексу, при цьому допоміжні буферні ділянки не беруть участі в зборі статистики. Значення загальної примусової затримки підсумовуються з даними за часом перебування автомобілів в мережі. Розрахунок порівнює результати функціонування різних фрагментів ВДМ при наявності і відсутності описаного управління за критерієм сумарного часу перебування автомобілів в мережі. Кількісні показники сумарного перебування автомобілів в мережі виводяться вбудованими засобами

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		49

програмного комплексу, при цьому допоміжні буферні ділянки не беруть участі в зборі статистики. Значення загальної примусової затримки підсумовуються з даними за часом перебування автомобілів в мережі.

Для всіх розрахованих об'єктів застосовувався один профіль зміни навантаження імітує ранкову годину пік: з інтервалом 20 хв навантаження зростала від 50% до 120%, а потім знижувалася, загальний період моделювання склав 4 години. Період максимального навантаження в 120% становив 40 хв. За 100% був прийняті потоки відповідні максимуму продуктивності, що оцінюється на підготовчому етапі.

Перший об'єкт являє собою ділянку дороги має спочатку дві смуги для руху потім звужується до однієї смуги. Зображення моделі ділянки приведено на рисунку 3.6.



Рисунок 3.6. ділянка звуження

Нерегульоване перехрестя є перетин двох доріг під прямим кутом. Кожна дорога має по дві смуги руху в кожному напрямку, на перехресті дозволені всі маневри, крім розвороту. Співвідношення обсягу попиту на головній дорозі і другорядною 95/5. Співвідношення прямого і поворотних потоків на всіх підходах однакове і становить 80% прямо, 15% направо і 5% наліво. Зображення моделі нерегульованого перехрестя наведено на рисунку 3.7.

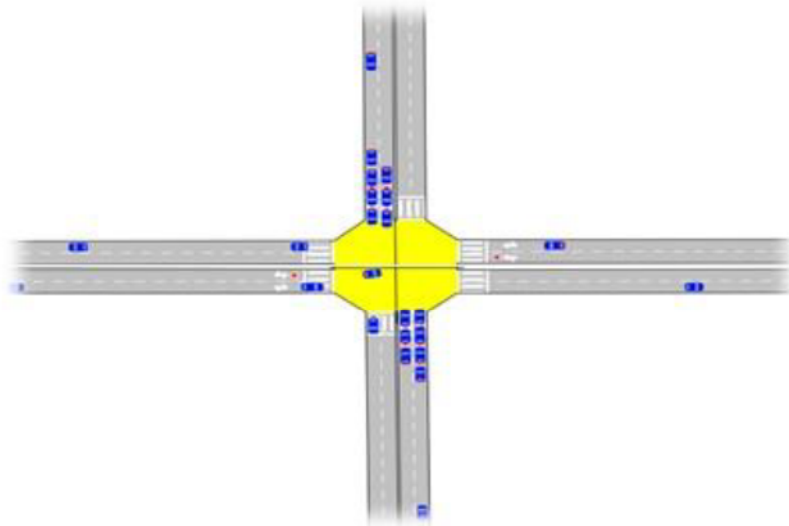


Рисунок 3.7. Нерегульоване перехрестя

Регульоване перехрестя утворений перетином двох вулиць під прямим кутом, кожна вулиця має по 3 смуги руху. На перехресті дозволені всі напрямки руху, крім розвороту, рух прямо дозволено з усіх смуг, поворотні потоки рухаються з крайніх смуг. Співвідношення обсягу навантаження по підходах однакове. Співвідношення прямого і поворотних потоків на всіх підходах також однакове і становить 80% прямо, 15% направо і 5% наліво. Режим регулювання має 2 фази тривалістю по 45 с, з яких 36 з основної такт і 9 з проміжний. Загальна тривалість циклу становить 90 с. Зображення моделі регульованого перехрестя наведено на рисунку 3.8.

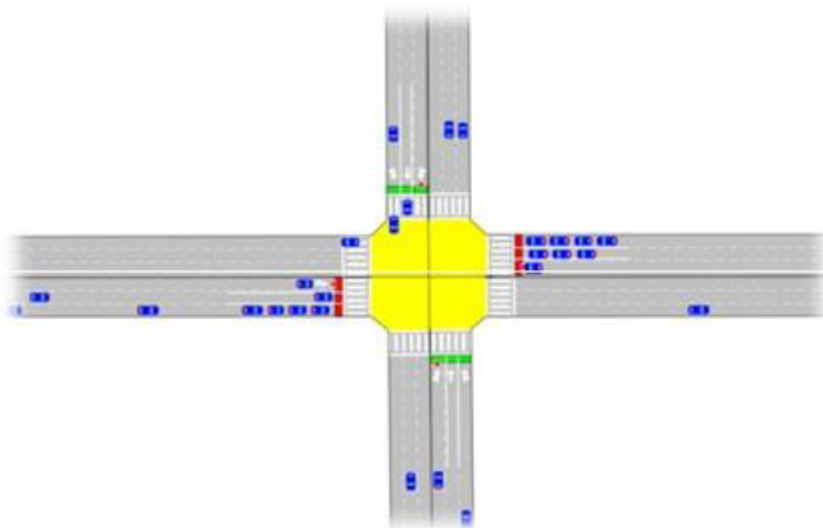


Рисунок 3.8. Регульоване перехрестя

Кільцевий перетин утворено двома шляхами мають по 3 смуги руху в кожному напрямку, діаметр центрального острівця складає 50 м. Кільцева проїжджа частина також має 3 смуги руху. Пріоритет мають автомобіль рухаються по кільцю. Співвідношення обсягу навантаження по підходах однакове. Зображення моделі кільцевого перетину наведено на рисунку 3.9.

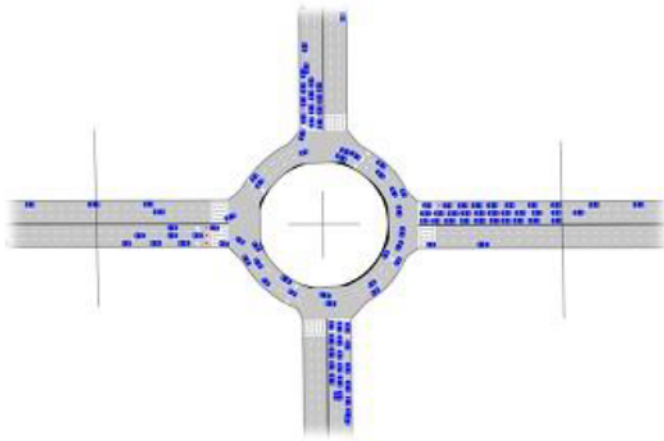


Рисунок 3.9 Кільцевий перетин

Розв'язка в різних рівнях є перетин двох магістралей мають 2 смуги руху по основному ходу в кожному напрямку. У місцях поворотних з'їздів проїжджа частина уширюється до 3 смуг. Радіус внутрішніх лівоповоротних з'їздів становить 60 м. Співвідношення обсягу навантаження по підходах однакове. Співвідношення прямого і поворотних потоків на всіх підходах також однакове і становить 80% прямо, 15% направо і 5% наліво. Зображення моделі розв'язки в різних рівнях наведено на рисунку 3.10.

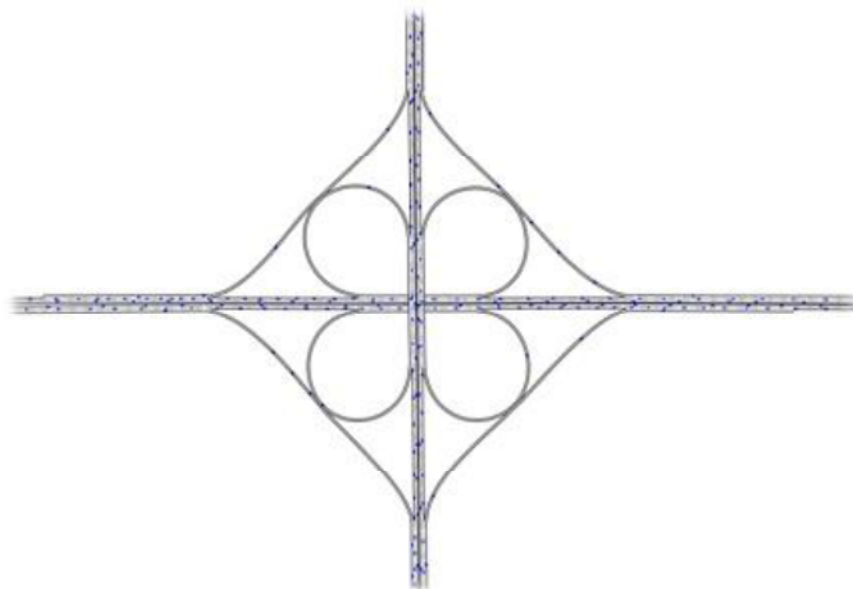


Рисунок 3.10 Розв'язка типу “лист конюшини”

Усереднені значення по всім прогонам зі зазначеними об'єктами наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Результати розрахунку для різних об'єктів

Ділянка ВДМ	сумарний час в дорозі до, с	сумарний час в дорозі після, с	зниження в%
Звуження з 2 до 1 смуги	1392126	657084	<b>52,8</b>
нерегульоване перехрестя	4508015	4453919	<b>1,2</b>
регульоване перехрестя	4545382	4568109	<b>-0,5</b>
кільцевий перетин	16216521	10508306	<b>35,2</b>
Розв'язка типу «лист конюшини»	15406458	8072984	<b>47,6</b>

Окремо взяті регульований і нерегульований перехрестя не показали зниження затримок. У зв'язку з цим інтерес представляє проведення даного

розрахунку з деяким ділянкою ВДМ має кілька перетинів різних типів. Для експерименту було обрано фрагмент ВДМ Центрального району включає 1 кільцеве, 15 нерегульованих і 25 регульованих перетинів. Дані по параметрам регулювання і навантаженні на дану мережу взяті з матеріалів виконаного раніше проекту щодо вдосконалення ОДР в даному районі. Навантаження відповідає вечірнього часу пік з 18.00 до 19.00. Зображення моделі досліджуваного фрагмента ВДМ наведено на рисунку 3.11.

Результат розрахунку з фрагментом реальної ВДМ показав зниження сумарного часу перебування в мережі на 18,1%. Проведені розрахунки носять характер попередньої оцінки, їх чисельні результати досить наближено відображають можливу ефективність запропонованої системи. Це обумовлено як похибками в відтворенні поведінки транспортних потоків програмним комплексом, так і недосконалістю програмної реалізації запропонованого методу. Однак, отримані результати показують значний позитивний ефект і спільно з теоретичним обґрунтуванням можуть служити переконливим підтвердженням ефективності запропонованої системи управління.

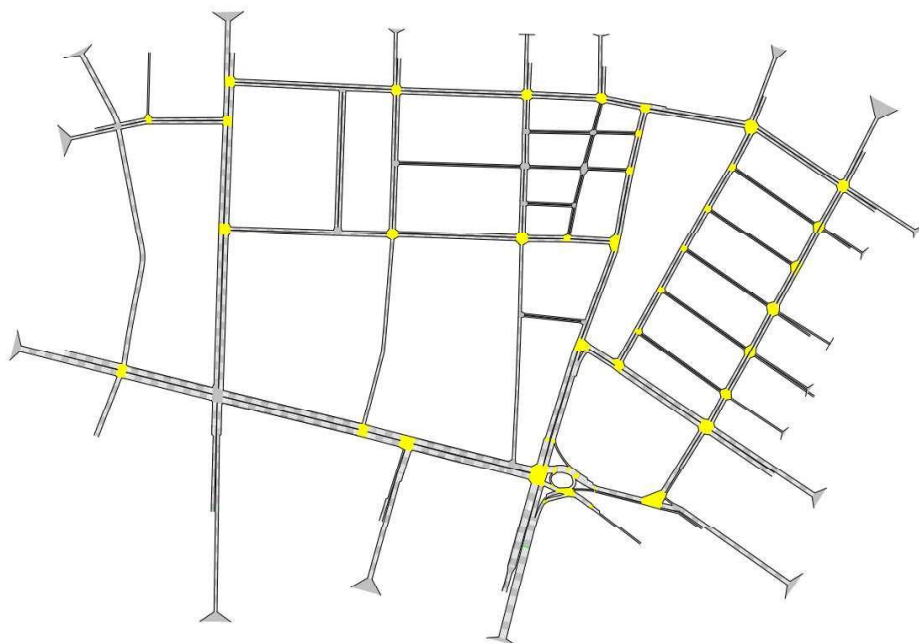


Рисунок 3.11. Досліджуваний фрагмент ВДМ

### 3.4. Технологія роботи системи

При розгляді питання практичного впровадження пропонованої системи управління формуванням транспортних потоків слід більш детально описати технологію і особливості її роботи.

Як уже зазначалося, ключовою відмінністю пропонованої системи є перехід від передачі керуючих впливів транспортному потоку в цілому до управління на рівні окремого ТЗ. Також система передбачає регулювання доступу до ВДМ до початку руху автомобіля від місця парковки. Отже необхідно законодавчо зобов'язати кожного водія перед вчиненням поїздки подавати заявку із зазначенням пункту призначення. При надходженні заявки в центр управління вона обробляється відповідно до розробленого алгоритму, результатом обробки є час виїзду на ВДМ і маршрут руху. Водій зобов'язаний слідувати вказівкою системи по часу виїзду і маршруту руху. Таким чином, можна сказати, що у кожного водія з'являється «індивідуальний світлофор». За порушення заборони на виїзд і не погодженого відхилення від маршруту повинен бути передбачений значний штраф. У цьому питанні виникає складність в ідентифікації порушника, оскільки для охорони прав і свобод особистості встановлені прилади можуть не містити інформації про власника автомобіля. У такій ситуації можна включити до складу даних про автомобіль його VIN номер, на підставі якого за спеціальним запитом до відповідних інстанцій вже можна буде визначити власника.

Можливість бронювання часу виїзду заздалегідь повинна бути виключена, для цього слід передбачити обмежений час дії дозволу на поїздку (наприклад 5 хв), після закінчення якого при відсутності переміщення автомобіля заявка анулюється. Однак при виникненні екстреної ситуації (загроза життю, здоров'ю або майну) слід передбачити можливість негайного виїзду. Водій може повідомити про екстрену ситуацію в центр управління натиснувши спеціальну кнопку і почати рух. У разі натискання цієї кнопки з



водієм зв'яжеться диспетчер і вкаже подальші дії, також в цьому випадку водій повинен буде підтвердити факт екстреної ситуації.

Транспорт загального користування, в тому числі таксі, а також автомобілі спецслужб мають безумовний пріоритет доступу на ВДМ.

Процес впровадження системи доцільно розбити на етапи, першим етапом може бути робота системи в режимі рекомендацій з паралельним оснащенням всього парку ТЗ бортовими пристроями та розгортанням систем позиціонування і зв'язку. Потім директивне управління доступом може застосовуватися на окремих магістралях і фрагментах ВДМ. На цих етапах буде проводитися збір статистичної інформації, що дозволяє проаналізувати роботу системи і підготувати базу для переходу до останнього етапу, на якому директивного управління доступом і вказівки маршруту поширяться на всю ВДМ агломерації.

Одними з найважливіших критеріїв оцінки функціонування будь-якої транспортної системи є її надійність і стійкість [105]. Надійність, стосовно до системи управління дорожнім рухом означає здатність забезпечити допустимий розкид у часі пересування при схожих шаблонах навантаження. Стійкість характеризує здатність системи нівелювати випадкові коливання різних параметрів. Ймовірності виникнення так званого перенасичення ділянок ВДМ або мережевих заторів є одними з найбільш важливих критеріїв оцінки стійкості [75]. Для користувача крім часу витрачається безпосередньо на поїздку важливим критерієм є розкид часу на вчинення поїздки. Висока частка стохастичности в процесі формування і руху транспортних потоків робить час поїздки погано передбачуваним, особливо в умовах високого завантаження, тому користувачі змушені орієнтуватися на максимальні значення часу поїздки, що викликає значні втрати часу даремно.

Однією з основних завдань системи управління формуванням транспортних потоків є забезпечення надійного часу здійснення поїздки при заздалегідь встановленому часу очікування. Оскільки рівень максимальної продуктивності ВДМ, який має підтримувати система, знаходиться в зоні

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		56

високої ймовірності утворення заторів, опрацювання питання надійності і стійкості роботи системи вимагає особливої уваги.

Можливим рішенням може бути пошук компромісу між продуктивністю мережі і стійкістю її роботи, за рахунок зниження допустимих щільності потоків. Визначення цих рівнів зажадає додаткових досліджень в ході детального опрацювання впровадження системи.

Крім того, оскільки випадкові обурення в транспортному потоці викликані відмінностями в сприйнятті навколишнього оточення і поведінці водіїв, підвищити надійність роботи системи можуть також різні заходи допомагають знизити ці відмінності. Серед таких заходів можуть бути такі:

- Інформування про час включення дозволяють сигналів на перехрестях, що дозволить водіям самостійно групуватися в «Пачки» і підвищити пропускну здатність перехресть;
- Жорсткий контроль максимальної швидкості за допомогою вбудованих в систему засобів моніторингу дозволить гармонізувати швидкості руху потоків і підвищити прогнозованість транспортної ситуації;
- Бортові системи попередження зіткнень, контролю сліпих зон, адаптивного круїз-контролю також можуть підвищити плавність потоків, допомогти уникати попутних зіткнень і зіткнень при перестроюванні.

Встановлення ступеня впливу таких заходів, також як і рівня зниження порогових значень щільності потоків на надійність роботи системи вимагає проведення додаткових досліджень.

Інтелектуальна транспортна система як комплекс взаємопов'язаних автоматизованих систем, що вирішують завдання управління дорожнім рухом, моніторингу та управління роботою всіх видів транспорту націлена на досягнення синергетичного ефекту від координації управління різними підсистемами. Також в поняття ІТС входить поняття телематичних систем [30,31]. Основними підсистемами ІТС є:

- Система моніторингу параметрів транспортних потоків;

- Система навігаційно-інформаційного забезпечення учасників дорожнього руху;
- Автоматизована система управління дорожнім рухом (АСКДР);
- Автоматизована система управління наземним міським пасажирським транспортом загального користування (АСУ ГПТ);
- Система автоматизованих комплексів контролю дотримання правил дорожнього руху;
- Система відеоспостереження;
- Система контролю вантажного транспорту;
- Система зв'язку і передачі даних;
- Система моніторингу та управління єдиним міським паркувальним простором;
- Система електронних платежів на транспорті;
- Система моніторингу метеорологічної обстановки;
- Інтегруюча система.

Пропонована система повністю охоплює функції підсистем моніторингу параметрів транспортних потоків, навігаційноінформаційного забезпечення учасників дорожнього руху, автоматизованих комплексів контролю дотримання правил дорожнього руху. Безперервно надходить інформація від системи позиціонування, в умовах охоплення всього автопарку переміщається на підконтрольній території повністю знімає необхідність у розгортанні окремої підсистеми моніторингу потоків. Більш того, оскільки система передбачає вказування водієм пункту призначення для здійснення кожної поїздки, результатом є матриця кореспонденцій максимальної точності, що не досяжною традиційними методами моніторингу. Підсистема навігаційно-інформаційного забезпечення також повністю заміщається пропонованою системою, забезпечуючи оптимальну маршрутизацію і надання будь-якої інформації через бортові пристрої. Високоточне позиціонування дозволить відстежувати більшість порушень ПДР, таких як проїзд на червоне світло, порушення швидкісного режиму,

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		58

зупинка в недозволеному місці, вчинення заборонених маневрів. На відміну від локально встановлених комплексів фото-відео фіксації порушень, система дозволить контролювати дотримання ПДР повсюдно, що є значною перевагою оскільки, як зазначається в [27], на основі проведених досліджень поведінки російських водіїв, для комплексного вирішення завдання підвищення БДР і оптимізації управління транспортними потоками необхідно обов'язкове застосування «Систем примусу до дотримання правил дорожнього руху». Також для підвищення ефективності використання ВДМ і безпеки можливо індивідуальне встановлення швидкісного режиму на окремих ділянках ВДМ в відповідно до місцевих умов, з інформуванням водіїв через бортові пристрої.

Система також частково охоплює функції і тісно інтегрується з підсистемами АСУ ДД, АСУ ГПТ, системою контролю вантажного транспорту, моніторингу та управління єдиним міським паркувальним простором, електронних платежів на транспорті. Як відомо, координоване управління, покликане забезпечити безперервний рух, стає неефективним при перевантаженні мережі. В умовах функціонування системи управління формуванням транспортних потоків не допускає перевантажень АСКДР зможе реалізувати весь свій потенціал в забезпеченні невинного руху. Оптимальні режими регулювання розраховуватимуться одночасно з прогнозом розвитку ситуації, можуть застосовувати локальні адаптивні алгоритми, в поєднанні з інформуванням водіїв про роботу світлофорів через бортові пристрої можна досягти значного зниження числа зупинок і підвищення плавності потоків.

Система АСУ ГПТ також буде взаємопов'язана з пропонованою системою. Немає необхідності в окремій системі моніторингу рухомого складу, у відсутності транспортних заторів завдання дотримання розкладу істотно полегшується. Кожен користувач при подачі заявки буде проінформований про можливість та умови здійснення тієї ж поїздки на

транспорті загального користування. Також відпадає необхідність в окремій системі моніторингу рухомого складу вантажного транспорту.

Управління паркувальним простором повинно бути невід'ємною складовою системи управління формуванням транспортних потоків. Єдиний реєстр паркувальних місць дозволить запобігати поїздки, в кінцевому пункті яких відсутні вільні паркувальні місця. Відстеження їх зайнятості буде здійснюватися засобами високоточного позиціонування ТЗ. Електронні платежі можуть здійснюватися безпосередньо з бортового пристрою.

Єдиний сервіс з надання транспортної інформації доступний у вигляді інтернет порталу та додатки для мобільних пристроїв також повинен надавати інформацію про всі можливі способи здійснення поїздки, про поточні величини віртуальних черг, про їх статистику і дозволяти подавати заявку на поїздку на особистому транспорті.

Таким чином, пропонується система не суперечить основним тенденціям розвитку ІТС, а тільки доповнює їх і системно вписується в загальну структуру. Також пропонується система позитивно впливає на всі основні індикатори визначення ефективності ІТС, сформульовані в [27]:

- Збільшення експлуатаційної ефективності та ефективності системи в цілому;
- Збільшення особистої рухливості, зручність, комфорт в дорозі;
- Зменшення витрат користувачів;
- Зменшення вартості вантажоперевезень;
- Поліпшення безпеки дорожнього руху;
- Зменшення шкідливих викидів, скорочення енергоспоживання.

### 3.5. Автоматичне управління одиницями рухомого складу

На сьогоднішній день набули широкого поширення системи допомоги водієві (ADAS, Advanced Driver Assistance Systems). До таких систем відносяться:

- Адаптивний круїз-контроль (Adaptive Cruise Control, ACC) призначений для автоматичного керування швидкістю руху автомобіля;
- Система запобігання виходу зі смуги (Lane Departure Prevention), яка безперервно відстежує лінії розмітки з боків автомобіля за допомогою відеокамер;
- Система контролю мертвих зон Side View Assist;
- Система розпізнавання дорожніх знаків (Traffic Sign Recognition, TSR);
- Система допомоги при парковці і інші.

Такі системи поступово заміщають функції водія, прагнучи повністю звільнити його управління автомобілем. Більшість найбільших виробників вже давно ведуть роботи зі створення автопілотів, які дозволять машинам самостійно пересуватися в просторі. Над такими системами працюють інженери Volvo, Volkswagen, BMW, Toyota, Nissan і ін. На сьогоднішній день вже розроблені, випробовуються і майже готові до серійного виробництва автомобілі здатні повністю автоматично пересуватися в умовах міського руху. У штатах Невада і Каліфорнія США вже законодавчо дозволено рух автомобілів з автоматичним управлінням по дорогах загального користування.

Технічне оснащення розроблених автомобілів-роботів приблизно однакове. Для реалізації функцій автоматичного управління система включає в себе наступні вхідні пристрої: лідар, радар, відеокамера, датчик оцінки становища, інерційний датчик руху, GPS приймач. Також на борту є блок обробки інформації - досить потужний комп'ютер і виконавчі пристрої вбудовані в систему рульового управління, управління двигуном і гальмівну систему. По всьому світу проводяться випробування таких автомобілів в

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		61

умовах закритих полігонів, і готуються перейти на ВДМ. Наприклад, проект Drive Me концерну Volvo, в якому також беруть участь міністерство транспорту Швеції, дорожні служби, вчені і муніципалітет м Гетеборга. Це місто стане полігоном для випробувань перших 100 автомобілів з автономним управлінням. Вони будуть рухатися за визначеними маршрутами протяжністю близько 50 км. Вибрані дороги представляють собою типові напрямки, за якими люди добираються до роботи, включати траси і ділянки, де часто утворюються затори, реалізація проекту намічена на 2017 г. [112].

Більш того, багато дослідників розглядають можливість створення автоматичних транспортних систем, як з власною інфраструктурою, так і з використанням наявної ВДМ [113,114]. Поява на ринку автоматичних автомобілів поступово призведе до заміщення звичайних автомобілів. Транспорт загального користування різної місткості і таксі також можуть стати автоматичними. Таким чином, повністю автоматична транспортна система вже не з області фантастики, і рано чи пізно стане реальністю. Цілком логічно припустити, що єдина система з автоматичним рухом транспортних одиниць, що знаходяться як у власності громадян, так і загального користування, повинна контролювати загальний стан і не буде сама створювати заторів.

Однією з основних проблем при впровадженні такої системи є складність організації одномоментного переходу на автоматичне керування, таким чином, повинен бути передбачений плавний перехідний етап, який поєднує рух автоматичних і керованих людиною ТС. В рамках запропонованої системи деякі параметри руху автомобіля (прискорення, уповільнення, вибір смуги і т.д.) можуть залишатися під контролем людини, автоматизується вибір маршруту і часу початку руху. Таким чином, пропоновану систему управління формуванням транспортних потоків можна розглядати як перехідний етап до автоматичної транспортній системі майбутнього, на якому деякі параметри руху автомобіля поки що контролюються людиною.

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		62

У цьому дослідженні позначені лише основні принципи роботи системи формування транспортних потоків, при цьому залишається ряд невирішених питань. У подальших дослідженнях слід приділити значну увагу проблемі забезпечення стійкої роботи системи. Система повинна гарантувати користувачеві, що час очікування не збільшиться і по його закінченню він проїде свій маршрут за передбачуване час з мінімальними затримками. Звичайно, при виникненні інцидентів, що перекривають рух по великим магістралях, система може виявитися не в змозі забезпечити заявлені часи руху, але в будь-якому випадку зможе мінімізувати втрати часу. Постійний моніторинг потоків з високою точністю може миттєво скласти картину того, що сталося ДТП, не вимагаючи тривалого складання протоколу, час ліквідації виниклих перешкод буде визначатися швидкістю приїзду спеціальних служб, яке також буде мінімально. Крім того, виникли втрати і збитки нанесені користувачам і державі через затримки можуть бути точно оцінені і представлені до відшкодування винуватцеві ДТП.

Ще один не відразу помітний питання, яке виникає при описі роботи системи, це те як будуть формуватися черги для користувачів знаходяться на різній відстані від «вузького» місця. Система повинна гарантувати, що сумарний час очікування і поїздки не буде перевищувати часу, яке треба було б для руху в умовах неконтрольованого доступу. Згідно з базовим алгоритмом запропонованим в 3 чолі, користувачі подали заявки з віддалених по відношенню до деякого «вузькому» місця районів встають в віртуальну чергу, при появі заявки із сусіднього району користувач буде змушений чекати коли реалізуються вже подані заявки, проте за відсутності системи він би виїхав відразу і вклинившись в потік перед «вузьким» місцем проїхав своє маршруту швидше.

Також потребують опрацювання питання обліку зовнішніх кореспонденцій, що генеруються за межами контрольованої зони. Ймовірно необхідно пристрій деяких буферних зон на кожному в'їзді в контрольовану зону і вплив на зовнішні кореспонденції непрямыми методами інформуючи

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		63



про статистику часу очікування в цих зонах. Потребує опрацювання питання надання пріоритету вантажному транспорту, чи буде вище вигода для суспільства від прискорення доставки товарів. Потребує додаткових дослідженнях і питання введення можливості платного зниження часу очікування.

Таким чином, система повинна забезпечувати підтримку основної цільової функції, а саме недопущення утворення заторів, а також прагнути максимізувати вигоду для всіх категорій користувачів, в той же час бути здатною адаптуватися під виникають зміни. Виходячи з таких завдань при описі функціонування пропонованої системи в подальших дослідженнях необхідно спиратися на теорію складних і складних адаптивних систем [115]. Прикладами складні адаптивних систем є колонії комах, біосфера і екосистеми, мозок і імунна система, клітина, ембріон, економічні ринки, політичні партії, соціальні спільноти, великі технічні і соціально-технічні системи. Транспортну систему великого міста також можна віднести до подібних систем. Побудова такої адаптивної автоматичної системи управління представляється доцільним здійснювати на базі нечітких регуляторів і нейромережових технологій [36, 37].

Крім технічних існує ще ряд складнощів соціального і правового характеру. Деякі жителі можуть сприйняти впровадження такої системи як спробу запровадження тотального стеження і обмеження свободи пересування. Також для впровадження системи потрібно значне коректування нормативно-правової бази.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі бакалавра розглянуті питання принципу управління формуванням транспортних потоків на ВДМ і створення спеціальної системи управління з директивним регулюванням доступу на ВДМ і приписом системнооптимального маршруту на рівні окремого ТЗ.

У поточних умовах стихійного формування транспортних потоків ефективність використання ВДМ істотно нижче можливої, що несе величезні витрати для суспільства. Основний вплив надає ефект зниження пропускної здатності в стані затору, а також неоптимальний розподіл потоків по маршрутами прямування.

Аналіз традиційних підходів показує, що 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 цей поріг затори все одно виникнуть.

Досягти підвищення ефективності використання ВДМ можливо за рахунок упорядкування доступу до неї з метою недопущення таких станів потоку, при яких висока ймовірність утворення затору. Для такого впорядкування можливе застосування двох методів: директивного і непрямого, які можуть реалізовуватися за допомогою економічного впливу та адміністративного обмеження. Непрямі методи носять в основному характер рекомендацій і економічних заходів загального дії, що не може повністю запобігти утворенню заторів. Директивні методи, наприклад примусове регулювання доступу на магістраль, показують високу ефективність і мають значний потенціал щодо підвищення ефективності використання наявних ВДМ міст.

Для забезпечення максимальної ефективності роботи ВДМ розроблена система управління з директивним регулюванням доступу на ВДМ і приписом системно-оптимального маршруту на рівні окремого ТЗ. Для

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		65

реалізації такої системи необхідно законодавчо зобов'язати кожного водія перед вчиненням поїздки подавати заявку із зазначенням пункту призначення. При надходженні заявки в центр управління вона обробляється і водієві пропонується час виїзду на ВДМ і маршрут руху. Таким чином, можна сказати, що у кожного водія з'являється «індивідуальний світлофор». За порушення заборони на виїзд і не погодженого відхилення від маршруту повинна бути передбачена адміністративна відповідальність.

Побудова системи управління формуванням транспортних потоків здійснюється методом управління на основі прогнозуючої моделі. Виходячи з цього розроблена структурна схема роботи системи включає наступні основні блоки:

- Модель транспортних потоків на підконтрольній ВДМ;
- Блок оцінки цільової функції;
- Блок вироблення управляючих впливів;
- Блок оцінки поточного стану.

Як критерій оцінки ефективності роботи ВДМ в системі був обраний показник продуктивності (автомобілі-кілометрів на годину).

Результат розрахунку з фрагментом реальної ВДМ показав зниження сумарного часу перебування в мережі на 18,1%. Проведені розрахунки носять характер попередньої оцінки, їх чисельні результати досить наближено відображають можливу ефективність запропонованої системи. Це обумовлено як похибками в відтворенні поведінки транспортних потоків програмним комплексом, так і недосконалістю програмної реалізації запропонованого методу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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/)
2. 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)
3. TTI's 2012 Urban Mobility Report Powered by INRIX Traffic Data, <http://tti.tamu.edu/documents/mobility-report-2012.pdf>
4. Robertson D.I. Transyt: a traffic network study tool. Road Research Laboratory report. LR 253. Crowthome, Berkshire, 1969, p. 37.
5. Prothmann H., Organic Traffic Control, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2011.
6. 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.
7. 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.
8. 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). <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/889/P-0870-5604704.pdf?sequence=1>
9. Zuurbier F. S. Intelligent Route Guidance. Ph.D. thesis. Delft University of Technology, Netherlands, 2010.
10. 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.

					РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		67

11. 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)
12. 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.
13. Monteil J., Billot R., El Faouzi N., Towards cooperative traffic management: methodological issues and perspectives. / Proceedings Australasian Transport Research Forum 2011.
14. Managing Urban Traffic Congestion, ECMT, 2007, <http://www.internationaltransportforum.org/Pub/pdf/07Congestion.pdf>
15. 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.
16. 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.
17. Taale H. Integrated Anticipatory Control of Road Networks A gametheoretical approach // Ph.D. Thesis, Netherlands: GA Delft, 2008.
18. 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
19. Digital-Age Transportation: The Future of Urban Mobility, Deloitte Services LP, 2012, <http://dupress.com/wp-content/uploads/2012/12/Digital-Agetransportation.pdf>
20. 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>

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		68

21. 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.
22. 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>
23. 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)
24. Dowling R., Skabardonis A. Urban Arterial Speed-Flow Equations For Travel Demand Models. // Innovations in Travel Modeling Conference, 2006.
25. 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.
26. Singh R. Improved Speed-Flow Relationships: Application to Transportation Planning Models. 7th TRB Conference on Application of Transportation Planning Methods. 1999.
27. Fosgerau M., De Palma A., Karlstrom A., Small K. Trip timing and scheduling preferences, 2012, <http://www.hal.archives-ouvertes.fr/hal-00742267>
28. 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.
29. Saberi M., Mahmassani H. S. Empirical Characterization and Interpretation of Hysteresis and Capacity Drop Phenomena in Freeway Networks. 92th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2013.
30. Saberi M., Mahmassani H. S., Zockaie A. Network capacity, traffic instability, and adaptive driving: findings from simulated urban network experiments // Springer-Verlag Berlin Heidelberg and EURO - The Association of European Operational Research Societies, 2013.

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		69

31. Knoop V. L., Hoogendoorn S. P. Empirics of a Generalized Macroscopic Fundamental Diagram for Urban Freeways // 92th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2012.

32. Mahmassani H.S., Saber M., Zockaie K. A. Urban Network Gridlock: Theory, Characteristics, and Dynamics. 20th International Symposium on Transportation and Traffic Theory // Procedia - Social and Behavioral Sciences 80. 2013. P. 79 – 98

33. Geroliminis N., Boyaci B. The effect of variability of urban systems characteristics in the network capacity// Transportation Research Part B 46. 2012. P. 1607–1623.

34. Zhenga N., Geroliminis N. On the distribution of urban road space for multimodal congested networks. 20th International Symposium on Transportation and Traffic Theory // Procedia - Social and Behavioral Sciences 80. 2013. P. 119 – 138.

35. Chen B. Y., William H. K. L., Tam M. L. Modeling Departure Time and Route Choice Problems in Stochastic Road Networks for Online ATIS Applications // Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies.2009.V.8.

36. Tung L., Hail L. Vu, Nazarathy Y., Hoogendoorn S. Linear-Quadratic Model Predictive Control for Urban Traffic Networks // Elsevier Ltd, Procedia - Social and Behavioral Sciences 80. 2013. P. 512-530.

37. Geroliminis N., Haddad J., Ramezani M. Optimal Perimeter Control for Two Urban Regions With Macroscopic Fundamental Diagrams: A Model Predictive Approach // Transactions on intelligent transportation systems: IEEE, 2012.

38. Resende P., Nashashibi F., Charlot F. A Cooperative Personal Automated Transport System – A CityMobil Demonstration in Rocquencourt. 12th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. 2012. <http://hal.inria.fr/docs/00/73/28/60/PDF/P0564.pdf>

					<i>РКБ.ОПАТ-19д.012.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		70