

Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
Міністерство освіти і науки

Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
Міністерство освіти і науки

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

АБРАМОВА ЛЮДМИЛА СЕРГІЇВНА

УДК 656.073

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

### **ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ДОРОЖНІМ РУХОМ У МІСТАХ**

Спеціальність 05.22.01 – транспортні системи

Галузь знань 27 – транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Л.С. Абрамова

Науковий консультант Нагорний Євген Васильович, доктор технічних наук,  
професор

Харків – 2020

## АНОТАЦІЯ

*Абрамова Л.С.* Теоретичні основи формування розподілених систем управління дорожнім рухом у містах. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.01 «Транспортні системи» (275 – Транспортні технології на автомобільному транспорті). – Харківський національний автомобільно-дорожній університет МОН України, Харків, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню проблеми розвитку теоретико-методологічних основ розподіленого управління дорожнім рухом із позицій визначення закономірностей взаємодії параметрів транспортного потоку при зміні режимів міського руху.

У першому розділі дисертаційної роботи розглянуті основні напрямки розвитку сучасних систем та технологій управління дорожнім рухом у містах. В результаті аналізу визначено, що система управління дорожнім рухом мають децентралізовану, централізовану та ієрархічну структуру, які відрізняються принципом дії і функціями управління та відносяться до одного з п'яти поколінь систем. Існуючі в даний час системи в Україні в більшості випадків належать до другого та третього поколінь. Виявлено наявність функціональної обмеженості та вузькоспеціалізованої орієнтації заходів управління на невеликій території вулично-дорожньої мережі міст. Проведено порівняльний аналіз відомих систем управління четвертого покоління за структурою та алгоритмами управління, а саме систем SCOOT, UTOPIA, ITACA, ROSE BALANCE, TRANSYT, OPTIMA та визначено, що системи реалізують адаптивне та випереджаюче управління за технологіями фіксованих планів; сітьового та ситуаційного управління на підставі удосконалення транспортних моделей. В результаті аналізу підсистеми «водій – автомобіль – дорога – середовище» встановлено, що вона є динамічною складовою системи та

потребує для опису великого обсягу інформації у залежності від умов та цілей функціонування.

В результаті систематизації класифікаційних ознак виявлено, що ефективною є ієрархічна система управління з елементами децентралізації для технології ситуаційного управління. Виявлено доцільність розподілення керуючих функцій за визначеними рівнями: стратегічний; тактичний та рівень локального управління, що впливає на ефективність розподілу ресурсів управління та дозволяє вирішувати задачі управління – слабко структуровані, добре структуровані та неструктуровані, що впливає на принцип модульності та поетапного розвитку проектування інтелектуальних транспортних систем.

У другому розділі роботи розроблені основні положення формування рівнів управління дорожнім рухом. Сформовано концепцію розробки розподіленої системи управління у містах, яка має ієрархічну структуру для виконання функцій інтелектуальних систем на підставі формалізації знань у поєднанні із традиційними методами управління дорожнім рухом, що містять дискретні та безперервні елементи методів теорії управління (робастного, адаптивного та інтелектуального). На підставі запропонованої концепції розроблено ромбовидну структуру систем управління, що розподіляє не тільки методи управління за цілями, а й відокремлює інформаційні та технологічні параметри за алгоритмами управління за наявності центрів управління – технічного та рівня прийняття рішень: для аналізу й синтезу динамічних контурів управління при проведенні «розрізів» по вертикалі та для статистичних розрахунків із формалізацією «розрізів» по горизонталі на кожному рівні засобами комп'ютерних технологій поряд із традиційними методами управління. Визначено чотири рівня управління: локального регулювання – рівень систем автоматичного регулювання, тактичної адаптації – рівень систем автоматичного управління, рівень систем автоматичного цілеуказання та рівень оперативного управління й прийняття рішень, пов'язаних між собою за принципом замкнутого контуру управління. Принцип дії першого рівня є робастним до зміни її вхідних параметрів. На другому рівні

властивість адаптації досягається шляхом формування математичної моделі дорожнього руху. Для поєднання рівнів у разі адаптивного управління розроблено принципову структуру на підставі робастного адаптивного регулятора з інтелектом. Формування мети управління здійснюється в регуляторі (рівень тактичної адаптації), який фактично виконує функції центру управління. У роботі наведено принципову схему регулятора інтелектуальної системи управління, що обумовлює ознаки гібридної системи управління у містах. Для реалізації програмного забезпечення гібридної системи розроблені моделі чотирьох типів агентів: агент = архітектура + програма. Для рівня прийняття рішень визначено задачі, функції та структуру системи підтримки прийняття рішень як складової інформаційного забезпечення системи для реалізації параметричного та ситуаційного контролю за станом дорожнього руху. Розроблено геоінформаційну модель частини мережі м. Харків у програмному середовищі Delphi 7.0 на підставі глобальної системи позиціонування GPS. Для калібровки моделі розроблено діаграми транспортного потоку, що поєднують нормативні та емпіричні дані інтенсивності потоку.

У третьому розділі роботи розроблено загальну стратегію управління дорожнім рухом, що передбачає розв'язання системних задач, а саме – визначення ефективності функціонування транспортної мережі міста; формування необхідного рівня безпеки руху у місті, забезпечення надійності транспортної мережі та екологічної безпеки навколишнього середовища. Для визначення ефективності вулично-дорожньої мережі міста на стратегічному рівні обрано параметр дорожньо-транспортних витрат, який поєднує параметри транспортного потоку та вулично-дорожньої мережі. Формалізовано задачу адаптивного управління на тактичному рівні із урахуванням нерівномірності та стохастичності параметрів транспортного потоку та наявності двох класів адаптивних систем. Визначено залежність управління від зміни динамічних параметрів потоку у часі. Для усунення невизначеності запропоновано та проведено формалізацію випереджаючого управління рухом із застосуванням

методів часових рядів у середовищі комп'ютерної математики MATLAB та інтервального методу апроксимації даних часового ряду. Для вирішення задач підвищення безпеки руху та зменшення забруднення навколишнього середовища запропоновано організацію рівномірного руху на контурі магістралей міста. Розроблено контурне управління на мережі магістралей міста. Задача надійності мережі пов'язана із втратою властивості забезпечення сталого режиму руху транспорту при наявності заторового стану мережі. Для тактичного рівня системи управління проведено моделювання параметрів транспортного потоку при зміні режимів руху. Визначено, що причиною заторового стану при міських умовах руху є «ударна хвиля», що формується при зміні дистанції безпеки між автомобілями. Розроблено математичний опис процесу формування «ударної хвилі» та місця її виникнення на підставі моделі локальної щільності на перегоні.

У четвертому розділі роботи проведено формалізацію методу контурного управління на підставі визначених аналітичних залежностей групового руху транспортного потоку. У роботі надано опис технологій управління на стратегічному рівні: часо-залежного (за фіксованими планами) та транспортно-залежного (технологія ситуаційного управління). Виявлено їх обмеження та переваги, отримані аналітичні залежності формування та взаємодії груп транспортних засобів при русі на перегонах магістралей міста методами макромодельовання ступеневих функцій інтенсивності транспортного потоку. Математичний опис процесу утворення груп автомобілів на перегоні визначає існуючий зв'язок розподілу часу основного такту циклу регулювання між стрічкою часу та надлишковими інтервалами часу у фазах регулювання. Вирішено задачу мінімізації надлишкового часу як параметру контурного управління – балансу часу світлофорного регулювання. Формалізовано задачу контурного управління на мережі магістралей. Розроблено імітаційну модель визначення параметрів контурного управління шляхом вирішення задачі оптимізації параметрів балансу часу циклу світлофорного регулювання, зсуву фаз включення світлофорів для визначення швидкості транспортного потоку.

Обґрунтовано та доведено доцільність вибору методу Нелдера-Міда для розв'язання формалізованої задачі умовної оптимізації керуючих параметрів контурного управління. Розроблено алгоритм оптимізації та програмне забезпечення «Контур». Для визначення показників ефективності контурного управління застосовано програмне середовище PTV VISSIM.

У п'ятому розділі роботи сформовано принципи динамічного управління дорожнім рухом у місті, проведено мікромодельовання руху автомобілів у міських умовах руху. Визначено, що спрямовувати керуючі дії треба на кінець ударної хвилі, а не на її початок, тому динамічне управління, яке полягає у зменшенні швидкості, необхідно реалізовувати на підході до місця утворення ударної хвилі. Доцільність застосування динамічного управління швидкістю руху транспортного потоку доведено засобом моделювання зміни швидкості потоку та інтенсивності. Для визначення параметрів руху транспортних засобів у щільному потоці розроблено мікромодель руху, яка відрізняється від існуючих та має математичний опис у вигляді динамічного масиву однакових об'єктів, параметрами якого є: прискорення, швидкість, поточна координата на перегоні та лічильник часу. Імітаційну модель розроблено у програмному середовищі Delphi 7.0. Отримано імітаційну модель руху щільного потоку за параметрами швидкості розповсюдження ударної хвилі та місця її утворення. Розроблено методику визначення параметрів динамічного управління, де керуючим впливом є швидкість руху транспортного потоку на визначеній відстані від початку перегону.

У шостому розділі роботи наведено результати модельних експериментів на ділянках мережі м. Харків. Для забезпечення рівномірного дорожнього руху на контурі вулично-дорожньої мережі м. Харків у розробленому програмному забезпеченні отримані параметри системного світлофорного регулювання для руху транспортного потоку зі швидкістю 50 км/год. Запропонований підхід до управління дорожнім рухом забезпечує зменшення часових затримок руху автомобілів на 13% та витрат палива на 15% за рахунок скорочення часу пересування транспорту, а також зменшення викидів забруднюючих речовин у

навколишнє середовище на 15 % за час моделювання у програмному комплексі PTV VISSIM. Для реалізації управління швидкістю руху проведено модельний експеримент динамічного управління рухом на просп. Науки, м. Харків на імітаційній моделі руху транспортного потоку; адекватність моделі визначена та не перевищує 5%. Доведено, що шляхом усунення заторових ситуацій час проїзду експериментальної ділянки зменшується у середньому на 22 % за чотири години «пік» при зниженні швидкості руху до 10 км/год. З метою формування баз моделей взаємодії основних параметрів транспортного потоку для рівня прийняття рішень побудовані вибіркові моделі калібровки перегонів мережі м. Харків. Результати представлено у вигляді основних діаграм транспортного потоку для чотирьох перегонів вулиць різної категорії із урахуванням особливих умов руху, які обумовлюють розбіжності у визначенні параметрів моделей. Наведено методику визначення параметрів діаграми транспортного потоку у вигляді трикутника. Такий підхід надає наочну інформацію стану руху у місті, та підвищує швидкодію на рівні прийняття рішень, але обов'язковою є наявність детекторів транспорту та баз моделей для кожного перегону геоінформаційної моделі. Таким чином, розроблені теоретичні основи розподіленого управління дорожнім рухом у містах підтверджені модельними експериментами та актами впровадження від департаменту інфраструктури Харківської міської ради (акт № 4146/0/78-19 від 20.12.2019 р.) та відділу транспорту, зв'язку та енергетики Краматорської міської ради (акт впровадження від 22.01.2020 р.).

Ключові слова: система управління, дорожній рух, структура управління, рівні управління, алгоритми управління, розподілене управління, імітаційні моделі, мікро- та макромоделі, модельний експеримент.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Абрамова Л.С., Кардаш І.П. Прогнозування інтенсивності транспортного потоку. *Вісник ХНАДУ*. 2003. № 22. С. 96-98.

2. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С. Моделирование параметров транспортных потоков. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2004. №6(12). С. 213-215.

3. Абрамова Л.С., Решетников Є.Б. Науково-технічне забезпечення автоматизованих систем управління дорожнім рухом. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2004. № 42. С. 79-83.

4. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С., Ширин В.В. Моделирование параметров транспортного потока. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2004. № 6(12). С. 213-215.

5. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С., Бугаев И.С. Алгоритм определения оптимальных параметров координированного управления транспортными потоками. *Вісник ХНАДУ*. 2004. № 25. С. 114-117.

6. Абрамова Л.С., Решетников Е.Б., Чернобаев Н.С., Ширин В.В. Анализ организации дорожного движения в центральной части города Харькова. *Вісник ХНАДУ*. 2005. №29. С. 116-122.

7. Абрамова Л.С., Чернобаев М.С. Элементы системного анализа при вивченні автомобільно-дорожньої системи міста. *Автомобільний транспорт*. 2006. №18. С. 67-71.

8. Абрамова Л.С., Чернобаев М.С. Аналіз методів прогнозування інтенсивності транспортного потоку. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2006. № 6. С.158-163.

9. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Методи підвищення ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі міста. *Автомобільний транспорт*. 2006. №19. С. 51-55.

10. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Моделирование и оптимизация транспортной сети. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2006. № 2/2 (20). С. 98-101.

11. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Імітаційна модель руху транспортних засобів при маневруванні. *Комунальне господарство міст*. 2006. Вип. 69. С. 221-228.



12. Абрамова Л.С., Чернобаев М.С. Щодо вирішення задачі оптимізації параметрів координованого управління транспортними потоками. *Вісник ХНАДУ*. 2007. № 37. С. 83-86.

13. Дербунович Л.В., Абрамова Л.С. Иерархические структуры систем управления дорожным движением. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2008. Вип. 31. С. 40-48.

14. Абрамова Л.С., Рогов А.В. Моделирование параметров транспортных потоков. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2008. № 46. С. 9-15.

15. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С. Программная среда координированного управления транспортными потоками. *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту*. 2008. № 1. С. 22-25.

16. Абрамова Л.С., Бугайов І.С., Горбатій П.О. Оптимізація параметрів локального управління на багатосмугових перехрестях у містах. *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту*. 2008. № 2. С. 28-34.

17. Дербунович Л.В., Абрамова Л.С., Ширін В.В. До питання оцінки ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2008. Вип. 56. С. 72-79.

18. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С. Имитационная модель управления транспортными потоками. *Вісник ХНАДУ*. 2009. № 47. С. 93-96.

19. Абрамова Л.С., Птиця Г.Г. Дослідження рівнів аварійності на автомобільних дорогах. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2006. № 3/2 (21). С. 17-20

20. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С. Постановка задачи адаптивного управления дорожным движением. *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту*. 2009. № 1. С. 7-12.

21. Абрамова Л.С., Капинус С.В. Анализ методов теории принятия решений с позиции управления дорожным движением. *Вісник ХНАДУ*. 2009. №47. С. 90-92.

22. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Моделирование заторовых ситуаций по улично-дорожной сети. *Автомобільний транспорт*. 2009. №25. С. 66-69.
23. Абрамова Л.С., Капинус С.В. К вопросу выбора критериев эффективности организации дорожного движения методами теории полезности. *Автомобільний транспорт*. 2009. №25. С. 62-65.
24. Абрамова Л.С., Капинус С.В. Анализ функционирования автоматизированных систем управления дорожным движением в мегаполисах. *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту*. 2009. № 1. С. 13-20.
25. Абрамова Л.С. Модели управления дорожным движением для АСУДД. *Вісник ХНАДУ*. 2010. №50. С. 57-63.
26. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С. Обоснование выбора показателей эффективности контурного управления дорожным движением. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2010. № 4/3. С. 58-61.
27. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Способ повышения пропускной способности регулируемых перекрестков. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2010. № 4/3. С. 62-65.
28. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Формализация параметров движения автотранспортных средств при движении в плотном потоке. *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту*. 2011. № 3. С. 4-11.
29. Абрамова Л.С., Наглюк И.С., Капинус С.В. Анализ структуры систем поддержки принятия решений в АСУДД. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2012. №18. С. 45-51.
30. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Модельный эксперимент поведения транс-портного потока на улично-дорожной сети города в заторовом режиме движения. *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту*. 2012. №1. С. 47-55.
31. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С. Координированное управление дорожным движением на сети магистралей города. Монография. Харьков: издательство "Точка". 2012. 160 с.

32. Абрамова Л.С. Элементы теории искусственного интеллекта в управлении дорожным движением. *Вісник ХНАДУ*. 2013. Вип. 61-62. С. 32-36.
33. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. К вопросу надежности транспортных систем. *Вісник ХНАДУ*. 2009. №47. С. 139-142
34. V. Hahanov, W. Gharibi, L.S. Abramova, S. Chumachenko, E. Litvinova, A. Hahanova, V. Rustinov, V. Miz, A. Zhalilo, A. Ziarmand. Cyber physical system-smart cloud traffic control. *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS 2014)*. SEP 26-29, 2014. PP. 49-66. (WOS:000380470800069). (Scopus)
35. Абрамова Л.С. Особенности аудита дорожной безопасности. *Автомобільний транспорт*. 2015. Вип. 36. С. 161-165.
36. Абрамова Л.С., Наглюк І.С., Птиця Г.Г. Аналіз методів визначення складу транспортного потоку. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2012. Вип. 17. С. 35-41.
37. Абрамова Л.С., Ширін В.В. Прогнозування параметрів транспортних потоків при плануванні автомобільних доріг. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2015. № 5/3(25). С 47-51.
38. Абрамова Л.С. Спосіб динамічного управління автомобільним рухом на залізничному переїзді. *Автомобільний транспорт*. 2016. Вип. 38. С. 34-38.
39. Абрамова Л.С., Птиця Г.Г. Дослідження показників безпеки руху на дорогах. *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту*. 2009. №1. С.20-26
40. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Метод классификации частных коэффициентов аварийности для автомобильных дорог различных технических категорий. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2014. Вип. 44. С. 41-55.
41. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Выявление латентных факторов частных коэффициентов аварийности. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2012. № 5/4 (59). С. 32-37.

42. Абрамова Л.С., Наглюк І.С., Левченко О.С. Аналіз методів проведення камеральних та польових досліджень аудиту безпеки дорожнього руху. *Вісник ХНАДУ*. 2016. Вип. 75. С. 182-190.

43. Абрамова Л.С., Ширин В.В., Птица Г.Г. Анализ методов определения показателей безопасности дорожного движения. *Вісник ХНАДУ*. 2015. №69. С.118-123

44. Нагорний Є.В., Абрамова Л.С. Концептуальний підхід до проектування систем управління дорожнім рухом. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2017. Вип. 12. С. 94-100.

45. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Визначення балансу між параметрами дорожнього руху. *Комунальне господарство міст*. 2018. Вип. 140. С. 91-97.

46. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Концепция управления безопасностью дорожного движения. Перспективные тренды развития науки: техника и технологии. В 2 книгах. К. 1. Глава 6.: кол. монографія. Одесса: Куприенко С.В., 2016. С. 169-190

47. Liudmyla Abramova, Yevhen Nahornyi, Henadii Ptytsia. Structure of transformation of the road motion parameters in the control system. *SHS Web of Conferences*. 2019. №67, 05001. NTI-UkrSURT 2019: DOI <https://doi.org/10.1051/shsconf/20196705001>. <https://www.shs-conferences.org/articles/shsconf/abs/2019/08/contents/contents.html> (WoS)

48. Abramova L. Model experiment of dynamic control implementation at the transport network in Kharkiv, Ukraine. *Theoretical and scientific foundations of engineering: collective monograph. International Science Group*. Boston: Primedia eLaunch. 2020. PP. 150-164. URL: <http://isg-konf.com>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

49. Абрамова Л.С., Чернобаев М.С. Визначення оптимальних параметрів координованого управління. Сборник научных трудов. «*Научные исследования и их практическое применение*»: Международная научно-практическая конференция. Том I. Транспорт. Физика и математика. Одесса, 2007, с. 42-44.

50. Абрамова Л.С., Тонконошко Г.А. Дослідження впливу показників видимості на безпеку дорожнього руху. *«Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях»*: праці науково-технічної конференції з міжнародною участю. ХНУ ім. В.Н. Каразіна. Харків, 2010. С. 17-20.

51. Абрамова Л.С. Проектирование систем управления дорожным движением. *«Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях»*: праці науково-технічної конференції з міжнародною участю. ХНУ ім. В.Н.Каразіна. Харків, 2010. С. 14-17.

52. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Имитационная модель поведения транспортного потока на улично-дорожной сети городов в условиях затора. *«Логістика промислових регіонів»*: IV Міжнародна науково-практична конференція. Донецьк, 23-25 квітня 2012 р. С. 171-172.

53. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Влияние параметров дорожных условий на безопасность дорожного движения. *«Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов»*: Материалы Межд. науч.-практ. конф., г. Минск 22-26 октября 2012 г., БНТУ. С. 68-70.

54. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Подход к усовершенствованию оценки уровня безопасности дорожного движения. *«Безпека дорожнього руху: правові та організаційні аспекти»*: Матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Донецьк 15-16 листопада 2012 р., ДААТ. С. 168-172.

55. Абрамова Л.С. Напрямки розвитку сучасного управління дорожнім рухом. *«Проблеми підвищення рівня безпеки, комфорту та культури дорожнього руху»*: Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції, 16-17 квітня Харків: ХНАДУ. 2013. С.33-35.

56. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Классификация методов определения показателей безопасности. *«Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе»*: Материалы международной научно-практической конференции г. Пермь, 25 - 27 апреля 2013, том 2, С. 8 - 16.

57. Абрамова Л.С., Капинус С.В. Признаки эргатических систем в управлении дорожным движением. *«Інформаційні технології і мехатроніки»*: Всеукраїнська науково-практична конференція. 15 квітня 2014 р. Харків. С. 5-6.

58. Абрамова Л.С., Наглюк И.С. Концепция управления дорожным движением в городах. *VII российско-германская конференция по безопасности дорожного движения*. Санкт-Петербург, 6-7 июня 2014 г.

59. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Результаты редукции частных коэффициентов аварийности при определении уровня безопасности дорожного движения. *Академическая наука – проблемы и достижения: Материалы IV международной научно-практической конференции*. 7-8 июля 2014 г. Москва. CreateSpace 4900 LaCross Road, North Charleston, SC, USA 29406, 2014. С. 165-169.

60. Абрамова Л.С. Концепція управління безпекою дорожнього руху. *«Новітні технології в автомобілебудуванні та на транспорті»*: Наукові праці. Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 85-річчю заснування ХНАДУ, 85-річчю автомобільного факультету, а також з нагоди Дня автомобіліста та дорожника. 15-16 жовтня 2015 р. ХНАДУ. Харків, 2015. С. 61.

61. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Экспериментальная проверка экспресс-метода определения уровня безопасности дорожного движения. *«Транспорт, экология – устойчивое развитие»*: Материалы науч.-технич. конф. с международным участием. г. Варна, Болгария 2016. С. 288-292.

62. Абрамова Л.С., Капинус С.В. Особенности системы управления дорож-ным движением. *«Транспорт, экология – устойчивое развитие»*: Материалы науч. технич. конф. с международным участием. г. Варна, Болгария. 2016. с.107-110.

63. Абрамова Л.С., Ширін В.В., Птица Г.Г. Формування інноваційних рішень для системи управління безпекою дорожнього руху. *Автомобільний транспорт та інфраструктура*: I Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, Україна, 26-28 квітня 2018 р.: тези конференції. Київ. 2018. С. 140-143.

64. L.S. Abramova. Substantiation of distribution of road traffic management of road traffic in the cities. *«Experience of the past, practice of the future»*: Proceedings of 48<sup>th</sup> International Scientific Conference. New York 2019. 6-14.

65. Абрамова Л.С., Нагорний Є.В. Підхід до формування гібридного управління дорожнім рухом. *«Сучасні інноваційні та інформаційні технології на транспорті»*: Збірка матеріалів XI Міжнародної науково-практичної конференції. Херсонська державна морська академія, Херсон, 2019, С.28-31.

66. Абрамова Л.С. Особливості моделювання групового руху транспортних засобів у містах. *«Scientific achievements of modern society»*: Abstracts of the 1st International scientific and practical conference. September 11-13, 2019, Cognum Publishing House, Liverpool, United Kingdom. 2019. PP. 8-17.

67. Абрамова Л.С., Нагорний Є.В., Птиця Г.Г. Структура перетворення параметрів дорожнього руху у системі управління. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика*: 15-та науково-практична міжнародна конференція, м. Харків, Україна, 6-8 червня 2019 року: тези доповідей. Вісник економіки транспорту і промисловості. №66 (Р2), УкрДУЗТ, Харків. 2019. С. 61-63.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

68. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С., Ширин В.В. Формализация задачи управления транспортными потоками на улично-дорожной сети крупных городов. *Прикладная радиоэлектроника*. 2009. Том 8, № 2. С. 188-192.

69. Абрамова Л.С., Бакуліч О.О. Автоматизовані системи управління дорожнім рухом: навч. посібник. Харків: ХНАДУ. 2014. 184 с.

70. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Побудова дерева рішень для управління дорожнім рухом на залізничному переїзді. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2016. Вип. 54 (спецвипуск). С. 33-34.

71. Абрамова Л.С., Птиця Г.Г. Риск возникновения ДТП как фактор надежности транспортных систем. *«Совершенствование организации*

*дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов»*: Материалы Межд. науч.-практ. конф., г. Минск 23-24 октября 2009 г., БНТУ.

72. Абрамова Л.С., Наглюк І.С., Ширін В.В., Птица Г.Г., Капінус С.В. Аудит безпеки дорожнього руху. Підручник. Харків: ХНАДУ. 2015. С. 281.

73. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Системный анализ систем управления дорожным движением. *Молодий вчений*. 2016. №7. С. 177-181.

74. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Управління дорожнім рухом на залізничному переїзді з елементами теорії корисності. *Економіка, управління та адміністрування (Вісник ЖДТУ)*. 2016. Вип. №2(77). С. 13-17.

75. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Влияние параметров дорожных условий на безопасность дорожного движения. М-во образования Республики Беларусь Белорусский национальный технический университет: сб. науч. тр., 2013. С. 29-36.

76. Абрамова Л.С., Чернобаєв М.С. Постановка задачі оптимізації параметрів координованого управління. *Актуальні проблеми забезпечення безпеки дорожнього руху*: Науково-практичний семінар. ХНУВС, Харків, 18.04.2008. С. 5.

77. Абрамова Л.С., Птица Г.Г., Ширін В.В. Довідковий словник термінів та визначень з організації та безпеки дорожнього руху: словник. Харків: ХНАДУ. 2017. 226 с.

78. Абрамова Л.С., Наглюк І.С., Ширін В.В., Птица Г.Г., Капінус С.В., Левченко О.С., Харченко Т.В. Практикум з проведення аудиту безпеки дорожнього руху: Навчальний посібник. Харків: ХНАДУ. 2019. 140 с.

79. Абрамова Л.С. Моделі управління дорожнім рухом для АСУДР: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49011. Державна служба інтелектуальної власності. 29.04.13.

80. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Метод классификации частных коэффициентов аварийности для автомобильных дорог различных технических категорий: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49010. Державна служба інтелектуальної власності. 29.04.13.



81. Абрамова Л.С., Капінус С.В. До питання вибору критеріїв ефективності організації дорожнього руху методами теорії корисності: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49009. Державна служба інтелектуальної власності. 29.04.13.

82. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С. Монографія. Координированное управление дорожным движением на сети магистралей города: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 53862. Державна служба інтелектуальної власності. 27.02.14.

83. Абрамова Л.С. Елементи теорії штучного інтелекту в управлінні дорожнім рухом: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 53587. Державна служба інтелектуальної власності. 10.02.14.

84. Абрамова Л.С. Особенности аудита дорожной безопасности: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 63002. Державна служба інтелектуальної власності. 13.10.15.

85. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Системный анализ систем управления дорожным движением: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 69151. Державна служба інтелектуальної власності. 13.12.16.

86. Абрамова Л.С. Спосіб динамічного управління автомобільним рухом на залізничному переїзді: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 69150. Державна служба інтелектуальної власності. 13.12.16.

87. Абрамова Л.С., Ширин В.В., Птица Г.Г. Анализ методов определения по-казателей безопасности дорожного движения: Свідоцтво про реєстрацію авторсь-кого права на твір № 69149. Державна служба інтелектуальної власності. 13.12.16.

88. Абрамова Л.С., Ширін В.В. Прогнозування параметрів транспортних по-токів при плануванні автомобільних доріг: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 68955. Державна служба інтелектуальної власності. 06.12.16.

89. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Управління дорожнім рухом на залізничному переїзді з елементами теорії корисності: Свідоцтво про

реєстрацію авторського права на твір № 70197. Державна служба інтелектуальної власності. 21.01.17.

90. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Визначення балансу між параметрами дорожнього руху: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 88932. Державна служба інтелектуальної власності. 24.05.19.

## **ABSTRACT**

*Abramova L.S.* Theoretical bases of distributed traffic control systems formation in cities. – Manuscript copyright.

Thesis for obtaining a scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.22.01 "Transport systems" (275 - Transport technologies). - Kharkiv National Automobile and Highway university, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The thesis is devoted to the decision of the traffic distributed control theoretical and methodological bases development problem from positions of transport stream parameters interaction laws definition at city traffic modes change.

In the first chapter the main directions of modern systems development and technologies of traffic management in cities are considered. The analysis shows that the traffic control systems have decentralized, centralized and hierarchical structures, which are differ in the principle of operation and management functions and belong to one of the five generations of systems.

The current systems in Ukraine belong to the second and third generations in most cases. The presence of functional limitations and narrowly specialized orientation of control measures on a small area of the city street network is revealed.

A comparative analysis of known four generation control systems by structure and control algorithms is conducted (SCOOT, UTOPIA, ITACA, ROSE BALANCE, TRANSYT, OPTIMA, etc.) and it is determined that the systems implement adaptive and advanced control by fixed plan technologies; by network and situational management based on the transport models improvement. As a result of the analysis

of the subsystem "driver - car - road - environment" it is established that it is a dynamic component of the system and must be described with a large amount of information depending on conditions and objectives of operation.

As a result of classification features systematization, it is found that a hierarchical control system with elements of decentralization for situational management technology is effective. The expediency of control functions distribution on certain levels is revealed: there are strategic; tactical and local management levels, which affect the management resources efficiency and allow solving management problems - poorly structured, well-structured and unstructured, which affect the principle of modularity and gradual development of intelligent transport systems.

In the second chapter the main provisions of traffic control levels formation are developed. The concept of distributed management system in cities is formed, which has a hierarchical structure for performing the intelligent system functions based on the knowledge formalization in combination with traditional methods of traffic management, containing discrete and continuous elements of management theory (robust, adaptive and intelligent).

Based on the proposed concept, a diamond-shaped structure of control systems is developed, which distributes not only control methods by objectives, but also separates information and technological parameters by control algorithms in the presence of control centers - technical and decision-making levels: for analysis and synthesis of dynamic control circuits by vertical cutting and for statistical calculations with the formalization by horizontal cut at each level using computer technologies along with traditional management methods.

Four levels of control are defined: local control level - the level of automatic control systems, tactical adaptation level - the level of automatic control systems, the level of automatic targeting systems and the level of operational control and decision-making related to each other on a closed control contour.

The principle of the first level operation is robust to change its input parameters. At the second level, the property of adaptation is achieved by forming a mathematical model of traffic. To combine levels in the case of adaptive control, a

basic structure is developed on the basis of a robust adaptive controller with intellect. The formation of the management purpose is carried out in the regulator (level of tactical adaptation), which actually performs the functions of the control center. A schematic diagram of the regulator of the intelligent control system is shown, which determines the characteristics of the hybrid control systems in cities.

To implement the software of the hybrid system, models of four types of agents are developed: agent = architecture + program. For the level of decision-making, the tasks, functions and structure of the decision-making support system as a component of information support system for the implementation of parametric and situational control over the traffic mode are defined. A geo-information model of the Kharkiv road network part is developed using the IDE Delphi 7.0 on the basis of the global GPS positioning system. For model calibrating the transport flow diagrams are developed that combine normative and empirical data of flow intensity.

The third chapter demonstrates a results of a general strategy developing for traffic management, which involves solving systemic problems, namely - determining the effectiveness of the transport city network; formation of the necessary level of traffic safety in the city, ensuring the reliability of the transport network and ecological safety of the environment. To determine the efficiency of the city's road network at the strategic level, the parameter of road transport costs is chosen, which combines the parameters of the traffic flow and the road network.

The problem of adaptive control at the tactical level is formalized taking into account the non-uniformity and stochasticity of transport flow parameters and the presence of two classes of adaptive systems. The dependence of control on the change of traffic flow dynamic parameters over time is determined. To eliminate the uncertainty, the formalization of advanced motion control with the use of time series methods and the interval method of time series data approximation is proposed and carried out using CMS MATLAB.

To solve the problems of improving traffic safety and reducing environmental pollution, the organization of uniform traffic on the contour of city highways is proposed. Contour control on the city highway network is developed. The problem of

network reliability is associated with the loss of the property of providing a stable mode of traffic in the presence of congestion on the network. For the tactical level of the control system, the simulation of traffic flow parameters with changing traffic modes is performed. It is determined that the cause of congestion in urban traffic conditions is a "shock wave", which is formed with changing the safety distance between cars. A mathematical description of the "shock wave" formation process and the place of its occurrence on the basis of density change rate model on the race are developed.

In the fourth chapter the formalization of the contour control method on the basis of certain analytical dependences of group traffic flow is carried out.

The control technologies at the strategic level: time-dependent (according to fixed plans) and transport-dependent (situational management technology) are described. Their limitations and advantages are revealed, analytical dependences of formation and interaction of vehicles groups at movement on races of the city highways by macromodeling methods of transport stream intensity power functions are received. A mathematical description of the forming car groups' process on a race determines the existing relationship between the distribution of the control cycle main time between the timeline and the excess time intervals in the control phases.

The problem of excess time minimization as a parameter of contour control - balance of traffic light time regulation - is solved. The problem of contour control on the highway network is formalized. A simulation model for determining the parameters of contour control is developed by solving the problem of optimizing the time balance parameters of the traffic light control cycle, shifting the phases of traffic lights to determine the speed of traffic flow. The expediency of choosing the Nelder-Mead method for solving the formalized problem of conditional optimization of contour control parameters is substantiated and proved. An optimization algorithm and Contour software is developed. The PTV VISSIM software environment is used to determine the efficiency indicators of contour control.

In the fifth chapter the principles of dynamic traffic management in the city are formed, micromodeling of car traffic in urban conditions is carried out. It is

determined that the control actions should be directed to the end of the “shock wave”, but not to its beginning, so the dynamic control, which consists in speed reducing, must be implemented on the approach to the place of the shock wave formation. The expediency of the application of traffic flow speed dynamic control is proved by the means of modeling the traffic flow speed and intensity changes. To determine the parameters of moving in dense traffic, a micromodel of motion is developed, which differs from existing ones and has a mathematical description in the form of an identical objects dynamic array, the parameters of which are: acceleration, speed, current coordinate and time counter.

The simulation model is developed with the help of IDE Delphi 7.0. The simulation model of dense flow motion according to the parameters of “shock wave” propagation velocity and the place of its formation is obtained. A method for determining the parameters of dynamic control is designed, where the traffic flow speed has a control effect at a certain distance from the race start.

The sixth chapter presents the results of model experiments on the road network sections (Kharkiv, Ukraine). The special software is developed to ensure uniform traffic on the Kharkiv’ road network contour, the parameters of the system traffic light control for the traffic flow at a speed of 50 km/h are obtained. The proposed approach to traffic management reduces vehicle traffic delays by 13% and fuel consumption by 15% after reducing the time of transport moving, as well as reducing emissions of pollutants into the environment by 15% using simulation in the PTV VISSIM software.

To implement speed control, a model experiment of dynamic traffic control is carried out on Ave. Nauki (Kharkiv, Ukraine) using traffic flow simulation model; the adequacy of the model is determined and does not exceed 5%. It is proved that by eliminating congestion situations, the travel time of the experimental section is reduced by an average of 22% for four hours of most intensive traffic by reducing the speed up to 10 km/h. In order to form the bases of interaction models of the traffic flow main parameters for the decision-making level, sample models of calibration for Kharkiv network races are built. The results are presented in the form of basic traffic

flow diagrams for four street races of different categories, taking into account the special traffic conditions, which cause differences in determining the model parameters. The method of determining the parameters of the traffic flow diagram in the form of a triangle is given. This approach provides visual information about the traffic condition in the city, and increases speed at the decision-making level, but it is mandatory to have transport detectors and model databases for each race of the geo-information model.

Thus, the developed theoretical foundations of distributed traffic management in cities are confirmed by model experiments and implementation acts by the Department of Infrastructure of Kharkiv City Council (№ 4146/0/ 78-19, 20.12.2019) and by the Department of Transport, Communications and Energy of Kramatorsk City Council (22.01.2020).

Keywords: control system, road traffic, control structure, control levels, control algorithms, distributed control, simulation models, micro- and macromodels, model experiment.

List of publications of the applicant.

Scientific works in which the main scientific results of the thesis have been published:

1. Abramova L.S., Kardash I.P. Predicting traffic intensity. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2003. № 22. PP. 96-98.
2. Abramova L.S., Chernobaev N.S. Modeling traffic flow parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2004. №6(12). PP. 213-215.
3. Abramova L.S., Reshetnikov Ye.B. Scientific and technical support of automated traffic control systems. *Bulletin of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. 2004. № 42. PP. 79-83.
4. Abramova L.S., Chernobaev N.S., Shirin V.V. Modeling transport stream parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2004. № 6(12). PP. 213-215.

5. Abramova L.S., Chernobaev N.S., Bugaev I.S. Algorithm for determining the optimal parameters of coordinated control of transport streams. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University* 2004. № 25. PP. 114-117.
6. Abramova L.S., Reshetnikov Ye.B., Chernobaev N.S., Shirin V.V. Analysis of the traffic organization in the central part of Kharkov city. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2005. №29. PP. 116-122.
7. Abramova L.S., Chernobaev M.S. Elements of system analysis in city road system studying. *Automobile transport*. 2006. №18. PP. 67-71.
8. Abramova L.S., Chernobaev M.S. Analysis of methods for predicting the traffic flow intensity. *Bulletin of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. Thematic issue "Automotive and Tractor Engineering". 2006. № 6. PP. 158-163.
9. Abramova L.S., Shirin V.V. Methods of increasing of road-traffic efficiency functioning. *Automobile transport*. 2006. №19. PP. 51-55.
10. Abramova L.S., Shirin V.V. Transport network modeling and optimization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2006. № 2/2 (20). PP. 98-101.
11. Abramova L.S., Kapinus S.V. Simulation model of vehicle movement during maneuvering. *Scientific and technical collection "Municipal economy of cities"*. 2006. Vol. 69. PP. 221-228.
12. Abramova L.S., Chernobaev M.S. Regarding the solution of the coordinated traffic flow control parameters optimization problem. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2007. № 37. PP. 83-86.
13. Derbunovich L.V., Abramova L.S. Hierarchical structures of traffic control systems. *Bulletin of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. 2008. № 31. PP. 40-48.
14. Abramova L.S., Rogov A.V. Modeling traffic flow parameters. *Bulletin of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. 2008. № 46. PP. 9-15.
15. Abramova L.S., Chernobaev N.S. Coordinated traffic control software environment. *Bulletin of Donetsk Academy of Automobile Transport*. 2008. № 1. PP. 22-25.



16. Abramova L.S., Buhaiov I.S., Horbatii P.O. Optimization of local control parameters at multi-lane intersections in cities. *Bulletin of Donetsk Academy of Automobile Transport*. 2008. № 2. PP. 28-34.

17. Derbunovich L.V., Abramova L.S., Shyrin V.V. On the issue of assessing the road network effectiveness. *Bulletin of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. 2008. № 56. PP. 72-79.

18. Abramova L.S., Chernobaev N.S. Simulation model of traffic management. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2009. № 47. PP. 93-96.

19. Abramova L.S., Ptytsia H.H. Research of accident levels on highways. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2006. № 3/2 (21). PP. 17-20.

20. Abramova L.S., Chernobaev N.S. Statement of the problem of adaptive traffic control. *Bulletin of Donetsk Academy of Automobile Transport*. 2009. № 1. PP. 7-12.

21. Abramova L.S., Kapinus S.V. Analysis of decision theory methods from the perspective of traffic management. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2009. №47. PP. 90-92.

22. Abramova L.S., Shirin V.V. Modeling of congestion conditions on the road network. *Automobile transport*. 2009. № 25. PP. 66-69.

23. Abramova L.S., Kapinus S.V. Choice of efficiency criteria for traffic management by means of utility theory. *Automobile transport*. 2009. № 25. PP. 62-65.

24. Abramova L.S., Kapinus S.V. Analysis of the functioning of automated traffic control systems in megapolises. *Bulletin of Donetsk Academy of Automobile Transport*. 2009. № 1. PP. 13-20.

25. Abramova L.S. Models of traffic management for ASTM (Automatic System of Traffic Management). *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2010. №50. PP. 57-63.

26. Abramova L.S., Chernobaev N.S. Justification of the choice of contour traffic control effectiveness indicators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2010. № 4/3. PP. 58-61.

27. Abramova L.S., Shirin V.V. Way of increase of traffic capacity of signaled crossing. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2010. № 4/3. PP. 62-65.

28. Abramova L.S., Shirin V.V. Formalization of vehicles movement parameters in dense traffic. *Bulletin of Donetsk Academy of Automobile Transport*. 2011. № 3. PP. 4-11.

29. Abramova L.S., Nagliuk I.S., Kapinus S.V. Analysis of the decision support systems structure in ASTM. *Bulletin of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. 2012. №18. PP. 45-51.

30. Abramova L.S., Shirin V.V. Model experiment of traffic flow behavior on the city road network in congestion mode. *Bulletin of Donetsk Academy of Automobile Transport*. 2012. №1. PP. 47-55.

31. Abramova L.S., Chernobaev N.S. Coordinated traffic control on the city's highway network. *Monograph*. Kharkiv: Publishing house "Tochka". 2012. 160 p.

32. Abramova L.S. Elements of the theory of artificial intelligence in traffic control. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2013. №61-62. PP. 32-36.

33. Abramova L.S., Ptitsa G.G. On the issue of reliability of transport systems. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2009. №47. PP. 139-142.

34. V. Hahanov, W. Gharibi, L.S. Abramova, S. Chumachenko, E. Litvinova, A. Hahanova, V. Rustinov, V. Miz, A. Zhalilo, A. Ziarmand. Cyber physical system-smart cloud traffic control. *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS 2014)*. SEP 26-29, 2014. PP. 49-66. (WOS:000380470800069). (ISBN:978-1-4799-7630-0).

35. Abramova L.S. Features of road safety audit. *Automobile transport*. 2015. № 36. PP. 161–165.

36. Abramova L.S., Nahliuk I.S., Ptytsia H.H. Analysis of methods for determining the traffic flow composition. *Bulletin of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. 2012. № 17. PP. 35-41.

37. Abramova L.S., Shyrin V.V. Forecasting of traffic flow parameters in highways planning. *Technology Audit and Production Reserves*. 2015. № 5/3(25). PP. 47-51.

38. Abramova L.S. Method of dynamic traffic management at a railway crossing. *Automobile transport*. 2016. № 38. PP. 34–38.

39. Abramova L.S., Ptytsia H.H. Research of road safety indicators. *Bulletin of Donetsk Academy of Automobile Transport*. 2009. № 1. PP. 20-26.

40. Abramova L.S., Ptitsa G.G. Method of classification of private factors of breakdown rate for highways of various technical categories. *Bulletin of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. 2014. № 44. PP. 41-55.

41. Abramova L.S., Ptitsa G.G. Identification of latent factors of partial accident rates. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2012. № 5/4 (59). PP. 32-37.

42. Abramova L.S., Nahliuk I.S., Levchenko O.S. Analysis of cameral and field research of road safety audit. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2016. № 75. PP. 182-190.

43. Abramova L.S., Shirin V.V., Ptitsa G.G. Analysis of methods for determining road safety indicators. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2015. № 69. PP. 118-123.

44. Nahornyi Ye.V., Abramova L.S. Conceptual approach to the traffic control systems design. *Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*. 2017. Vol. 12. PP. 94-100.

45. Abramova L.S., Kapinus S.V. Balance determination between parameters of road transport. *Scientific and technical collection "Municipal economy of cities"*. 2018. Vol. 140. PP. 91-97.

46. Abramova L.S., Ptitsa G.G. Road safety management concept. Promising trends in the development of science: engineering and technology. In 2 books.

Book 1. Chapter 6.: collective monograph. Odessa: Kuprienko S.V., 2016. PP. 169-190.

47. L. Abramova, Ye. Nahornyi, H. Ptytsia. Structure of transformation of the road motion parameters in the control system. *SHS Web of Conferences*. 2019. №67, 05001. NTI-UkrSURT 2019: DOI <https://doi.org/10.1051/shsconf/20196705001>. <https://www.shs-conferences.org/articles/shsconf/abs/2019/08/contents/contents.html>

48. Abramova L. Model experiment of dynamic control implementation at the transport network in Kharkiv, Ukraine. *Theoretical and scientific foundations of engineering: collective monograph*. International Science Group. Boston: Primedia eLaunch. 2020. PP. 150-164. DOI: 10.46299/isg.2020.MONO.TECH.II URL: <http://isg-konf.com>

Scientific papers certifying the approbation of the materials of the thesis:

49. Abramova L.S., Chernobaiev M.S. Determining the optimal parameters of coordinated control. «*Scientific research and their practical application*»: International scientific and practical conference. Collection of scientific works. Vol I. Transport. Physics and mathematics. Odessa, 2007, PP. 42-44.

50. Abramova L.S., Tonkonozhko H.A. Study of the impact of visibility indicators on road safety. «*Computer modeling in science-intensive technologies*»: proceedings of scientific and technical conference. V.N. Karazin Kharkiv National University. Kharkiv, 2010. PP. 17-20.

51. Abramova L.S. Design of traffic control systems. «*Computer modeling in science-intensive technologies*»: Proceedings of scientific and technical conference. V.N. Karazin Kharkiv National University. Kharkiv, 2010. PP. 14-17.

52. Abramova L.S., Shirin V.V. Simulation model of traffic flow behavior on the city road network in traffic jams. «*Logistics of industrial regions*»: Proceedings of 4th International scientific and practice conference. Donetsk, April 23-25, 2012. PP. 171-172.

53. Abramova L.S., Ptitsa G.G. Impact of road conditions parameters on road safety. «*Improving the organization of road traffic and transportation of passengers*

*and goods*»: Proceedings of International scientific and practice conference. Minsk, Belarus, October 22-26, 2012. Belarusian National Technical University. PP. 68-70.

54. Abramova L.S., Ptitsa G.G. Approach to improving road safety assessment. *"Road safety: legal and organizational aspects"*: Proceedings of 7th International scientific and practice conference. Donetsk, November 15-16, 2012. Donetsk Academy of Automobile Transport. PP. 168-172.

55. Abramova L.S. Directions of development of modern traffic management. *«Problems of increasing the level of safety, comfort and traffic culture»*: Proceedings of 3rd International scientific and practice conference. Kharkiv, April 16-17, 2013. *Kharkiv National Automobile and Highway University*. PP. 33-35.

56. Abramova L.S., Ptitsa G.G. Classification of methods for determining safety indicators. *«Modernization and scientific research in the transport complex»*: Proceedings of International scientific and practice conference. Perm, Russian Federation, April 25-27, 2013. Vol. 2, PP. 8 - 16.

57. Abramova L.S., Kapinus S.V. Signs of ergatic systems in traffic control. *«Information technology and mechatronics»*: Proceedings of Ukrainian scientific and practice conference. Kharkiv. April 15, 2014. PP. 5-6.

58. Abramova L.S., Nagliuk I.S. Traffic management concept in cities. *VII Russian-German conference on road safety*. St. Petersburg, Russian Federation, June 6-7, 2014. PP. 127-129

59. Abramova L.S., Ptitsa G.G. The results of the reduction of partial accident rates in determining the road safety level. *«Academic Science - Problems and Achievements»*: Proceedings of 4th International scientific and practice conference. July 7-8, 2014. Moscow. CreateSpace 4900 LaCross Road, North Charleston, SC, USA 29406, 2014. PP. 165-169.

60. Abramova L.S. Road safety management concept. *«The latest technologies in automotive and transport»*: International scientific and practical conference. Collection of scientific works. Kharkiv, October 15-16, 2015. *Kharkiv National Automobile and Highway University*. PP. 61.

61. Abramova L.S., Ptitsa G.G. Experimental verification of the express method for determining the road safety level. *«Transport, ecology - sustainable development»*: Proceedings of 4th International scientific and practice conference. Varna, Bulgaria, 2016. PP. 288-292.

62. Abramova L.S., Kapinus S.V. Traffic management system features. *«Transport, ecology - sustainable development»*: Proceedings of 4th International scientific and practice conference. Varna, Bulgaria, 2016. PP. 107-110.

63. Abramova L.S., Shyrin V.V., Ptytsia H.H. Formation of innovative solutions for road safety management system. *«Road transport and infrastructure»*: Proceedings of 1st International scientific and practice conference. Kyiv, April 26-28, 2018. PP. 140-143.

64. Abramova L.S. Substantiation of distribution of road traffic management of road traffic in the cities. *«Experience of the past, practice of the future»*: Proceedings of 48th International Scientific Conference. New York. 2019. PP. 6-14.

65. Abramova L.S., Nahornyi Ye.V. Approach to the formation of hybrid traffic management. *«Modern innovative and information technologies in transport»*: Proceedings of 11th International scientific and practice conference. Kherson, 2019. Kherson State Maritime Academy. PP. 28-31.

66. Abramova L.S. Features of group traffic modeling in cities. *«Scientific achievements of modern society»*: Abstracts of the 1st International scientific and practical conference. September 11-13, 2019, Cognum Publishing House, Liverpool, United Kingdom. 2019. PP. 8-17.

67. Abramova L.S., Nahornyi Ye.V., Ptytsia H.H. The structure of the transformation of traffic parameters in the control system. *«International transport infrastructure, industrial centers and corporate logistics»*: Proceedings of 15th International scientific and practice conference. Kharkiv, June 6-8, 2019. Bulletin of Transport Economics and Industry. №66 (P2), Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv. 2019. PP. 61-63.

Scientific works, which additionally reflect the scientific results of the dissertation:

68. Abramova L.S., Chernobaev N.S., Shirin V.V. Formalization of managing traffic flows task on the road network in large cities. *Applied Radio Electronics*. 2009. Vol. 8, № 2. PP. 188-192.

69. Abramova L.S., Bakulich O.O. Automated traffic control systems: textbook manual. Kharkiv: *Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2014. 184 p.

70. Abramova L.S., Kapinus S.V. Construction of a tree of decisions for traffic management at a railway crossing. *Bulletin of transport and industry economics*. 2016. № 54 (special issue). PP. 33-34.

71. Abramova L.S., Ptitsa G.G. The risk of road accidents as a factor of transport systems reliability. «*Improving the organization of road traffic and transportation of passengers and goods*»: Proceedings of International scientific and practice conference. Minsk, Belarus, October 23-24, 2009. Belarusian National Technical University.

72. Abramova L.S., Nahliuk I.S., Shyrin V.V., Ptytsia H.H., Kapinus S.V. Road safety audit. Tutorial. Kharkiv: *Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2015. 281 p.

73. Abramova L.S., Kapinus S.V. System analysis of traffic control systems. *Young scientist*. 2016. №7. PP. 177-181.

74. Abramova L.S., Kapinus S.V. Traffic control at a railway crossing with elements of utility theory. *Bulletin of Zhytomyr State Technological university*. 2016. Vol. №2(77). PP. 13-17.

75. Abramova L.S., Ptitsa G.G. Impact of road conditions parameters on road safety. Belarusian National Technical University: collection of scientific works, 2013. PP. 29-36.

76. Abramova L.S., Chernobaiev M.S. Statement of the optimization problem of coordinated control parameters. *Current problems of road safety*: Proceedings of Scientific and practical seminar. Kharkiv, April 18, 2008. Kharkiv National University of Internal Affairs. PP. 5-7.

77. Abramova L.S., Ptytsia H.H., Shyrin V.V. Reference dictionary of terms and definitions on the organization and safety of road traffic: dictionary. Kharkiv: *Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2017. 226 p.

78. Abramova L.S., Nahliuk I.S., Shyrin V.V., Ptytsia H.H., Kapinus S.V., Levchenko O.S., Kharchenko T.V. Workshop on road safety audit: Tutorial. Kharkiv: *Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2019. 140 p.

79. Abramova L.S. Models of traffic management for ASTM: Copyright registration certificate № 49011. The state service of intellectual property of Ukraine. 29.04.13.

80. Abramova L.S., Ptytsia H.H. Method of classification of private factors of breakdown rate for highways of various technical categories: Copyright registration certificate № 49010. The state service of intellectual property of Ukraine. 29.04.13.

81. Abramova L.S., Kapinus S.V. On the choice of criteria for the traffic organization effectiveness by the utility theory methods: Copyright registration certificate № 49009. The state service of intellectual property of Ukraine. 29.04.13.

82. Abramova L.S., Chernobaiev M.S. Coordinated traffic management on the city's highway network. Monograph: Copyright registration certificate № 53862. The state service of intellectual property of Ukraine. 27.02.14.

83. Abramova L.S. Elements of the theory of artificial intelligence in traffic management: Copyright registration certificate № 53587. The state service of intellectual property of Ukraine. 10.02.14.

84. Abramova L.S. Features of road safety audit: Copyright registration certificate № 63002. The state service of intellectual property of Ukraine. 13.10.15.

85. Abramova L.S., Kapinus S.V. System analysis of traffic control systems: Copyright registration certificate № 69151. The state service of intellectual property of Ukraine. 13.12.16.

86. Abramova L.S. Method of dynamic traffic control at railway crossing: Copyright registration certificate № 69150. The state service of intellectual property of Ukraine. 13.12.16.



87. Abramova L.S., Shyrin V.V., Ptytsia H.H. Analysis of methods for determining road safety indicators: Copyright registration certificate № 69149. The state service of intellectual property of Ukraine. 13.12.16.

88. Abramova L.S., Shyrin V.V. Forecasting the parameters of traffic flows for road planning: Copyright registration certificate № 68955. The state service of intellectual property of Ukraine. 06.12.16.

89. Abramova L.S., Kapinus S.V. Traffic management at a railway crossing with elements of utility theory: Copyright registration certificate № 70197. The state service of intellectual property of Ukraine. 21.01.17.

90. Abramova L.S., Kapinus S.V. Determining the balance between traffic parameters: Copyright registration certificate № 88932. The state service of intellectual property of Ukraine. 24.05.19.

## ЗМІСТ

Вступ	37
1 Аналіз стану проблем розвитку теорії та практики впровадження систем управління дорожнім рухом	45
1.1 Основні напрямки розвитку систем та технологій управління дорожнім рухом у містах	45
1.2 Розвиток системного представлення комплексу «водій – автомобіль – дорога – середовище»	65
1.3 Аналіз методології оцінки зміни характеристик дорожнього руху при зміні параметрів дорожніх умов	74
1.4 Структурні та функціональні особливості систем управління дорожнім рухом в містах	90
1.5 Висновки за розділом 1	104
2 Концептуальний підхід до формування гібридних систем управління дорожнім рухом	106
2.1 Розробка концепції та архітектури проектування ІТС	106
2.2 Обґрунтування принципів проектування гібридної системи управління дорожнім рухом	119
2.3 Підхід до розробки структури програмного забезпечення ІСУ	133
2.4 Проектування елементів інформаційного забезпечення ІСУ	142
2.5 Висновки за розділом 2	156
3 Стратегія розподілення методів управління дорожнім рухом у містах	158
3.1 Принципи формування та задачі СУДР	158
3.2 Формалізація методів управління ДР	167
3.3 Визначення взаємозв'язку параметрів ТП у процесі моделювання динаміки руху у міських умовах	184
3.4 Висновки за розділом 3	195
4 Концепція контурного управління дорожнім рухом на стратегічному рівні управління	197

4.1 Моделювання групового руху транспортних засобів на перегоні вулично-дорожньої мережі.....	197
4.2 Формалізація процесу контурного управління транспортними потоками на ВДМ міста.....	219
4.3 Оптимізація параметрів контурного управління дорожнім рухом у містах .....	228
4.4 Висновки за розділом 4.....	244
5 Методологія динамічного управління дорожнім рухом на тактичному рівні.....	246
5.1 Обґрунтування доцільності впровадження динамічного управління дорожнім рухом.....	246
5.2 Розробка мікромоделі руху АТЗ у міських умовах руху .....	258
5.3 Розробка імітаційної моделі руху ТП для динамічного управління дорожнім рухом.....	273
5.4 Висновки за розділом 5.....	290
6 Практична реалізація запропонованих методів управління дорожнім рухом у містах.....	292
6.1 Модельний експеримент реалізації рівномірного руху ТП на контурі ВДМ м. Харків.....	292
6.2 Експериментальні дослідження режимів дорожнього руху на перегонах ВДМ м. Харків.....	302
6.3 Експериментальна розробка моделей калібрування перегонів геоінформаційної моделі ВДМ м. Харків.....	308
6.4 Висновки за розділом 6.....	316
Висновки .....	318
Список використаних джерел .....	321
Додаток А Характеристика рівнів обслуговування руху.....	346
Додаток Б Результати розрахунків значення параметрів транспортного потоку і транспортної мережі досліджуваної частини міста.....	348

Додаток В Опис процесу моделювання із графіками зміни інтенсивності ТП .....	351
Додаток Г Алгоритм пошуку мінімуму цільової функції у задачі з обмеженнями параметрів .....	359
Додаток Д Алгоритм імітаційної моделі поведінки АТЗ у транспортному потоці .....	361
Додаток Е Приклад опису перегонів та перехресть із урахуванням введеної порядкової нумерації перегонів .....	363
Додаток Ж Результати натурних вимірювань інтенсивностей на основних перехрестях транспортної мережі в ранковий час, в час «ППК» .....	365
Додаток И Результати розрахунків параметрів циклу світлофорного регулювання.....	369
Додаток К Вікна інтерфейсу вводу даних перехресть контуру .....	373
Додаток Л Результати розрахунків параметрів контурного управління та діаграми координації параметрів управління тп на контурі ВДМ.....	378
Додаток М Схема досліджуваної ділянки просп. Науки та вікна імітаційної моделі при проведенні експерименту .....	385
Додаток Н Акти впровадження результатів дисертації .....	388
Додаток П Свідоцтва про реєстрацію авторського права.....	392
Додаток Р Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	405

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми досліджень.** Сучасний стан транспортної системи України не в повній мірі задовольняє вимогам національної економіки для ефективного впровадження курсу розвитку України та інтеграції національної транспортної мережі в транс'європейську транспортну систему.

У Національній транспортній стратегії України на період до 2030 р. серед пріоритетних напрямів визначено питання створення конкурентоспроможної та ефективної транспортної системи, де управлінню дорожнім рухом (ДР) приділяється найбільша увага. При вирішенні проблем організації та управління транспортними системами (ТС) у міжнародній практиці широко використовуються інтелектуальні транспортні системи (Intelligent Transportation System, далі ITS), які призначені ефективно управляти транспортним процесом для підвищення працездатності вулично-дорожньої мережі (ВДМ) міста. У міжнародному Центрі НАН та МОН України сформульовані перспективні технічні напрямки створення новітніх технологій управління, до яких належать інформаційні технології інтелектуального управління розподіленими у просторі динамічними об'єктами. Для реалізації дій у цьому напрямку визначено загальні проблеми, що потребують розв'язання: високий рівень смертності та травматизму в результаті дорожньо-транспортних пригод (ДТП); недосконалість систем управління рухом транспорту; низький рівень впровадження та практичного застосування новітніх технологій і технічних засобів організації ДР. Накопичений всесвітній досвід створення та експлуатації систем управління дорожнім рухом (СУДР) свідчить, що розробка заходів у галузі проектування СУДР дозволяє отримати наступні результати: зменшення транспортних затримок – 15-40%; підвищення пропускної спроможності ВДМ – 10-15%; зменшення кількості ДТП – 15-20%; зменшення забруднення навколишнього середовища – 20-25%. Саме тому розробка основ СУДР є доцільним та актуальним питанням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана відповідно до Закону України «Про дорожній рух» від 30.06.1993 р. № 3353-ХІІ; Резолюцій Генеральної Асамблеї ООН № 64/255 від 10.05.2010, № 66/260 від 23.05.2012 і № 68/269 від 29.04.2014; Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року» від 30.05.2018 р. № 430-р.; Стратегії підвищення рівня безпеки дорожнього руху на період до 2020 року (схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 14 червня 2017 р. № 481); Державної Програми підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2020 року (постанова Кабінету Міністрів України від 25 квітня 2018 р. № 435). Дисертаційна робота пов'язана з виконанням науково-дослідних робіт кафедри організації і безпеки дорожнього руху Харківського національного автомобільно-дорожнього університету: «Розробка проекту реконструкції обладнання системи управління транспортними потоками з метою зниження шкідливого впливу автотранспортних засобів на навколишнє середовище м. Харків (зелена хвиля)» (ДР № 0103U002604), «Розробка наукових основ та методів удосконалення транспортних систем мегаполісів» (ДР № 0111U001503), «Науково-практичний підхід підвищення безпеки дорожнього руху на залізничних переїздах» (ДР № 0115U003272); «Перспективні напрямки вирішення проблем підвищення безпеки дорожнього руху» (ДР № 0116U007632; ДР № 0117U006846; ДР № 0119U000631; ДР № 0119U103248); «Послуги з інженерного проектування (послуги з розробки схеми організації дорожнього руху на дорогах Дніпровського району)» (ДР № 0117U004878).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є підвищення ефективності функціонування транспортної мережі міста на підставі формування теоретичних основ управління дорожнім рухом для подальшого розвитку систем управління.

*Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:*

- проаналізувати стан проблем розвитку теорії та практики впровадження систем управління ДР;
- сформулювати теоретичні основи проектування багаторівневого управління ДР у містах;
- узагальнити наукові основи та розробити концепцію формування гібридних систем управління ДР;
- розробити стратегію розподілення методів управління ДР для усунення наслідків збурень на ТП у міських умовах руху;
- виконати теоретичні дослідження організації рівномірного руху ДР на магістралях ВДМ методом контурного управління;
- розробити методологію динамічного управління ДР на основі управління швидкістю руху ТП для тактичного рівня СУДР;
- провести експериментальну апробацію запропонованих методів управління ДР для різних рівнів управління.

**Об’єктом дослідження** є розподілене управління дорожнім рухом.

**Предметом дослідження** є закономірності параметрів дорожнього руху при зміні умов руху на ВДМ міста.

**Методи дослідження.** При створенні теоретичних основ розробки систем управління дорожнім рухом у містах використовувалися принципи системного аналізу, теорії автоматичного управління, теорії й практики інтелектуальних систем управління, теорії транспортних потоків, теорії планування міст, теорії прийняття рішень. Для досягнення мети і вирішення задач дослідження були застосовані методи аналітичного та імітаційного моделювання, методи оптимізації. Моделі прогнозування було реалізовано у СКМ MatLab. Експериментальні дослідження були проведені за допомогою модельних експериментів на розроблених імітаційних моделях із застосуванням результатів натурних спостережень на ВДМ міста. Оцінку ефективності запропонованих методів управління отримано у PTV VISSIM.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у розвитку теоретико-методологічних основ управління дорожнім рухом із позицій визначення взаємозв'язку параметрів ДР при зміні режимів міського руху.

Важливі наукові рішення, що запропоновані в процесі досліджень і визначають новизну дисертації, полягають у наступному:

***вперше:***

– розроблені теоретичні основи структурного синтезу, аналізу алгоритмів управління та розробки інтелектуальних агентів для проектування гібридних систем управління ДР за технологією розподілення інформаційних та технологічних складових об'єкту управління для підвищення соціально-економічних показників функціонування ВДМ міст;

– методологічно обґрунтовані та аналітично визначені параметри динамічного управління ТП у складних міських умовах на підставі визначення місця утворення та параметрів «ударних хвиль» як причини переходу ТП з детермінованого стану до стохастичного, що підвищує пропускну спроможність ВДМ;

– сформовано концепцію контурного управління ДР шляхом організації рівномірного руху ТП по магістралям контуру на підставі визначення параметрів руху груп АТЗ та оптимізації параметрів управління, що зменшує час пересування по мережі та рівень екологічного забруднення міст;

***удосконалено***

– методологію мікромоделювання руху окремого АТЗ у потоці підвищеної щільності із урахуванням його динамічних параметрів на відміну від існуючого логічного опису АТЗ як однакових клітин однаково поєднаних між собою за теорією клітинних автоматів;

– процес макромоделювання параметрів ТП у міських умовах руху за рахунок визначення параметру локальної щільності ТП, на відміну від відомих моделей щільності ТП, які у складних умовах руху не надають конкретного результату;

***отримали подальший розвиток:***



– моделі зміни основних параметрів ТП у вигляді діаграм ТП для калібровки геоінформаційної моделі міста шляхом поєднання нормативних характеристик руху з емпіричними даними на підставі фундаментальної діаграми ТП.

**Практичне значення отриманих результатів.** Отримані у дослідженні результати мають як теоретичне, так і практичне значення. Запропоновані в роботі методики визначення параметрів управління придатні до використання на різних стадіях функціонування ДР у містах: динамічне управління на під'їздах до складних ділянок транспортної мережі для підвищення соціальних показників ефективності руху; контурне управління для організації рівномірного руху на мережі магістралей міста забезпечує вирішення складової техногенної проблеми ДР у містах. Розроблена геоінформаційна модель сприяє отриманню адекватної та точної моделі транспортної мережі міста для організації параметричного контролю за рухом транспорту. Розроблені імітаційні моделі дозволяють на стадії проектування визначити параметри управління та оцінити їх вплив на ДР. Основні наукові положення, розробки та рекомендації прийняті до впровадження:

– у навчальному процесі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету у підготовці фахівців за спеціальністю 275 «Транспортні технології»;

– Департаментом інфраструктури Харківської міської ради (акт про прийняття до впровадження № 4146/0/78-19 від 20.12.2019 р.);

– відділом транспорту, зв'язку та енергетики Краматорської міської ради (акт про прийняття до впровадження від 22.01.2020 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Результати, що виносяться на захист, отримані автором самостійно та викладені у роботах [25,32,35,38,48,51,55,60,64, 66,79,83,84,86]. У монографіях: розроблені системні підходи до удосконалення координованого управління ДР на мережі магістралей міста [31,82], ідея розробки концепції управління безпекою ДР [46]. Запропоновано застосування показника дорожньо-транспортних витрат для визначення ефективності

функціонування ВДМ [6]; обґрунтовано доцільність застосування системного аналізу до вирішення проблем ДР [7,73,85]; обґрунтовано вибір параметрів КУ [5,12,26,49,76]; обґрунтовано вибір методів прогнозування інтенсивності та складу ТП [1,8,36,37,88]; доведено доцільність застосування хмарного сервісу до управління ДР [34]; розроблено ромбовидну структуру СУДР [13]; визначено основні напрямки моделювання параметрів ТП [2,4,10,14,22,45,67,90]; запропоновано основні показники оцінки ефективності ВДМ [9,17,27]; визначено та обґрунтовано застосування типів управління ДР [3,16,20,24,44,58,62,68,69]; визначення складових структури імітаційних моделей взаємодії параметрів ДР при: маневрі АТЗ на дорозі [11], координованому управлінні [15,18], русі ТП у щільному потоці [52]; розроблено методику динамічного управління ДР у місті [28,30]; вперше визначені ергатичні складові СУДР [57]; визначено особливості процесу прийняття рішень для СУДР [21,29]; доведено доцільність застосування теорії корисності в процесі прийняття рішень в СУДР [23,70,74,81,89]; визначено основні напрямки управління безпекою ДР [50,53,54,63]; запропоновано концепцію проектування гібридних систем управління ДР [47,65]; проведено оцінку впливу характеристик дорожніх умов на безпеку ДР [75]; запропоновано поняття надійності транспортної системи [33,71]; обґрунтовано доцільність розподілення методів оцінки безпеки ДР [19,39,42,43,56,87]; розроблено підхід до удосконалення методу визначення підсумкового коефіцієнту аварійності [40,41,59,80]; розроблено технологію проведення аудиту безпеки ДР [61,72,78]; проведено аналіз визначень термінів у нормативних документах [77].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на таких конференціях: міжнародній науково-практичній конференції «Наукові дослідження та їх практичне застосування» (Одеса, 2007); науково-технічній конференції із міжнародною участю Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна (Харків, 2010); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Логістика промислових регіонів» (Донецьк, 2012); Міжнародній

науково-практичній конференції «Удосконалення організації дорожнього руху й перевезень пасажирів та вантажів» (Мінськ, Білорусія, 2012); VII Міжнародній науково-практичній конференції «Безпека дорожнього руху: правові та організаційні аспекти» (Донецьк, 2012); III Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми підвищення рівня безпеки, комфорту та культури дорожнього руху» (Харків, 2013); Міжнародній науково-практичній конференції «Модернізація та наукові дослідження у транспортному комплексі» (Перм, РФ, 2013); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інформаційні технології і мехатроніки» (Харків, 2014); VII російсько-німецькій конференції з безпеки дорожнього руху (Санкт-Петербург, РФ, 2014); IV міжнародній науково-практичній конференції «Академічна наука - проблеми й досягнення» (Москва, РФ, North Charleston, SC, USA, 2014); Міжнародній науково-практичній конференції «Новітні технології в автомобілебудуванні та на транспорті» (Харків, 2015); науково-технічній конференції із міжнародною участю «Транспорт, екологія – сталий розвиток» (Варна, Болгарія, 2016); I Міжнародній науково-практичній конференції «Автомобільний транспорт та інфраструктура» (Київ, 2018); 48th International Scientific Conference «Experience of the past, practice of the future» (New York, USA, 2019); XI Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інноваційні та інформаційні технології на транспорті» (Херсон, 2019); 1st International scientific and practical conference «Scientific achievements of modern society» (Liverpool, UK, 2019); XV науково-практичній міжнародній конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика» (Харків, 2019).

Дисертаційна робота в повному обсязі доповідалась на науковому семінарі кафедр ХНАДУ: транспортних технологій, транспортних систем і логістики, організації і безпеки дорожнього руху (м. Харків, 25.06.2020 р.).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 90 наукових праць, у тому числі: 3 монографії, 48 публікацій у наукових фахових виданнях України та інших держав (з них 46 у виданнях, що включені до

міжнародних наукометричних баз, у тому числі 2 статті у виданнях, що індексуються у Scopus та WoS). За матеріалами досліджень опубліковано 3 навчальних посібника, 1 словник термінів, 19 тез у збірниках доповідей міжнародних наукових конференцій, отримано 12 авторських свідоцтв України на твір науково-практичного характеру.

## РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМ РОЗВИТКУ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ  
ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ДОРОЖНІМ РУХОМ1.1 Основні напрямки розвитку систем та технологій управління  
дорожнім рухом у містах

Автоматизація управління рухом є провідною задачею сучасного розвитку суспільства, до вирішення якої застосовуються як автоматизовані системи управління транспортним потоком, так і автоматичні та полу автоматичні системи управління.

Первинне знання щодо систем надає їх класифікація, яку проводять за різними ознаками: за походженням, за складом та за призначенням. Класифікації можуть бути багаторівневими, вкладеними, але жодна відома класифікація не є повною. Найбільш розповсюдженою вважається класифікація за походженням (рис. 1.1) [91], що дозволяє розподілити системи на штучні, природні та ергатичні (змішані).



Рисунок 1.1 – Класифікаційне дерево систем

Розглянута у дослідженні система управління дорожнім рухом належить до транспортних систем та має ознаки технічних, екологічних та ергатичних систем. Розглянемо їх докладніше. Технічні системи відтворюються людьми, як засіб утворення штучної середовища, що забезпечує комфортне існування та захист

від природних факторів. До основних властивостей технічних систем можливо віднести:

- наявно виражені системні кордони та часовий життєвий цикл;
- морфологія (упорядкування) містить повну інформацію відносно функцій системи та загалом їх визначає. Апріорна залежність між морфологією та функціями залишається;
- наявність метаболізму, а саме через обмін з природною середою енергією та інформацією обмежено періодом функціонування системи.

Ергатичну систему розглядають як сукупність технічних пристроїв, та людей, поєднаних логікою технологічного процесу та підвладних загальному результату – досягнення максимальної ефективності процесу. Теорія ергатичних систем призначена для розробки загальносистемних рекомендацій для проектування функціональної структури та розподіленню відповідальності між людиною та технікою для прогнозування кінцевого результату [92].

До властивостей ергатичних систем відноситься наступне:

- 1) ергатична система активна в деякій не порожній області простору поведінки та стану системи;
- 2) ергатична система забезпечує постійність та незалежність своєї активності у різноманітних станах зовнішнього та внутрішнього середовища;
- 3) ергатична система утримує основні показники щодо необхідного функціонування у деяких відповідних межах;
- 4) людина у ергатичній системі повинна стежити за станом зовнішнього та внутрішнього середовища та прагнути реалізувати алгоритм досягнення відповідного рівня ефективності системи у цілому;
- 5) ергатична система зберігає основну функцію при варіативності функціональних властивостей людських та машинних частин, а також внутрішнього та зовнішнього середовища;
- 6) розвиток ергатичних систем визначається ступенем орієнтації людини на досягнення мети.

Надана більш ретельна класифікація систем за основними (рис. 1.2), ознаками, до яких належить кількість входів та виходів, рівень сигналів та властивості операцій.



Рисунок 1.2 – Класифікаційне дерево за основою

Одномірні – це системи, що мають один вхід та один вихід. Багатомірні мають декілька входів та виходів. У скупчених системах входи (виходи) можливо навести крапками, а у розділених – входи (виходи) розподілені у просторі. Якщо вхідні (вихідні) сигнали можуть приймати безперервну множину значень по величині та у часі, то система відноситься до безперервних; якщо сигнал надходить у дискретний момент часу та має означену кількість значень, то такі системи є дискретними (імпульсними). Система вважається стаціонарною, якщо її динамічні властивості не змінюються у часі, оператори не залежать від часу, тобто інваріантні відносно зрушенню у часі. Реакція нестаціонарних систем на вхідний вплив залежить як від поточного часу, так і від моменту застосування вхідного впливу. Наведений опис класифікації багатомірних систем застосовано для наочності, але він не є повним.

На підставі наведеного можливо стверджувати, що системи управління дорожнім рухом мають ознаки розподілених, дискретних та нестаціонарних

складних систем, що застосовуються для вирішення задач управління дорожнім рухом сучасними засобами інформаційних та комп'ютерних технологій.

Складна за організацією СУДР являє собою гібридну систему, до якої належать різноманітні взаємодіючі підсистеми, що виконують вимірюючі, керуючі, прогнозуючі та приймаючі рішення функції для досягнення єдиної мети – підвищення ефективності дорожнього руху у містах.

Згідно функціям АСУДР та функціям управління, кожен діючий АСУДР можна віднести до одного з п'яти поколінь, які відомі у науці та практиці [93]:

Покоління 1. Розрахунок параметрів управління, і введення їх в АСУДР виконуються вручну ("Старт"(Москва), "Город-М"(Алма-Ата, Новосибірськ, Томськ, Ташкент).

Покоління 2. Розрахунок керуючих параметрів автоматизований, але введення їх в АСУДР виконуються вручну ("Старт-1"(Москва), АСКУ "Магістраль" (Баку), "Город-М1" (Омськ, Мінськ, Кишинів, Рига, Ярославль), "Сигнал", "Смарагд", TRANSYT (Великобританія).

Покоління 3. Розрахунок керуючих параметрів і введення їх в АСУДР автоматизовані. Управління здійснюється на підставі прогнозу динаміки транспортних потоків (TRANSYT (Великобританія), система Peek Traffic з підсистемою AUT (Великобританія), АСУДР Siemens (Санкт-Петербург).

Покоління 4. Управління в реальному часі, тобто формування та передача управляючих дій здійснюється у режимі реального часу.

Останнім часом почали функціонувати нові системи управління, які функціонують із застосуванням теорії штучного інтелекту.

Покоління 5. Інтелектуальні системи управління FRED (Голландія), TRYS (Німеччина), проект демонстрації транспортного коридору, Санта-Моніка, США.

Існуючі в даний час в містах України АСУДР, в більшості випадків відносяться до систем першого і другого покоління, де керування транспортними потоками здійснюється за жорсткими планами координації і при цьому не враховується реальна транспортна ситуація на дорогах. Істотним



недоліком є закладена в них функціональна обмеженість, відсутність сумісності обладнання системи при її нарощуванні, вузькоспеціалізована орієнтованість ліній зв'язку, природний знос устаткування і невелика територія застосування (як правило, охоплює невеликий район в межах міста). Внаслідок цього вони практично не здійснюють істотного впливу на управління транспортними потоками і не впливають на підвищення пропускної спроможності та безпеку дорожнього руху.

На підставі проведеного аналізу визначено, що автоматизовані системи управління дорожнім рухом за своєю структурою, розподіляються в залежності від призначення, складу та розташування елементів для реалізації функцій управління на децентралізовані, централізовані та ієрархічні системи [94], але усі типи структури мають певні недоліки та обмеження при функціонуванні. У світовій практиці досліджень у галузі управління дорожнім рухом у містах розробляються та аналізуються централізовані та децентралізовані системи управління, як оптимальні [95].

У децентралізованих системах, управління можливо реалізувати за допомогою незалежних один від одного пунктів управління за даними детекторів транспорту (рис. 1.3). Прикладом децентралізованої системи є управління світлофорними пристроями, коли пункт управління отримує інформацію, що до інтенсивності дорожнього руху від детекторів транспорту (ДТ), розраховує цикл світлофорного регулювання та передає управляючі дії на світлофор (СВ) або на керований дорожній знак (КДЗ), тобто реалізується локальне управління ділянками вулично-дорожньої мережі. До складу пункту управління (ПУ) обов'язково входить дорожній контролер (КД), як пристрій місцевого управління ДР.

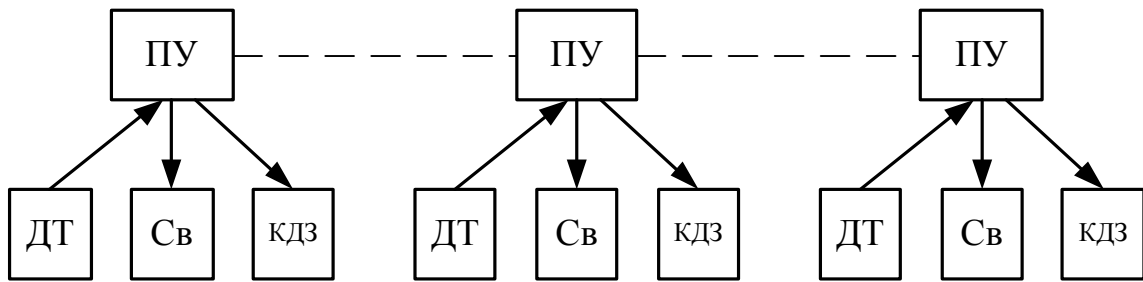


Рисунок 1.3 – Децентралізована структура АСУДР

Децентралізовані АСУДР характеризуються тим, що у них відсутній єдиний центр управління. Складність функціонування такої системи полягає у розподіленні ділянок вулично-дорожньої мережі (ВДМ) як за територією, так і за управлінням. Децентралізовану структуру АСУДР можливо застосувати при управлінні дорожнім рухом у малих містах, де транспортна мережа недостатньо розвинута. У якості району або зони управління може бути або окрема магістраль, або сукупність перехресть на вулично-дорожній мережі міста. Також за допомогою децентралізованої системи управління можливо реалізувати управління керованими дорожніми знаками у зоні дії системи.

Недоліки децентралізованої системи : низькі мобілізаційні здібності та складність узгодженості управління на межах районів управління.

Централізовані АСУДР характеризуються наявністю центру управління, пов'язаного з контролерами лініями зв'язку. Як правило, централізовані АСУДР мають можливість здійснювати багатопрограмне управління (рис. 1.4) на окремих ділянках ВДМ.

У централізованих системах центр управління отримує інформацію від дорожніх контролерів (КД), які розташовані у зоні дії АСУДР та обробляють її. Визначені управляючі дії передаються на світлофорні пристрої та керовані дорожні знаки, при цьому необхідна обробка великого об'єму даних, що потребує застосування великих обчислювальних потужностей у центрі управління.

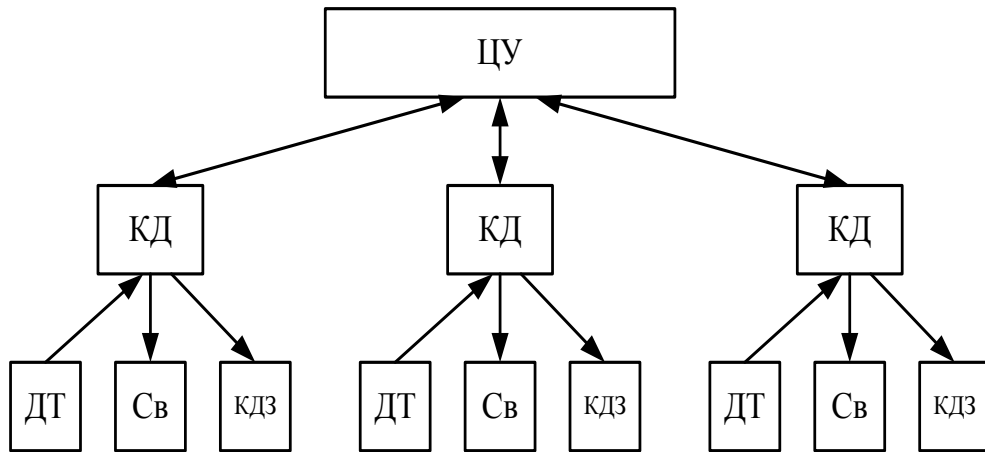


Рисунок 1.4 – Централізована структура АСУДР

Подібні системи застосовують при управлінні дорожнім рухом на магістралях міст, або на вулично-дорожній мережі невеликих міст. Найважливішими перевагами системи з централізованою структурою можливо визначити наступні: високі мобілізаційні здібності; відносно малий час реакції на дії (внутрішні або зовнішні); реалізуються процеси інформаційної взаємодії (координації дій нижчого рівня); існує принципова можливість глобальної оптимізації управління системою в цілому.

До недоліків централізованих структур можливо віднести: в цілому недостатньо високі адаптаційні здібності (негнучкість) системи; відносно низька надійність системи; сильна залежність поведінки усієї системи від характеристик та алгоритму управління центру.

Функції центру управління:

- моніторинг елементів транспортної мережі з метою підтримки її працездатності;
- формування керуючих впливів на дорожній рух;
- можливість налаштування технічних засобів контролю на мережі;
- централізоване управління світлофорними об'єктами, інформаційними табло та керованими дорожніми знаками;
- накопичення і обробка даних за допомогою системи управління базами даних (СУБД);

- візуалізація даних;
- формування бази даних параметрів транспортних потоків.

Устаткування центру складається із комунікаційного серверу і серверу баз даних, автоматизованих робочих місць (АРМ) операторів, АРМ інженера-технолога, мультиекранами системи відеоспостереження та мнемосхеми, яка являє собою карту району ВДМ, що обслуговується, із позначеними світлофорними пристроями. В той же час, в мінімальному варіанті система може бути розгорнута на базі однієї ЕОМ.

При ієрархічній структурі (рис. 1.5) управління окремими світлофорами, дорожніми показчиками, АТЗ, розташованими в районі дії АСУДР, здійснюється за допомогою декількох КД, що знаходяться на нижньому рівні ієрархії.

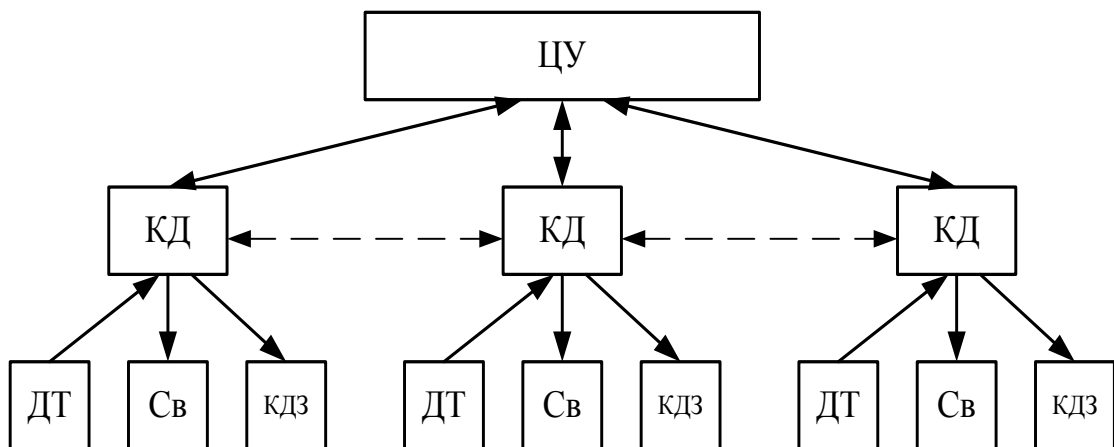


Рисунок 1.5 – Ієрархічна структура АСУДР

Кожен КД забезпечує управління рухом в певному локальному мікрорайоні. Координація роботи декількох локальних систем виконується централізовано на більш високому рівні ієрархії. У таких систем існує зв'язок між КД, що дозволяє підвищити надійність функціонування АСУДР та дає можливість розподілити функції управління у системі по рівням.

Ієрархічна система найбільш ефективна при організації управління дорожнім рухом у великих містах та при реалізації складних алгоритмів управління дорожнім рухом. Така система має у складі центру управління

групу фахівців (ОПР – особа, або колектив), що приймає рішення щодо вибору методу управління дорожнім рухом у зоні дії управління, тобто система управління реалізує функцію прийняття рішень при управлінні, тому є більш ефективна та працездатна, ніж попередні.

Ієрархічна структура є розвиненою структурою в порівнянні з централізованою. Її переваги, в порівнянні з останньою, у наступному: 1) високі адаптаційні здібності (структурна гнучкість); у ієрархічній системі немає яскраво вираженої "найважливішої" ланки і головних зв'язків, і відмови в яких-небудь підсистемах не можуть привести до розпаду системи.; 2) підвищена надійність функціонування.

Відома загальна класифікація основних технологій управління транспортними потоками за територіальною ознакою, за часом дії і за типом управління (рис. 1.6): локальне управління перехрестям на ВДМ; зональне управління дорожнім рухом на ВДМ району міста; системне управління дорожнім рухом на ВДМ міста [33].

Методи управління транспортними потоками на локальному рівні широко відомі і можуть бути класифіковані по гнучкості, тривалості циклу і фаз світлофорного регулювання [96]: регулювання за попередньо встановленими жорсткими параметрами управління; регулювання за вибором програм управління в залежності від поточної транспортної ситуації на перехресті; адаптивне регулювання.

При локальному регулюванні керуючі параметри циклу світлофорного регулювання визначаються заздалегідь, виходячи із середніх значень параметрів транспортного потоку, схеми організації дорожнього руху та топологічних параметрів перехрестя.

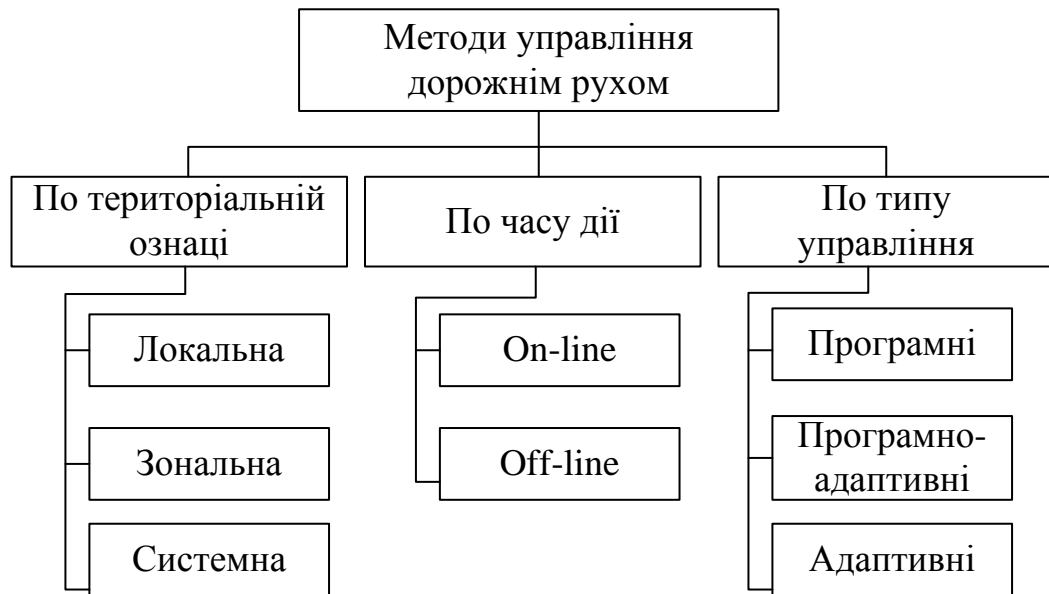


Рисунок 1.6 – Загальна класифікація методів управління дорожнім рухом

Даний тип регулювання широко й ефективно застосовується при стаціонарних транспортних потоках і ненасиченому русі. Керуючий вплив можливо навести у вигляді

$$\bar{U} = f(\bar{N}(t), \bar{S}, Z(t)), \quad (1.1)$$

де  $\bar{U}$  – вектор керуючих впливів;

$\bar{N}(t)$  – вектор усереднених значень інтенсивності транспортного потоку в момент часу;

$\bar{S}$  – вектор параметрів топології елементів ВДМ;

$Z(t)$  – параметри схеми організації дорожнього руху;

$t$  – час введення керуючих параметрів.

Регулювання з вибором програм управління передбачає визначення набору параметрів світлофорного регулювання, які застосовуються в системі управління на підставі аналізу стану транспортного потоку на підходах до перехрестя із другорядних напрямків. Сигнал світлофора, що дозволяє рух, для головної дороги діє постійно до надходження інформації про прибуття на підході з другорядного напрямку перехрестя автотransпортних засобів. Якщо

другорядний напрямок завантажується до закінчення виділеного основного такту для головної дороги – рух по головній дорозі продовжується. Тоді керуючий вплив можна описати таким чином

$$\bar{U} = f(\bar{N}, \bar{S}, Z, \xi), \quad (1.2)$$

де  $\xi$  – сигнал про прибуття автотранспортного засобу у другорядному напрямку.

Адаптивне регулювання здійснюється в режимі реального часу шляхом безперервної зміни параметрів світлофорного регулювання з урахуванням параметрів транспортного потоку, часу очікування і інтервалів прибуття АТЗ на підходах до перехрестя. Вихідні параметри визначаються за допомогою детекторів транспорту і передаються в центр управління дорожнім рухом, де проводиться розрахунок керуючих параметрів світлофорного регулювання для поточної дорожньої ситуації. Вектор керуючих впливів в загальному вигляді може бути визначений

$$\bar{U} = f(\bar{N}(t), \bar{S}, Z, \omega(t)), \quad (1.3)$$

де  $\omega(t)$  – поточні параметри транспортного потоку і дорожньої ситуації на підходах до перехрестя.

При зональному управлінні найбільш поширеними є алгоритми, засновані на застосуванні заздалегідь розрахованих базових програм координації (бібліотеки базових програм). Зміна програм дозволяє з деякою затримкою реалізувати режим управління у відповідності до реальних умов руху. Перехід з однієї програми на іншу проводиться поступово шляхом скорочення або подовження окремих фаз у встановлених межах. Кількість програм може становити від однієї до декількох десятків.

Вибір програми, який найповніше відповідає виникаючим умовам руху, в загальному вигляді можна навести залежністю

$$n = f(t\{\bar{X}_T\}), \quad (1.4)$$

де  $n$  – номер програми;

$t$  – час доби;

$\{\bar{X}_T\}$  – вектор параметрів об'єкту управління.

$$\{\bar{X}_T\} = \{\bar{N}, \bar{V}, \bar{Q}\}, \quad (1.5)$$

де  $\bar{N}$  – вектор інтенсивності руху транспорту в транспортній мережі;

$\bar{V}$  – вектор швидкості;

$\bar{Q}$  – вектор параметра довжини черги.

Системне управління забезпечує оптимізацію функціонування ТП в мережі, до якої входить безліч перехресть ВДМ та базується на методах, які враховують макропараметри транспортних потоків. Причому зміна управляючих дій на одному перехресті, неминуче викликає зміну характеристик ТП на суміжних елементах ВДМ.

Особливістю сітьових АСУДР є їх призначення для визначення параметрів управління на декількох перехрестях, зазвичай пов'язаних в єдину мережу, що характеризується значною інтенсивністю руху транспортних засобів між перехрестями із невеликими (до 600..700 м) відстанями між ними. Для визначення параметрів системного управління, використовується інформація щодо топології мережі, взаємозв'язках транспортних потоків на суміжних перехрестях, а також часу проїзду між перегонами мережі.

В дійсний час у світовій практиці в складі адаптивних систем управління дорожнім рухом (СУДР) найбільш поширені наступні технології управління транспортними потоками [97]:



1) технологія управління за фіксованими планами (координоване управління).

2) технологія мережевого адаптивного управління.

3) технологія ситуаційного управління.

Відомі системи, що реалізують зазначені технології управління та мають централізовану і децентралізовану архітектуру, наведені в таблиці 1.1 [98].

Таблиця 1.1 – Результати аналізу відомих систем управління

Технологія управління	Архітектура системи	Постачальник	Продукт МО
UTOPIA	децентралізована	MIZAR	UTOPIA
UTOPIA	децентралізована	Peek Traffic BV	UTOPIA
SCOOT	централізована	Siemens	TMS/COMET
SCOOT	централізована	Peek Traffic BV	TMS
SCOOT	централізована	TRL Limited	TMS
SCATS	централізована	TyCo	RTA – TMC
BALANCE	централізована	GEVAS	BALANCE
MOTION	централізована	Siemens	SiTraffic/Scala
ITACA	централізована	Telvent	ITACA
ROSE	децентралізована	Imtech Traffic & Infra /Peek Traffic BV	ImFlo

Розглянуті системи належать до різних поколінь СУДД. Перехід до кожного наступного покоління систем характеризується скороченням транспортної затримки на 12-15 % (залежно від конкретного об'єкта). Для адаптивних систем третього покоління особливо важливо підкреслити їх ефективність при завантажених вулично-дорожніх мережах для використання резервів пропускнуої спроможності. Перехід до кожного наступного покоління і класу технології управління дорожнім рухом пов'язаний з істотним збільшенням витрат, як на будівництво, так і на експлуатацію системи, бо витрати плануються не тільки на утримання технічних засобів, але і на технологічну підтримку – регулярне оновлення бібліотек програм координації (ПК) і параметрів світлофорного регулювання, необхідних для ефективного функціонування АСУД.

До систем останнього четвертого покоління належать системи SCOOT, UTOPIA, ITACA, ROSE, BALANCE, які за архітектурою поділяються, в свою чергу, на централізовані і децентралізовані.

Для порівняльного аналізу систем потрібно розглянути технології SCOOT і UTOPIA, як найбільш поширені у світі АСУД з різними архітектурними рішеннями.

В основі функціонування децентралізованої системи UTOPIA лежить принцип обміну даними безпосередньо між контролерами сусідніх перехресть. Детектори транспорту підключені безпосередньо до дорожнього контролеру та доповнюють параметри ТП на сусідніх перехрестях. Крім установки програмного комплексу керуючого центру, в периферійні дорожні контролери встановлюється спеціальний блок SPOT, вироблений MIZAR і є периферійною частиною системи UTOPIA. Цей блок щомиті взаємодіє з дорожнім контролером, забираючи дані його детекторів і директивно задаючи стан сигнальних груп, а також забезпечує пріоритет громадського транспорту. При цьому сам дорожній контролер власної логіки управління не має. Якість розрахунків програм координації або локальних режимів світлофорного регулювання (в порівнянні з централізованою системою) є сумнівним, оскільки кожен контролер здатний об'єднати зв'язками обмежену кількість суміжних перехресть. UTOPIA працює на базі транспортної моделі.

В процесі роботи централізованої системи з використанням моделі SCOOT (матеріали компанії ImtechPEEK, 2011), система централізовано отримує інформацію про параметри транспортних потоків (ТП) безпосередньо від детекторів та визначає час функціонування детектора для кожного перегону. Далі моделюється рух автомобілів по перегону при середній швидкості руху на даний час доби і їх приєднання до черги (якщо така є). Факт від'їзду АТЗ встановлюється детекторами, що стоять на виході з перехрестя.

Після моделювання дані використовуються системою в трьох оптимізаторах, які безперервно адаптують три основних параметри управління дорожнім рухом: тривалість зеленого сигналу світлофорного циклу для

кожного напрямку, зсув фаз світлофорів на сусідніх перехрестях і час, що виділяється для проїзду регульованого перехрестя для всіх підходів. Ці три оптимізатора використовуються для безперервної адаптації даних параметрів для всіх перехресть, що перебувають в зоні, яка контролюється системою SCOOT.

Альтернативною системою, у порівнянні з UTOPIA і SCOOT, є BALANCE. Як і SCOOT, BALANCE розраховує основні керуючі плани (загальної стратегії управління) для всіх контролерів і пересилає їм відповідний набір обраних параметрів для місцевого управління світлофорних об'єктів. Головна відмінність системи BALANCE від UTOPIA і SCOOT є те, що вона базується на транспортній моделі і використовує її для розрахунку як поточного стану дорожнього руху, так і майбутнього стану. Головна перевага використання транспортної моделі в системі BALANCE полягає в тому, що наявність прогнозування параметрів ТП зменшує кількість детекторів в мережі при експлуатації автоматизованої системи управління дорожнім рухом (АСУДР). Також немає вимог до місця розташування детекторів, в той час як UTOPIA і SCOOT надзвичайно вимогливі до зазначення точного положення детекторів.

BALANCE часто застосовується з локальними контролерами на базі методу місцевого управління TRENDS/EPICS. TRENDS/EPICS може працювати окремо і самостійно, виконуючи при цьому локальне адаптивне управління світлофорних об'єктів. Якщо означені методи адаптивного сітьового управління дорожнього руху застосовуються у системі BALANCE, то вони використовують базовий набір параметрів від BALANCE, що дозволяє системі самостійно налаштувати локальне управління на базі глобальних вимог.

Для коректної роботи системи адаптивного сітьового управління дорожнього руху необхідні наступні вимоги:

- високий рівень надійності детекторів;
- наявність параметрів поточного і майбутнього стану дорожнього руху;
- наявність каліброваної актуальної транспортної моделі.

Аналіз виявив, що з методологічної точки зору наведені системи реалізують технологію сітьового адаптивного управління та мають багато спільного в частині принципів підходів до визначення параметрів регулювання: вони передбачають розрахунок базових значень параметрів ТП в реальному часі з їх подальшим уточненням і використовують імітаційні моделі TRANSYT або OPTIMA – пакети для прогнозу транспортної ситуації і оцінки варіантів її розвитку [99].

Для порівняння варіантів проектування децентралізованої і централізованої систем наведемо порядок технологічного та інформаційного функціонування децентралізованої і централізованої системи (рис. 1.7).

До складу базового інформаційного керуючого апаратно-програмного комплексу та дорожніх контролерів входить геометрія ВДМ, окремих перехресть, ширина і кількість смуг руху, геометричні та регульовані напрямки, схеми пофазного регулювання, від яких залежать параметри ТП.

У разі впровадження дорожніх контролерів децентралізованої АСУД для розрахунків параметрів світлофорного регулювання додатково використовується пакет для інженерних розрахунків TRANSYT.

Передбачається, що при проектуванні роботи по збору вихідних даних (конфігурація світлофорного об'єкта, існуючі схеми організації дорожнього руху, інтенсивність, швидкість) окремо виконуються попередні розрахунки світлофорного регулювання і програми координації для мережі перехресть. Результати розрахунків передаються у кожен дорожній контролер та в керуючий апаратно-програмний комплекс, в даному випадку – зональний центр (локальні режими управління, програми координації).

У разі незадовільної роботи АСУД процедура розрахунків і завантаження інформаційного забезпечення повторюється. На практиці ефективність роботи системи перевіряється з використанням програмних комплексів моделювання руху транспортних потоків – VISSIM, AIMSUN.

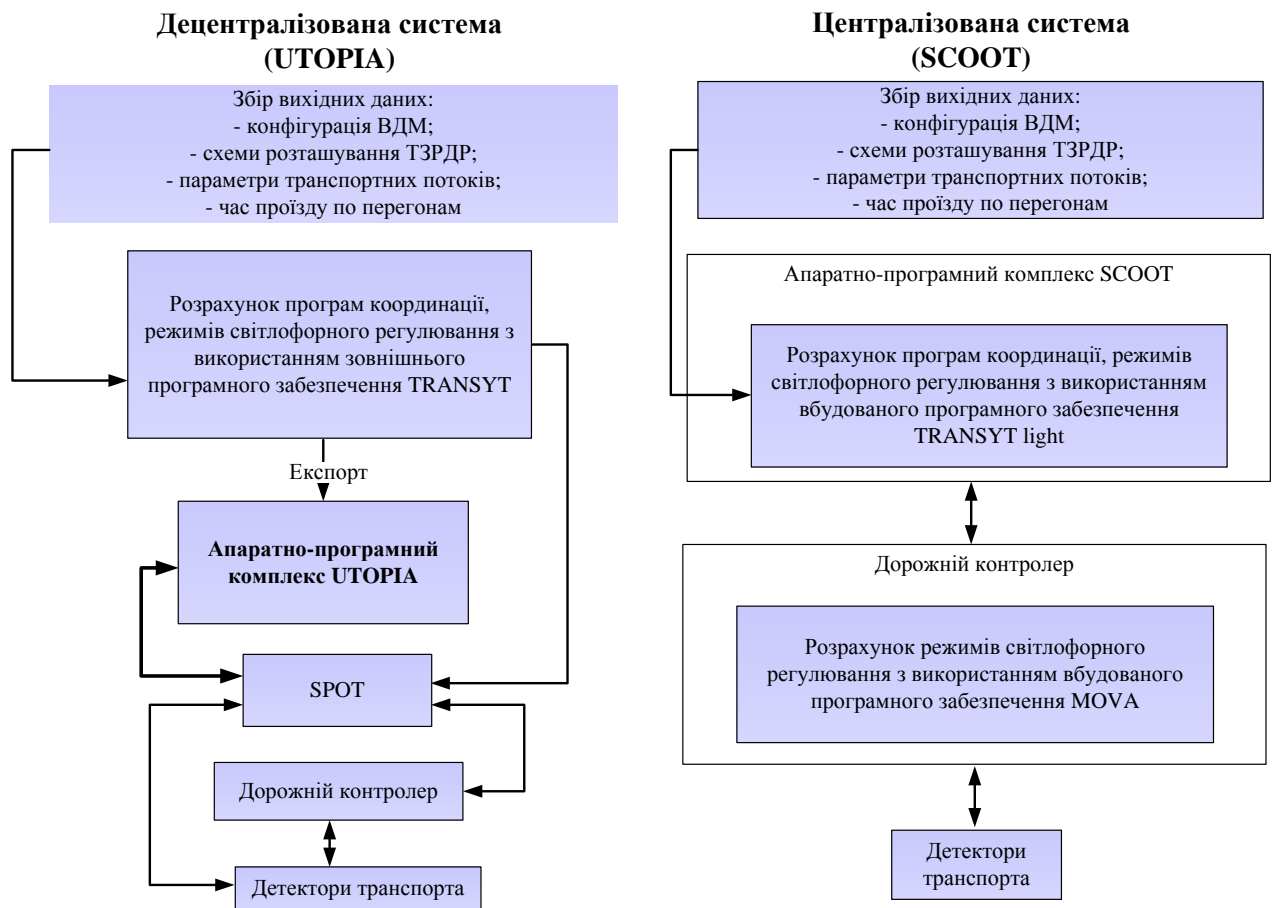


Рисунок 1.7 – Алгоритм технологічного та інформаційного функціонування децентралізованої і централізованої системи

При впровадженні централізованої АСУД розрахунки параметрів світлофорного регулювання на етапі проектування не проводяться, оскільки ядро програмного забезпечення TRANSYT light включено в керуючий апаратно-програмний комплекс, який, отримуючи інформацію з детекторів транспорту, розраховує програми координації і формує необхідну кількість режимів світлофорного регулювання з відповідним співвідношенням тривалості фаз.

Тобто, в залежності від рівня завантаження підходів на перехрестях відбувається централізовано автоматичний розрахунок параметрів світлофорного регулювання в реальному масштабі часу (керуючих впливів на транспортний потік) і здійснюється їх передача в дорожній контролер (ДК) з використанням системи передачі даних. Дорожні контролери централізованої системи також мають у своєму складі програмний комплекс для розрахунку

параметрів світлофорного регулювання, наприклад MOVA – спрощену, автономну версію SCOOT.

Відомі дослідження [95], у яких наведено результати аналізу централізованого та децентралізованого управління дорожнім рухом у містах. Сучасні адаптивні мережеві системи управління дорожнього руху використовують транспортні моделі. Транспортні моделі показують попит на дорожній рух в досліджуваній мережі і те, як відбувається його розподіл. Якісна і відкалібрована модель є необхідною для надійної і правильної роботи системи АСУДР. Таким чином, з використанням транспортних моделей і поточних даних з детекторів можливо екстраполювати (поширити) дані про інтенсивність на всі ділянки транспортної мережі, а також розрахувати прогностичні значення інтенсивності. Можливість прогнозувати ситуацію на майбутнє дозволяє приймати обґрунтовані управлінські рішення і діяти продуктивно, враховуючи транспортну мережу в цілому. Результати прогнозування утворення складних ділянок на ВДМ у роботі [100] для вибору з альтернативних маршрутів руху ТП. Також надається можливість перевіряти запропоновані стратегії управління щодо заданих критеріїв ефективності і то, як вони впливають на дорожній рух в цілому.

Проведений аналіз опису відомих систем управління дозволив виділити наступні особливості СУДР:

- належність до класу автоматичних або автоматизованих систем залежно від архітектури системи, функціональних модулів і методів управління;
- наявність тенденції по розробці автоматичних систем управління з елементами інтелектуальних інформаційних систем четвертого покоління СУДР;
- використання певної методології оцінки закономірностей зміни параметрів транспортного потоку залежно від параметрів транспортної мережі, а саме методом макро- і мікромоделювання.
- необхідність розробки транспортних моделей, як аналітичних, так і імітаційних.

Однак, як показують результати аналізу, незважаючи на наявність загальних функціональних ознак, СУДР істотно відрізняються по ряду характеристик. Запропоновано та проведено систематизацію СУДР по ряду класифікаційних ознак (рис. 1.8).

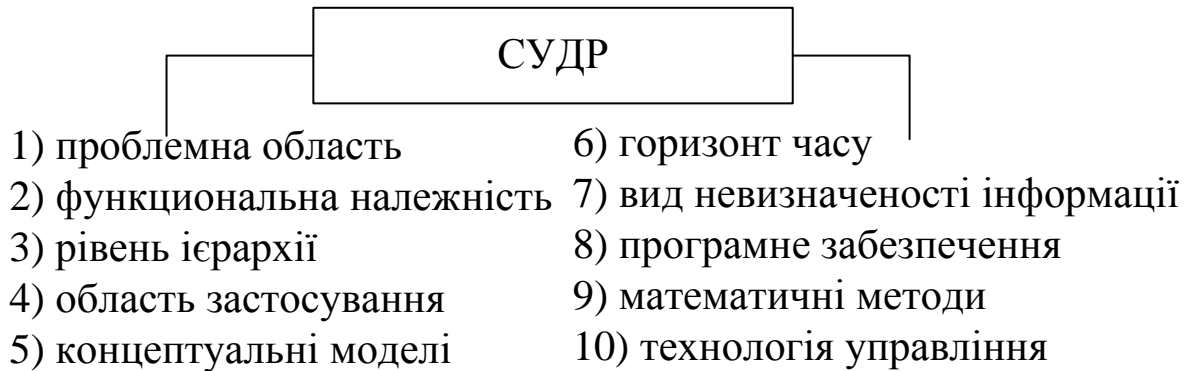


Рисунок 1.8 – Систематизація класифікаційних ознак для СУДР

Проблемна область визначається архітектурою системи управління дорожнім рухом і її призначенням:

– прогнозування розвитку ситуацій на транспортній мережі з оцінкою наслідків у разі їх зміни;

– пошук відмов при функціонуванні транспортної мережі (зниження пропускної спроможності в результаті виникнення ДТП або транспортного затору на ділянках дорожньої мережі);

– здатність формування керуючих впливів на об'єкт управління для забезпечення працездатності транспортної мережі міста.

Функціональна придатність характеризує цільову спрямованість системи управління на рішення певного класу завдань для стратегічного, тактичного або локального управління дорожнім рухом у місті за рівнем ієрархії розв'язуваних системою завдань.

Область застосування характеризується межами області управління: елементи ВДМ (перехрестя, перегін), зональне управління (ділянка магістралі), мережне управління (транспортна мережа району або міста).

Концептуальні моделі дозволяють охарактеризувати систему залежно від режиму управління (on-line, off-line), виду моделювання (математичні, імітаційні моделі) і типу системи керування (автоматизовані, автоматичні, інтелектуальні).

Визначення горизонту часу впливає на вибір методів прогнозування параметрів управління в системі. Необхідно також виділити методи для стратегічного, тактичного й оперативного управління на певному часовому інтервалі, та для вирішення завдань управління у надзвичайних ситуаціях, до яких належить виникнення ДТП, утворення заторових режимів руху та проведення ремонтних робіт на ВДМ міста.

Вид невизначеності застосованої інформації визначає складності структуризації завдань усієї системи. Розрізняються завдання з невизначеністю виміру параметрів ТП, неточністю формалізації залежностей зміни параметрів дорожнього руху у часі та з невизначеністю результату по управлінню, що пов'язано із невизначеністю при ухваленні рішення в центрі управління системи (особою, що приймає рішення (ОПР), яка вносить елемент суб'єктивізму у процес прийняття рішень).

Застосоване програмне забезпечення може бути як стандартним (уніфікованим), так і спеціально розробленим для рішення конкретних завдань управління. Перший тип має системну централізовану спрямованість, другий базується на використанні різних алгоритмів пошуку оптимальних варіантів управління та імітації поведінки досліджуваних параметрів дорожнього руху під впливом управління.

Математичні методи залежать від мети функціонування та архітектури системи управління, меж об'єкта управління й режиму роботи системи управління.

Технологія управління характеризує тип системи управління та принцип управління, залежно від якого розрізняються інформаційні, робастні та адаптивні СУДР. При застосуванні у містах перевагу мають системи, що реалізують технології управління за фіксованими планами та адаптивного



управління. Але найбільш прогресивними системами є системи ситуаційного управління та автоматичної цілеспрямованості, до яких належать автоматичні та інтелектуальні системи управління. Таким чином, спосіб класифікації ознак систем управління ДР, що пропонується, не є універсальним, але дозволяє виділити й систематизувати основні методологічні напрямки розробки систем управління ДР і на підставі аналізу тенденцій розвитку коректно обрати й обґрунтувати методологію розробки системи управління ДР у містах. Але первинним і актуальним є розробка достатньо точних методів оцінки зміни характеристик дорожнього руху при зміні умов руху. У зв'язку з цим вивчення таких закономірностей є актуальною науковою задачею.

## 1.2 Розвиток системного представлення комплексу «водій – автомобіль – дорога – середовище»

Підвищення ефективності та безпеки руху є важливою комплексною проблемою, що може бути вирішена шляхом удосконалення усіх елементів та систем комплексу «водій – автомобіль – дорога – середовище» (В-А-Д-С). Тому що одним з найбільш перспективних шляхів вирішення проблеми є управління дорожнім рухом на автомобільних шляхах.

Дорожній рух – це процес руху по дорогах транспортних засобів та учасників дорожнього руху [101]. З наведеного визначення випливає, що ДР – це складна динамічна система з великою кількістю вхідних до неї елементів, що є результатом функціонування комплексу В-А-Д-С, дослідженням якого присвячені роботи В.Ф. Бабкова [102], Г.І. Клінковштейна [103], М.Я. Говорущенка [104], Я.В. Хомяка [105], В.П. Поліщука [106], А.П. Васильєва [107], Є.В. Гаврилова [108], І.С. Степанова [109], О.О. Лобашова [110], Е.А. Рейцена [111] та ін. У цих роботах надано ґрунтовний аналіз впливу транспортних потоків, дорожніх умов на організацію та ефективність дорожнього руху.

Об'єктом управління в системі управління дорожнім рухом є транспортний потік, що складається з транспортних засобів (автомобілів, мотоциклів, автобусів тощо). Під час руху водії автомобілів мають вільний вибір і реалізують при русі свої приватні цілі. Таким чином, дорожній рух є техносоціальною системою, що і визначає його специфіку як об'єкту управління. Тому навіть розглядаючи тільки технічні аспекти управління дорожнім рухом, необхідно урахувати, що цей об'єкт складний і має специфічні, з точки зору управління, властивості [93].

Першою особливістю транспортного потоку є його нестаціонарність, причому спостерігаються коливання його характеристик, принаймні, в трьох циклах: добовому, тижневому і сезонному.

Другою особливістю є стохастичність транспортного потоку, параметри якого допускають визначення прогнозу тільки з певною мірою вірогідності. Зупиняючись на цьому моменті детальніше, відмітимо, що транспортний потік на підставі теорії подібності описується параметрами, що і потік рідини або газу: швидкістю, щільністю, а також інтенсивністю і складом потоку, зв'язки між якими досить добре досліджені і описані як за допомогою диференціальних рівнянь, так і іншими методами. Транспортний потік рухається по транспортній мережі, яка у свою чергу має певні параметри, що допускають більш-менш суворий опис. Як правило, топологія транспортної мережі описується довжиною і пропускною спроможністю її ділянок, складніше отримати опис стану покриття, який залежить від зовнішнього середовища. Тому характеристики транспортної мережі теж є нестаціонарними. Стан покриття залежить від погодних умов, топологія мережі – від містобудівних заходів і, навіть, від проведення дорожніх робіт. Природно, що транспортна мережа впливає на характеристики транспортних потоків, вносячи додатковий елемент нестаціонарності. Крім того, на транспортні потоки можуть впливати різноманітні випадкові події: дорожньо-транспортні події, вихід пішоходів на проїжджу частину тощо.

Третьою особливістю дорожнього руху як об'єкту управління є неповна керованість, суть якої полягає в тому, що навіть за наявності у системи управління повної інформації про транспортні потоки і можливість доведення управляючих дій до кожного водія, ці дії у ряді випадків можуть носити тільки рекомендаційний характер. Ця особливість робить дуже проблемним досягнення глобального екстремуму будь-якого критерію управління.

Четвертою особливістю, що відноситься вже не лише до дорожнього руху але і до системи управління – є безліч критеріїв ефективності та якості управління. Дорожній рух в районі транспортної мережі або місті, керований певним чином, має деякі критерії, серед яких можуть бути названі: транспортна робота, часові затримки руху, швидкість сполучення, кількість дорожньо-транспортних подій, об'єм шкідливих викидів в атмосферу тощо. Більшість перерахованих критеріїв взаємозв'язані, але вибір одного з них або проведення їх ранжирування залежить від мети управління дорожнім рухом.

П'ятою особливістю дорожнього руху як об'єкту управління є складність і навіть неможливість виміру практично усіх характеристик ефективності управління. Так, оцінка величини транспортної роботи вимагає або наявності датчиків транспортних потоків на усіх напрямках руху, або використання даних аерофотозйомки, або проведення трудомісткого ручного обстеження. Ситуація ускладнюється відсутністю надійних і недорогих технічних засобів (датчиків), призначених для вимірювання даних параметрів транспортних потоків (детекторів транспорту).

Нарешті, необхідно відмітити принципову неможливість проведення масштабних натурних експериментів у сфері управління дорожнім рухом. Ця неможливість обумовлена, по-перше, необхідністю забезпечення безпеки руху, по-друге, матеріальними і трудовими витратами на проведення експерименту (зміна розмітки і дислокації дорожніх знаків) і, по-третє, тим, що серйозні зміни в комплексній схемі організації руху зачіпають інтереси великої кількості людей - учасників руху.

Опис особливостей дорожнього руху як об'єкту управління підтверджує необхідність створення моделей дорожнього руху, що дозволяють прогнозувати наслідки змін параметрів, які впливають на характеристики транспортних потоків для оцінювання ефективності управління дорожнім рухом.

Методологічною основою проектування будь-якої машинної системи управління є знаходження величини, що вимірюється, яка характеризує кінцевий результат чи вихід системи, якою управляють. Для дорожнього руху такою величиною є пропускна спроможність транспортної мережі та безпека дорожнього руху.

Модель еволюції системи В-А-Д-С ретельно наведено у роботі Є.В. Гаврилова [108], де описано різні її варіанти складових у залежності від мети дослідження.

Для докладного аналізу окремих елементів системи В-А-Д-С, необхідно враховувати і їх зв'язки між елементами, що з'єднують елементи системи в єдине ціле [112, 113] (рис. 1.9).

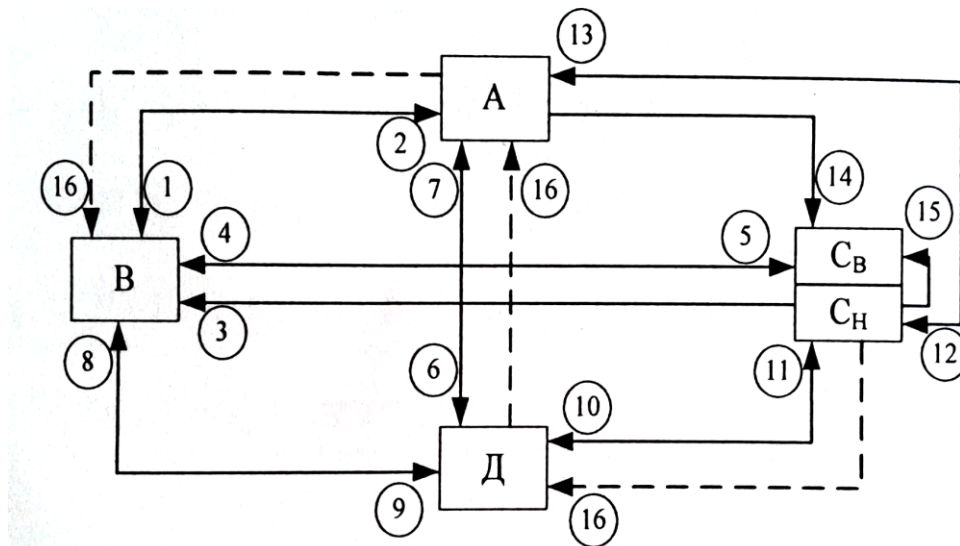


Рисунок 1.9 – Структура В-А-Д-С з міжелементними зв'язками

Штрих-пунктирними лініями відзначені зв'язки між елементами системи та виявлено показники, які визначають їх надійність (табл. 1.2).

У таблицю включені також показники, що визначають надійність системи В-А-Д-С з точки зору безпеки руху і визначають ризик виникнення несприятливих подій, що призводять до зміни режимів руху.

Таблиця 1.2 – Фактори функціонування системи В-А-Д-С

Зв'язок	№ з/п	Фактори функціонування, що впливають на надійність системи В-А-Д-С	Оціночний показник
А-В	1	Технічні характеристики АТЗ: технічна і максимальна швидкості, інформаційна забезпеченість водія	Коефіцієнт стохастичності поля сприйняття водія [114]
В-А	2	Керуючі впливи водія	Час реакції водія [115-117]
С <sub>Н</sub> -В	3	Видимість	Підсумковий коефіцієнт аварійності [102, 118]
С <sub>В</sub> -В	4	Шум, загазованість в салоні	Питомі витрати абстрактної роботи водія [119]
В-С <sub>В</sub>	5	Умови водіння	Ентропія поля сприйняття водія; продуктивність діяльності водія [109, 114, 120, 121]
А-Д	6	Інтенсивність, стан покриття	Підсумковий коефіцієнт аварійності [102, 118]
Д-А	7	Коефіцієнт зчеплення, план траси	Підсумковий коефіцієнт аварійності [102, 118]
Д-В	8	Дорожні умови, інформаційна завантаженість водія	Підсумковий коефіцієнт аварійності [102, 118]
В-Д	9	Вибір траєкторії і швидкості руху	Час реакції водія [115, 117]
С <sub>Н</sub> -Д	10	Дорожні умови	Підсумковий коефіцієнт аварійності [102, 118]
Д-С <sub>Н</sub>	11	Екологічні характеристики руху: запиленість, водостоки	Відповідність АД принципам функціонування людини [106, 108]
А-С <sub>Н</sub>	12	Екологічні характеристики навколишнього середовища: загазованість, шум, вібрація	Токсичність двигуна [106, 122]
С <sub>Н</sub> -А	13	Атмосферний вплив на рух: корозія, стійкість від бокового вітру	Стійкість транспортного засобу [123, 124]
А-С <sub>В</sub>	14	Ергономічні властивості: шум, температура, пасивна безпека	Параметри мікроклімату робочого місця водія [123]
С <sub>Н</sub> -С <sub>В</sub>	15	Вплив навколишнього середовища	Екологічна категорія небезпеки дороги [125]
С <sub>Н</sub> -Д-А-В	16	Фактори всіх елементів системи, що впливають на водія	-----

Узагальнюючи, можна представити систему В-А-Д-С як ієрархічну систему, що складається з відповідних підсистем. При цьому важливо якісно встановити існуючі зв'язки, щоб потім надати їм кількісну оцінку (рис. 1.10). У ході теоретичних досліджень можливо припустити, що при розгляді функцій дорожнього руху можливо істотно спростити вихідну систему, замінивши її двох- або трьохелементними підсистемами із обмеженою кількістю зв'язків, що враховують найбільш істотні властивості для вирішення конкретної задачі.

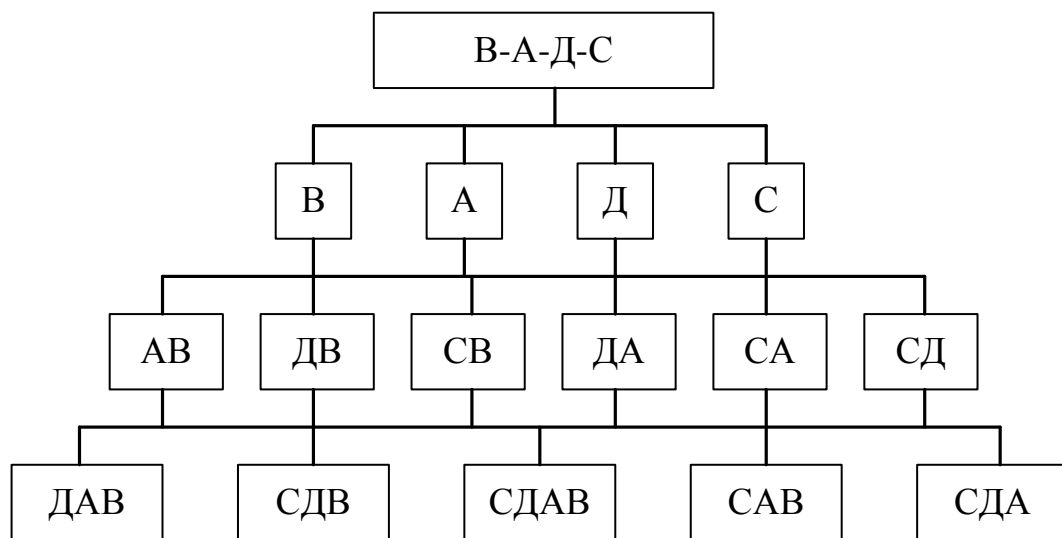


Рисунок 1.10 – Ієрархія елементів та підсистем системи В-А-Д-С

Із сукупності елементів системи В-А-Д-С виділяють окремі підсистеми: Водій - Автомобіль, Автомобіль - Дорога, Водій - Дорога, Зовнішнє Середовище - Водій, Зовнішнє Середовище - Автомобіль, Зовнішнє Середовище - Дорога. Підсистему Водій - Автомобіль можна розглядати як ергономічну систему, ефективність функціонування якої визначається фізіологічними і технічними можливостями водія і автомобіля [126].

Динамічні характеристики транспортного процесу можуть бути описані при моделюванні підсистеми Автомобіль - Дорога. Підсистеми Водій - Дорога і Зовнішнє Середовище - Водій є інформаційними моделями транспортного процесу, що формують у водія емоційні напруги і зумовлюють режими і безпеку руху [127]. Підсистеми Зовнішнє Середовище - Автомобіль і Зовнішнє

Середовище - Дорога є моделями, що дозволяють досліджувати надійність і довговічність автомобілів і доріг при різних кліматичних і атмосферних умовах. Розгляд підсистеми Зовнішнє Середовище - Автомобіль - Дорога дозволяє вивчити питання управління дорожнім рухом, розробити заходи щодо підвищення безпеки дорожнього руху та знизити негативний вплив автотранспорту на навколишнє середовище.

При цьому на всіх етапах дослідження необхідно глибоке знання закономірностей руху транспортних потоків і зміни параметрів стану доріг, а також аналіз схем організації і типів управління рухом.

Пропонуємо розглядати дорожній рух як об'єкт управління в процесі функціонування системи В-А-Д-С в цілому, де основною підсистемою, приймаємо систему Середовище – Дорога - Автомобіль, де функції середовища, що впливають на дорожній рух, виконують технічні засоби регулювання. Тоді ієрархічна система буде мати відомий вигляд (рис. 1.11).

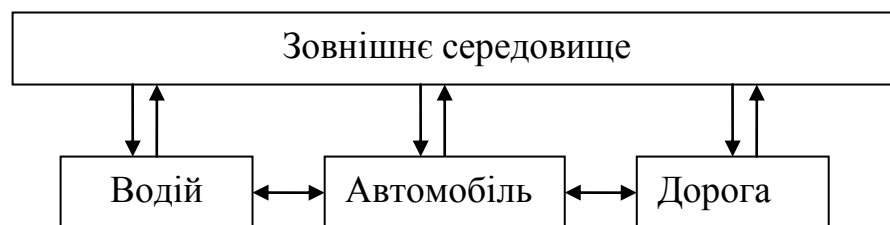


Рисунок 1.11 – Схема системи В-А-Д-С

Параметри систем, що входять у комплекс, можуть змінюватися у широких діапазонах, при чому параметри В, А, Д є впливовими у процесі управління. Такий підхід дозволяє керувати параметрами усього комплексу шляхом реагування на зміни параметрів однієї чи декількох систем у відповідності до змін у інших системах.

Вихідними параметрами для організації ДР є параметри транспортних потоків. Функціонування В-А-Д-С у великому ступені залежить від інтенсивності або щільності ТП. При малих щільностях взаємний вплив системи В-А-Д-С є невеликим і діють в основному міжелементні зв'язки. З

підвищенням інтенсивності взаємний вплив зростає й все більшого значення набувають міжсистемні зв'язки. Багатоплановість режимів руху розбивається на чотири інтервали - рівня зручності руху. При цьому на кожному рівні існує своє значення пропускної спроможності, що визначає режими руху автотранспортних засобів і характеристики відмов функціонування ВДМ.

Відома залежність інтенсивності ТП із безпекою дорожнього руху на підставі [128], застосування параметру зниження ризику виникнення несприятливої події (шляхом виміру інтенсивності ТП або контролю цього параметру при русі). Це ствердження можливо довести за залежністю

$$n_{\text{постр}} = N_{\text{авт}} \cdot k_a \cdot k_T, \quad (1.6)$$

де  $n_{\text{постр}}$  – кількість постраждалих, чол.;

$N_{\text{авт}}$  – інтенсивність, авт/доб;

$k_a$  – ризик події, ДТП/1000000 авт.км;

$k_T$  – ризик поранення, чол. км.добу/ДТП.

При збільшенні інтенсивності ТП виникають відмови функціонування транспортної мережі, та їх причинами є заторові ситуації або ДТП, що виникають.

Напрямами підвищення надійності міжелементних зв'язків у системі В-А-Д-С є наступні:

- підготовка водіїв;
- безпосередній вплив на ТП методами організації дорожнього руху;
- утворення однорідного ТП (за швидкістю або напрямком руху).

Вивчення міжелементних зв'язків у В-А-Д-С створюють ці можливості.

Порушення у функціонуванні системи В-А-Д-С, рівно як у будь-якої системі лише однієї ланки, викликає відмову всієї системи. Особливостями відмови у процесі дорожнього руху, що призводить до зменшення пропускної спроможності та безпеки ДР, є:



– велика вірогідність зміни режимів руху АТЗ , що призводить до зміни стану ВДМ;

– виникнення подій внаслідок дій людини (водіїв, пішоходів), що призводить до ДТП та до відмови функціонування транспортної мережі.

Наявність ризику в ДР визначає вимоги, що висуваються перед окремими елементами і системою в цілому. Ризик має ймовірнісний характер результату події, при цьому під словом ризик розуміють ймовірність втрат, хоча його можна описати і як ймовірність отримати результат, відмінний від очікуваного [129]. У загальному вигляді ризик – це ймовірність настання «несприятливої події». У дорожньому русі «несприятливою подією» є ДТП або зменшення працездатності ВДМ, виникнення яких пов'язане з великою кількістю чинників ризику. Фактори ризику – це чинники, що впливають на ймовірність подій [128, 130]. Визначення чинників призводить до виявлення умов, які їх формують. Чим більше факторів ризику враховується, тим точніше дослідження дорожнього руху. Головними серед них є елементи системи В-А-Д-С [108, 131]: природні умови; стан дорожніх умов; стан транспортних засобів; стан водія транспортного засобу. Різні комбінації наведених факторів визначають ймовірність виникнення ДТП. Оскільки фактори ризику можуть проявлятися в складних поєднаннях, то виділення критичного фактора, який став справжньою причиною відмови ВДМ, є складним завданням.

Отже, проблеми вивчення системи В-А-Д-С обумовлені не тільки розміром і складністю структури системи, а й обсягом інформації, яка супроводжує процеси, що відбуваються в її підсистемах. Для коректної обробки, структуризації і оцінки інформації в умовах невизначеності, необхідне застосування елементів теорії системного аналізу та інформаційних технологій [132]. Особливо це критично в умовах формування керуючих впливів в рамках системи на підставі первинної інформації про процеси всередині системи, коли ціна помилки вимірюється макропоказниками функціонування соціотехнічних систем.

У роботі [133] наведено стратегію розвитку систем управління ТП із урахуванням виявлених особливостей міського руху в умовах підвищеної щільності. Вона містить вирішення таких основних задач управління ДР, як визначення параметрів ТП, оптимізацію параметрів дорожнього руху та прогнозування параметрів ТП та стану ВДМ. При цьому приділяється увага заходам управління маршрутами руху для усунення ризиків при русі та зменшенню транспортної затримки.

На підставі цього вважаємо застосування системних та інформаційних методів дослідження процесів в транспортній системі та її підсистемах, актуальним завданням, яке необхідно вирішити в даній роботі для отримання коректних і достовірних результатів при моделюванні динаміки руху для визначення керуючих впливів. Необхідним проміжним результатом є формалізація задач управління і отримання математичної моделі ТП. Опис явищ і процесів, що відбуваються в системі, не залежно від вибору методу дослідження, не може бути абсолютно повним і залежить від призначення та вибору обмежень.

Вибір та формування керуючих впливів в залежності від умов функціонування комплексу В-А-Д-С повинні відповідати одному з напрямків підвищення ефективності ДР, а саме: забезпечення безпеки ДР та пропускнуої спроможності транспортної мережі та поліпшення екології у містах.

### 1.3 Аналіз методології оцінки зміни характеристик дорожнього руху при зміні параметрів дорожніх умов

На ефективність функціонування транспортної мережі впливають принципово різні категорії факторів: параметри та топологія транспортної мережі, що відомі заздалегідь та швидко змінюватись не можуть; ймовірнісні фактори, що змінюються у часі, до яких відносяться зміна режиму руху, зміна дорожніх умов, нестаціонарність інтенсивності транспортного потоку у часі. Взаємодію параметрів підсистеми ДУ – ТП системи В-А-Д-С (рис. 1.12) може

бути відображено основною діаграмою ТП, що пов'язує вхідні та вихідні параметри В-А-Д-С: інтенсивність, швидкість, щільність транспортного потоку, які впливають на пропускну спроможність ВДМ та, відповідно, на працездатність функціонування ВДМ та її ефективність. В США при оцінці функціонування ВДМ застосовується показник рівня обслуговування (Level of Service, скорочено LOS).

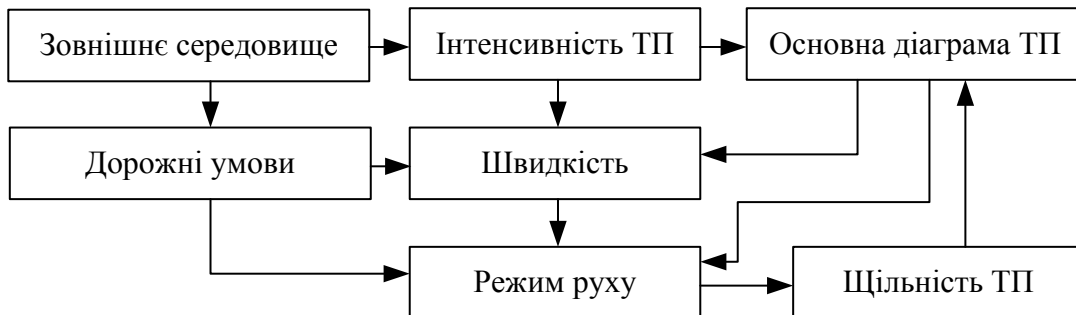


Рисунок 1.12 – Схема взаємодії параметрів у системі ДУ-ТП

Класичне визначення терміна «пропускна спроможність проїзної частини» формулюється в такий спосіб: пропускна спроможність – це максимальна кількість транспортних засобів, що може проїхати перетин проїзної частини в одиницю часу в одному або двох напрямках у даних дорожніх умовах [134] ( $P_a$ ). При цьому, оптимальна щільність ( $q_{a\text{опт}}$ ) при оптимальній швидкості ( $V_0$ ) ТП у реальних умовах руху постійно змінюються.

Графічне подання функції інтенсивності від щільності, відомо як фундаментальна діаграма транспортного потоку (ФД) (рис. 1.13), у якій відображено властивості транспортного потоку, у тому числі просторово-часові співвідношення між параметрами ТП у різних умовах руху. Вважається, що побудова ФД на підставі вимірюваних параметрів ТП при наявності стратегії управління ДР, існує як основна залежність опису взаємодії та взаємозалежності параметрів ТП [135].

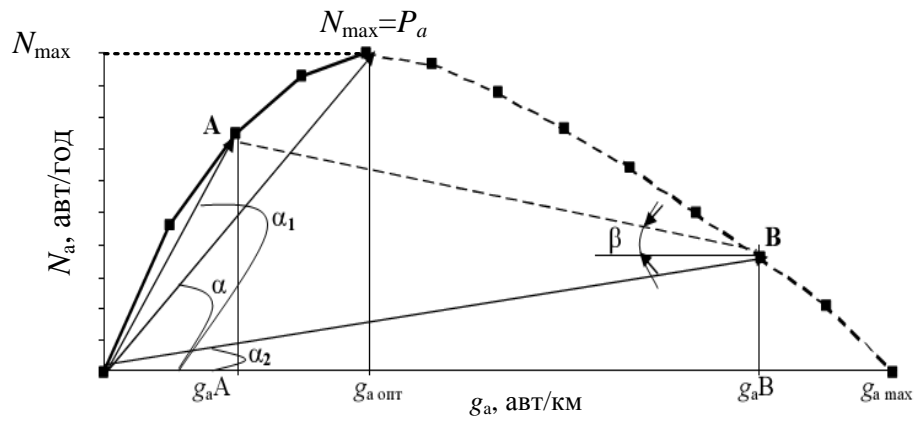


Рисунок 1.13 – Основна діаграма транспортного потоку

Основна фундаментальна залежність теорії транспортних потоків доводить, що закономірності зміни загальних параметрів руху потоку автомобілів (щільність, інтенсивність, швидкість) та існує у вигляді [136]

$$N = V \cdot q. \quad (1.7)$$

Фундаментальна діаграма розкриває зміну стану однорідного ТП залежно від збільшення його інтенсивності й щільності. Ліва частина кривої (показана суцільною лінією) відображає стійкий стан потоку, при якому, у міру збільшення щільності, ТП проходить фази вільного, потім частково зв'язаного й нарешті зв'язаного руху, досягаючи точки максимально можливої інтенсивності, тобто пропускної спроможності (точка  $N_{\max}=P_a$ ). У процесі цих змін швидкість потоку падає. Вона характеризується тангенсом кута нахилу  $\alpha$  радіуса-вектора проведеного від крапки 0 до будь-якої крапки кривої, що характеризує зміну  $N_a$ . Відповідні точці  $N_{\max}$  значення щільності ( $g_{a \text{ опт}}$ ) й швидкості потоку ( $V_a$ ) вважаються оптимальними за пропускною спроможністю ( $P_a$ ). Середня швидкість ТП  $V_a$  може бути виражена на підставі його інтенсивності й щільності в наступному вигляді:

$$V_a = \frac{N_a}{q_a} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (1.8)$$

При наступному зростанні щільності (після  $P_a$ ) рух потоку стає нестійким (відповідна частина кривої показана переривчастою лінією). Такий перехід потоку в нестійкий стан відбувається в результаті зовнішніх впливів (появи перешкоди на дорозі, наближення до регульованого перехрестя) або зміни швидкості руху. При цьому зниження швидкості лідера колони АТЗ викликає гальмування наступних автомобілів, а потім і розгін, що створює «пульсуючий» (нестійкий) потік. Різде гальмування потоку та перехід його в стан, по швидкості й щільності відповідній крапці  $B$ , сприяє початку процесу утворення «ударної хвилі» (пунктир  $AB$ ), що поширюється назустріч ТП зі швидкістю, що визначається тангенсом кута  $\beta$ . Ударна хвиля є джерелом виникнення попутних ланцюгових зіткнень у потоці в результаті порушень дистанції безпеки водіями АТЗ та зменшенню швидкості ТП [136]. У крапках 0 і  $q_{a\max}$  інтенсивність руху  $N_a=0$ , що надає опис двох можливих станів ТП: на дорозі немає АТЗ або ТП перебуває в стані затору (рух ТП відсутній). Тобто, при виникненні затору, рух АТЗ припиняється, щільність ТП досягає максимального значення  $q_{max}$ , а інтенсивність і швидкість руху прагнуть до нуля:

$$N(q) \rightarrow 0, \quad (1.9)$$

$$V(q) \rightarrow 0. \quad (1.10)$$

Діаграма ТП може бути побудована й в інших координатах, наприклад  $V-q$  та  $N-V$ .

Слід зазначити, що побудова діаграми «інтенсивність - щільність» дозволяє визначити значення граничної та оптимальної пропускнуої спроможності з погляду завантаження дороги рухом, та швидкості на різних ділянках доріг [137], яку можна визначити за виразом

$$V_a = V_{cb} - \beta q + \alpha \rho, \quad (1.11)$$

де  $V_{cb}$  – швидкість руху у вільних умовах, км/год;

$\alpha, \beta$  – емпіричні коефіцієнти рівняння;

$\rho$  – кількість легкових автомобілів у потоці, %.

Але фундаментальна діаграма не може відобразити складність процесів, що відбуваються у ТП, бо може бути застосована лише при однорідному складі ТП та нормальному стані дорожнього покриття і зовнішнього середовища, тобто у ідеальних умовах руху. При зміні стану покриття, умов видимості для водіїв, складу потоку, топології проздої частини дороги змінюються основні параметри ТП, але це не відбиває характер діаграми.

Емпіричні спостереження показали, що теоретична фундаментальна діаграма не описує складної поведінки щільного транспортного потоку, в якому пов'язані складні просторово-часові залежності є істотно неоднорідними. Саме у крапках зміни режимів руху опис процесів зміни параметрів не повністю надає розуміння природи формування заторів [135].

Наданий аналіз процесу зміни параметрів ТП дозволяє визначити, що щільність є одним з основних параметрів ТП, який формує режими руху.

Залежно від щільності ТП фахівці розділяють режими руху ТП на [138, 139]: вільний, пов'язаний, ускладнений та старт-стопний («stop-and-go»). Режимам руху ТП відповідає певний рівень завантаження дороги рухом [140] та значення пропускної спроможності ВДМ.

У періоди максимального транспортного навантаження ВДМ (в «годину пік») інтенсивність руху ТП підвищується, і режим руху стає обмеженим, що змушує водіїв значно зменшувати швидкість руху і, як наслідок, призводить до зниження пропускної спроможності ВДМ. Зміна швидкості руху АТЗ створює умови для утворення на ВДМ руху підвищеної щільності і переходу ТП у передзаторовий та заторовий стан.

Проблемі усунення та утворення заторів на ВДМ приділяється багато уваги як вітчизняних, так і зарубіжних фахівців. Основна увага більшості дослідників приділяється вдосконаленню світлофорного регулювання [141] і проблемам координації руху ТП по ВДМ [136], однак основна мета зазначених досліджень - зниження затримок ТЗ, підвищення безпеки руху та зниження

екологічного навантаження на транспортну мережу, які є непрямими показниками ефективності ВДМ та частково впливають на її пропускну спроможність. Проблема утворення заторів на регульованих перехрестях розглянута в дослідженні [142]. Слід зазначити, що рішення проблеми заторів різними авторами пропонується шляхом реконструкції ВДМ, оптимізації світлофорного регулювання, будівництва багаторівневих розв'язок.

Але параметри організації та управління дорожнім рухом є більш гнучкими, оскільки їх зміна може бути виконано в порівняно короткі періоди часу і при незначних фінансових, матеріальних та трудових ресурсах.

Досліджено вплив режимів руху ТП на утворення заторів на перегонах ВДМ у роботі [143], де визначено, що напрямок дослідження параметрів руху ТП у заторі є найбільш перспективним, але менш вивченим тому, що це пов'язано з наявністю моделей руху ТП тільки у колонному режимі, а рух у стані затору за параметрами йому не відповідає.

Складність застосування діаграм «інтенсивність - щільність» і «інтенсивність-швидкість» полягає в тім, що вони є характеристиками конкретної ділянки дороги та певних дорожніх умовах. Разом із зміною умов руху (добові чи сезонні коливання інтенсивності, складу руху, погодні умови, стан покриття та обурюючі впливи) змінюються довжина дистанції безпеки руху між АТЗ та швидкості ТП, що суттєво впливає на зміну пропускну спроможності ВДМ.

В результаті аналізу було виявлено, що пропускну спроможність є основним параметром транспортної системи, оскільки затори і невиправдані простой АТЗ виникають в момент її зменшення. Це визначає актуальність досліджень можливості її підвищення засобами управління дорожнім рухом.

Пропускна спроможність ВДМ залежить від геометричних параметрів проїжджої частини, рівня технічного оснащення транспортної мережі засобами організації руху, параметрів ТП, а також методів управління дорожнім рухом. До причин зниження пропускну спроможності ВДМ належать: незадовільний стан дорожнього покриття, застосування нераціональних схем організації руху,

а головне – не стаціонарність ТП, яка призводить до зміни рівня завантаження проїжджої частини.

На підставі взаємозв'язку параметрів ТП [136], пропускну спроможність ділянки ВДМ ( $P$ ), можна вважати нестаціонарною характеристикою мережі, яка повинна мати максимальне можливе значення:

$$P = f(q, V, k_c) \rightarrow \max, \quad (1.12)$$

де  $k_c$  – склад ТП.

Впливом складу ТП на пропускну спроможність можна знехтувати, тоді як потік АТЗ різних типів можна привести до умовного легкового автомобіля за допомогою коефіцієнтів приведення [144]. Тому необхідно дослідити вагомий вплив щільності і швидкості ТП на зміну пропускну спроможності ВДМ

$$P = f(q, V) \rightarrow \max. \quad (1.13)$$

У 1912 р. російським вченим, професором Г.Д. Дубеліром були закладені основи вивчення закономірностей дорожнього руху. Етап визначення оцінки пропускну спроможності магістралей та їхніх перетинань є початком дослідження поведінки транспортних потоків.

Існуючі дослідження взаємодії автотранспортних засобів (АТЗ) у потоці дозволили сформулювати основні напрямки моделювання дорожнього руху для рішення завдання визначення пропускну спроможності автомобільних доріг: детермінованого та стохастичного моделювання [124].

До детермінованих моделей відносяться моделі, в основі яких лежать функціональні залежності між інтенсивністю, щільністю, швидкістю й дистанцією між АТЗ у потоці. У стохастичних моделях процес руху ТП розглядається як імовірнісний, випадковий процес.



Детерміновані моделі відносяться до макроскопічного моделювання із формалізацією руху щільного ТП, які надають опис руху автомобілів як суцільного середовища з використанням різних фізичних аналогій [136, 124].

У сучасній теорії ТП на підставі фундаментальної діаграми ТП сформовані дві основних групи макромоделей: група гідродинамічних моделей ТП і група кінетичних моделей ТП, тому що фундаментальна діаграма є формалізованим виразом ідеї про те, що «рух транспортного потоку є подібним до течії рідини». Усі подальші дослідження лежать у рамках даної мети [145].

У 1934 р. з'явилася перша модель Гріншилдса [146]. Вона відображає залежність між швидкістю та щільністю транспортного потоку. У її основу покладено гіпотезу щодо росту щільності  $q$  (як ступеня насичення дороги автомобілями) призводить до зниження швидкості АТЗ  $V$  за наявності безпечної дистанції, яку математично можна записати наступним чином:

$$V = V_0 \cdot \left(1 - \frac{q}{q_{\max}}\right), \quad (1.14)$$

де  $V_0$  – швидкість вільного руху;

$q_{\max}$  – максимальна щільність потоку, при якій усі автомобілі зупиняються.

Ця модель передбачає лінійну залежність між швидкістю та щільністю потоку.

В основі гідродинамічних моделей ТП закладене подання ТП як однорозмірно стислої рідини за умовою збереження потоку, що дозволяє досліджувати взаємозв'язок між щільністю й швидкістю руху, яка виражається залежністю

$$T \frac{dV}{dt} + V = k\lambda, \quad (1.15)$$

де  $T = \frac{\lambda}{c^2 q^2}$ ;  $k = \frac{1}{q}$ ;

$V$  – швидкість руху потоку;

$q$  – щільність потоку;

$\lambda$  – інтенсивність потоку;

$c$  – константа.

До цієї групи також відносять: модель Лайтхіла-Уизема (Уитема)-Ричардса (LWR) [147]; модель Танака [136]; модель Уизема и модель Пейна [148] та її узагальнення (М. Раскаля, Д. Грінберга, Хелбінга-Сйлера-Навье-Стокса).

Модель Лайтхілла-Уизема [147] дозволила перейти від статичних функціональних залежностей параметрів транспортного потоку до опису їх динамічного зв'язку за часом та координатами. Цей перехід був досягнутий фактично формальним застосуванням гідродинамічного формалізму. Тому, основна гіпотеза моделі Гріншілдса (1.14) була розвинута Лайтхіллом та Уиземом (LWR) та «пересаджена» на ґрунт фізики рідини. Так, у 1955 р. у своїй класичній праці [149] автори засвідчили, що: «...Основна гіпотеза теорії полягає в тому, що в будь-якій точці дороги інтенсивність (автомобілі на годину) є функцією щільності (автомобілі на милю) ... ». При цьому припущення та обмеження мають наступний вигляд:

1) транспортний потік є безперервним, із щільністю  $q(x,t)$ , що дорівнює кількості машин на одиницю довжини ( $x$ ) та інтенсивністю  $N(x,t)$ , яка визначається як кількість машин, що перетинають лінію  $x$  за одиницю часу;

2) інтенсивність  $N$  визначається локальною щільністю  $q$

$$N = Q(q) . \quad (1.16)$$

Тоді швидкість потоку дорівнює  $V(q) = \frac{Q(q)}{q}$ , тобто середня швидкість є детермінованою функцією щільності  $Q(q)$ .

Це підтверджує той факт, що водії знижують швидкість при збільшенні щільності машин попереду. Це означає, що  $N$  залежить не тільки від щільності  $q$ , але і від її градієнта  $q_x$  (Дж. Уїзем, 1974)

$$q = Q(q) - k \cdot q_x, \quad (1.17)$$

де  $k$  – деяка позитивна константа.

Ґрунтуючись на емпіричному аналізі поведінки транспортних потоків в 1996-2000 рр. Кернер висунув концепцію синхронізованого потоку і пов'язану із нею теорію трифазного транспортного потоку [150]. Згідно до концепції «синхронізованого потоку» є два якісно різні стани (фази): фаза транспортного потоку, так звана «синхронізована» і фаза «широких пробок, що переміщуються», які слід розрізняти в щільному (такому, що утворює черги) транспортному потоці. Ця різниця ґрунтується на якісно відмінних емпіричних просторово-часових властивостях цих станів (фаз). У свою чергу щільний потік складається з двох фаз. Таким чином, розрізняються три фази руху транспортного потоку: 1) вільний потік; 2) синхронізований потік; 3) широкі пробки, що переміщуються.

В трифазній теорії просторово-часові властивості поведінки потоку пояснюються за допомогою фазових переходів між перерахованими станами потоку [151].

Вільний потік характеризується середньою бажаною швидкістю  $V_0$  та сильною кореляцією між потоком  $N$  та локальною щільністю  $q$  за квазілінійним відношенням  $N \approx q V_0$  [152].

Термін «синхронізований потік» відображає наступні властивості цієї фази:

– це безперервний транспортний потік, у якому зазвичай трапляються пробки всередині. Слово «потік» відображає саме цю властивість безперервності при русі;

– є тенденція до синхронізації швидкостей транспортних засобів на смузі руху дороги. Крім того, ця тенденція вирівнювання швидкостей автомобілів на кожній смузі («зв'язування» автомобілів) у синхронізованому потоці з'являється завдяки відносно низькій середній швидкості руху в цій фазі, тобто термін «синхронізований» відображає ефект синхронізації швидкості.

Термін «широкі пробки, що переміщуються» повинен відображати характеристики та властивості поширення пробок в будь-яких інших фазах транспортного потоку і через будь-які звуження ВДМ, зберігаючи швидкість переміщення переднього фронту пробки. Словосполучення «пробка, що переміщається» відображає властивість пробки поширюватися як єдиної зосередженої структури на дорозі, тобто виникає ударна хвиля, яка спрямована назустріч руху ТП. Якщо довжина скупчення АТЗ (пробки) більше ширини її фронту, а швидкість всередині пробки є нульовою, то швидкість переміщення пробки є характеристикою цього режиму руху ТП. Термін «широка пробка» повинен відображати характерну властивість поширення пробки зберігати швидкість її переднього фронту.

Докладний аналіз макромоделей ТП наведено у роботі [143]. Перевага існуючих макромоделей полягає в можливості дослідження ударних хвиль у транспортному потоці. Однак, їхньою особливістю є ряд істотних спрощень, на яких вони засновані, а також складність обчислень, що викликає обмеження при застосуванні у алгоритмах керування автоматизованих систем управління дорожнім рухом.

Мікромодельовання ТП засновано на дослідженні динамічних габаритів АТЗ, що дозволяє визначити взаємне просторове положення транспортних засобів у потоці. Динамічний габарит визначають як суму довжини АТЗ, дистанції безпеки та зазору до автомобіля, що зупинився попереду (для легкових автомобілів цей зазор коливається в межах 1-3 м). Клас мікромоделей ТП формують динамічні моделі руху за лідером [153, 154], а також мікромоделі ТП, засновані на теорії клітинних автоматів [141, 154], у яких для формалізації процесу руху застосовувалася теорія клітинних автоматів фон Неймана [155].

Процес моделювання ТП за допомогою клітинних автоматів можна охарактеризувати як ітераційний, в основі якого закладена формалізація процесу руху за допомогою логічних операторів, що дозволяють описати взаємозв'язок параметрів руху АТЗ у невеликих групах [138, 153]. У цьому випадку клітинний автомат являє собою регулярні решітки ознак, що являють собою автомобілі при русі на ділянці ВДМ. Кожний АТЗ може перебувати в одному з кінцевої безлічі станів. Тому клітинні автомати можуть бути застосовані для формалізації процесу руху ТП на ділянці ВДМ у конкретних умовах, тоді як результати моделювання багато в чому залежать від початкових умов, що визначають параметри руху кожного АТЗ у потоці. Формування правил переходу по клітинам решітки засновано на визначенні дистанції між АТЗ, що впливає на результати моделювання ТП. Але проблема визначення дистанції між АТЗ має неоднозначне рішення та впливає на обмеження при їх застосуванні для управління ДР.

Проведений аналіз динамічних моделей руху ТП довів, що їх застосування засновано на різних початкових припущеннях. У дослідженні [156] спрощені динамічні мікромоделі розділені на три групи. Першу групу моделей відрізняє підхід до моделювання без обліку гальмівного шляху автомобіля за умови, що автомобілі, які рухаються один за одним, зупиняються одночасно, причому довжина гальмівних шляхів цих автомобілів є однаковою, що не відповідає реальним умовам руху АТЗ. Відповідно до цього пропускну спроможність можна визначити на підставі динамічного габариту АТЗ у потоці [154]

$$P = \frac{1000 \cdot V}{l_a + l_p + l_o}, \quad (1.18)$$

де  $P$  – пропускну спроможність смуги руху, авт./год;

$V$  – швидкість руху, км/год;

$l_a$  – довжина АТЗ, м;

$l_p$  – шлях, що проходить останній у черзі АТЗ за час реакції водія, м;

$l_o$  – запас відстані між автомобілями, що зупиняються, м.

У роботах [153] розглянуто модель, що відноситься до другої групи моделей, де при визначенні пропускної спроможності дороги пропонується враховувати повний гальмівний шлях останнього у черзі автомобіля у випадку раптового гальмування попереднього

$$P = \frac{1000 \cdot V}{l_a + l_T + l_p + l_o}, \quad (1.19)$$

де  $l_T$  – гальмівний шлях заднього автомобіля, м.

Застосування різниці гальмівного шляху останнього й переднього автомобілів у потоці відрізняє третю групу мікромоделей ТП. Ці моделі описують процес взаємодії автомобілів у потоці [139], що впливає на визначення пропускної спроможності наступним чином

$$P = \frac{1000 \cdot V}{l_a + l_{T2} - l_{T1} + l_p + l_o}, \quad (1.20)$$

де  $l_{T2}$  і  $l_{T1}$  – довжина гальмівного шляху заднього й переднього автомобілів відповідно, м.

На підставі аналізу існуючих мікромоделей ТП було зроблено висновок, що особливий інтерес вітчизняних і закордонних вчених приділяється саме мікромоделям третьої групи. Основні припущення, на яких засновані ці мікромоделі не відрізняються від загального вигляду моделі (1.19).

Розвитком теорії динамічних моделей є модель слідкування за лідером [154], у якій припускається, що у ТП відстані між автомобілями не є постійними. Таке припущення відповідає дійсності в певних умовах руху, а саме при русі ТП в умовах невисокої щільності потоку. Положення АТЗ у потоці наведено на рис. 1.14, на якому положення АТЗ формалізовані у вигляді

відповідних координат:  $X_i(t)$  – координата положення автомобіля, що рухається спереду;  $X_{i+1}(t)$  – координата положення автомобіля, що рухається позаду.

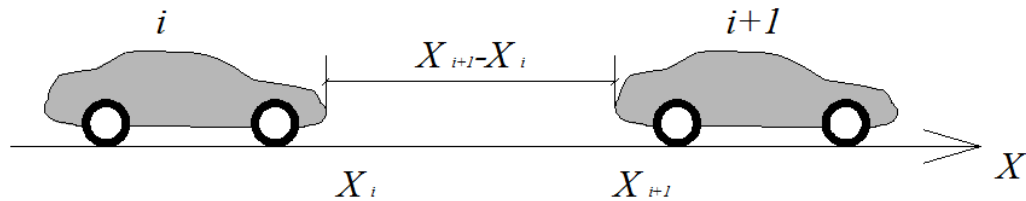


Рисунок 1.14 – Схема слідкування за лідером при русі АТЗ

Отже, дистанція між АТЗ у потоці  $\Delta X(t)$  визначається на підставі координат їх розташування на ділянці дороги

$$\Delta X(t) = \frac{1}{\tau} \left( \dot{X}_i(t) - \dot{X}_{i+1}(t) \right), \quad (1.21)$$

де  $\tau$  – час узгодження швидкостей АТЗ, що послідовно рухаються у потоці, с.

Отже, у потоці автомобіль рухається із певним прискоренням  $a_3$ , яке пропорційне різниці швидкостей цих АТЗ, а узгодження швидкостей АТЗ у потоці пропонується виконувати з урахуванням коефіцієнту чутливості водія АТЗ, який є зворотною величиною до часу реакції водія:

$$a_3 = \frac{1}{t_p} (V_{\Pi} + V_3), \quad (1.22)$$

де  $a_3$  – прискорення заднього АТЗ;

$V_{\Pi}, V_3$  – швидкості переднього й останнього АТЗ відповідно, м/с;

$\frac{1}{t_p}$  – коефіцієнт чутливості водія;

$t_p$  – час реакції водія, с.

У теорії слідкування за лідером [154] основним елементом є визначення дистанції між автомобілями з урахуванням реакції водія на прискорення або уповільнення автомобіля-лідера, що суттєво впливає на максимальну щільність потоку  $q$

$$q = \frac{1}{X_i(t) - X_{i+1}(t)}. \quad (1.23)$$

Тоді визначення максимальної щільності транспортного потоку дає можливість отримати пропускну спроможність смуги руху [157, 158]

$$P = 0,25 \cdot V_{\text{св}} \cdot q, \quad (1.24)$$

$$P = \frac{1}{e} V_{\text{опт}} \cdot q, \quad (1.25)$$

де  $V_{\text{св}}$  – швидкість руху у вільних умовах, км/год;

$V_{\text{опт}}$  – швидкість ТП при максимальній інтенсивності, км/год;

$q$  – максимальна щільність транспортного потоку, авт./км;

$e$  – підстава натурального логарифму.

Відомі емпіричні моделі ТП, що побудовані на даних натурних спостережень за інтервалами та швидкостями АТЗ у ТП [159-161]. Відомі моделі ТП, що побудовані на даних натурних спостережень за інтервалами і швидкостями у ТП. Наведені дані показують, що в змішаному ТП переважають інтервали між АТЗ від 2 до 4 секунд. Причому ці інтервали практично не залежать від типів автомобілів. Дані зарубіжних досліджень потоків легкових автомобілів визначають інтервали, які найбільш часто зустрічаються в потоці – 2-3 с.

Для опису руху ТП низької щільності в умовах, при яких зберігається можливість маневрування автомобілів, відомі запропоновані імовірнісні моделі [162, 163]. Ці моделі розглядають характеристики режиму руху кожного



автомобіля як випадкові події та не можуть бути застосовані у алгоритмах управління.

Широке поширення отримала теорія масового обслуговування у дослідженнях параметрів ТП. Імовірність прибуття  $n$  автомобілів на обраній ділянці дороги  $p_n$  визначають за формулою [162, 164]

$$p_n = (1 - z) \cdot z^n, \quad (1.26)$$

де  $z$  – коефіцієнт завантаження дороги рухом.

Але імовірнісні моделі забезпечують визначення коректних результатів моделювання при інтенсивності руху 450-500 авт./год або при меншому значенні, ніж повна пропускна спроможність смуги проїзної частини дороги. Тому застосування даних моделей для оцінки пропускної спроможності дороги з декількома смугами руху не дозволяє одержувати адекватні результати.

Таким чином, для визначення пропускної спроможності ВДМ найбільш придатні макро- та мікромоделі, які надають опис режиму руху автотранспортного засобу із урахуванням взаємодії параметрів транспортного потоку та особливостей їх визначення, а саме:

- щільність транспортного потоку, яка безпосередньо не може бути визначена;

- наявність вихідних параметрів опису об'єкту управління, тоді як швидкість ТП та інтервали між транспортними засобами формуються у багатомірному випадковому процесі руху;

- неповна керованість дорожнім рухом, тому що виконання керуючих впливів не завжди виконується водіями;

- попит на проїзд транспортних засобів являє собою імовірнісний процес, параметри якого потрібно прогнозувати;

- поява зовнішніх перешкод при русі ТП (ДТП, зміна метеорологічних умов) має ймовірнісний характер та потребує додаткових керуючих впливів від системи управління ДР.

Усі наведені особливості дозволяють віднести задачу управління дорожнім рухом до задач управління з неповною інформацією в умовах невизначеності відповідних ризиків. Отримані результати аналізу методології моделювання параметрів дорожнього руху, які певним чином впливають на формування не тільки алгоритмів управління, а й структури систем управління дорожнього руху.

#### 1.4 Структурні та функціональні особливості систем управління дорожнім рухом в містах

Побудова узагальненої структури та моделі управління процесом ДР при функціонуванні складної системи є обов'язковим етапом будь-якого теоретико-операційного дослідження [165], який передбачає:

- побудову моделі системи з описом (у тому числі і математичним) мети, процесу та результатів проведення досліджень;
- опис дій, що можуть привести до досягнення мети найкращими засобами;
- оцінку та порівняння ефективності конкуруючих дій на підставі заданих цілей;
- розробку алгоритмів визначення оптимальних керуючих дій та математичних методів їх пошуку.

Тому вибір архітектури автоматизованої системи управління дорожнім рухом (АСУДР) залежить від апріорно сформованих функціональних вимог. Взаємозв'язок елементів архітектури АСУДР наведено на рис. 1.15.

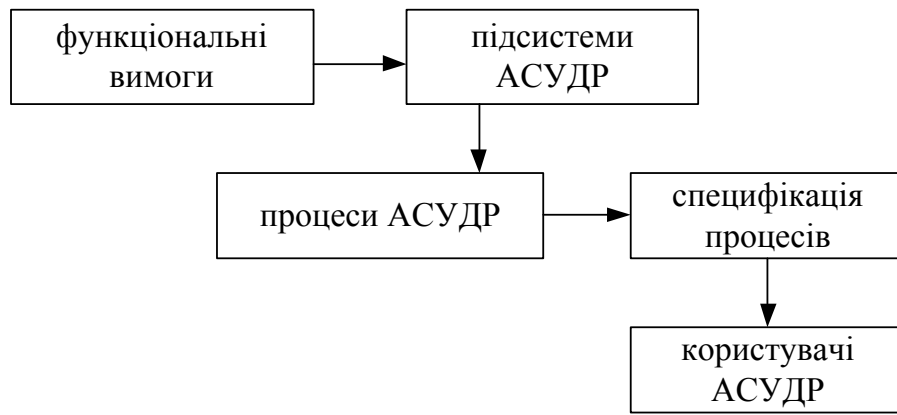


Рисунок 1.15 – Взаємозв'язки елементів архітектури

При проектуванні АСУДР визначають функції АСУДР залежно від об'єкту та мети управління, які підрозділяються на управляючі, інформаційні і допоміжні [166]. Залежно від рівня складності АСУДР, до управляючих функцій можливо віднести:

- автоматичне локальне управління рухом транспортних засобів на окремих перехрестях (або в'їздах);
- автоматичне координоване управління рухом транспортних засобів на групі перехресть;
- координоване управління рухом транспортних засобів на дорожній мережі міста, автомагістралі (чи на їх ділянках) з автоматичним розрахунком (або вибором) програм координації (сукупності дій, що управляють);
- встановлення допустимих або рекомендованих швидкостей;
- перерозподіл транспортних потоків на дорожній мережі;
- автоматичний пошук і прогнозування місць заторів на ділянках дорожньої мережі (чи автомагістралі) з вибором відповідних дій, що управляють;
- забезпечення пільгового проїзду транспортних засобів через перехрестя або автомагістралі;
- оперативне диспетчерське управління рухом транспортних засобів на окремих перехрестях (в'їздах) або групі перехресть.

До інформаційних функцій відносяться:

- формування сигналів і індикація даних про характеристики транспортних потоків (для автомагістралі – додатково про метеорологічні умови і стан дорожнього покриття);

- накопичення, аналіз і формування статистичних даних про параметри об'єкту управління, а також про режими функціонування АСУДР в цілому і окремих технічних засобів і про їх несправності;

- забезпечення можливості візуального спостереження за рухом транспортних засобів на ділянках дорожньої мережі і автомагістралях за допомогою телевізійної апаратури (при необхідності);

- формування сигналів про порушення правил дорожнього руху (при необхідності);

- забезпечення аварійно-викличного зв'язку уздовж автомагістралей;

- забезпечення можливості оперативного зв'язку оператора системи з дорожньо-патрульною службою, службами швидкої медичної і технічної допомоги, дорожньо-експлуатаційними службами;

- реєстрація зміни режимів роботи АСУДР, реєстрація і аналіз спрацьовувань пристроїв блокувань і захисту.

До допоміжних функцій АСУДР відноситься автоматизація процесів підготовки початкових даних, кодування, аналізу тощо.

Підсистеми АСУДР фактично реалізують функціональні вимоги за допомогою технічного обладнання, програмного забезпечення та каналів зв'язку. При проектуванні архітектури завжди існує деякий перелік необхідних елементів та таблиця зв'язків між підсистемами та елементами.

Проведений аналіз доводить, що до найбільш розповсюджених процесів управління ДР належать:

- 1) Координоване управління на магістралях. Цей процес контролює рух на магістралях та долучає до управління різні стратегії управління, а саме узгодження параметрів світлофорного регулювання на магістралі, управління швидкістю руху транспортного потоку, управління рухом по смугам та

розподілення АТЗ за складом ТП. Містить спеціалізоване програмне забезпечення та необхідні технічні засоби регулювання дорожнього руху.

2) Управління мережею магістралей. При цьому здійснюється рух транспортного потоку на підставі його розподілу за інтенсивністю по ділянках ВДМ відповідно до нормативного значення пропускної спроможності шляхом примусового або динамічного управління на окремих напрямках руху.

3) Управління окремими смугами руху міського пасажирського транспорту (МПТ). Реалізується по смугах за рахунок управління світлофорами для забезпечення пріоритетного проїзду спеціалізованого транспорту та МПТ, які повинні мати GPS обладнання і бортовий комп'ютер.

Специфікації процесів управління ДР у свою чергу пов'язані з користувачами або іншими зовнішніми системами, з якими взаємодіє дорожній рух. Під «користувачами» розуміються фахівці, які відповідають за окремі галузі управління. До них належать: оператори центру управління АСУДР та особа, що приймає рішення (ОПР), тобто виконавці бізнес-ролей у процесі управління. На підставі викладеного можливо вважати, що архітектура АСУДР містить:

- функціональні вимоги до системи;
- технічне обладнання;
- підсистеми;
- процеси;
- функціональні ролі людей;
- внутрішні та зовнішні потоки інформації.

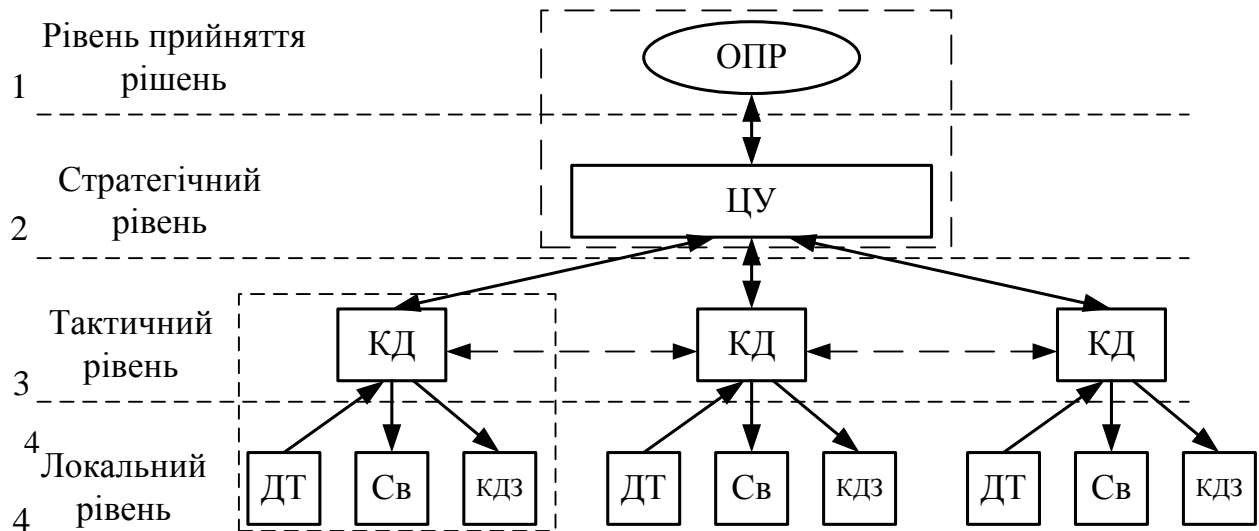
Такий певний набір елементів для реалізації СУДР, у повному обсязі або частково, дозволяє створити основу для інтеграції системи із існуючими елементами транспортних систем або логістичними центрами.

На підставі розробленої концепції багаторівневості управління, що заснована на розподілі функцій систем управління структурно-складного об'єкта та складається з набору взаємозалежних підсистем – LSS (Large Scale System). Основними методами дослідження подібних систем є декомпозиція і

агрегування [167], що дозволяє розглядати з єдиних позицій вулично-дорожню мережу різних розмірів з наявними варіантами ОДР.

Загальну структуру АСУДР ієрархічного типу із визначеними рівнями управління наведено на рис. 1.16. Структура відображає процес виконання функцій при їх розподіленні по відповідним рівням управління.

Найважливішим принципом організації сучасних АСУДР є наявність в них декількох рівнів управління, що знаходяться в ієрархічному співвідношенні між собою. Можливо виділити такі рівні управління: локальний, стратегічний, тактичний та оперативний рівень прийняття рішень.



Умовні позначення: ОПР – особа, що приймає рішення; ЦУ – центр управління; КД – контролер дорожній; ДТ – детектор транспорту; Св – світлофор; КДЗ – керовані дорожні знаки

Рисунок 1.16 – Рівні управління в системах управління

На стратегічному рівні вирішуються найбільш важливі принципові завдання системного управління, до яких відносяться:

- вирішення задач проектування вулично-дорожньої мережі міста;
- вибір критерію ефективності функціонування транспортної мережі для забезпечення пропускної спроможності та безпеки дорожнього руху;

- розподіл мережі на окремі райони для визначення в межах кожного з них загальної програми управління мережею району та транспортною мережею міста у цілому;

- прогнозування зміни параметрів транспортного потоку у часі;

- контроль та організація управління ділянками на межах виділених районів з метою забезпечення міжрайонної координації параметрів дорожнього руху;

- контроль виникнення надзвичайних ситуацій в мережі і перерозподіл транспортних потоків з метою попередження і ліквідації наслідків позаштатних ситуацій;

- здійснення загального контролю за параметрами та схемами організації дорожнього руху в місті за обраними критеріями ефективності.

На тактичному рівні управління здійснюється у рамках обмежень, обумовлених рішеннями, прийнятими на стратегічному рівні. Суть тактичних завдань зводиться до коригувань керуючих впливів, які входять у стратегічні програми з урахуванням топологічних особливостей мережі в межах групи перехресть, об'єднаних однією магістраллю або належать до одного району вулично- дорожньої мережі міста:

- збір інформації про параметри транспортних потоків;

- обробка оперативних даних про стан вулично-дорожньої мережі;

- розрахунок параметрів локального управління рухом транспортних засобів на вулично-дорожній мережі;

- розрахунок параметрів координованого управління на магістралях вулично-дорожньої мережі;

- введення схем організації руху в мережі за допомогою багатопозиційних дорожніх знаків, а також управління реверсивними смугами руху;

- контроль працездатності технічних засобів регулювання.

На локальному рівні системи управління здійснюється реалізація керуючих впливів в межах кожного окремого елемента мережі. Такий спосіб

управління існує у межах програм, що формуються та розраховуються на стратегічному і тактичному рівнях, та має своїм завданням максимально адаптувати режими роботи засобів світлофорного регулювання перехрестя до фактичних умов руху, а також забезпечити оптимальний швидкісний режим руху ТП.

Локальний рівень є найбільш дієвим за своєю швидкістю і має обмежений термін передачі та реалізації управляючих дій. До функцій локального рівня управління належать наступні:

- управління світлофорною сигналізацією;
- інформування учасників дорожнього руху про діючу схему організації дорожнього руху;
- організація пішохідного руху;
- моніторинг транспортних потоків;
- вимір параметрів ТП первинними пристроями;
- відеозйомка процесу руху АТЗ;
- контроль виконання ПДР водіями АТЗ.

Управління дорожнім рухом по окремому напрямку руху на ВДМ міста застосовується для умовного пропуску спеціалізованих автотransпортних засобів в загальному транспортному потоці.

Локальне управління передбачає оптимізацію показників ефективності руху транспорту на одному перехресті в рамках обмежень з верхніх рівнів системи управління. До системних технологічних параметрів локального рівня відносяться такі параметри: тривалості циклів, кількість і черговість фаз режиму управління, параметри ТП для алгоритмів пошуку розривів у транспортному потоці.

Послідовність фаз світлофорного регулювання на локальному рівні визначається планом управління, що розробляється з верхнього тактичного рівня управління. Застосування такої процедури передбачає змінну тривалість основних тактів і більш повне навантаження перехрестя. Необхідною умовою



виключення зеленого сигналу на напрямку руху є закінчення максимальної його тривалості, яка визначається при розробці керуючих впливів.

Результати аналізу дозволяють стверджувати, що сучасне проектування систем автоматичного або автоматизованого управління характеризується етапом переходу до багатопараметричних та багатооб'єктних систем управління, які мають ієрархічну структуру із елементами децентралізації функцій управління. Це пов'язано із появою задач, у яких оптимальне локальне управління транспортним потоком впливає на зниження показників ефективності функціонування транспортної мережі, а застосування централізованих засобів управління недоцільно за вартістю та трудомісткістю формування керуючих впливів. Підвищити ефективність управління ДР можливо за умови застосування децентралізації управління дорожнім рухом, але у такому разі існує проблема неузгодженості управління по транспортній мережі у цілому. Тому виникає необхідність реалізації раціонального розподілу функцій управління для багатфункціональних автоматизованих систем управління. Це стосується планування роботи системи загалом, вибору технології управління та визначення методів формування керуючих впливів, моделювання параметрів дорожнього руху та прийняття рішень щодо зміни режимів руху, або схеми організації дорожнім рухом. Комплексне вирішення означених проблем дозволить розробити системи управління ДР наступного покоління на відміну від існуючих у містах країни.

Для виконання означених функцій управління дорожнім рухом система управління повинна мати стандартизований склад відповідних підсистем [168]. У ході проектування систем управління дорожнім рухом необхідно розглядати підсистеми згідно із теорією систем управління, за якою до складу АСУДР входять підсистеми (рис. 1.17): ТЗ – підсистема технічного забезпечення; МЗ – підсистема математичного забезпечення; ПЗ – підсистема програмного забезпечення; ІЗ – підсистема інформаційного забезпечення; ОЗ – підсистема організаційного забезпечення [168].

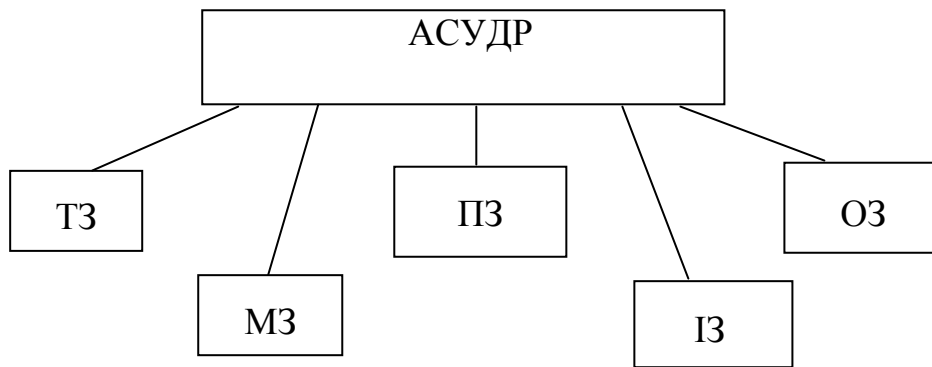


Рисунок 1.17 – Склад АСУДР

До складу технічної підсистеми АСУДР, залежно від складності об'єкту управління, повинні входити:

- обчислювальний комплекс (ОК) з устаткуванням для резервування та забезпечення надійності функціонування;
- технічні пристрої пункту управління (ПУ) або диспетчерського устаткування;
- периферійні технічні засоби, а саме – технічні засоби регулювання та управління ДР;
- інтерфейсне обладнання;
- прилади і пристрої, які необхідні для наладки і перевірки працездатності устаткування системи.

За своїм складом комплекс технічних засобів повинен забезпечувати реалізацію усіх функцій АСУДР, які сприяють досягненню мети її проектування.

Програмне забезпечення (ПЗ) комп'ютерів центру управління повинно задовольняти наступні вимоги:

- ПЗ є модульним і розподіленим по робочих станціях локальної транспортної мережі;
- модулі ПЗ - це програми з конкретним набором системних функцій, з індивідуальним інтерфейсом оператора;
- модулі ПЗ - це програми з можливістю взаємодії між собою як в межах одного комп'ютера, так і на різних робочих станціях локальної мережі;

– модулі ПЗ допускають роботу копій (клонів) на різних комп'ютерах в мережі.

Програмне забезпечення автоматизованих систем управління (АСУ) повинне мати наступні властивості: функціональну достатність (повноту); надійність; адаптованість; модифікованість; модульність побудови і зручність експлуатації.

Математична підсистема – це комплекс математичних моделей обробки первинних даних та алгоритмів управління дорожнім рухом.

Призначення інформаційного забезпечення (ІЗ) – це реалізація інформаційних потреб складових системи управління. Головною функцією ІЗ є проектування інформаційного фонду, який забезпечує формування, підтримку та організацію доступу до даних системи. Таким чином, ІЗ являє собою сукупність інформаційного фонду та засобів його функціонування. До інформаційного фонду належать: вхідні данні, що до об'єкту управління, нормативно-довідкові документи, до яких належать державні стандарти, регламентуючі документи, типові проектні рішення, бази даних, банки даних та системи управління базами даних, які визначають метод доступу до баз даних.

Інформаційне забезпечення АСУ має бути достатнім для виконання функцій АСУДР. Для кодування в АСУ вихідної інформації, що використовується на вищому рівні, мають бути застосовані класифікатори вищестоящих елементів систем управління, окрім спеціально обумовлених випадків.

Інформаційне забезпечення АСУ має бути сумісним з програмним забезпеченням систем за змістом, за системами кодування, методами адресації, форматами даних і формами надання інформації, яку отримує та формує АСУДР.

Організаційне забезпечення АСУ має бути достатнім для ефективного виконання персоналом АСУ покладених на нього обов'язків при здійсненні автоматизованих і, пов'язаних з ними, неавтоматизованих функцій системи.

Склад організаційної структури АСУДР повинен забезпечити виконання функцій АСУ з урахуванням їх розподілу по рівнях управління.

Інструкції організаційного забезпечення АСУ повинні визначати дії технічних засобів та персоналу АСУ, які необхідні для виконання кожної автоматизованої функції, в усіх режимах функціонування АСУ та з урахуванням заданих вимог по безпомилковості і швидкодії реалізації функціональних обов'язків, а також містити конкретні вказівки щодо дій у разі виникнення аварійних ситуацій, або порушення нормальних умов функціонування АСУ. При формуванні організаційного забезпечення особливе значення мають ергатичні особливості та ознаки АСУДР, як людино-машинної системи [169].

Наведено варіанти ергатичних систем управління ДР (рис. 1.18–1.21). При управлінні ДР при наявності центру управління (централізована структура АСУДР) система є поліергатичною з дистанційним зв'язком (рис. 1.18), якщо ж здійснюється локальне управління світлофорним об'єктом з пульта, то система стає моноергатичною з безпосереднім зв'язком 2-го роду (рис. 1.19). Якщо має місце визначення оцінки різниці між вихідними і вхідними параметрами (рис. 1.20) і при виникненні відмов (рис. 1.21), то таку структуру відносимо до ергатичних системи 1-го роду.

Для представлення ергатичних систем управління дорожнім рухом були прийняті наступні позначення: ПУ – пульт управління; 1,2,3 – оператори;  $x_{\text{вх}}(t)$  – вхідні параметри;  $u(t)$  – керуючий вплив;  $y(t)$  – вихідні параметри;  $g(t)$  – керуючий вплив ЛО.

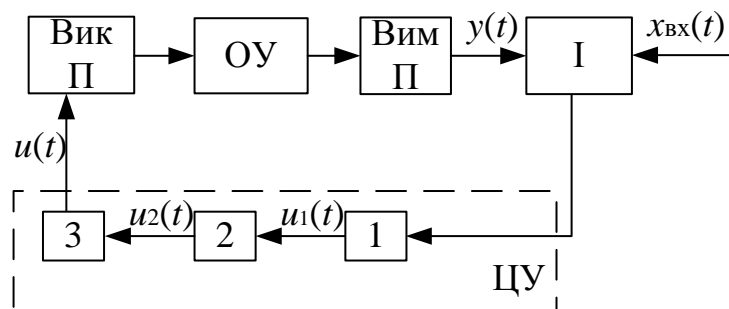


Рисунок 1.18 – Поліергатична система с дистанційним зв'язком

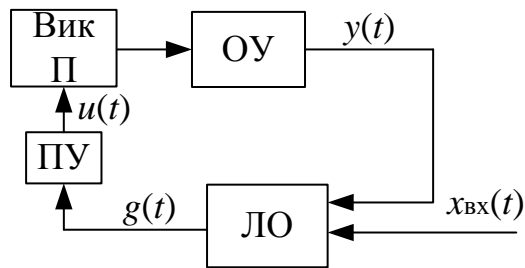


Рисунок 1.19 – Моноергатична система з безпосереднім зв’язком 2-го роду

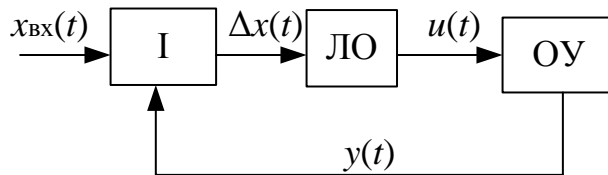


Рисунок 1.20 – Ергатична система 1-го роду при оцінці різниці між вихідними і вхідними параметрами.

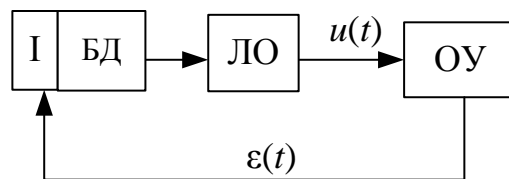


Рисунок 1.21 – Ергатична система 1-го роду при виникненні відмов

Для АСУДР було виявлено такі особливості:

– функціональні (наявність загальної задачі управління ДР і єдиної мети функціонування для всієї системи - підвищення безпеки руху, здатність до розвитку, що виражається у здатності змінювати функції і структуру системи управління ДР, інтеграція нових алгоритмів і моделей управління ДР);

– структурні (велика кількість взаємодіючих елементів, що складають систему управління ДР; наявність ієрархічної структури зв’язків підсистем у системі управління ДР; висока територіальна розгалуженість підсистем);

– особливості виготовлення (значні витрати на розробку і виготовлення; різноманіття можливих допустимих варіантів побудови системи управління ДР);

необхідність введення в дію одночасно всіх елементів і підсистем; складність у проведенні натурального експерименту у зв'язку із забезпеченням безпеки ДР);

– експлуатаційні (необхідність постійного вимірювання інтенсивності руху транспортних засобів, при цьому через великий обсяг інформації, її ефективна обробка вручну практично неможлива; неможливість достовірно прогнозувати вплив на систему безперервної зміни навколишнього середовища; наявність розвиненої інфраструктури, потребує ремонту і відновлення виконавчих і вимірювальних пристроїв АСУДР);

– ергономічні (людина приймає участь у процесі управління, при цьому має значення непередбачуваність поведінки, настрою, працездатності та швидкодії людини-оператора).

Наявність людини у процесі управління ДР передумовлює обмеження на вирішення оптимізаційних задач як у часі, так і за критеріями оптимізації, бо невідомо жодного критерію із урахуванням дій людини. Тоді з точки зору формалізації складного процесу управління відповідно до концепції Саймона [170] стосовно «обмеженої раціональності» існує підхід, у якому пропонується замість поняття «оптимального (тобто найбільш ефективного й раціонально обґрунтованого) рішення ввести в оберт поняття «задовільного» (satisfying), тобто кращого за деякими критеріями рішення. А у сучасній науці існує визначений напрям досліджень, згідно до якого інтелектуальність пов'язана із раціональною діяльністю. Такий системний підхід пояснює розвиток інтелектуальних систем управління дорожнім рухом у світовій практиці.

При рішенні проблеми організації дорожнього руху та управління транспортними системами (ТС) у міжнародній практиці широко використовується поняття системи Інтелектуальної Транспортної Системи (Intelligent Transportation System, далі ITS), що призначена ефективно управляти існуючою дорожньо-вуличною мережею доріг із урахуванням її щільності та пропускної спроможності [171].

Абревіатура ITS, що з'явилася в США, стала міжнародним визнаним скороченням для Систем Інформаційного Забезпечення Транспорту, у яких

мають бути застосовані останні досягнення інформаційних технологій і систем зв'язку, управління, комп'ютерного устаткування й програмного забезпечення для підвищення ефективності й безпеки роботи наземного транспорту. Докладний аналіз функціонування ITS у США із застосуванням інформаційних технологій, їх переваги та умови застосування наведено у роботі [172]. Доведено, що впровадження систем управління ДР за період з 1994 року до 2014 року дозволило заощадити більш ніж 4,7 млрд. доларів та 175 млн. годин. Впровадження ITS значно впливає на структуру наземних перевезень та на збільшення пропускної спроможності автомобільних доріг, зменшення або виключення транспортних заторів, підвищення рівня безпеки руху.

У Європі процес створення ITS проходить із ініціативи міжнародної некомерційної структури – Європейської організації по координації впровадження дорожньої телематики (European Road Telematics Implementation Coordination Organization – ERTICO), що запропонувала для Європи цілий спектр спеціальних програм [173]:

1) EuroRoad – програма по створенню баз даних про європейську дорожню інфраструктуру;

2) IP PReVENT – програма впровадження спеціальних електронних пристроїв ADAS (Advanced Driver Assistance Systems), що дозволяють водієві одержувати превентивну інформацію про можливу небезпеку по напрямку руху й уникати аварійних ситуацій;

3) MAPS&ADAS (IP PReVENT) – програма використання електронних карт для підвищення безпеки на дорогах;

4) Road Traffic Information Group – програма розвитку інформаційного супроводу учасників дорожнього руху;

5) SAFESPOT – програма підтримки появи більшої кількості «розумного» рухомого складу на «розумних» дорогах;

6) SpeedAlert Forum – програма інформування водіїв про дотримання встановленого швидкісного режиму;

7) TMC Forum (Traffic Message Channel) – програма інформування учасників дорожнього руху про реальну дорожню обстановку за допомоги спеціального виділеного радіоканалу.

Основний висновок зі світової практики розвитку ITS полягає в тому, що методологічно розвиток базується на системному підході. Сьогодні ITS формуються саме як системи, а не окремі модулі (сервіси). При цьому підходи до створення ITS ґрунтуються на принципі реінжинірингу діючих транспортних систем. Звідси впливають важливі принципи модульності й поетапного розвитку процесу створення ITS.

Інтелектуальні системи управління (СУ) є перспективним напрямком наукових досліджень. Саме цей напрям було обрано для вирішення проблем управління дорожнім рухом у містах. Теорію цих систем відображено у працях провідних вчених, вона стосується складних технічних і людино-технічних (ергатичних) СУ, що функціонують на рівні прийняття рішень в ускладнених умовах. Під ускладненими умовами розуміється велика розмірність об'єкту управління, його нестационарність, розподільність параметрів, відсутність контролю зовнішніх впливів, мінливість цілей. Відомі новітні системи підтримки прийняття рішень, які розроблені для вирішення задач управління ДР засобами тимчасового зменшення швидкості руху, попередження одонаявності перешкод на дорозі та оптимізації часових затримок [174]. Таким чином, інтелектуальні СУ – це інформаційно-обчислювальна система з інтелектуальною підтримкою при рішенні завдань у процесі управління, заснованих на знаннях (knowledge-based system).

### 1.5 Висновки за розділом 1

На підставі проведеного аналізу сучасних систем управління дорожнього руху було визначено наявність класифікаційних ознак систем та проведено їх систематизацію по проблемній області, функціональній належності, рівню ієрархії, області застосування, концептуальним моделям, горизонтом часу,



видом невизначеності інформації, програмного забезпечення, математичним методам та технології управління. Було виявлено, що найбільш ефективною є ієрархічна система управління з елементами децентралізації, що реалізує технологію ситуаційного управління.

В результаті аналізу розвитку системи В-А-Д-С із наведеною ієрархією її елементів було виявлено не тільки складність її структури, а й наявність великого обсягу інформації. Зроблено вибір цілей у залежності від умов функціонування комплексу В-А-Д-С, а саме підвищення працездатності ВДМ при забезпеченні необхідного рівня соціальної та екологічної безпеки міст.

Виявлено, що методологія визначення параметрів дорожнього руху при зміні умов руху ТП заснована на макро- та мікромоделюванні, але основні залежності розвинуті тільки для теоретичних досліджень та не відповідають задачам практичного застосування у алгоритмах управління. Тому постає задача адаптувати існуючі методи управління ДР до їх застосування у СУДР та розробити більш ефективні у виявлених умовах невизначеності параметрів ТП при міському русі та наявності відповідних ризиків процесу ДР.

Виявлена доцільність розподілення функцій керуючих функцій за визначеними рівнями: стратегічний рівень; тактичний та локального управління, що впливає на ефективність розподілу ресурсів управління. Але відсутність структури та методів належного формування рівня прийняття рішень негативно впливає на реалізацію управління ДР у режимі реального часу. Синтез функціональних та організаційних заходів має тільки теоретичний характер, тому розробка методологічних підходів до проектування повинна поєднувати сучасні складові математичного та програмного забезпечення системи управління із ознаками ІТС.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [3, 24, 33, 43, 46, 51, 55, 57].

## РОЗДІЛ 2

### КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ФОРМУВАННЯ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ДОРОЖНІМ РУХОМ

#### 2.1 Розробка концепції та архітектури проектування ІТС

У другому розділі розроблені основні положення формування рівнів систем управління дорожнім рухом на підставі обґрунтування принципів управління, які впливають на розробку алгоритмів управління із реалізацією керуючого впливу на об'єкт управління.

Інтелектуальне управління є ефективним та необхідним при керуванні складними об'єктами, для яких важко або неможливо обрати формалізовані моделі функціонування. Відомо, що методи інтелектуального управління є різноманітними та можуть бути застосовані до технічних і транспортних систем [175, 176].

У міжнародному Центрі НАН та МОН України [175] сформульовані нові технічні напрямки, що сприяють розробці наступних типів технологій управління:

- інформаційні технології інтелектуального управління автоматичними кібернетичними системами;
- трансформерні технології для мобільних роботизованих людино-машинних систем;
- інформаційні технології інтелектуальної підтримки оперативних рішень по управлінню соціально-економічними процесами;
- інформаційні технології інтелектуального управління розподіленими в просторі динамічними об'єктами.

Саме проектування системи управління дорожнім рухом на підставі визначення рівнів управління динамічним об'єктом (дорожнім рухом), потребує формування теоретичних основ розробки інформаційних технологій інтелектуального управління розподілених функцій управління за рівнями.

У інтелектуальній системі управління знання про невідомі характеристики об'єкта управління й навколишнього середовища формуються в процесі адаптації, а отримана при цьому інформація використовується в процесі автоматизованого прийняття керуючих рішень, що поліпшує якість управління. При цьому адаптація може відбуватися або у відриві від процесу управління, або безпосередньо в процесі автоматичного управління в режимі реального часу. Інтегрована інтелектуальна СУ являє собою модифікацію й розвиток системи управління дорожнім рухом, що реалізує технологію ситуаційного управління транспортними потоками на вулично-дорожній мережі міст.

В результаті аналізу було визначено відмінності між інтелектуальними та інформаційними технологіями. Інформаційні технології виконують функції підтримки інтелектуального управління. Основну роль мають інтелектуальні технології прийняття рішень, які дають можливість поряд з визначенням рішення, або в процесі отримання рішення, здійснювати пошук нових знань задля накопичення інтелектуальних ресурсів. Проте інформаційні технології тільки створюють інформаційні ресурси. Це означає, що знання, формалізовані в явному вигляді, можуть стати частиною бази знань у системах управління ДР і бути використані для рішення завдань прийняття рішень, щодо вибору керуючих впливів на дорожній рух.

У ході дослідження було виявлено, що проблемою управління є обмежена кількість інтелектуальних технологій при застосуванні неявних знань. Технічно проблема управління базами знань, що містять моделі управління дорожнім рухом у аналітичному вигляді, пов'язана із трансформацією інформаційних ресурсів в інтелектуальні та з їх застосуванням у інтелектуальних технологіях [177].

Таким чином, на підставі аналізу сучасних тенденцій розвитку ІТС і в рамках запропонованої концепції проектування розподілених систем управління дорожнім рухом було виявлено, що мають місце проблеми узгодження й взаємодії між елементами системи. Необхідність оперативного

реагування на мінливі зовнішні умови (режими руху ТП) при управлінні дорожнім рухом визначають нові функціональні завдання СУДР - координації, оперативного управління та прийняття рішень, які функціонують у режимі реального часу, поза ним або при комбінації цих режимів. Відсутність системного підходу у реалізації управління дорожнім рухом та наявність тільки окремих технічних елементів на вулично-дорожній мережі міста (камери спостереження; «розумні» світлофори; GPS-навігатори), які несуттєво впливають на ефективність дорожнього руху у мегаполісах [178], тому що має місце запізнювання керуючих впливів, або їх відсутність, які є причиною утворення заторових ситуацій та зменшення пропускної спроможності ВДМ міст із зниженням її працездатності загалом.

У загальному випадку транспортні затори, які виникають на ВДМ міст, можливо розподілити на регулярні та нерегулярні (рис. 2.1).

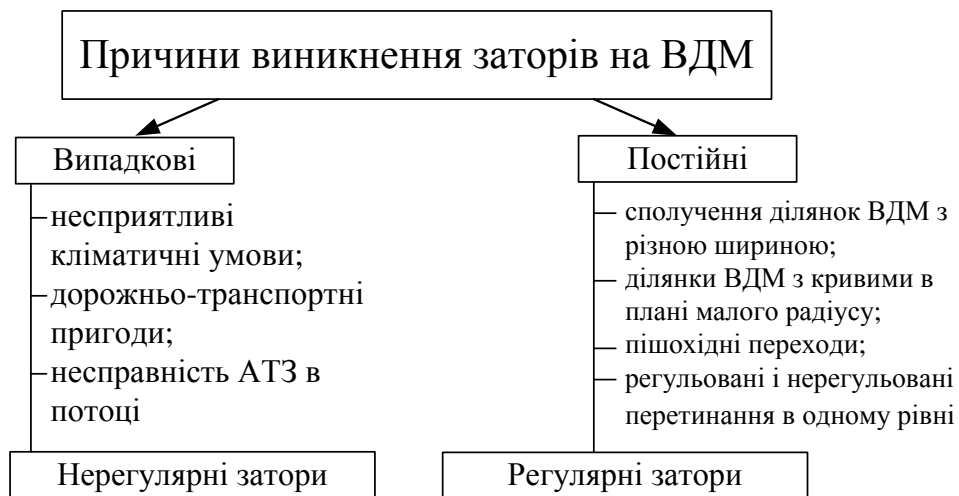


Рисунок 2.1 – Класифікація причин виникнення транспортних заторів на ВДМ

Виникнення нерегулярних транспортних заторів складно прогнозувати, оскільки вони пов'язані з випадковими процесами на ВДМ, тоді як виникненню регулярних транспортних заторів у «вузьких місцях» на ВДМ можливо запобігти як на етапі планування, так і методами управління ДР на тактичному рівні СУДР.

Під «вузьким місцем» на ВДМ фахівці розуміють [142] перетин дороги з низькою пропускною спроможністю по відношенню до всього перегону мережі. «Вузькі місця» на ВДМ утворюються з ряду причин, які розділяються на дві основні групи – зміну геометричних параметрів проїжджої частини та невідповідність параметрів управління дорожнім рухом. Причини першої групи можуть бути усунені на стратегічному рівні управління при плануванні ВДМ.

Згідно проведеного аналізу було визначено типи «вузьких місць» ВДМ, з яких до першої групи належать:

- 1) наявність звуження проїжджої частини згідно до топології ВДМ;
- 2) наявність примикань другорядних ділянок ВДМ до головних магістралей;
- 3) наявність регульованих перетинань;
- 4) наявність перешкод у напрямку руху ТП.

Довжина затору, його тривалість та щільність скупчення автотранспортних засобів, що його утворюють, є наслідками застосованих методів та алгоритмів управління, або їх відсутності. У більшості існуючих алгоритмів управління ДР керуючі впливи спрямовані на усунення перешкод руху (коли вони вже трапились), тобто існує ефект післядії, але відсутні керуючі дії для запобігання їх утворенню. Тому випереджаючого управління ДР є більш ефективним на вулично-дорожній мережі міст (ВДМ). При сучасному стані ДР постійно зростає кількість складних за умовами руху ділянок ВДМ міста, де існує неузгодженість параметрів ДР. Отже, мають місце просторові взаємини між нестандартними й небезпечними ситуаціями по всій транспортній мережі в цілому, що припускає також наявність взаємного зв'язку між керуючими впливами по мережі. Тому необхідно розробити стратегію управління, яка буде спрямована на забезпечення вирішення задач управління в цілому по мережі таким чином, щоб керуючі впливи на дорожній рух не ускладнювали рух та нейтралізували один одного. Тоді одним з найважливіших аспектів проблеми управління ДР є не тільки визначення сукупності керуючих впливів і й послідовності їхньої реалізації системою управління, яка має бути

розподіленою з раціональним ступенем децентралізації й функціонувати у режимі реального часу. Таким чином, в залежності від зони дії СУДР та типу вирішуваних завдань, існує необхідність розробки розподілених систем за функціональною ознакою. Означені розбіжності впливають на диференціацію в архітектурі системи, склад підсистем для рівнів управління та на вибір елементів технічного забезпечення СУДР. Тобто при проектуванні СУДР на вулично-дорожній мережі міст важливою проблемою є оптимальний розподіл транспортних засобів за допомогою світлофорного регулювання на перехрестях, на магістралях – організації рівномірного руху транспортного потоку без зупинок, а на складних елементах ВДМ – вирішення проблеми усунення транспортних заторів за рахунок своєчасної інформації щодо зміни умов руху. Саме тому, при побудові СУДР, крім традиційних функцій управління, виникає необхідність у рішенні завдань координації та оптимізації керуючих впливів з послідовним їх вибором при наявності відповідної транспортної ситуації.

На підставі викладеного пропонується застосування відповідної класифікації задач управління дорожнім рухом, де усі завдання управління, з погляду можливості формалізації, можливо розділити на три класи:

1. добре структуровані або кількісно сформульовані завдання, у яких існуючі залежності з'ясовані й можуть бути виражені кількісно;
2. слабо структуровані завдання, що поєднують кількісні і якісні залежності та характеризують маловідомі й невизначені завдання;
3. неструктуровані, засновані на судженнях фахівців завдання, що містять лише опис ознак і характеристик, але кількісні залежності між якими невідомі.

Такий підхід сприяє визначенню особливості проектування СУДР, що полягає в тому, що усі три класи завдання управління ДР мають бути вирішені на різних рівнях управління. Вважаємо, що на стратегічному рівні завдання управління мають відношення до добре структурованих завдань, на тактичному та локальному рівні управління у сучасних умовах існують завдання

неструктуровані із невідомими ознаками ускладненого руху транспортного потоку, а завдання для рівня прийняття рішень (при виборі керуючих впливів) – до слабо структурованих завдань. До виявлених особливостей має відношення поєднання в рамках однієї системи управління крім результатів математичного моделювання й обробки даних, використання імітаційних моделей для визначення параметрів управління, що значно ускладнює процес проектування СУДД.

Тоді, доцільно розглядати СУДР як багаторівневу розподілену систему, у якій кожний рівень вирішує завдання управління певними методами, а результати передає пов'язаним з ним рівням і об'єкту управління безпосередньо. Розвиток систем управління – необхідний процес для функціонування транспортної системи міста. Але цей розвиток повинен бути заснований на системному підході при розробці СУДР, а саме на розробці сукупності окремих модулів за принципом функціональності, засобами модернізації, реінженірингу та удосконалення існуючих, з урахуванням того факту, що інтелектуальні системи управління належать до типу автоматичних систем управління.

Для систематизації процесу управління дорожнім рухом за необхідне вважаємо розглянути формалізовану загальну схему управління з позицій класичної побудови автоматизованих систем управління складними технологічними процесами, до яких належить дорожній рух (рис. 2.2).

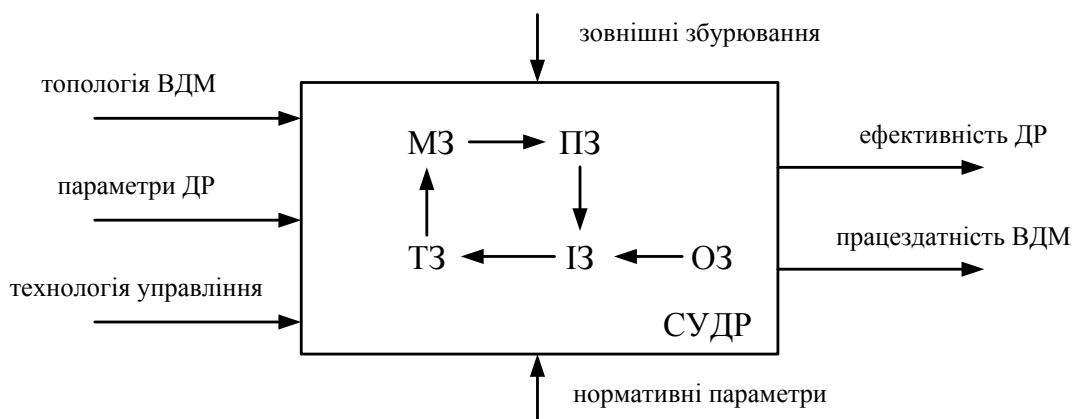


Рисунок 2.2 – Загальна схема процесу управління ДР

На підставі наведеного опису, мету автоматичного управління ДР сформулювали наступним чином: необхідно утримувати із визначеною точністю функціональну взаємодію між змінними параметрами об'єкту управління та керуючими впливами в умовах наявності збурень на об'єкт із зовнішнього середовища із урахуванням внутрішніх збурень.

Математична залежність означеної функціональної взаємодії впливає на формування алгоритму управління для підвищення соціально-економічних та якісних показників дорожнього руху шляхом забезпечення оптимального рівня обслуговування транспорту та працездатності ВДМ.

Під працездатністю транспортної мережі міста розуміємо спроможність транспортної мережі якісно та своєчасно виконувати функції перевезень пасажирів та вантажів у логістичному ланцюгу транспортних систем.

Відповідно до цього маємо: змінні, якими керуємо – параметри транспортного потоку; керуючі впливи – технологічні параметри управління; зовнішні збурення – критичні ситуації на ВДМ; внутрішні впливи – змінні параметри дорожніх умов.

Нормативні параметри відіграють роль обмежень у ході реалізації процесу дорожнього руху та містяться у складі організаційного забезпечення (ОЗ) системи.

Функціональну залежність між керуючими впливами та керованими змінними параметрами дорожнього руху реалізує послідовне поєднання підсистем математичного (МЗ), технічного (ТЗ), програмного (ПЗ) та інформаційного (ІЗ) забезпечення системи управління.

З урахуванням класичних підходів до управління та виявлених відмінностей між інформаційними та інтелектуальними технологіями у сучасних ІСУ, виникає необхідність у новітніх підходах та методах проектування систем управління дорожнім рухом у містах.

У результаті аналізу відомих структур та технологій управління для забезпечення функціонування СУДР та виявлення особливостей відомих діючих систем управління дорожнім рухом, було сформовано концептуальний



підхід до проектування розподілених систем управління з метою підвищення пропускної спроможності транспортної мережі у містах при забезпеченні необхідного рівня безпеки ДР:

1. Система управління дорожнім рухом повинна мати ієрархічну структуру із частковою децентралізацією управління, що буде сприяти виконанню задач управління у повному обсязі за рахунок формування на верхніх рівнях вимог та обмежень для задач нижчих рівнів.

2. Структура системи управління ДР повинна мати коректно сформовані рівні управління із відповідним математичним описом та технічним забезпеченням для вирішення відповідних задач технічними засобами регулювання ДР для їх реалізації.

3. Рівень прийняття рішень необхідно відокремити від центру управління та надати йому пріоритет по відношенню до інших рівнів із розробленою системою підтримки прийняття рішень щодо вибору керуючих впливів на дорожній рух.

4. Підхід до проектування потребує урахування різних режимів функціонування системи управління (від локального управління до системного) при наявності окремих показників ефективності дорожнього руху та/або якості управління, навіть коли вони знаходяться у протиріччі із загальними критеріями ефективності системи управління ДР.

5. В процесі проектування необхідно враховувати ступінь невизначеності параметрів дорожнього руху шляхом визначення часових інтервалів їх зміни на підставі методів прогнозування.

6. Наявність ознак багатопараметричності та багатокритеріальності у процесі дорожнього руху потребують формування сукупності методів управління, що впливають на розробку програмних продуктів, але сукупність пристроїв технічного забезпечення (дорожні контролери, детектори транспорту, технічні засоби регулювання) залишається незмінною. Синтез функціональних та організаційних заходів має теоретичний характер, тому методологічні

підходи до проектування повинні пов'язувати у систему технічне, математичне та організаційне забезпечення системи управління.

7. На підставі аналізу функцій систем управління та наявності динамічних властивостей зміни параметрів дорожнього руху необхідно розподілити методи автоматичного регулювання (САР) та автоматичного управління (САУ) дорожнім рухом шляхом декомпозиції та агрегування за відповідними рівнями управління

8. Система управління дорожнім рухом повинна бути адаптованою до змін параметрів транспортних потоків у режимі реального часу, що визначає її тип як автоматичної системи, що належить до інтелектуальних систем управління, але на початку функціонування в умовах невизначеності параметрів об'єкту управління та зовнішніх збурень має ознаки робастної, що підкреслює актуальність методів синтезу робастних оптимальних систем на етапі проектування автоматизованих систем управління дорожнім рухом.

Для реалізації розробленої концепції та відповідно до ITS підходу, а також до завдань управління, що мають бути розв'язані на кожному рівні ієрархії, вважаємо, що інтелектуальна система управління ДР повинна бути побудована за принципом багаторівневої архітектури із використанням кільцевих Ethernet-технологій, який більшою мірою відповідає ромбовидна форма архітектури СУ, що дозволяє розподілити не тільки методи управління ДР за цілями, а й відокремити інформаційні  $(i, n^{\text{інф}})$  та технологічні  $(i, n^{\text{T}})$  складові управління (рис. 1.22). Термін «ромбовидна структура» системи управління застосовується в науковій літературі для характеристик систем, що перебувають під управлінням двох керуючих центрів [13], а саме – інформаційного ( $4^{\text{інф}}$ ) та технологічного ( $4^{\text{T}}$ ), що пов'язані між собою, саме цей підхід пропонуємо застосовувати у системах управління дорожнього руху. Наведемо розроблену архітектуру ієрархічної системи управління дорожнім рухом (рис. 2.3).

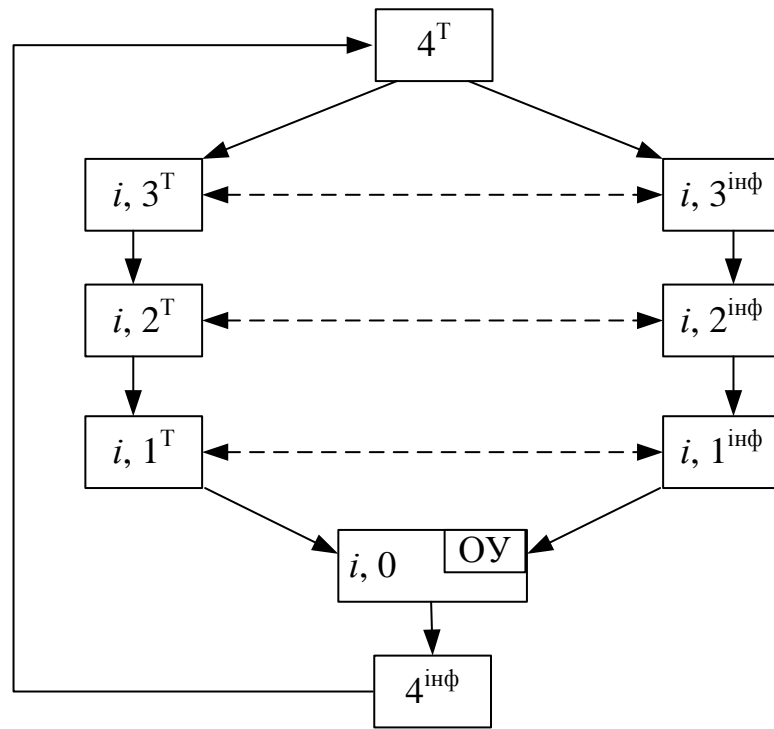


Рисунок 2.3 – Структура ієрархічної системи управління ДР із двома центрами

Для кожної ланки ( $S_{ij}$ ) структури із номером  $i = 1, m_j$ , що знаходиться на  $j$ -му ієрархічному рівні ( $j = 0, n$ ) відображення має вигляд

$$S_{ij} : U_{ij} \times Y_{ij} \times H_{ij} \rightarrow X_{ij} , \quad (2.1)$$

де  $U_{ij} = \{u_{ij}\}$  – множина керуючих впливів вищого рівня;

$Y_{ij} = \{y_{ij}\}$  – множина сигналів зворотного зв'язку від нижчих рівнів;

$H_{ij} = \{h_{ij}\}$  – множина збудюючих впливів на даній ланці;

$X_{ij} = \{x_{ij}\}$  – множина вихідних сигналів ланки  $i$  на нижчий рівень.

Для самої верхньої ланки відображення має вигляд

$$S_{ij} : Y_{m,4} \times H_{m,4} \rightarrow X_4 , \quad (2.2)$$

А для об'єкта управління формується система відображень у вигляді:

$$S_{m,0} : X_{i,1} \times H_{i,0} \rightarrow X_0 \quad (2.3)$$

У вирази (2.2) та (2.3) входить множина збурюючі впливів, але в СУДР маємо два типи збурюючі впливів – зовнішні (кліматично-погодні умови, якість покриття проїжджої частини, коефіцієнт зчеплення колеса з дорогою) та внутрішні (зміна режиму руху ТП, зміна рівнів обслуговування транспортної мережі). Для рівня прийняття рішень більшу вагу мають внутрішні збурення, а для центру управління системою – зовнішні. Тому наявність двох вершин у запропонованій структурі має підґрунтя для розподілення функцій управління – керуючих та прийняття рішень, які застосовують відповідно технологічні та інформаційні складові системи управління.

Тоді для кожної ланки у запропонованій структурі надамо опис двома пов'язаними між собою частинами: перша приймає участь у формуванні керуючих впливів з урахуванням зовнішніх збурень  $H_{ij}^3$ , а друга впливає на оцінку існуючого стану дорожнього руху, або показників його ефективності,  $H_{ij}^B$ .

Тому відображення у ромбовидній структурі для кожної ланки буде складатися з двох частин:

– для технічних пристроїв

$$S_{ij}^T : U_{ij}^T \times Y_{ij}^T \times H_{ij}^3 \rightarrow X_{ij} \quad ; \quad (2.4)$$

– для інформаційних складових системи

$$S_{ij}^{\text{інф}} : U_{ij}^{\text{інф}} \times H_{ij}^B \rightarrow X_{ij} \quad (2.5)$$

Такий підхід дозволяє розподілити функції управління у системі та чітко виділити та зв'язати завдання двох типів, які необхідно вирішувати в процесі проектування систем управління ДР. До першого типу відносяться завдання

аналізу й синтезу динамічних контурів управління, що можуть бути структуровані при проведенні «розрізів» структури по вертикалі. До другого типу належить завдання статичного розрахунку, що можуть бути формалізовані при виконанні «розрізів» структури по горизонталі на кожному з рівнів ієрархії інформаційної або керуючої частини системи. В існуючих СУ ДР основою алгоритмізації є математична теорія транспортних потоків, на основі якої будуються системи мережевого та координованого управління із прогнозуванням параметрів транспортних потоків і зміною керуючих параметрів світлофорного регулювання, що працюють у режимі календарної автоматики [179]. Однак в умовах неповного, нечіткого й неточного знання характеристик вулично-дорожньої мережі, параметрів транспортного потоку та характеристик навколишнього середовища, у якому функціонує об'єкт управління, досить перспективним напрямом побудови СУДР, для режиму реального часу, є використання методів адаптивного управління. Такі методи повинні бути засновані на пошуку оптимального керуючого впливу та на використанні методів динамічного управління, де адекватна модель об'єкта конфігурується на підставі імітаційних моделей, які описують можливі стани системи, або засобами самонастроювального управління. Такий підхід до проектування системи доводить доцільність застосування принципів гібридних систем [180]. Тому ефективність переходу до ромбовидної структури має переваги при управлінні дорожнім рухом та дозволяє:

1) розділити керуючі й інформаційні канали системи на всіх рівнях ієрархії, з урахуванням того, що в деяких сучасних багатооб'єктних СУДР керуючі й інформаційні пристрої розділені територіально;

2) виділити в системі локальні динамічні контури управління для проведення розрахунків при зміні параметрів ТП у часі;

3) розглянути типові завдання статичних розрахунків, що відбуваються на кожному рівні в керуючих і інформаційних підсистемах з урахуванням детермінованих і нечітких параметрів;

4) створити за рахунок розподілу функцій за рівнями «задовільний» математичний опис окремих ланок і системи в цілому, а також спростити структурні перетворення в процесі проектування системи, що залежать від розміру об'єкту управління.

Таким чином, ієрархічна ромбовидна структура СУДР являє собою багатопроцесорну систему управління на основі індустриальних Ethernet-пристроїв, RISC-процесорів і сучасних мережевих технологій. Численні статистичні експерименти, а також досвід промислового використання подібних систем показує, що в більшості випадків відмови мікропроцесорних пристроїв нижчого локального рівня управління ДР обумовлені нестійкими збоями перемешованого типу й збоями, що виникають у результаті перешкод по ланцюгах живлення й зовнішніх електромагнітних хвиль. Тому, при постійному зростанні кількості автомобілів на дорогах, до систем управління пред'являються більш тверді вимоги до їх відмовостійкості та надійності, виконання яких можна домогтися шляхом використання сучасних досягнень технічної діагностики, вбудованих засобів діагностування й відновлення працездатності СУ ДР. Таким чином, на основі аналізу сучасних тенденцій розвитку СУДР запропоновано й обґрунтовано структуру системи управління ДР у містах, де розподіл інформаційних каналів управління сполучається із розподілом потоків технологічних параметрів та керуючих впливів, що дозволяє ефективно використовувати сучасні комп'ютерні й Ethernet-технології.

На підставі розробленої концепції пропонуємо розглядати чотири рівня управління, що були виділені у ієрархічній структурі АСУ ДР у відповідності із методами дослідження теорії автоматичного управління.

## 2.2 Обґрунтування принципів проектування гібридної системи управління дорожнім рухом

Проблеми узгодження взаємодії між окремими підсистемами управління, необхідність оперативного реагування на істотно мінливі внутрішні та зовнішні умови, багаторежимність функціонування дорожнього руху та суперечливість вимог, що висуваються до системи управління дорожнього руху у містах, сприяли появі таких функціональних завдань, як координація, оперативне управління й прийняття рішень в СУДР. Для встановлення взаємозв'язку традиційних завдань із новими завданнями управління розглянемо функціональну структуру багатооб'єктної системи управління. У роботі під структурою СУДР розумімо: 1) загальноприйняте якісне визначення структури системи як сукупність елементів, між якими існують певні зв'язки [181]; або 2) широко розповсюджену математичну модель структури як решітки, тобто частково впорядкованої сукупності, у якій кожна двоелементна підмножина має як точну верхню, так і точну нижню границю [167]. Використання такого підходу дозволить надалі формалізувати структуру СУДР у вигляді спеціального орієнтованого мультиграфа. За рахунок наявності складних взаємозв'язків між окремими елементами системи великої розмірності змінних, що характеризують систему в цілому, систему управління проектують у вигляді ієрархічної системи, на кожному функціональному рівні якої засобами обчислювальної техніки вирішуються завдання управління певного типу. Системи такого типу містять замкнутий контур визначення керуючої дії на об'єкт управління та забезпечують зв'язок об'єкта з керуючим пристроєм.

Із урахуванням визначених функціональних завдань та мети автоматичного управління, до яких належать інтелектуальні СУДР, можливо припустити, що у СУДР існує відповідність призначення цих рівнів певним принципам автоматичного управління. Пропонуємо розглядати послідовно чотири рівні управління: локального регулювання (рівень системи автоматичного регулювання (САР)), тактичної оптимізації (рівень системи

автоматичного управління (САУ)), координації параметрів із оптимізацію, та оперативного управління й прийняття рішень (рис. 2.4), зв'язаних між собою відповідно за принципами замкнутого контуру управління.

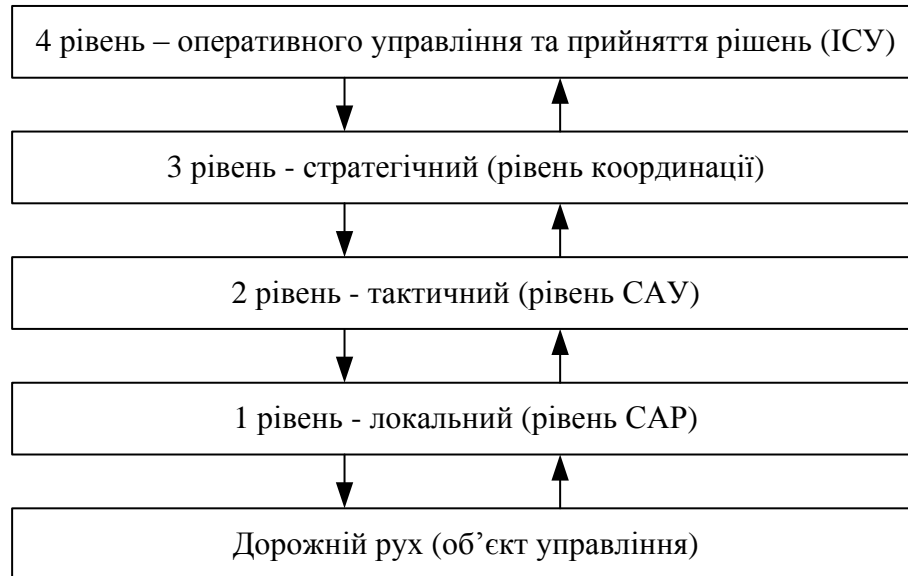


Рисунок 2.4 – Схема ієрархічної структури системи управління дорожнім рухом

Об'єкт управління, а саме дорожній рух, відноситься до структурно-складних об'єктів великої розмірності та може мати відмінність генеральних цілей управління від цілей функціонування його елементів із урахуванням існуючих протиріч в моделях зміни параметрів ТП при зміні параметрів дорожніх умов.

На першому рівні здійснюється керування об'єктом управління технічними засобами регулювання, які безпосередньо впливають на дорожній рух. Це - світлофори, керуючі дорожні знаки, засоби відеофіксації та контролю за рухом транспортних засобів. Саме цей рівень відповідає класу систем стабілізації, які утримують параметри ТП (інтенсивність та швидкість дорожнього руху) за відповідним керуючим впливом, що визначається на верхньому рівні. Саме на цьому рівні здійснюється регулювання дорожнього руху за методами автоматичного регулювання.

Локальний рівень має ознаки систем автоматичного регулювання (САР) як сукупності об'єкта регулювання і регулятора у ланцюзі апаратного зв'язку.



Структурні елементи САР належать до класу SISO-систем (Single Input Single Output) із зосередженими постійними параметрами. Вплив середовища й неадекватності відповідних математичних моделей об'єкту призводять до того, що функціонування об'єкта відбувається в умовах невизначеності та проявляється через неузгодженість керуючих впливів. Рівень САР забезпечує рішення задач автоматичного регулювання, тобто стабілізації або програмної зміни параметрів об'єкту відповідно із установками, що визначені на вищому рівні.

Другий рівень функціонує за типом систем узгодження, де керуючий вплив формується на підставі визначених керованих змінних для заданого алгоритму управління. Цей принцип відповідає основам адаптивного управління та передає на перший рівень керуючий вплив або у вигляді циклу світлофорного регулювання, або у вигляді рівня швидкісного режиму руху транспортного потоку. На тактичному рівні вирішуються завдання систем автоматичного управління (САУ), які відносяться до класу МІМО-систем (Multiple Input Multiple Output) де керуючий вплив формується на підставі алгоритму управління із урахуванням зміни параметрів об'єкту управління у часі та забезпечує ефективність процесу дорожнього руху.

Системам програмного управління відповідає стратегічний рівень управління, який призначений для оптимізації параметрів управління, де потрібно враховувати «інтереси» підлеглих оптимізатору підсистем. На цьому рівні повинні бути застосовані сучасні інформаційні та керуючі технології для узгодженого управління роботою регуляторів нижчого рівня та відповідні методи оптимізації параметрів управління.

Рівень оперативного управління містить керуючий орган (колектив фахівців або особа), що приймає рішення – ОПР. На цьому рівні узагальнені цілі та задачі системи управління перетворюються у конкретні установки для нижчих рівнів управління на підставі визначення загального критерію ефективності управління ДР. На рівні оперативного управління та прийняття рішень здійснюється узагальнений контроль за функціонуванням об'єкту

управління та у оперативному режимі особою, що приймає рішення (ОПР), визначаються дії вибору керуючого впливу на об'єкт управління у разі необхідності.

При такому підході відбувається розподіл ресурсів управління між окремими підсистемами управління та прийняття рішень також і у позаштатних ситуаціях. Кращий спосіб забезпечення ефективної роботи цього рівня - застосування «швидких моделей» для нижчих рівнів ієрархії й об'єкта управління. Кращі результати мають місце при повній автоматизації функцій оперативного управління й прийняття рішень, що обумовлено підвищеними вимогами до якості та швидкодії процесу прийняття рішень ОПР.

До опису завдань, що мають бути розв'язані на кожному рівні ієрархії СУДР належить наступне. Якщо об'єктом управління в СУ ДР є транспортні потоки, то під характеристикою об'єкта розуміється вектор, компонентами якого є значення інтенсивності, швидкість потоку й показники якості управління (наприклад, тривалість затримки, число зупинок і т.д.). При описі об'єкта необхідно враховувати й ряд особливостей, що мають ознаки технічного, соціального, економічного та екологічного типу:

- висока складність об'єкту управління, пов'язана з його специфікою й пояснювана, насамперед, можливістю виникнення відмінностей мети управління об'єктом від цілей функціонування його елементів;

- стохастичність поведінки об'єкту, що пов'язана із високим рівнем випадкових збурювань, як зовнішніх, так і внутрішніх;

- не стаціонарність параметрів, що пов'язана зі зміною у часі.

Таким чином, процес дорожнього руху як об'єкт управління, відноситься до структурно-складних об'єктів високої розмірності LSS (large scale systems) систем, що складаються з набору взаємозалежних підсистем. Основними методами дослідження подібних систем є декомпозиція й агрегування, що теоретично обґрунтовані [173]. Принцип агрегування передбачає розбиття транспортної мережі на стандартно описувані елементи та дозволяє розглядати

елементи дорожньої мережі різних розмірів з єдиних позицій з різними варіантами організації руху.

Пропонуємо підхід до структурного формування рівнів управління на підставі функцій управління кожного рівня [51].

На рівні САР забезпечується рішення завдань локального автоматичного регулювання, тобто програмної зміни параметрів об'єкта відповідно до налаштувань, що визначаються та задаються на вищому тактичному рівні. У якості технічних засобів на рівні САР можуть бути використані як цифрові регулятори (у тому числі й мікропроцесорні), так і традиційні регулятори безперервної дії (рис. 2.5). САР формується як сукупність об'єкта управління (ОУ) та світлофорного пристрою ( $\otimes$ ) у якості виконавчого приладу системи управління із регулятором (ДКЛ) – дорожнім контролером локальним. Алгоритм (АЛУ) розрахунку циклу світлофорного регулювання ( $T_{\text{ц}}$ ) розраховується заздалегідь та заноситься до ДКЛ.

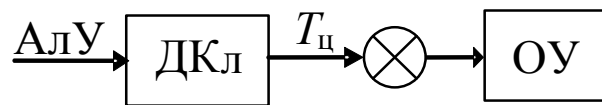


Рисунок 2.5 – Структурна схема САР

Принцип дії системи САР є робастним («грубим») до зміни її вхідних параметрів [182], що означає, що САР, незважаючи на зміну вхідних параметрів, повинна регулювати ТП за розробленим заздалегідь алгоритмом. Робастне управління являє собою сукупність методів теорії управління, метою яких є визначення керуючого впливу при наявності не повного та не докладного опису об'єкту управління. Особливе місце серед понять теорії робастного управління займає невизначеність вхідних параметрів, саме воно відображає неточність параметрів управління дорожнім рухом. Робастність передбачає невелику та вчасну зміну виходу розімкнутого контуру системи управління (циклу світлофорного регулювання) при зміні параметрів об'єкту управління (інтенсивності  $N$  та складу транспортного потоку  $K_c$ ). Наявність

такої властивості необхідна, тому як параметри об'єкту в реальних умовах змінюються, а керуючий вплив потребує додаткових розрахунків. Такий принцип дії відповідає робастному (грубому) управлінню об'єктом що до параметрів інтенсивності ТП та застосовується для управління об'єктами із неповним описом та невизначеністю, що має місце у процесі локального управління. Це і є недоліком такого типу управління.

Уникнути цього недоліку робастних систем можливо за допомогою адаптивних систем управління. Саме в такий спосіб формується процес управління для об'єктів, параметри яких невідомі з початку функціонування системи, а властивість адаптації досягається шляхом формування математичної моделі об'єкту управління для визначення впливу на нього. Тому особливістю адаптивних систем управління є можливість отримання вхідної інформації для формування керуючих впливів та наявності апріорної інформації стосовно невизначеності у системі. Це і є принциповою відмінністю адаптивного управління від робастного, яка реалізується на другому рівні управління.

На другому тактичному рівні управління дорожнім рухом вхідні параметри ОУ складаються з параметрів ОУ ( $N(t)$ ,  $K_c$ ) і впливу зовнішнього середовища, що обурює об'єкт управління –  $z(t)$ . Вихідні параметри також підрозділяється на вимірювані  $N(t)$  і не вимірювані. У процесі управління ДР до таких параметрів відноситься пропускна спроможність транспортної мережі  $P(t)$ . Керуючий сигнал системи  $u(t)$  формується в регуляторі на підставі заздалегідь розробленої моделі об'єкта управління.

На рис. 2.6 наведено структурну схему САУ другого рівня управління.

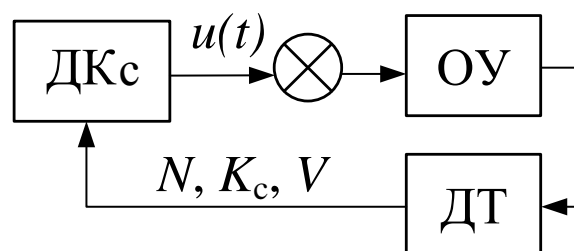


Рисунок 2.6 – Структурна схема САУ

При зміні поточних параметрів ОУ змінюються керуючі впливи на ОУ, що відповідає принципам адаптивного управління об'єктом. Вхідними параметрами до системного дорожнього контролеру (ДКс), який виконує функції не тільки регулятора (як на локальному рівні), а й блока місцевого керування, є параметри транспортного потоку:  $N$  – інтенсивність,  $V$  – швидкість,  $K_c$  – склад транспортного потоку, які входять до алгоритму управління та вимірюються детекторами транспорту (ДТ).

Технічні засоби регулювання ( $\otimes$ ), а саме – світлофорний пристрій, чи керований дорожній знак – отримують сигнал управління  $u(t)$  та передають на об'єкт управління.

Рівень САУ призначений для управління обмеженою кількістю об'єктів, підлеглих відповідним блокам місцевого керування (ДКс). Визначення мети управління для цього рівня може відрізнитися від загального критерію функціонування всієї системи. У всякому разі, у критеріях необхідно враховувати «власні інтереси» об'єкту управління. Технічні засоби рівня САУ, а також засоби більш високих рівнів ієрархії, повинні використовувати сучасні комп'ютерні технології, засоби швидкісного зв'язку збору та обробки інформації для реалізації адаптивного управління.

На третьому стратегічному рівні здійснюється координація та оптимізація управління для узгодження роботи місцевих пристроїв керування нижчого рівня для досягнення загальної мети функціонування всієї системи управління в цілому. Визначення оптимальних керуючих впливів на дорожній рух в умовах міста, коли щільність транспортного потоку впливає на режими руху на головних магістралях транспортної мережі, є складним завданням із великою розмірністю параметрів. Взаємний вплив параметрів об'єкту управління, технічних засобів регулювання та вулично-дорожній мережі (параметри нижчих рівнів управління) формує умови та обмеження до математичного апарату при розробці алгоритму управління та процесу прийняття рішень, щодо вибору керуючого впливу, що здійснюється на вищому рівні управління.

Необхідний рівень обслуговування ТП на елементах ВДМ забезпечується за рахунок організації рівномірного руху транспортних засобів шляхом зменшення кількості зупинок при русі. При цьому рух приймає ознаки упорядкування та сталості, що суттєво підвищує пропускну спроможність ВДМ та екологічну безпеку транспортної системи.

Найбільш дієві методи управління цього рівня – це магістральне або координоване управління із вирішенням задачі оптимізації керуючих впливів. При цьому для оптимізації процесу дорожнього руху використовується один або кілька критеріїв, що відбивають «інтереси» всієї ієрархічної системи. На цій підставі можливо стверджувати, що стратегічний рівень управління реалізує принципи автоматичного цілеуказання, що потребує розробки спеціалізованого математичного та програмного забезпечення для систем управління дорожнім рухом та методів інтелектуального управління (імітаційні моделі та моделі прогнозування зміни параметрів ТП).

Рівень оперативного управління й прийняття рішень містить крім центру управління технічним забезпеченням СУДР, керівний орган (колектив фахівців або особа, що приймає рішення (ОПР)), забезпечений сучасними комп'ютерними технологіями для проведення процедури формування варіантів рішення та вибору найбільш ефективного. На цьому рівні загальні цілі й завдання, що стоять перед системою, перетворюються в конкретні установки для нижчих рівнів управління. Крім того, відбувається розподіл ресурсів управління між окремими підсистемами й прийняття рішень у різних позаштатних ситуаціях. Ідеальний засіб для забезпечення ефективної роботи ОПР – це використання «швидких моделей» із застосуванням елементів ІСУ (формування баз моделей управління, баз даних) для оперативного рівня управління. Особливий інтерес викликають варіанти повної автоматизації функцій оперативного управління й прийняття рішень, які обумовлені підвищеними вимогами до якості прийнятих рішень і обмеженнями на час рішення, а також (в окремих випадках) неможливістю організації умов для нормальної роботи ОПР. Такий підхід обумовлює вимоги до проектування

гібридної системи управління дорожнім рухом на підставі отриманого структурного та функціонального опису розподілення методів та алгоритмів управління дорожнім рухом. У сфері автоматизації різних технологічних процесів до дійсного моменту використовуються різні мікропроцесорні пристрої, але тенденцією останніх років стало розповсюджене використання Internet-технологій (ІТ-системи управління) [183], що дозволяють більш гнучко інтегрувати послуги сучасних технологій зв'язку й управління. У такій системі задля взаємодії із пристроями, що входять до складу об'єкту управління, можуть використовуватися різні типи:

- IP-відеосервери, що підтримують якісний потік відеоінформації (MPEG-4) і синхронну трансляцію аудіо- і відео потоків;
- спеціалізовані асинхронні сервери доступу, що забезпечують підключення сенсорів, датчиків і програмувальних пристроїв управління із застарілими протоколами послідовної передачі даних RS- 232/422/485 до Ethernet-мереж;
- Internet-сервери введення й виводу, що безпосередньо обслуговують сенсори, датчики та виконавчі механізми;
- спеціалізовані шлюзи, наприклад, ModBus-Internet або програмувальні сервери доступу, через які до Ethernet-мережі підключаються пристрої, що підтримують інші промислові протоколи;
- дорожні контролери – мікропроцесорні пристрої, що забезпечують швидке перетворення параметрів ТП або безпосереднє локальне управління у вузлах транспортної мережі. Такі контролери взаємодіють із пристроями контролю й управління на дорогах і за рахунок вбудованого RISC-процесора беруть на себе більшу частину завдань системи управління.

Отримані результати дослідження структури та функцій СУДР, що підтверджують цілісність та системність запропонованого підходу, зведено у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Реалізація багаторівневого управління дорожнім рухом

Рівень	Тип управління	Тип параметрів	Керуючий елемент
1 рівень	Автоматичне регулювання	статичні	ДКл
2 рівень	Адаптивне управління	динамічні	ДКс
3 рівень	Оптимізація, координація	квазі динамічні	ЦУ
4 рівень	Гібридне інтелектуальне управління	бази даних бази моделей	ОПР

Відомо, що ІСУ має три режими роботи в реальному часі [184]:

- статичний – рішення завдань в умовах вихідних даних і знань, що не змінюються в часі;
- квазідинамічний – параметри інтерпретують ситуацію, що змінюється в деякому тимчасовому інтервалі;
- динамічний – у цьому режимі вирішують завдання в умовах даних і знань, що змінюються в часі.

Тоді, при наявності у системі управління дорожнім рухом декількох рівнів управління, такий підхід до визначення режимів роботи ІСУ передбачає наявність сукупності алгоритмів управління дорожнім рухом для кожного рівня управління [25, 185].

На стратегічному рівні, де функціонують пристрої системного керування що до координації параметрів транспортного потоку доцільним буде застосування квазідинамічного режиму, бо параметри об'єкту управління змінюються у деякому періоді часу при русі (пікові години, нічний період та сталий рух автотранспортних засобів) по транспортній мережі.

Динамічний режим функціонування системи управління вважаємо доцільним застосовувати на тактичному рівні керування, тому що параметри транспортного потоку потребують корегування у часі як на перегонах так і на перехрестях транспортної мережі, протягом часової довжини циклу світлофорного регулювання, або величини кратної їй.

На рівні прийняття рішень, згідно ромбовидної структури (рис. 2.3) ІСУ дорожнім рухом функціонують два центри управління дорожнім рухом:



перший – технологічний, що може у статичному режимі контролювати параметри технічних засобів регулювання та транспортної мережі загалом, та центр оперативного управління та прийняття рішень (ОПР), який повинен функціонувати у режимі реального часу.

Означені особливості та умови функціонування СУДР надають переваги у розробці гібридної інтелектуальної системи управління дорожнім рухом, бо вона є найбільш ефективною при функціонуванні, коли навколишнє середовище містить дискретні та безперервні елементи [180].

Під гібридною інтелектуальною системою розуміють систему, у якій для рішення завдання використовується більше ніж один метод імітації інтелектуальної діяльності людини. Гібридні інтелектуальні системи розглядають як сукупність аналітичних і імітаційних статистичних моделей. Фахівці University of Sunderland (Великобританія), які входять до складу групи HIS (Hybrid Intelligent Systems) визначають гібридні системи, як великі та складні, що дозволяють поєднувати знання із традиційною обробкою даних. Вони можуть надавати можливість зберігати, шукати й маніпулювати даними, знаннями й традиційними технологіями проектування гібридних інтелектуальних систем, які надають значно ефективніший результат, ніж екстраполяція концепцій існуючих систем. Таким чином системи, до складу яких входять декілька різних підсистем, що мають єдину мету функціонування та виконують загальні дії, відповідають типу гібридних систем.

Відомо [186], що у теорії існує два підходи до побудови гібридних систем:

- логічний, на підставі моделювання логічного (вербального) мислення;
- аналітичний, заснований на різноманітних методах формалізації знань.

Наведені ознаки підтверджують, що проектування запропонованої системи багаторівневого управління дорожнім рухом за описаними структурними та функціональними особливостями належить до гібридної інтелектуальної системи із реалізацією аналітичного підходу до побудови

розподілених систем управління. До розподілених систем мають відношення і системи, які застосовують данні з мережі Internet.

Наступним кроком розвитку систем автоматичного управління є система автоматичного досягнення мети, що може бути реалізована як інтелектуальна система управління (ІСУ) із реалізацією автоматичних методів управління. Але невизначеність вхідних параметрів відбиває різну природу зовнішніх збурювань, що діють на дорожній рух, як об'єкт управління та місцеві регулятори. У СУДР основним параметром, що впливає на якість управління, є параметри ТП – інтенсивність ( $N$ ) та склад транспортного потоку ( $K_c$ ), які змінюються у часі, тобто реалізують робастне управління (грубе) до основних вхідних параметрів об'єкту управління на локальному рівні. Усунути цей недолік можливо за допомогою розробки математичної моделі об'єкта з урахуванням зовнішніх впливів на нього. Основна особливість адаптивних систем управління – це застосування первинної інформації для управління, отриманої в процесі функціонування об'єкту.

Для поєднання різних типів управління (САР та САУ) у єдину ІСУ дорожнім рухом було розроблено її структуру (рис. 2.7).

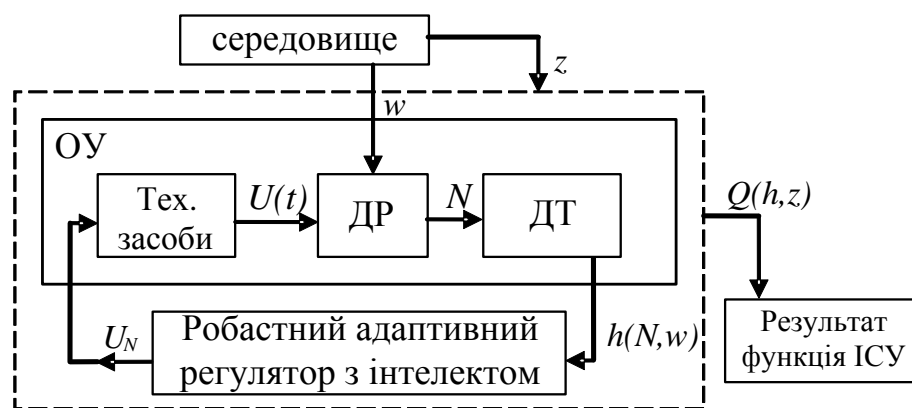


Рисунок 2.7 – Принципова схема ІСУ дорожнім рухом

До складу ІСУ дорожнім рухом входять відомі складові. Тоді узагальненим об'єктом управління є процес дорожнього руху з детекторами транспорту (ДТ) як пристроями для виміру параметрів ТП ( $N$ ) і технічними

засобами регулювання (Тех. засоби), що передають керуючі впливи на об'єкт управління (світлофорні пристрої, динамічні дорожні знаки).

Принцип дії адаптивної системи управління дорожнім рухом полягає у наступному. Вихідними параметрами ДР є параметри ТП (інтенсивність, швидкість, склад транспортного потоку), що формуються під впливом середовища (обурюючий вплив навколишнього середовища ( $w(t)$ ) і параметричні змінні дорожніх умов ( $z$ ), які пов'язані зі зміною топології транспортної мережі). Тоді на вхід робастного адаптивного регулятора будуть надходити вхідні дані з ознаками невизначеності, що наведено як  $h(N,w)$ . Регулятор формує керуючий вплив  $U_N$  на ОУ ( $U_N(t) \rightarrow \text{opt}$ ) для досягнення мети управління, що впливає на результат функціонування дорожнього руху, а саме на функцію  $Q(h,z)$ , яка повинна урахувати невизначеність вхідних параметрів, змінні параметри умов руху ТП та випадкові збурювання.

Регулятор у поднанні з ОУ утворює адаптивну СУ, якщо управління забезпечує оптимальне досягнення мети управління. Формування мети управління здійснює регулятор, тому запропонована СУ є системою автоматичного цілеуказання (САЦ) і належить до систем більш високого рівня, ніж САР або САУ. Реалізувати можливість приймати коректні рішення під час функціонування СУ необхідно за допомогою інтелекту (як якоїсь субстанції, що володіє властивістю знаходити обґрунтовані з погляду розуму й інтуїції людини рішення) безпосередньо в регуляторі, який фактично виконує функції центру управління системи.

Результати функціонування САЦ визначаються на підставі функції  $Q(h,z)$ . Характеристикою досягнення мети, якою є показник ефективності управління  $F(U)$  або протилежна їй величина – функція втрат  $C(u,h)$ , що залежить від обраного правила прийняття рішень на основі спостережуваних даних, при цьому  $C(u,h) \rightarrow 0$  [187].

Присутня робастність у САЦ припускає зменшення ефективності системи, тобто  $C(u,h) > 0$ . Отже, зменшити втрати можливо шляхом введення

адаптивних елементів в ІСУ й удосконалення структури регулятора системи, блок-схема якого представлена на рис. 2.8.

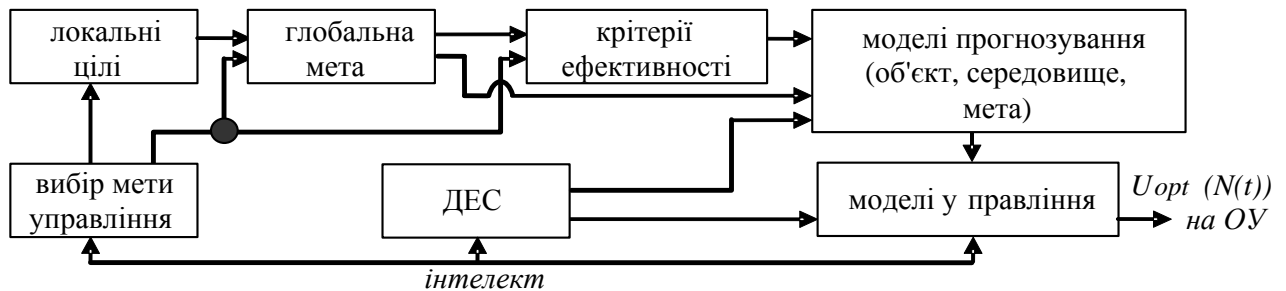


Рисунок 2.8 – Принципова схема регулятора ІСУ

ІСУ повинна мати динамічну експертну систему (ДЕС), що у процесі функціонування уточнює або обирає алгоритми управління, моделі об'єкта та середовища. Це комп'ютерна система, яка здатна замінити фахівця прийняття рішення (ОПР) у рішенні проблемної ситуації [188].

Наведено структуру запропонованого регулятора ІСУ (рис. 2.8), яка формує керуючий вплив  $U_{opt}(N(t))$  на об'єкт управління (ОУ).

До складу ДЕС разом з базами знань належать моделі, що засновані на думці експертів з використанням процедур логічного виводу й прийняття рішень. Подібні системи можуть бути пошуковими або довідковими. Але застосування експертних систем на оперативному рівні управління дорожнім рухом впливає на ефективність та тривалість процесу прийняття рішень ОПР.

У ході досліджень було виявлено [188], що класична концепція експертних систем, що склалася у 70-80 р. ХХ ст., переживає серйозну кризу, пов'язану з її орієнтацією на текстовий людино-машинний інтерфейс, що у теперішній час було усунуто графічним – GUI. GUI – графічний інтерфейс користувача (graphical user interface), в якому елементи представлені на дисплеї і виконані у вигляді графічних зображень.

На відміну від інтерфейсу командного рядка у GUI користувач має довільний доступ до всіх видимих об'єктів на екрані, що полегшує розуміння програми користувачами. Також GUI є частиною призначеного для користувача

інтерфейсу і визначає взаємодію на рівні візуалізації інформації. У теперішній час GUI є стандартом, що становить більшість операційних систем і додатків (Windows, Menus, Icons).

Крім того, класичний підхід погано погоджується з реляційною моделлю даних, що унеможлиблює ефективне використання сучасних промислових систем управління базами даних (СУБД) для організації баз знань таких систем. Відомі підходи до розробки експертних систем із сучасними користувальницькими інтерфейсами (проекти CLIPS, Java Native Interface) [189].

ДЕС розробляють: 1) експерти проблемної області; 2) фахівці з розробки ІСУ; 3) програмісти. Тобто, ДЕС у сучасних СУДР повинна мати структуру спеціального програмного забезпечення із призначенням формувати керуючі впливи на дорожній рух.

Отже, маючи у своєму складі ДЕС, ІСУ має можливість уточнювати моделі й тому вона є адаптивною системою управління, що підвищує ефективність управління ОУ. З урахуванням того, що ДЕС виконує розрахунки, оптимізацію на підставі баз параметрів ОУ та баз моделей управління об'єктом є автоматичною із високою швидкодією. Особливу увагу заслуговує наявність в ДЕС формування системи підтримки прийняття рішень для особи, що приймає рішення (ОПР), яка вкрай необхідна у СУДР.

### 2.3 Підхід до розробки структури програмного забезпечення ІСУ

У напрямку створення теорії штучного інтелекту на підставі «законів мислення» для формування логічних висновків, вагомою частиною є програмне забезпечення СУ, а саме програми управління, які мають назву агентів (від латинського «agere» - діяти) та входять до складу ДЕС. Але комп'ютерні агенти мають атрибути відмінності від звичайних програм. Найбільш суттєва з них – це здібність функціонувати при автономному управлінні, реагувати на середовище та адаптуватися до змін його параметрів.

У сучасній науці визначений підхід, згідно якому інтелектуальність пов'язана з раціональною діяльністю [190]. В ідеальному випадку інтелектуальний агент (початкова структура) визначає найкращу управляючу дію на об'єкт управління. Тому при проектуванні інтелектуальних систем управління головною проблемою є проблема розробки агентів, які є інтелектуальними саме у цьому сенсі. Метою сучасної теорії управління, особливо частини стохастичного оптимального управління, є проектування систем, які максимізують цільову функцію у часі математичними методами – диференціальним або інтегральним численням та за допомогою алгебри матриць. Штучний інтелект був розроблений як засіб запобігання обмеженням для математичного апарату теорії управління.

Раціональним агентом є агент, який діє таким чином, щоб була можливість отримати найкращий результат в умовах невизначеності [180].

За цими обставинами, підхід до області проектування раціональних агентів, як дослідження штучного інтелекту, має наступні переваги:

– по-перше, цей підхід є узагальнюючим в порівнянні з підходом, заснованим на застосуванні «законів мислення», оскільки коректний логічний висновок – це тільки один з декількох механізмів досягнення раціональності;

– по-друге, він є найбільш перспективним для наукових розробок у порівнянні з підходами, які засновані на дослідженні людської поведінки, або мислення, тому що у нього чітко визначена раціональність.

При цьому треба враховувати, що у складному середовищі задача досягнення повної раціональності не має рішення. Тому у теорії штучного інтелекту існує поняття «обмеженої раціональності» - тобто організації програмних дій у ситуаціях, коли часу на виконання обчислень не вистачає, а саме це стосується управління дорожнім рухом у режимі реального часу.

Тоді, підхід до розробки агента, який може працювати у обчислювальному пристрої поряд з датчиками виміру параметрів ДР та виконавчими пристроями на вулично-дорожній мережі є актуальним застосуванням штучного інтелекту у

СУДР. У цілому ці компоненти мають назву архітектури, а структуру агента умовно можна визначити як: *агент = архітектура + програма* [32].

Згідно із визначенням, архітектура забезпечує функції передачі у програму результатів вимірювання параметрів об'єкта управління та середовища відповідними датчиками, безпосередньо для виконання програми управління та передачу виконавчим пристроям варіантів управляючих дій, сформованих у програмі. Саме це відповідає принципу управління, який реалізує агент, що також співпадає із функціями управління ДР.

Розроблено та запропоновано моделі декількох типів рефлексних агентів для розглянутих технологій управління дорожнім рухом [32].

Найпростіший вид агента визначає керуючий вплив (дію) на підставі поточних вимірів параметрів середовища, ігноруючи попередні виміри. На рис. 2.9 наведено структуру агента, де у схематичній формі доведено, що правила «умова-дія» дозволяють агенту реалізувати зв'язок з об'єктом управління від моменту сприйняття середовища до передачі управляючої дії. Під «умовами» розглянуто середовище, у якому функціонує об'єкт управління, тобто транспортну мережу, а дія – це сформована управляюча дія на об'єкт управління.

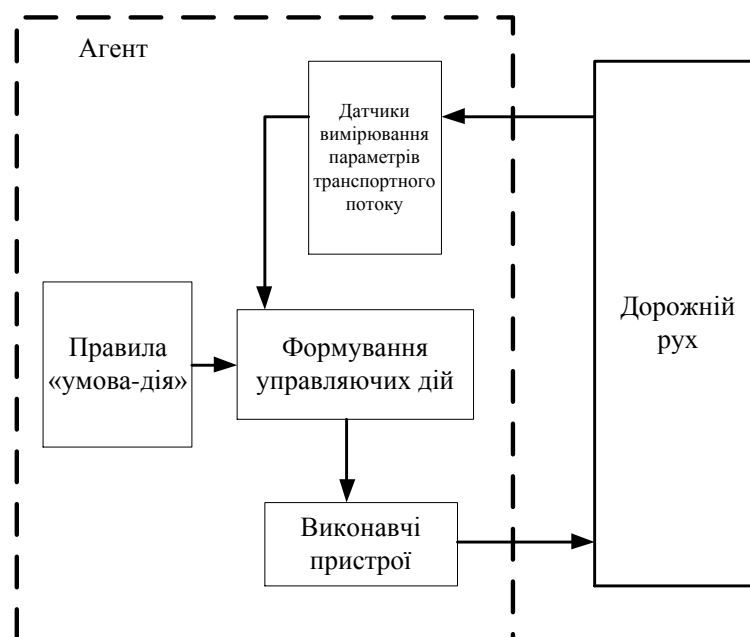


Рисунок 2.9 – Модель простого рефлексного агента

До датчиків агента в управлінні дорожнім рухом відносяться детектори транспорту, пристрої відеозйомки та пристрої теленагляду. До виконавчих пристроїв належать світлофорні пристрої та керовані дорожні знаки. Правила «умова-дія» формуються фахівцями в залежності від обраного методу управління дорожнім рухом на локальному рівні управління. Саме на підставі структури рефлексного агента можливо розробити гнучку систему управління дорожнім рухом із формуванням управляючих дій для світлофорного пристрою або за розрахунком параметрів циклу регулювання (методом Вебстера чи методом Міллера), або за методом пошуку розриву у транспортному потоці на підході до регульованого перехрестя.

За даною структурною схемою рефлексного агента можливо реалізувати програмно-адаптивні методи управління дорожнім рухом, які працюють у реальному часі якщо контролер має таймер реального часу.

Прості рефлексні агенти відповідають безпосередньо на акти сприйняття інформації при спостереженні в різних варіантах середовища. У зв'язку із цим часто бувають неминучими нескінченні цикли їхньої роботи. Вихід із циклів стає можливим, якщо агент має здатність рандомізувати свої дії.

Найбільш ефективний спосіб організації роботи системи управління в умовах часткового виміру параметрів навколишнього середовища та об'єкту управління, полягає в формуванні управляючої дії на підставі математичної моделі. Для рефлексного агента це означає, що агент повинен підтримувати свій внутрішній стан, який залежить від статистичних даних, або від вимірюваних параметрів датчиками. Для управління дорожнім рухом, з огляду на нестационарність об'єкту управління, такими параметрами є інтенсивність та склад транспортного потоку. Для забезпечення можливості оновлення внутрішньої інформації протягом часу, необхідні закодовані знання двох типів. По-перше, потрібна інформація щодо зміни поточної інтенсивності транспортних потоків, по-друге – інформація щодо зміни узагальнюючого параметру зовнішнього середовища (яким є вулично-дорожня мережа) – пропускної спроможності вулично-дорожньої мережі. Ці знання можуть бути



реалізовані у логічних схемах, або на підставі аналітичної моделі. Агент, у якому застосовується такий підхід, має іншу структуру (рис. 2.10). Програма такого агента відповідає за побудову опису нового стану, об'єкту управління і середовища. Нова функція агента повинна урахувати, яким чином дії агента впливають на стан середовища, а саме на працездатність транспортної мережі. Тому структура агента повинна містити такі складові, як база даних (БД), де зберігаються дані про параметри ТП; базу знань (БЗ), у якій знаходяться алгоритми прогнозування зміни параметрів дорожнього руху після дій агента та безпосередньо база моделей (БМ), що повинна містити моделі динаміки об'єкта управління. Таким чином, поточний стан ОУ та функціонування агента комбінуються з очікуваним результатом для вироблення керуючих дій за правилами «умова - дія».

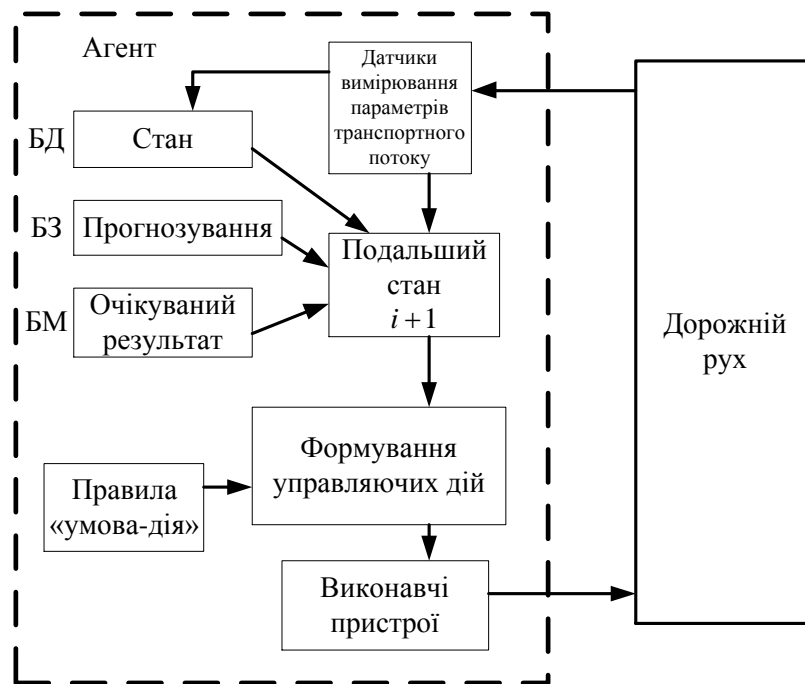


Рисунок 2.10 – Структура рефлексного агента, заснованого на моделі об'єкту

Наданий опис агента, заснованого на моделі, пропонуємо застосовувати для проектування систем управління дорожнім рухом на тактичному рівні керування. Наприклад, динамічне управління швидкісним режимом руху на магістралях міста або на підходах до складних елементів транспортної мережі.

При побудові структури агента необхідно розробити наступні елементи структури: опис стану середовища, параметри якого вимірюють датчики, який формується у базі даних (БД), опис майбутнього стану середовища визначається моделями прогнозу зміни параметрів ТП та може бути визначений як база знань (БЗ); очікуваний результат у наступному кроці можливо отримати на підставі бази моделей (БМ) (визначення БД, БЗ, БМ відповідно на рис. 2.8). Наведена структура є досить гнучкою, оскільки знання, на яких засновані рішення, формалізовані та наведені явно, а у подальших дослідженнях можуть бути модифіковані для реалізації технології динамічного управління ДР на тактичному рівні системи управління.

При проектуванні агентів інтелектуальних систем управління, виникає проблема щодо цільового функціонування систем управління дорожнім рухом. Для цього, агенту потрібен не тільки опис поточного стану об'єкту управління, а й інформація стосовно мети функціонування об'єкту. Програма агента може комбінувати цю інформацію із моделями визначення управляючих дій при виборі послідовності операцій, які призведуть до поставленої мети. Структура агента, який діє на підставі означеної мети, наведено на рис. 2.11.

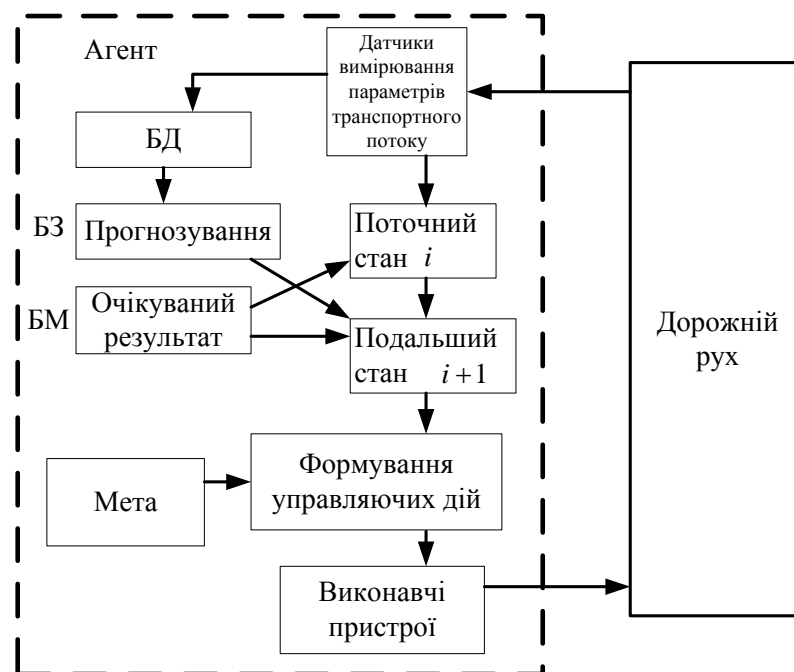


Рисунок 2.11 – Структурна схема агента, заснованого на досягненні мети

Іноді задача формування управляючих дій при наявності мети, вирішується за один цикл, а іноді процес рішення складається із послідовності обчислювальних операцій для досягнення мети. Тоді, складовими програмного середовища агента при формуванні послідовності дій для досягнення мети додаються операції оптимізації показників ефективності дорожнього руху.

Якщо середовище, у якому діє об'єкт управління, можливо описати детермінованими, статистичними та дискретними методами, то таке середовище має ознаки застосування класичного проектування. Некласичне проектування призначено для часткових спостережень у середовищі, або при наявності стохастичних ознак у середовищі. Саме такі відмінності присутні при управлінні дорожнім рухом. Тоді структуру агентів необхідно змінювати. Успішне рішення задачі при проектуванні структури агента має процес декомпозиції задачі. Визначення мети функціонування СУДР у складі ІТС є найважливішим етапом проектування, бо існує ціла низка критеріїв ефективності управління ДР – технічні, соціальні, економічні та екологічні, до яких відноситься зменшення транспортних затримок, економічність витрат палива та підвищення екологічної безпеки навколишнього середовища. Але вони є похідними, якщо досягнута головна мета управління ДР – забезпечення оптимальної пропускнуєї спроможності ВДМ при необхідному рівні безпеки ДР. Тому цей тип агента необхідно проектувати для стратегічного рівня управління за технологією сітьового управління на підставі координації керуючих впливів при контурному управлінні ДР.

В процесі управління дорожнім рухом досягнення однієї з мети його функціонування буває недостатньо. Багатокритеріальність об'єкту управління, а саме наявність зустрічних критеріїв оцінки його ефективності, передбачає декілька варіантів послідовності етапів, які можуть привести до формування управляючих дій. Для порівняння стану дорожнього руху після дії управління пропонуємо користуватись категоріями «задовільно» чи «незадовільно», на підставі функції корисності, яка означає відповідну ступінь задовільності результатом управління на рівні прийняття рішень ОПР [21]. Загальний опис

функції корисності забезпечує можливість приймати раціональні рішення, коли цього потребують процеси досягнення мети. По-перше, якщо маємо конфліктні цілі, то може бути досягнути тільки деякі із них. У разі визначення параметрів швидкості руху транспортних засобів, або зменшення транспортних затримок функція корисності дозволяє отримати компромісне рішення. По-друге, якщо управління має декілька цілей стосовно об'єкту, але жодна не може бути досягнута із повною визначеністю, то функція корисності являє зручний спосіб узгодженої оцінки ймовірності успіху із урахуванням важливості цілей. Для цього необхідно провести аналіз цілей та критеріїв ефективності дорожнього руху.

Зважаючи на це, необхідно формувати вимоги до раціонального агента із урахуванням функції корисності, очікуване значення якої він може максимізувати. На підставі цього, поняття раціональності необхідно перетворити в локальні обмеження до структури раціонального агента, які можуть бути доведені у складі програмного забезпечення. Структура агента, який діє із урахуванням корисності, наведена на рис. 2.12.

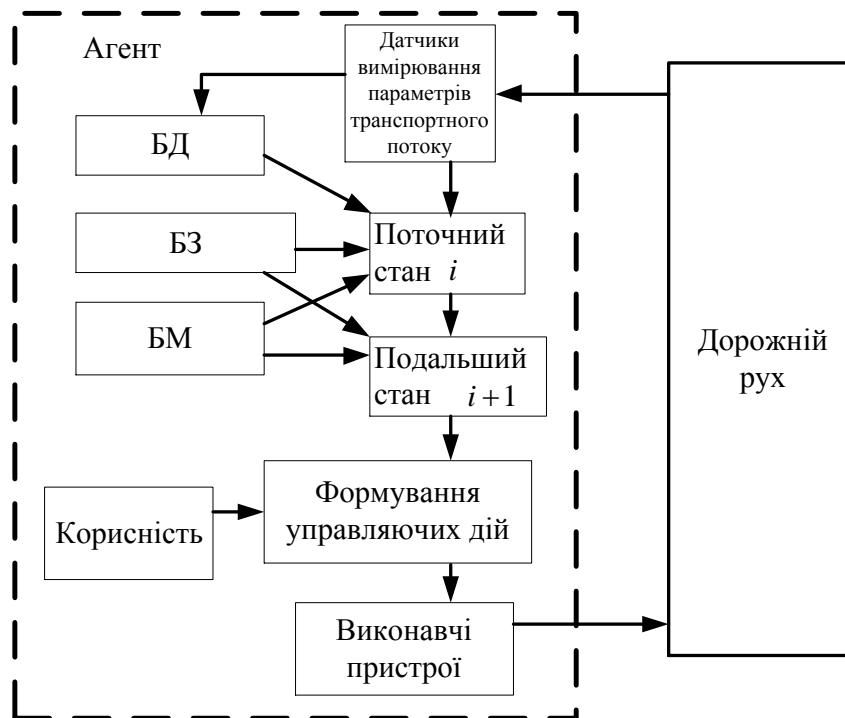


Рисунок 2.12 – Структура агента із урахуванням корисності

Функція корисності відображає процедуру прийняття рішень при оперативному управлінні дорожнім рухом та означає відповідний ступінь задоволення агента результатом. Оптимізацію функцій корисності проводимо методами теорії ігор. Методи визначення корисності забезпечують можливість приймати раціональні рішення, коли цього не дозволяють зробити поставлені цілі функціонування ОУ. По-перше, при наявності конфлікуючих цілей, у випадку можливості досягнення тільки деяких з них (наприклад, або швидкість сполучення, або безпека ДР) функції корисності дозволяють знайти компромісне рішення. По-друге, при наявності в системі декількох цілей і якщо жодна з них не може бути досягнута з необхідною визначеністю, функція корисності дає можливість зваженої оцінки ймовірності успіху з урахуванням важливості цілі.

При цій структурі агент застосовує базу знань поряд із визначенням корисності для ступеня важливості дії агента на підставі бази моделей. Агент обирає ту управляючу дію, яка призводить до очікуваної корисності та для формування якої виконуються усереднення вихідних параметрів за всіма можливими результатами із урахуванням або експертних оцінок, або оптимізації результату. Такий підхід формує принцип дії рівня прийняття рішень в ІТС, який відсутній в АСУДР, коли такі задачі вирішує саме центр управління. Тому, у процесі проектування агента, необхідно розробити систему підтримки прийняття рішень для особи, що приймає рішення (ОПР) у разі виникнення критичних ситуацій на вулично-дорожній мережі та неефективних режимів руху транспортних засобів, що однаково призводять до зменшення працездатності транспортної мережі ефективності транспортної системи загалом.

Таким чином, запропоновано підхід до визначення фіксованої послідовності дій у моделях агентів, що призвело до формування стратегії управління дорожнім рухом за відповідною технологією на рівнях гібридної системи управління дорожнім рухом у містах.

## 2.4 Проектування елементів інформаційного забезпечення ІСУ

Питання невизначеності як параметрів об'єкту управління (ДР), так і впливу участі людини у процесі управління, які виникають під час функціонування СУДР та проблеми багатокрітеріальності оцінки функціонування ВДМ можливо вирішити на базі сформованої множини альтернатив рішення в процесі прийняття оперативних рішень та розробки заходів контролю параметрів ТП.

Участь людини в сучасних системах управління постійно зростає, особливо на стратегічному рівні та рівні прийняття рішень, які мають функціональний зв'язок із інформаційним забезпеченням ІСУ мережі міст. Бо навіть завдяки людині СУДР забезпечує управління ДР у дуже складних і навіть у критичних ситуаціях, які виникають на ВДМ міста.

Особливості функцій та структури процесу прийняття рішень визначаються рівнем ієрархії СУДР. На вищих рівнях управління особа, що приймає рішення (ОПР) має справу із слабо структурованими проблемами. У її діяльності переважають дії, що мають ознаки евристичних, творчих, інтуїтивних і компонентів інтелектуальних заходів.

До слабо структурованих проблем в управлінні ДР відносяться:

- а) прийняття рішень стосовно дій до майбутнього стану дорожнього руху;
- б) наявний широкий діапазон альтернативних дій;
- в) рішення залежать від неповноти поточної інформації;
- г) прийняті рішення вимагають великого обсягу ресурсів і містять елементи ризику;
- д) неповністю визначені вимоги, які стосуються вартості і часу вирішення проблеми;
- е) проблема внутрішньо складна внаслідок того, що для її вирішення необхідно комбінування різних ресурсів [191].

У звичайних ситуаціях центр управління дорожнім рухом (ЦУДР) забезпечує ОПР інформацією для прийняття рішення і здійснює трансформацію і передачу рішень до оператора. У більш складних ситуаціях ЕОМ виступає ще й у ролі консультанта. При більш високих рівнях автоматизації, ОПР може

задавати ЕОМ певну стратегію управління, яку та виконує відповідно з реальною обстановкою на ВДМ. Оператор має можливість віддавати прямі розпорядження чи змінювати параметри програми управління. У цьому випадку ЕОМ виступає в якості творчого виконавця, а людина є провідною ланкою у процесі управління.

Ефективність роботи всієї системи залежить від того, як буде організовано участь ОПР в процесі управління ДР. Тому прийняття остаточного рішення в слабо структурованих проблемах завжди пов'язане з ризиком та здійснюється людиною на основі його досвіду, знань та інтуїції. Саме розвинуте інформаційне забезпечення системи надає підґрунтя ОПР для ефективної роботи.

Така особливість існуючих СУДР, в умовах психологічного навантаження на людину і великих потоків інформації, що надходить, не виключає прийняття нерациональних або помилкових рішень, що може посилювати транспортну проблему міста.

Інформаційне забезпечення роботи ОПР з великими обсягами інформації, котра надходить, за своєю основою містить процес створення систем підтримки прийняття рішень (СППР) або Decision Support System (DSS) [192], які здійснюють глибокий аналіз інформації, що надходить з перетворенням даних в необхідну форму для прийняття рішень. Відбувається перехід від інфологічного (переважно) до синтетичного використання даних. Для DSS характерно застосування агрегованих даних і певних правил формування та формалізації рішень, що надаються ОПР. Саме в такий спосіб функціонує СППР в СУДР.

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

формування керуючого впливу інформації, але і в формуванні конкретної, наочної інформації, що до стану ДР на ВДМ.

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

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

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

- по-перше, ОПР необхідно мати доступ до інформації, яка є результатом транспортних ситуацій, що виникають на ВДМ під час її функціонування. Також розроблені моделі, що надають формалізований опис ДР для вибору альтернативних шляхів їх вирішення та сприяють коректному вибору керуючих дій ОПР у вигляді заходів ОДР для тієї чи іншої ситуації за обраними критеріями;

- по-друге, здійснюючи параметрично-експертний вибір, ОПР повинна мати правила вибору чи зміни параметрів управління ДР, або формування керуючого впливу у разі виникнення складних умов руху транспорту на ВДМ, що призводить до зміни режимів руху ТП на елементах ВДМ.

З урахуванням задач та функцій була розроблена принципова схема СППР для СУДР (рис. 2.13).



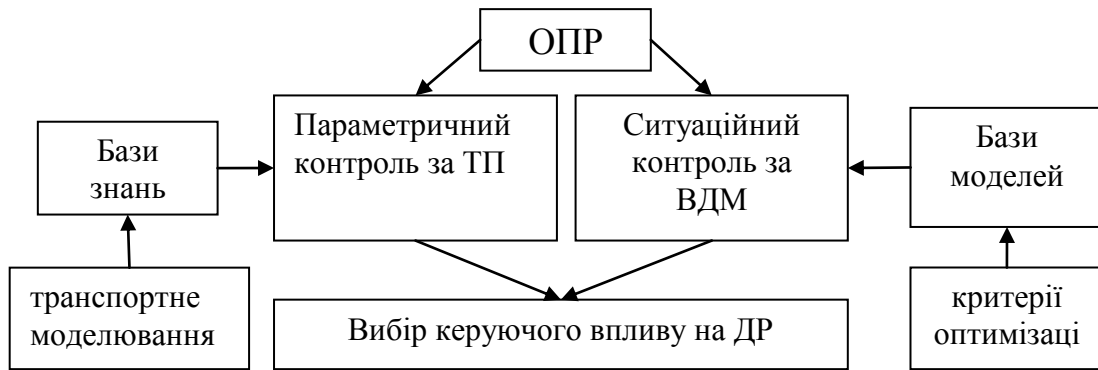


Рисунок 2.13 – Принципова схема СППР

Якщо мета оперативного управління, що здійснюється на рівні прийняття рішень, міститься у формуванні керуючих впливів на ДР, які спрямовані на забезпечення працездатності ВДМ, то основа оперативного управління полягає у вимірі параметрів та їх оцінці на підставі розроблених моделей. Моделі для оперативного рівня у своїй спрямованості повинні надавати відповідну інформацію щодо виявлення «вузьких місць» ВДМ, які є причинами затору, визначення ділянки з наявним ризиком виникнення ДТП та формування дії ОПР згідно з технологією управління для зменшення напруги у транспортній мережі міста.

Основу дій ОПР формує СППР, що включає моделі об'єкта, бази знань, бази моделей та можливість в діалоговому режимі отримувати необхідну інформацію для оцінки існуючих альтернатив і вибору рішень [107]. Такий підхід обумовлює наявність інтелектуальної складової в управлінні ДР та формує ознаки гібридної системи управління ДР.

Відомий підхід до побудови схеми ВДМ, що розповсюджений у процесі вирішення транспортних задач, бо наочно відображає зв'язки у транспортній мережі, де перехрестя відповідає вузлам графу, а перегони – ребрам графу із змінною вагою, у залежності від типу дослідження [167]. Але схематично виконаний граф транспортної мережі у масштабі, без координатної орієнтації відповідно до реальної транспортної мережі міста не відповідає ознакам

математичної моделі та впливає на проблему визначення параметрів дорожнього руху.

Було розроблено геоінформаційну модель ВДМ (ГІМ) на підставі топологічної карти міста, яка поєднує наявність географічних координат елементів ВДМ із параметрами ТП, із застосуванням спеціального програмного забезпечення у програмному середовищі Delphi 7.0 [31] та глобальної системи позиціонування (GPS).

Введення початкових параметрів при моделюванні здійснюється в режимі діалогу програми, яка має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс і графічне пояснення кожного з параметрів елементів ВДМ міста. Це істотно спрощує процес адаптації програмного продукту серед фахівців у департаментах організації дорожнього руху державних органів та у місцевому центрі управління ДР.

ГІМ ВДМ міста запропоновано у вигляді графа, де вершини є перехрестями, а дуги – перегонами ВДМ. Кожен з елементів характеризується певним набором параметрів. Кероване перехрестя розглядається в моделі ВДМ як точка перетину магістралей міста із позначенням інтенсивностей ТП за дозволеними напрямками руху на перехресті [15]. Модель х-подібного перехрестя має вигляд (рис. 2.14).

Опис перехресть надано сукупністю параметрів, які пов'язані з особливостями організації дорожнього руху на перетині. До таких параметрів належать:

- $k$  – номер перехрестя,  $k = 1, \dots, n$ ;
- $X_k, Y_k$  – координати перехрестя на двокоординатній сітці моделі.

Географічні параметри визначаються автоматично на підставі географічної карти об'єкта дослідження на початку побудови структурної моделі досліджуваного району управління.

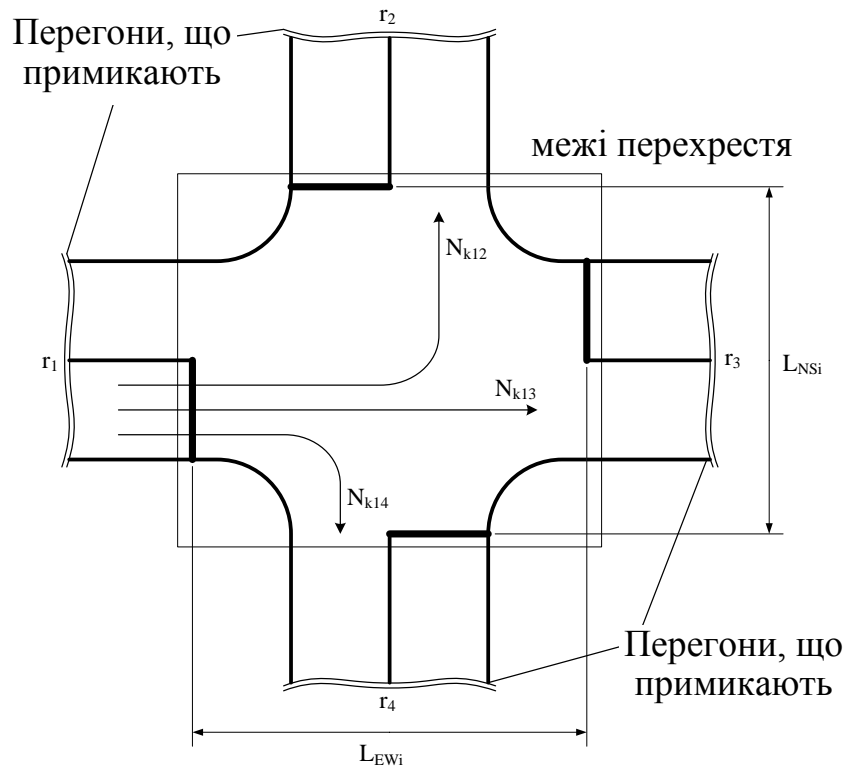


Рисунок 2.14 – Модель перехрестя

Для коректного визначення положення перехрестя на площині моделі, прийняті позначення елементів моделі через географічні сторони світу. Таким чином, верх робочої області позначений як північ ( $N$ ), низ – південь ( $S$ ), права частина – схід ( $E$ ), ліва – захід ( $W$ ). Ці ознаки застосовуються для позначення місць примикання перегонів до перехрестя, а також опису інших параметрів моделі.

Процес комп'ютерного моделювання було розроблено наступним чином.

Якщо кількість перехрестя дорівнюють  $n$ , то  $X_k$ ,  $Y_k$  – координати перехрестя,  $k=1 \dots n$ , (м). Координати повинні визначатися будь-якої необхідної крапки на карті міста; такою крапкою може бути, наприклад, південно-західний кут досліджуваної ділянки. Східний напрямок вважається позитивним по осі  $X$ , північне – позитивним по осі  $Y$ . Таким чином, якщо  $X_5 = 200$  і  $Y_5 = 350$ , це означає, що перехрестя з умовною нумерацією 5 знаходиться на 200 м на схід від обраної за початок координат точки і на 350 м на північ від неї. Точка на площині знаходиться в центрі перехрестя, на перетині осей проїжджих частин.

Дані координати потребують необхідного ступеню точності для визначення довжини перегонів в метрах, що, при середній швидкості руху транспортних засобів 30 км/год дає похибку при розрахунку циклів світлофорного регулювання у секундах. Визначені координати зручно використовувати для графічного опису транспортної мережі міста у цілому.

Для опису кожного перегону ВДМ, а саме контуру управління, застосовано такі позначення. Перегін ВДМ з'єднує два перехрестя і визначається за номером перехрестя і номером примикання на даному перехресті. Основними параметрами перегону в ГІМ було обрано (рис. 2.15):

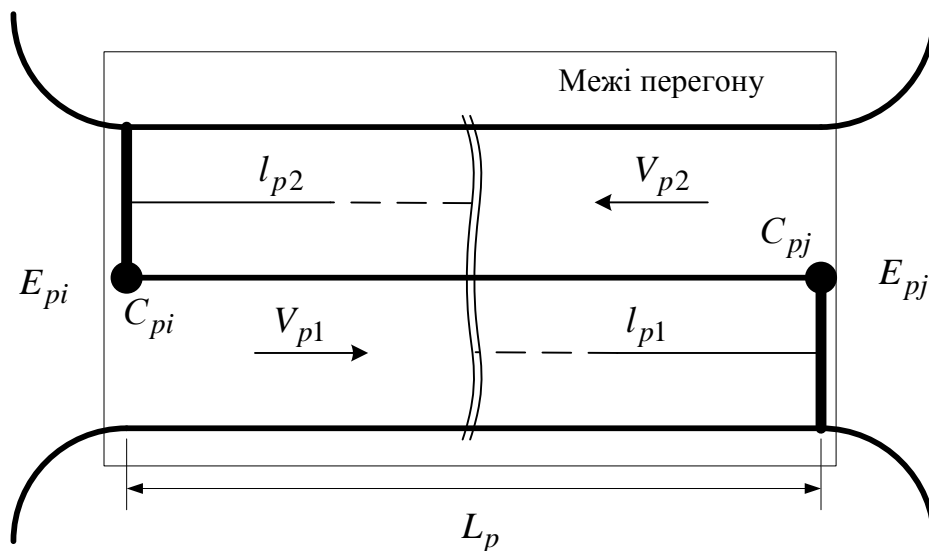


Рисунок 2.15 – Модель перегону

Складовими моделі перегону є:

- $l_{p1}$  – кількість полос руху у напрямку  $C_{pi} - C_{pj}$ ;
- $l_{p2}$  – кількість полос руху у напрямку  $C_{pj} - C_{pi}$ ;
- $V_{p1}$  – розрахункова швидкість у напрямку  $C_{pi} - C_{pj}$ ;
- $V_{p2}$  – розрахункова швидкість у напрямку  $C_{pj} - C_{pi}$ ;
- $V_{b,p1}$  – базова еталонна швидкість у напрямку  $C_{pi} - C_{pj}$ ;
- $V_{b,p2}$  – базова еталонна швидкість у напрямку  $C_{pj} - C_{pi}$ ;
- $L_{p1}$  – довжина  $p$ -го перегону;
- $\alpha_p$  – коефіцієнт кривизни перегону;

–  $p$  – номер перегону у моделі.

Тоді  $L_{EWi}$ ,  $L_{NSi}$  – довжина перехресть в горизонтальному (захід-схід) і вертикальному (північ-південь) напрямку відповідно (м), та застосовується для визначення часу проїзду перехрестя транспортним засобом.

Вихідні дані для ГІМ контуру:

–  $m$  – загальна кількість перегонів в даній ділянці транспортної мережі;

–  $C_{r1}$ ,  $C_{r2}$  – номери перехресть, між якими є перегін,  $r=1, \dots, m$ . У постановці завдання вважається, що перегін з'єднує строго два перехрестя. Це необхідно для відображення того факту, що між перехрестями або існує, або відсутній перегін, тоді як ця ознака має вплив на подальші розрахунки параметрів управління.

–  $E_{r1}$ ,  $E_{r2}$  – номери в'їздів на перехрестя (1 – захід, 2 – північ, 3 – схід, 4 – південь) для орієнтації перехрестя на площині.

–  $l_{r1}$ ,  $l_{r2}$  – кількість смуг у напрямку  $C_{r1}-C_{r2}$  и  $C_{r2}-C_{r1}$  (для випадків, коли на перегоні організовано односторонній рух, одне значення буде дорівнювати 0).

–  $\alpha_r$  – коефіцієнт кривизни перегону. Базова довжина перегону визначається як квадратний корінь з суми квадратів різниць координат перехресть, проте дана величина не може вважатися достовірною, оскільки перегони не являють собою ідеальний відрізок між точками. Коефіцієнт кривизни збільшує розрахункову довжину перегону  $i$ , за умовою задачі, не може бути менше 1.

Матриці інтенсивності на перехрестях мають вигляд:

$$N_k = \begin{bmatrix} N_{k11} & N_{k12} & N_{k13} & N_{k14} \\ N_{k21} & N_{k22} & N_{k23} & N_{k24} \\ N_{k31} & N_{k32} & N_{k33} & N_{k34} \\ N_{k41} & N_{k42} & N_{k43} & N_{k44} \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

де  $k$  – номер перехрестя,  $k=1, \dots, n$ ;

$N_{kij}$  – інтенсивність потоку, що рухається на  $k$ -му перехресті від в'їзду  $i$  до виїзду  $j$ ,  $i, j = 1, \dots, 4$ .

Номери в'їздів і виїздів відповідають індексам примикання перегонів до перехрестя  $r_1, \dots, r_4$  (рис. 2.14). При чому якщо 1 – захід, 2 – північ, 3 – схід, 4 – південь, діагональні елементи відповідають інтенсивності потоку на розвороті ( $N_{11}$  – із заходу на південь). Якщо, згідно з ОДР або за топологією перехрестя на одному з напрямків рух заборонено або він відсутній (Т-подібне перехрестя, односторонній перегін), відповідний елемент дорівнює 0. Позначено через  $V_{r1}$ ,  $V_{r2}$  (км/год) задані швидкості на даному перегоні, при цьому ураховано існуюче обмеження швидкості ТЗ, а значення швидкості для прямого і зворотного напрямку можуть відрізнятися, тому в розробленій методиці присутні дві рекомендовані швидкості для кожного перегону (винятком є такі випадки, коли смуг руху в одному з напрямків немає, тобто на перегоні організовано односторонній рух).

Наданий опис перегонів, пов'язаних з даними перехрестям, буде мати вигляд

$$r_i(k) = \left. \begin{array}{l} \exists [(C_{r1} = k) \wedge (E_{r1} = i) \vee (C_{r2} = k) \wedge (E_{r2} = i)] \Rightarrow r \\ 0 \end{array} \right\}, r = 1..m . \quad (2.7)$$

Саме номер перегону  $r_i(k)$  в напрямку  $i$  для перехрестя  $k$  відповідає або вхідним або вихідним потокам цього напрямку.

Далі визначаємо параметри, що надають геометричні розміри перехрестя, а саме його довжину і ширину (рис. 2.14):

- $L_{EWi}$  – розмір  $i$ -го перехрестя у горизонтальному (схід-захід) напрямку;
- $L_{NSi}$  – розмір  $i$ -го перехрестя у вертикальному (північ-південь) напрямку.

Прив'язка перегонів до перехресть проводиться шляхом їх індексації - через номер перехрестя та індекс напрямку примикання перегону до перехрестя, що розглядається:

–  $C_{pi}$ ,  $C_{pj}$  – номери перехресть, між якими є перегін,  $p = 1, \dots, m$ ;

–  $E_{pi}$ ,  $E_{pj}$  – номери в'їздів на перехрестя, відповідають індексам примикання перегонів до перехрестя (1, ..., 4);

$m$  – кількість перегонів на досліджуваній ВДМ міста.

Розроблена ГІМ ВДМ міста призначена для відтворення схеми ВДМ та параметрів ДР по транспортній мережі з метою надання ОПР наявної інформації стосовно руху ТП на прямолінійних перегонах. Фрагмент розробленої моделі за наданим описом для транспортної мережі центральної частини м. Харків, наведено на рис. 2.16.

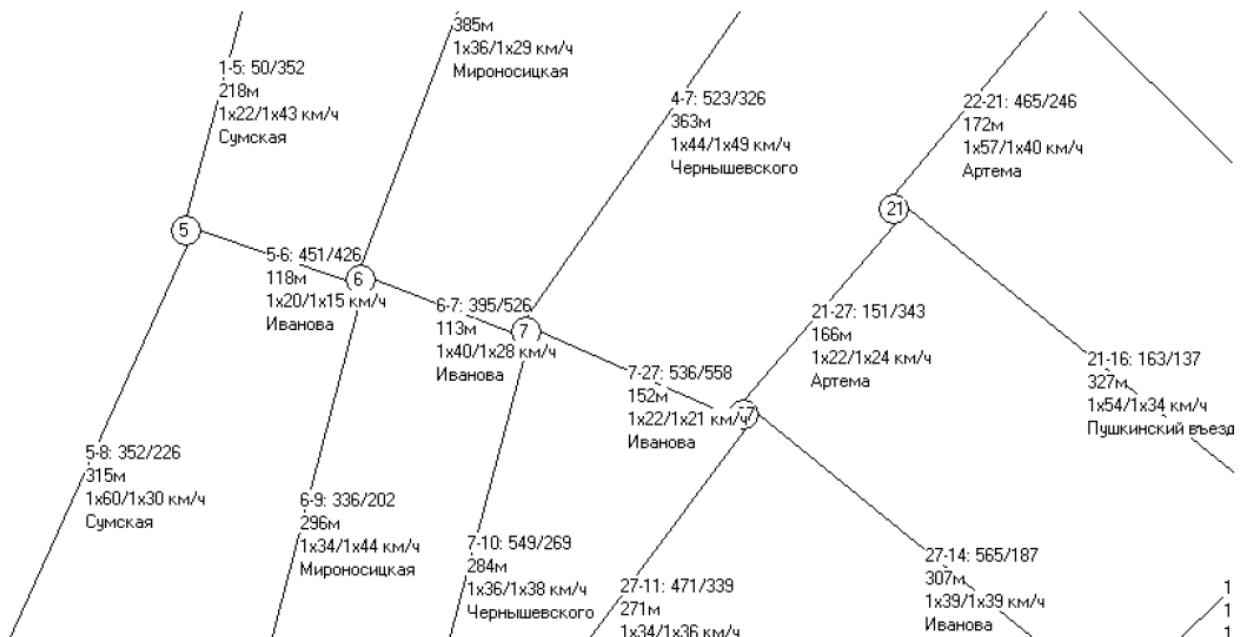


Рисунок 2.16 – Геоінформаційна модель частини ВДМ м. Харків

Таким чином, розроблено геоінформаційну модель контуру ВДМ для управління транспортними потоками [31], яка є первинним елементом визначення параметрів ДР на ВДМ міста для ЦУДР.

Наявність принципової моделі ВДМ, що містить дані інтенсивності ТП та геометричні параметри перегонів ВДМ, надає первинну інформацію стосовно стану ДР на мережі. Але для рівня прийняття рішень необхідна додаткова інформація динаміки зміни параметрів ТП в залежності від дорожніх умов у поточному часі. На підставі розробленої ГІМ при подальших дослідженнях було розроблено географічну інформаційну систему (ГІС) міста для центра управління ДР. Практика застосування таких систем відома у світі [194]. Для цього була вирішена задача калі бровки ГІМ міста. Для позначення кожної дуги моделі ВДМ було обрано універсальну модель параметрів ТП, яка містить основну інформацію взаємодії параметрів, а саме фундаментальну діаграму (ФД) транспортного потоку для перегонів ВДМ [103]. Але теоретична ФД не дозволяє вирішувати практичні задачі управління ДР у містах, бо положення трифазної теорії ТП не можуть бути пропорційними із результатами емпіричних даних та наслідків їх взаємодії [195] у реальних умовах руху. Це пов'язано з тим, що емпіричні дані, отримані шляхом вимірювання на ВДМ, підлягають ретельному аналізу для обґрунтування теорій транспортного потоку та їх застосування, що наразі не завжди можливо. Тому було проведено модифікацію форми ФД із наступних припущень.

Досліджено, що основні властивості переходу від вільного до щільного стану ТП, згідно [143], полягають у наступному:

- перехід до щільного ТП є переходом  $F-S$  (free flow - synchronized flow), від вільного через синхронізований стан до стислого;
- перехід  $F-S$  може бути як спонтанним так і викликаним зовнішнім обуренням близько одного і того ж місця на дорозі – «вузького місця».

Тому, згідно з [196] існуючі моделі щільного потоку можна розділити на два класи:

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



2. Моделі типу «Дженерал Моторс» (ДМ), в якій перехід до щільного потоку пов'язаний з невизначеністю модельних рішень близько критичної щільності ТП. Детальний огляд цього класу моделей наведено в [197].

Порівняльний аналіз моделей довів, що моделі LWR-типу не дозволяють дослідити зміну параметрів щільного потоку (права сторона діаграми), тоді як моделі ДМ-класу надають можливість визначити параметри руху ТП при підвищеній щільності з урахуванням невизначеності його параметрів [198] (ліва сторона діаграми).

Тому можливо припустити, що аналітична залежність фундаментальної діаграми не є безперервною і має складну структуру з двох гілок, і як наслідок цього, форма фундаментальної діаграми може мати декілька форм уявлення – трапецієвидну, трикутну, складну (нелінійну справа) і розірвану справа в точках, де змінюється рівень завантаження дороги та відбуваються скачки зміни щільності ТП [139].

Відомо [199], що дані вимірювань в лівій частині фундаментальної діаграми (в зоні вільного руху) можуть бути апроксимовані прямою лінією, в той час як дані в правій частині фундаментальної діаграми (в зоні ускладненого руху) мають значний розкид та невизначеність. Цей розкид залежить від розбіжностей значень інтенсивності і швидкості ТП, що створює відповідну невизначеність фундаментальної діаграми в правій частині.

При виборі форми фундаментальної діаграми було ураховано існуючий досвід у дослідженнях фундаментальної діаграми [200] для застосування в управлінні дорожнім рухом. Основними параметрами побудови фундаментальної діаграми було обрано швидкість вільного руху ( $V$ ), максимальну щільність ТП ( $q_{\max}$ ), критичну щільність ТП ( $q_{\text{кр}}$ ) та максимальну інтенсивність ( $N_{\max}$ ). Такий підхід до моделювання надає опис ТП, коли він рухається в вільному режимі, швидкість і інтенсивність прагнуть до максимуму і визначають точку  $B$ , отже ліву частину діаграми формалізували рівнянням та надали опис відрізка прямої, що відповідає лівій частині фундаментальної діаграми ТП (рис. 2.17).

$$V = \frac{N_{\max}}{q_{\text{кр}}} . \quad (2.8)$$

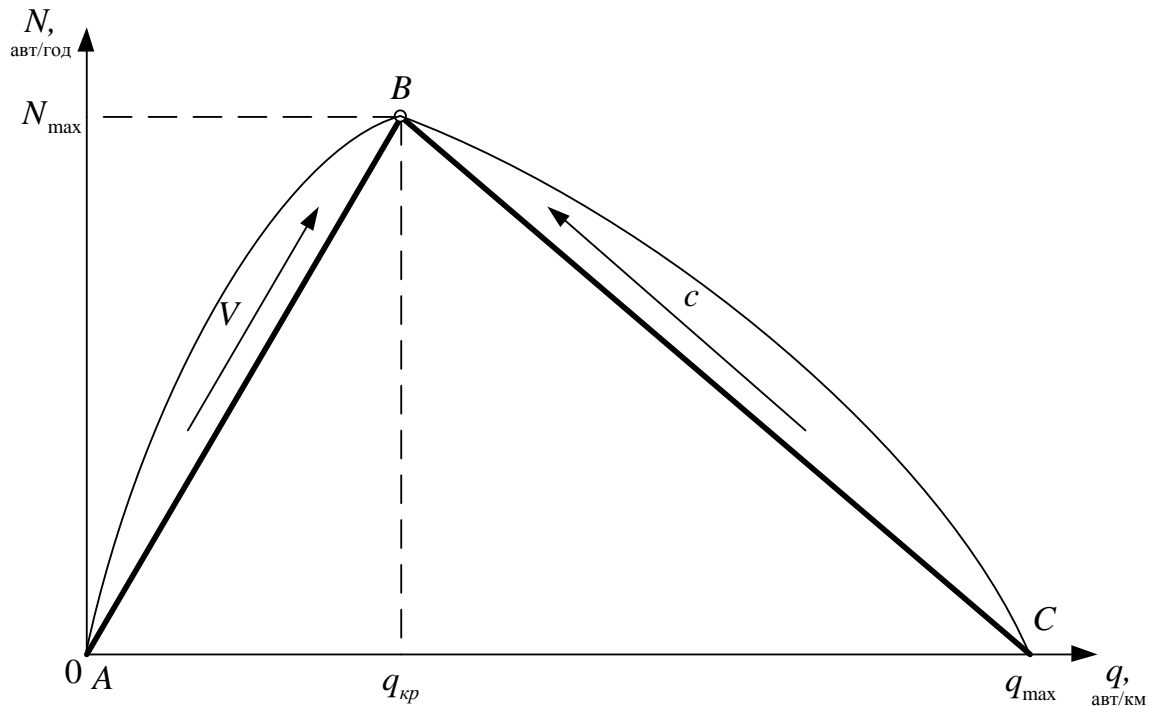


Рисунок 2.17 – Модифікація фундаментальної діаграми ТП

Точка  $C (q_{\max}, 0)$  відповідає максимальній щільності потоку при тому, що інтенсивність і швидкість рівні 0. Тоді праву частину діаграми на яку впливає «ударна хвиля», що виникає при максимальній щільності ТП, було побудовано на підставі залежності

$$c = \frac{N_{\max}}{(q_{\max} - q_{\text{кр}})} , \quad (2.9)$$

де  $c$  – швидкість ударної хвилі, м/с;

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

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

$$V \cdot q_{кр} = c \cdot (q_{max} - q_{кр}) \cdot \quad (2.10)$$

Тоді, для побудови ФД на підставі нормативних та емпіричних даних, отриманих шляхом виміру на ділянках ВДМ необхідно розрахувати наступні параметри:

- швидкість поширення «ударних хвиль», які виникають назустріч руху ТП;
- максимальна щільність ТП (бампер до бампера);
- критична щільність ТП при максимальній інтенсивності ТП.

Методика визначення параметрів побудови фундаментальної діаграми для практичного застосування була розроблена та надала адекватні результати при тестуванні на перегонах ВДМ м. Харків [45].

Наявність сформованих баз даних для елементів транспортної мережі дозволяє калібрувати модель транспортної мережі шляхом визначення параметрів ТП для побудови фундаментальної діаграми у якості ваги ребер графу геоінформаційної моделі (ГІМ). Ця кропітка та складна робота дозволяє отримати оцінку динаміки зміни стану ДР при порівнянні модельного значення інтенсивності ТП із параметрами виміру інтенсивності у реальному часі. Порівняння поточної інтенсивності та визначеної за діаграмою ТП на ГІС надає ОПР необхідну інформацію для прийняття рішень та реалізації параметричного контролю.

На підставі того, що основою оперативного управління є контроль параметрів ТП з подальшим їх аналізом для визначення методів управління, які надають можливість змінювати інтенсивність ТП на елементах ВДМ. До них відносяться методи:

- зменшення щільності ТП на магістралях міста в пікові години;
- надання інформації для водіїв при виборі маршруту руху, а саме попередження про перешкоди на маршруті прямування, а також можливі шляхи об'їзду заторових ділянок руху;

- регулювання параметрів вхідних потоків на завантажених магістралях міста;
- динамічне управління швидкістю руху ТП для забезпечення працездатності ВДМ шляхом попередження виникнення заторових режимів руху;
- координація роботи світлофорних пристроїв на контурах для забезпечення рівномірного руху ТП.

## 2.5 Висновки за розділом 2

Розроблено концепцію проектування гібридного управління, що надає можливість зберігати, шукати, виконувати аналітичні розрахунки на підставі формалізації знань у поєднанні із традиційним підходом до процесу управління ДР, який містить дискретні та безперервні елементи на підставі методів теорії управління – робастного, адаптивного та інтелектуального.

Розроблено ромбовидну архітектуру ієрархічної системи управління дорожнім рухом, що дозволяє розподілити не тільки методи управління за цілями, а й відокремити інформаційні та технологічні параметри за алгоритмами управління при наявності двох центрів управління – технічного центру та органу прийняття рішень. Існуючий зв'язок між ними дозволяє вирішувати завдання синтезу та аналізу динамічних контурів управління у поєднанні із статичними розрахунками керуючих впливів на дорожній рух.

Обґрунтована доцільність проектування гібридної інтелектуальної системи, яка у порівнянні із екстраполяцією концепцій існуючих систем є більш ефективною для процесу управління дорожнім рухом у містах. Запропоновано принципову схему гібридної системи управління дорожнім рухом із застосуванням робастного адаптивного регулятора з інтелектом для поєднання означених типів управління, що забезпечує оптимальне досягнення мети за принципом дії системи автоматичного цілеуказання. Такий підхід до проектування обумовлює інтелектуальне управління ДР.

Розроблено структуру інтелектуальних агентів, як елементів програмного забезпечення гібридної системи управління дорожнім рухом, де функції агентів відображені у вигляді абстрактного математичного опису в межах наданої архітектури. Це надає підґрунтя для проектування алгоритмів управління та спеціального програмного забезпечення для вирішення задач управління на визначених рівнях.

Визначено задачі та функції СППР як складової інформаційного забезпечення ІСУ, які полягають у реалізації параметричного та ситуаційного контролю ДР. Для цього розроблена геоінформаційна модель частини ВДМ м. Харків у програмному середовищі Delphi 7.0 та глобальної системи позиціонування GPS. Для калібровки моделі розроблено моделі ТП у вигляді діаграм ТП із урахуванням нормативних даних проектування, параметрів ділянок ВДМ та емпіричних даних інтенсивності ТП. Порівняння модельних значень із поточними складає основу оперативної інформації для ОПР у процесі прийняття рішень.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [13, 25, 32, 34, 44, 45, 47, 58, 64, 65].

## РОЗДІЛ 3

### СТРАТЕГІЯ РОЗПОДІЛЕННЯ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ДОРОЖНІМ РУХОМ У МІСТАХ

#### 3.1 Принципи формування та задачі СУДР

Стратегія розробки гібридного управління ДР у містах передбачає визначення плану дій за впровадженням заходів управління для досягнення складної мети, яка корегується у залежності від зміни умов руху на різних рівнях управління.

Головна мета розробки СУДР, як було визначено, полягає у забезпеченні працездатності ВДМ міста. Відомі результати аналізу існуючих досліджень функціонування ІСУ ДР [171] у містах доводять, що впровадження декількох типів методологій управління ДР впливають на отримання результатів для різних рівнів управління. Саме тому визначення цілей управління для досягнення головної мети полягає в основі виявлення нових підходів до управління ДР. Розроблена стратегія управління ДР у містах передбачає розв'язання сформованих задач:

1) Визначення ефективності функціонування транспортної мережі міста. Задача є складною при існуванні зустрічних протилежних критеріїв ефективності, саме тому що оптимальні показники для транспортної системи відрізняються від оптимальних вимог її користувачів. Враховуючи вимоги щодо розрахунку критерію ефективності СУДР у вигляді кількісного показника, визначено, що якість дорожнього руху та ефективність ВДМ треба визначати показником завантаження дороги, який поєднує параметри ТП та ВДМ:

$$z = N/P, \quad (3.1)$$

де  $N$  – інтенсивність ТП;

$P$  – пропускна спроможність ВДМ.

Визначення обраного показника ефективності дозволяє дослідити та оцінити стан ДР, взаємозалежність параметрів ТП та ВДМ із урахування того, що це єдиний критерій, який має безрозмірне походження та змінюється у діапазоні  $[0, 1]$ .

Суттєвий вплив взаємозв'язку інтенсивності та пропускної спроможності, який визначається рівнем обслуговування руху, формує ефективність функціонування ВДМ та управління ДР.

Характеристики рівнів обслуговування [140, 201], до яких належать рівень завантаження ВДМ, коефіцієнт швидкості руху ТП, коефіцієнт насичення рухом, характеристика руху потоку, стан потоку, емоційне навантаження водія, ступінь зручності роботи водія, економічна ефективність функціонування дороги наведено у Додатку А.

Результати аналізу доводять, що до ділянок автомобільної дороги, які обслуговують рух в режимі перевантаження, належать ділянки автомобільної дороги з рівнем обслуговування D, E або F, які мають максимальні значення коефіцієнту завантаження та насичення рухом, що відповідає складним умовам руху ДР. Усунути проблеми узгодження інтенсивності ТП із пропускною спроможністю ВДМ пропонуємо заходами зменшення інтенсивності на складних ділянках ВДМ. Такий підхід формує методологію управління ДР для забезпечення працездатності ВДМ міста.

2) Утримання необхідного рівня безпеки дорожнього руху, що існує як необхідна вимога у процесі управління ДР. Але існують протиріччя взаємодії між безпекою та ефективністю дорожнього руху, яке полягає у наступному: відносно безпечний рух АТЗ має місце у транспортних потоках підвищеної щільності. Проте зменшення щільності ТП, до якої призводять заходи управління, сприяє підвищенню швидкості руху, що впливає на безпеку ДР та порушення правил дорожнього руху (ПДР).

Розробка методології організації рівномірного руху ТП на магістралях міста заходами координації керуючих впливів на швидкість руху

запропонована як дієвий засіб для отримання компромісу між безпекою та ефективністю дорожнього руху.

3) Надійність транспортної мережі. Відмовою ВДМ вважаємо втрату ВДМ властивості здійснювати свою головну функцію – забезпечення сталого руху транспорту за маршрутами, тому виникнення заторового режиму руху ТП збільшує час пересування транспорту та ускладнює визначення часу прибуття вантажів та пасажирів. Визначено, що шлях підвищення надійності ВДМ полягає у розробці методів управління міським рухом методами запобігання утворення заторових ситуацій та зміни режимів руху.

4) Забезпечення екологічної безпеки навколишнього середовища. Вирішення цієї задачі потребує визначення компромісу між вимогами користувачів (збільшення швидкості руху) та надійністю транспортної системи (відсутність заторових ситуацій на мережі). Саме спрямованість управління на досягнення стану рівномірного руху транспорту у сталому режимі передбачає зменшення обсягів шкідливих речовин у середовище за рахунок усунення таких режимів руху АТЗ як сповільнення, зупинка та розгін АТЗ на ВДМ.

Фахівці в області дорожнього руху розрізняють теоретичну і практичну пропускну спроможність вулиць і доріг: максимальну теоретичну, яка можлива на еталонній ділянці дороги і другий тип – практичну, яка формується в конкретних дорожніх умовах, відмінних від еталонних [144].

Теоретичну пропускну спроможність визначають розрахунковим методом для горизонтальної ділянки дороги, вважаючи постійними інтервали між автомобілями з однорідним складом транспортного потоку (враховуються лише легкові автомобілі). У якості ідеальних умов руху приймаються наступні:

- безперервний потік транспортних засобів, вільний від побічних перешкод;
- транспортний потік однорідний;
- ширина смуги руху – 3,6 м, на відстані 1,8 м від краю проїжджої частини відсутні нерухомі предмети.



Такі умови необхідні для підтримки інтенсивності руху, яка дорівнює пропускній спроможності дороги, але зазвичай їх не можливо реалізувати, тому виникає необхідність визначати пропускну спроможність у реальних умовах методами моделювання параметрів ТП.

Для виявлення умов зміни теоретичної пропускної спроможності до реальної була розроблена принципова схема управління системи «ДУ–ТП» (рис. 3.1), яка відображає взаємозв'язки параметрів існуючих рівнів управління у процесі дорожнього руху [38]:

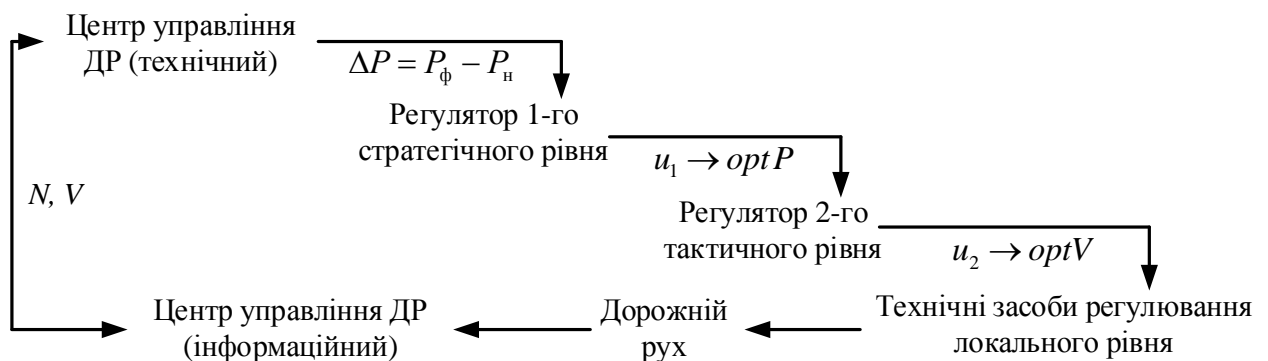


Рисунок 3.1 – Принципова схема системи ДУ-ТП

При багаторівневому управлінні, рівень стратегічного управління формується на стадії проектування СУ. Згідно з нормативними документами відомі основні планувальні параметри дорожньої мережі – це параметри транспортного потоку і транспортно-експлуатаційні характеристики дороги. До параметрів дорожніх умов належить ширина проїжджої частини ( $B_{п.ч.}$ ), що прийнята на стадії проектування, та вхідні параметри процесу обслуговування транспортного потоку з рекомендованої швидкості руху ( $V_p$ ). Це пояснює суттєвий зв'язок параметрів у підсистемі «дорожні умови – транспортний потік». При заданому попиту на користування дорогою транспортним потоком ( $N$  – інтенсивність транспортного потоку,  $V_{\phi}$  – фактична швидкість руху) і при даному рівні обслуговування ( $P_{\phi}$ ) за розробленими нормами ( $P_n, V_p$ ) визначено керуючі параметри цього рівня в регуляторі 1, як величину неузгодженості, який впливає

на процес дорожнього руху в цілому, коли поточна пропускна спроможність відрізняється від її нормативного значення:

$$\Delta P = P_{\phi} - P_H . \quad (3.2)$$

Другий рівень вирішує задачі тактичного управління, яке здійснюється на стадії процесу обслуговування автомобільного руху на підставі реалізації заходів управління дорожнього руху  $V = f(\Delta P)$ . Локальне управління транспортним потоком третього рівня здійснюється шляхом відображення керуючих впливів на транспортний потік, або у вигляді визначеної швидкості руху на перегонах, або циклом світлофорного регулювання на перехрестях:  $T_{ц} = f(N, B_{п.ч.}, V)$ .

Для забезпечення попиту на користування автомобільною дорогою транспортним потоком необхідно сформулювати керуючі впливи:  $u_1$  – для апарату обслуговування і  $u_2$  – безпосередньо для транспортного потоку. В даному випадку керуючий вплив  $u_1$  визначають як величину невідповідності нормативних параметрів ТП і фактичних, які змінюються в часі ( $t$ ).

$$u_1(t) = \int_0^t f [P_{\phi}(t), P_H(0)] dt . \quad (3.3)$$

Визначення керуючих впливів  $u_2$  безпосередньо на транспортний потік наведено залежністю:

$$u_2(t) = \int_0^t f [V_{\phi}(t), P_{\phi}(t), V_p(t)] dt . \quad (3.4)$$

При зростанні інтенсивності, поступово накопичуються негативні наслідки зміни величини неузгодженості як  $u_1$  так і  $u_2$ , які не забезпечують оптимального функціонування системи «ДУ–ТП».

У реальних умовах відбувається самокерування або регулювання ДР, що відбивається в зміні швидкості транспортного потоку і пропускної спроможності ділянки дороги. При зростанні інтенсивності руху виникає необхідність у системних заходах зміни параметрів управління дорожнім рухом для узгодження збільшеного попиту транспортного потоку з необхідною якістю обслуговування. У результаті досліджень було виявлено, що параметри управління дорожнім рухом можна розділити на групи чотирьох типів (рис. 3.2).

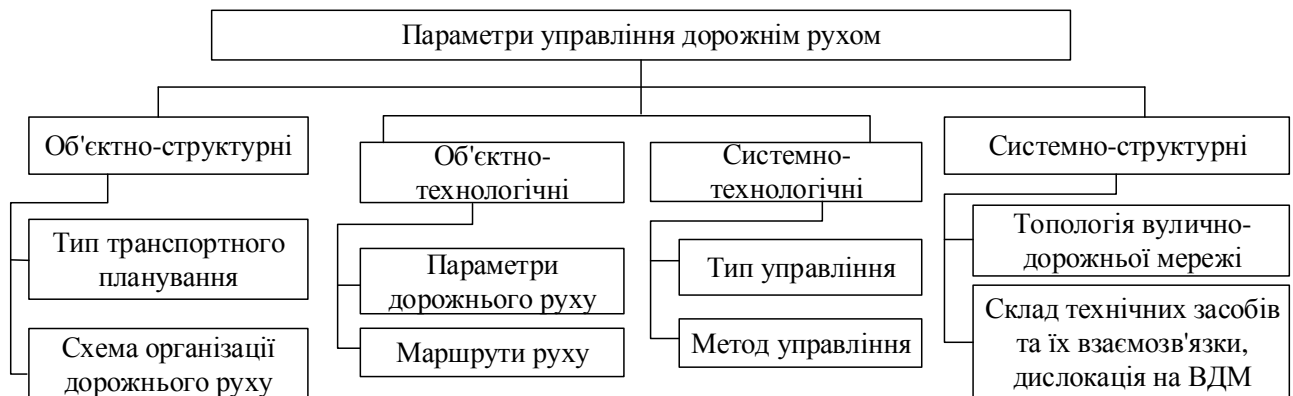


Рисунок 3.2 – Параметри управління дорожнім рухом

Наявність у складі системи управління дорожнього руху двох регуляторів відповідає вирішенню задач оптимального управління – координації керуючих впливів на мережі (регулятор 1) та адаптації їх до зміни поточних параметрів (регулятор 2). Найбільш дієвими заходами вважаємо реалізацію координації на стратегічному рівні програмним шляхом, а адаптацію – на підставі зворотного зв'язку елементами автоматичного управління тактичного рівня.

Для організації управління дорожнім рухом на підставі архітектури ієрархічних багаторівневих систем управління, доцільно застосовувати принципи багатоцільових систем оптимального управління. Такий підхід обумовлює наявність критеріїв якості управління для кожного рівня управління та для усїєї системи у цілому, що передбачає координацію дій між рівнями.

На підставі того, що головне призначення системи управління дорожнім рухом у містах – це забезпечення працездатності транспортної мережі, яка є складовою транспортної системи міста, пропонуємо визначити її транспортно-

експлуатаційні показники у якості критерію ефективності ДР на стратегічному рівні управління.

Різноманіття факторів, що впливають на проектування мережі автомобільних доріг на стратегічному рівні управління вимагає визначення закономірностей зв'язків між теоретичними вимогами до параметрів транспортної мережі міста і реальними параметрами дорожнього руху на ВДМ. Основою такого підходу є алгоритм проектування оптимальної схеми ВДМ відповідно до розподілу потоків транспортних засобів. Ефективність проектних рішень залежить від способів отримання вихідних даних і досконалості методу проектування.

З огляду на функції автомобільної дороги для оцінки ефективності того чи іншого варіанту проектного рішення, необхідно застосовувати критерії ефективності функціонування дорожнього руху, які дозволяють отримати різні оцінки розглянутих варіантів.

В даний час для оцінки ефективності функціонування транспортних мереж використовуються наступні критерії [202]:

- швидкість руху одиночних автомобілів;
- середня швидкість автомобілів і всього потоку;
- витрати часу швидкорухомими автомобілями;
- пропускна спроможність дороги і її елементів;
- коефіцієнт аварійності та безпеки руху;
- коефіцієнт завантаження дороги рухом або коефіцієнт насичення;
- психофізіологічні та естетичні параметри;
- техніко-економічні параметри;
- відношення фактичного часу в дорозі до загального часу руху при відсутності перешкод;
- показник стану потоку;
- енергетичний стан потоку;
- градієнт швидкості вільного руху;
- середньоквадратичне відхилення швидкості.

Перераховані критерії обираються і групуються в залежності від цілей оцінки ефективності функціонування транспортної мережі.

Але наведені критерії дозволяють отримати лише часткову оцінку функціонування об'єкта. У той же час, завдання оптимізації параметрів такої складної системи як транспортна мережа вимагає більш повного дослідження ефективності її функціонування.

Розроблено алгоритм оцінки ефективності ВДМ за параметром дорожньо-транспортних витрат, який є узагальненим, так як він надає оцінку ефективності ділянок всій мережі, оскільки містить основні параметри транспортного потоку і ВДМ (рис. 3.3).

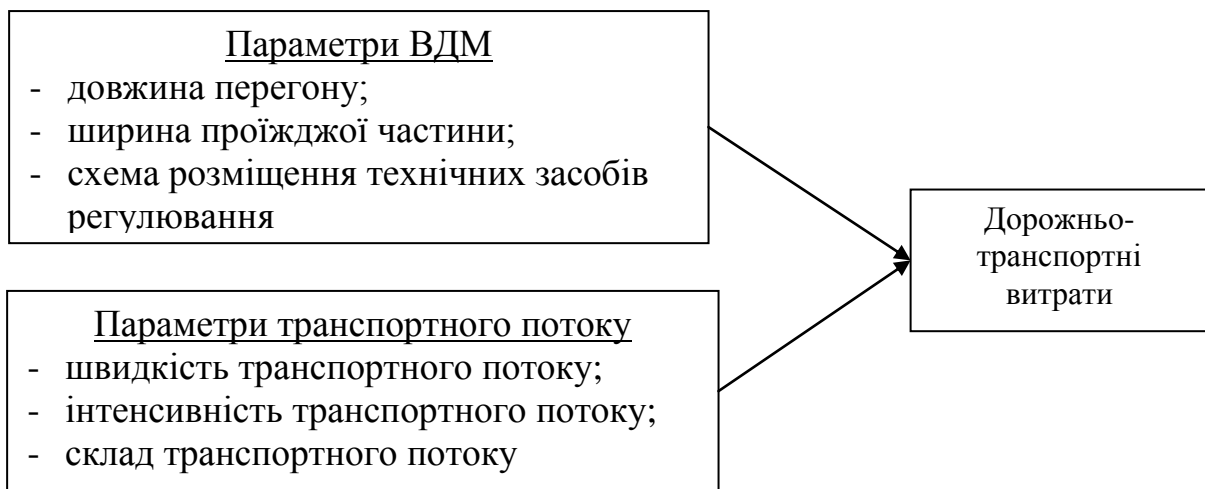


Рисунок 3.3 – Параметри, що впливають на зміну дорожньо-транспортних витрат

Для застосування дорожньо-транспортних витрат ( $E_T$ ) у якості критерію оцінки ефективності функціонування ВДМ, було сформовано умову оптимальної працездатності транспортної мережі

$$E_T = \left( \frac{D_s}{M_s} + S_T \right) \cdot M_T \rightarrow \min , \quad (3.5)$$

де  $M_S$  – сумарна кількість автомобіле-годин, витрачених на проїзд заданого перегону за розрахунковий період, з урахуванням річного приросту;

$M_T$  – сумарна кількість автомобіле-годин, витрачених автомобілями на проїзд до дорожньої мережі за розрахунковий рік;

$D_S$  – сумарні дорожні витрати на перегонах за розрахунковий період;

$S_T$  – сумарні витрати на проїзд автомобілів по перегонах.

Для розрахунку (3.5) розроблено схему визначення дорожньо-транспортних витрат для перегонів ВДМ із метою виявлення найбільш завантажених перегонів, які потребують додаткових заходів управління (Додаток Б). Для проведення експерименту досліджено стан організації дорожнього руху частини м. Харків, що обмежена вулицями Пушкінською, Сумській, площею 1-го Травня, вул. Весніна, вул. Короленка (рис. 3.4). Модель досліджуваної частини міста представлено у вигляді графа (рис. 3.5).

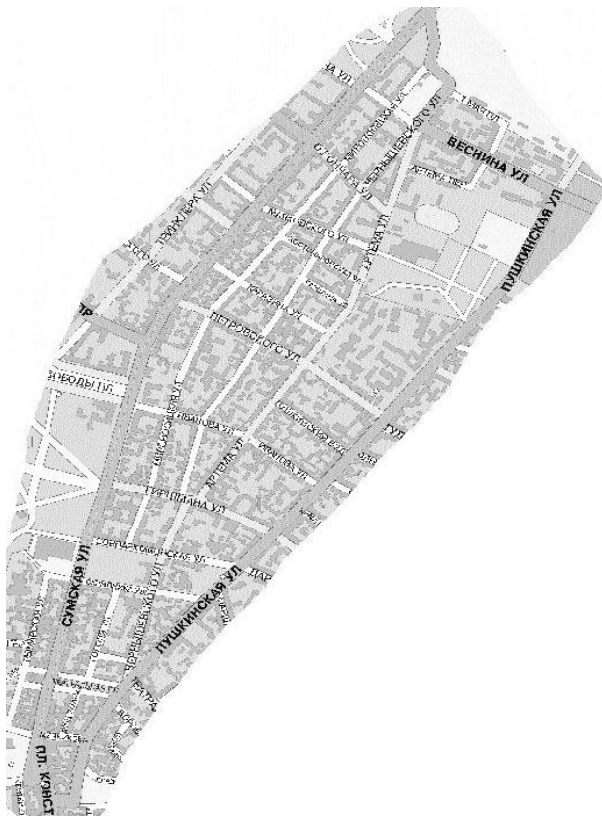


Рисунок 3.4 – Карта  
центральної частини міста Харків

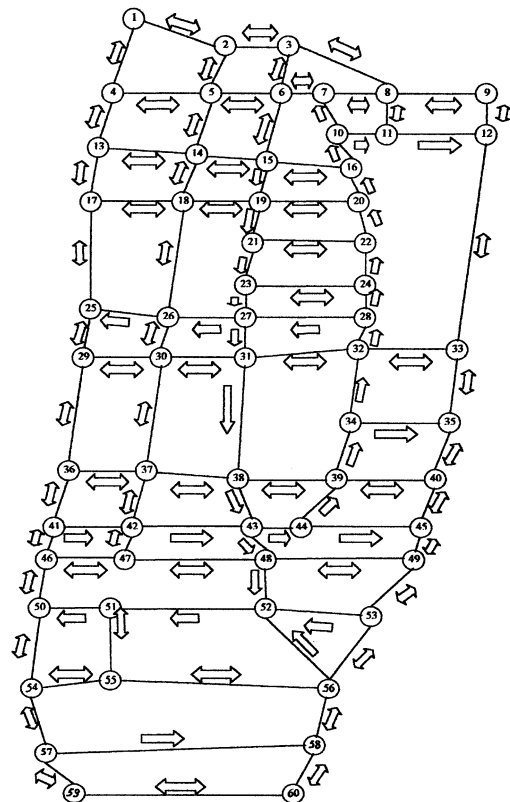


Рисунок 3.5 – Модель  
центральної частини міста Харків

Значення параметрів транспортного потоку і транспортної мережі досліджуваної частини міста було отримано шляхом натурних спостережень та визначено дорожньо-транспортні витрати на перегонах ВДМ центральної частини м. Харків при існуючій організації дорожнього руху. Результати розрахунків наведено у Додатку Б.

Було виявлено, що перегонами з найбільшими дорожньо-транспортними витратами є перегін 1-4 (6819 тис. грн.) і 12-13 (21256 тис. грн.). Це ділянки магістральних вулиць Пушкінської та Сумської, які дійсно є найбільш завантаженими і в години «пік» мають ознаки ускладненого режиму руху. Отриманий результат підтверджує дієвість та коректність методу визначення ефективності ДР на стратегічному рівні.

У процесі формування задач управління для досягнення мети було визначено нові підходи до розподіленого управління ДР.

### 3.2 Формалізація методів управління ДР

Принципи реалізації розподіленого управління ДР полягають у розробці методів координації руху ТП на магістралях міста, адаптивного управління для урахування нерівномірності параметрів ТП, розробки заходів управління для запобігання заторових ситуацій на дорозі та формування випереджаючого управління на підставі визначення прогнозу зміни параметрів у часі.

Тому проведено формалізацію адаптивного управління ДР та випереджаючого, які є найбільш дієвими та ефективними при управлінні ДР на ВДМ. Розглянемо принцип формування адаптивних систем управління.

Ефект пристосування до умов функціонування в адаптивних системах забезпечується за рахунок накопичення та обробки інформації про поведінку транспортного потоку. Це дозволяє істотно знизити вплив невизначеності на якість управління, компенсуючи недолік апріорної інформації на етапі проектування систем управління дорожнім рухом.

Чисельні огляди з теорії адаптивних систем мають різноманітні варіанти класифікації. Будемо дотримуватися класифікації, наведеної в огляді [203]. Адаптивні системи розділяються на два великі класи: такі, що самоорганізуються та такі, що самостійно налаштовуються. У самоорганізованих системах відбувається формування алгоритму управління в умовах зміни структури і параметрів об'єкта управління. При цьому важко визначити єдину структуру алгоритму управління, який може забезпечити досягнення мети управління.

Але при управлінні дорожнім рухом структура об'єкта управління відома і незмінна, а поведінка його залежить від ряду невідомих параметрів. Такі завдання вирішуються в класі самостійно налаштованих систем (СНС), в яких задана структура регулятора і потрібно визначити алгоритм налаштування, а саме – алгоритм адаптації. Саме до таких систем належить дорожній рух. З урахуванням цих особливостей надамо опис задачі синтезу адаптивної системи управління дорожнім рухом (рис. 3.6).

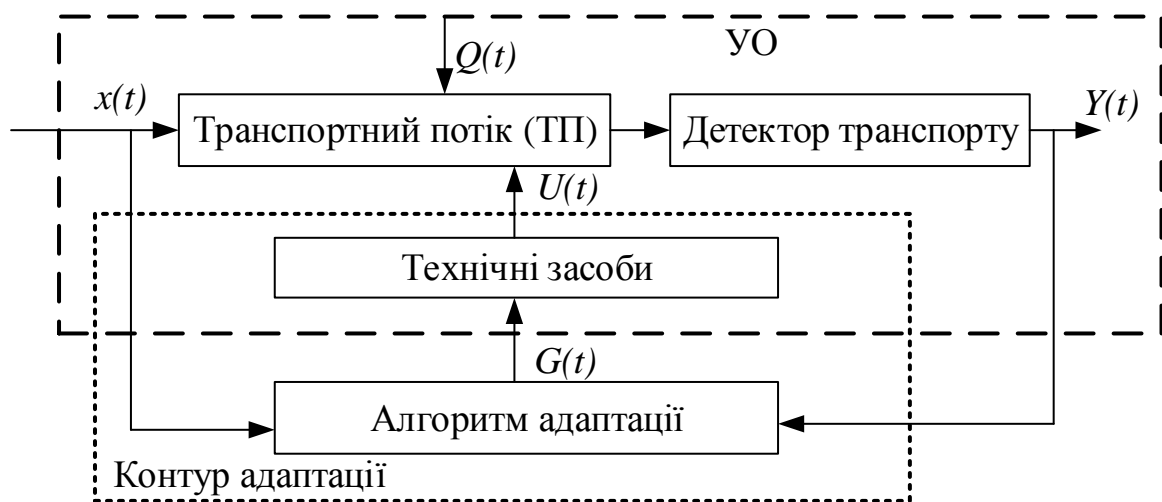


Рисунок 3.6 – Структурна схема адаптивної системи управління дорожнім рухом

Нехай на об'єкт управління (ОУ) впливають вимірювані обурення  $x(t)$ , невимірювані обурення  $Q(t)$  та управляючі впливи  $U(t)$ .



Спостереженням доступні вихідні змінні об'єкта управління  $Y(t)$ . При цьому припускаємо, що поведінка об'єкту залежить від ряду невідомих параметрів, сукупність яких позначають через  $G(t)$ . Задана мета управління ДР впливає на параметри ТП. У процесі управління дорожнім рухом необхідно забезпечити рух транспортного потоку в сталому режимі, що сприяє скороченню часу проїзду по мережі, підвищенню екологічної безпеки у містах та зменшенню транспортних затримок при русі.

Для вирішення завдання управління в умовах невизначеності, що пов'язана з наявністю  $G(t)$  було розроблено алгоритм адаптивного управління, що має дворівневу структуру. Адаптивні системи управління відрізняються від традиційних (неадаптивних) систем управління додатковим контуром адаптації. Тоді для формалізації задачі адаптації застосували поняття «Узагальнений об'єкт управління» (УО), який містить незмінну частину системи управління ДР.

При цьому параметри адаптивної системи управління – вхідні  $X(t)$ , вихідні змінні  $Y(t)$  та керуючий вплив  $U(t)$  описуються наступним чином:

$$x(t) = F_1(N, V, K_c, l, T_{cp}); \quad (3.6)$$

$$Y(t) = F_2(P, T_{ц}, V); \quad (3.7)$$

$$U(t) = F_3(T_{ц}, V), \quad (3.8)$$

де  $P$  – пропускна спроможність вулично-дорожньої мережі (авт / год),

$l$  – довжина перегонів (м),

$T_{cp}$  – наявність технічних засобів регулювання (1 або 0),

$N$  – інтенсивність транспортного потоку (авт / год),

$V$  – швидкість транспортного потоку (км / год),

$K_c$  – склад транспортного потоку,

$T_{ц}$  – цикл світлофорного регулювання (с),

$F_1, F_2, F_3$  – невідомі функції.

У загальному випадку мета управління задається у вигляді цільової функції  $P_{\text{ВДМ}} \rightarrow \text{opt}$ , що відповідає максимальному узгодженню між інтенсивністю ТП та пропускнуою спроможністю ВДМ:  $N_{\text{ТП}} \leq P_{\text{ВДМ}}$ .

У якості регулятора адаптивної системи управління дорожнім рухом застосовуємо пристрій місцевого управління – дорожній контролер, який спрямовує керуючий вплив на ТП через такі технічні засоби регулювання, як світлофорні пристрої та керовані дорожні знаки.

Вектор невідомих параметрів  $\bar{G}$  складається з параметрів світлофорного циклу, що входять у математичний опис об'єкта управління і відповідають оптимальному налаштуванню світлофорного регулювання

$$\bar{G} = (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5), \quad (3.9)$$

де  $q_1$  – тривалість основної фази циклу регулювання (с);

$q_2$  – тривалість забороняючої фази циклу регулювання (с);

$q_3$  – тривалість проміжних тактів циклу регулювання (с);

$q_4$  – частка ефективного часу світлофорного циклу;

$q_5$  – послідовність фаз світлофорного регулювання.

Вхідними параметрами УО можуть бути настроювані параметри регулятора  $G(t)$  і входи об'єкта управління  $x(t)$ , тобто  $G(t) = x(t)$ , якщо основний контур управління відсутній.

В рамках наведеної схеми (рис. 3.6) було розглянуто нестационарні об'єкти управління (транспортні потоки), в яких вектор-функція  $\bar{G}$  вважається квазістационарною, тому що вона змінюється значно повільніше інших динамічних процесів, що протікають у системі [153]. Тому вектор  $\bar{G}$  «відстежує» дрейф значень інтенсивності, пристосовуючись до умов руху транспортного потоку, що змінюються, для досягнення поставленої мети

управління – забезпечення оптимальної пропускної спроможності ВДМ шляхом організації рівномірної швидкості потоку по вулично-дорожній мережі.

При такій постановці завдання адаптивного управління слід синтезувати алгоритм управління, що використовує вимірювані або обчислювані на основі вимірів величини, які не залежать від  $q \in G$  і забезпечує для кожного  $q \in G$  досягнення заданої цільової функції.

Таким чином наданий опис задачі управління в умовах невизначеності, що пов'язана із  $q \in G$ . При цьому завдання може вирішуватися поетапно:

- ідентифікація вектора  $\bar{G}$ ,
- визначення алгоритму управління, що вимагає якості функціонування СУДР одним з традиційних методів.

Зміна параметрів ОУ передбачає наявність прогнозування цієї зміни, тому управління за прогнозом параметрів об'єкту управління належить до випереджаючого управління – одного з різновидів типів управління ДР. До переваг випереджаючого управління (УУ) складними системами належать визначені особливості. УУ формується на базі інтелектуального комплексу технічних та програмних заходів та є формою управління, що застосовує інтелектуальні інформаційні технології. Основою УУ є сучасні методи прогнозування в режимі реального часу, які аналізують параметри ТП, прогнозують транспортні ситуації та дають підґрунтя для прийняття рішень щодо попередження транспортних ситуацій на мережі.

Але складність УУ полягає у визначенні методу прогнозування, бо необхідно ураховувати періодичність зміни параметрів та обмеження при моделюванні динаміки зміни параметрів ТП. Такий підхід визначає можливість комбінування методів для визначення гібридної моделі прогнозу [204]. Для реалізації прогностичної діяльності центру управління системою було визначено її структуру (рис. 3.7).

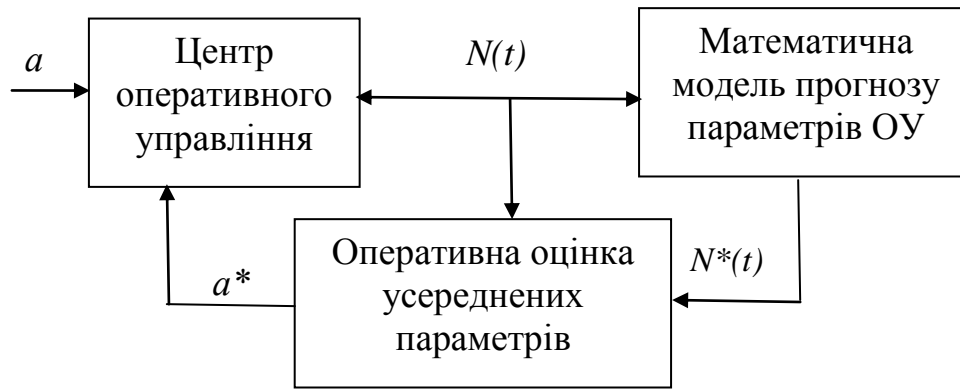


Рисунок 3.7– Структура контуру УУ дорожнім рухом

У випадках, коли змінюється вплив зовнішніх збурень, УУ призводить до самоадаптації ОУ за допомогою замкнутого контуру зворотного зв'язку на рівні адаптивного управління.

Центр інформаційного управління системи містить уставки, що до нормативних значень параметрів ОУ ( $a$ ), які система повинна утримувати для забезпечення ефективності управління та поточні значення параметрів ОУ – інтенсивність ( $N(t)$ ), які складають основу математичної моделі прогнозу  $N^*(t)$  для оперативної оцінки порівняння поточних значень та отриманих за прогнозом –  $a^*$ . При цьому значення  $N^*(t)$  мають ознаки усереднених параметрів, на які впливає методична помилка, що виникає за неточністю моделі прогнозу та змінюється в залежності від горизонту прогнозу.

Для вирішення проблеми розробки основ УУ для системи управління дорожнім рухом у містах необхідна наявність наступних складових:

- структурної моделі вулично-дорожньої мережі (ВДМ) міста у вигляді орієнтовного графа, вершинами якого є перехрестя, а ребрами - міські магістралі;
- схеми орієнтовного руху транспортних потоків по ВДМ міста із визначенням проблемних ділянок руху;
- перелік ділянок утворення перешкод руху транспорту, як регулярних, так і не регулярних;

- розроблені алгоритми управління ТП;
- існуючі обмеження на параметри руху (швидкість, інтенсивність, склад транспортного потоку) та напрями руху по ВДМ;
- розроблений критерій ефективності дорожнього руху та працездатності транспортної мережі міста.

У процесі аналізу означених складових було визначено особливості випереджаючого управління:

- в алгоритмі управління дорожнім рухом необхідно застосовувати швидкі комп'ютерні моделі, які можливо реалізувати у режимі реального часу;
- моделі дорожнього руху для кожного рівня управління повинні з достатньою точністю мати його опис та можливість відокремлювати нестандартні ситуації, що виникають у часі та просторі;
- мати єдиний критерій якості функціонування всієї системи управління із урахуванням критеріїв ефективності кожного рівня.

Випереджаюче управління має переваги, які полягають у наступному:

- вихідні параметри дорожнього руху мають фіксовані значення, що збігається із твердженням що до нормативних параметрів функціонування ділянок ВДМ міста. Тому можливо отримати інформацію не тільки що до кінцевих значень параметрів, а й дослідити процес досягнення саме цих значень.
- у процесі управління можливо досягти компромісу між реальною керуючою дією та майбутніми діями.

У деяких випадках оптимальний керуючий вплив на дорожній рух при локальному або зональному керуванні може зменшити ефективність під час управління, але дозволить досягти більшого ефекту у майбутньому для усієї транспортної системи у цілому.

При формалізації УУ було визначено декілька етапів управління.

Перший етап формується на визначенні майбутніх параметрів транспортного потоку та визначенні горизонту прогнозу, в залежності від типу задач управління у системі. Прогноз базується на поточних параметрах ТП

$(x(k))$  із урахуванням обурюючих впливів  $(d(k))$  – як відомих, так і неочікуваних. Так, зміна умов руху ТП та наявність світлофорного регулювання – очікуване збурення, а виникнення дорожньо-транспортної пригоди (ДТП) є неочікуваним. Усе це впливає на формування керуючих впливів на ТП  $(u(k))$ .

Тоді сутність процедури прогнозу у дискретні моменти часу можливо навести залежністю

$$x(k+1) = f(x(k), u(k), d(k)) , \quad (3.10)$$

де  $k$  – момент часу.

На другому етапі виконується оцінка ефективності  $Q(t)$  на підставі цільової функції, що була визначена раніше, із урахуванням прогнозних параметрів стану ТП  $(x^*(k))$  та параметрів управління

$$Q(t) = f(x^*(k), u(k)) . \quad (3.11)$$

Метою процедури оптимізації, що виконується на третьому етапі, є визначення такого керуючого впливу  $(u^*(k))$ , який оптимізує  $Q(t)$  для поточного стану  $(x(k))$  та збурень  $(d(k))$ .

На цьому етапі формується алгоритм оптимізації, методи та структура якого залежать від процесу моделювання та горизонту прогнозу  $(l)$

$$Q(t) \rightarrow opt \quad (3.12)$$

$$\text{при } u^*(k) = [u(k), u(k+1), \dots, u(k+l)] \quad \cdot$$

На четвертому етапі необхідно отримати набір керуючих впливів для системи управління дорожнім рухом для прогнозних значень  $N^*(t)$ , які перераховуються за рекурсивним алгоритмом схеми УУ (рис. 3.7).

Умова реалізації алгоритму УУ полягає у визначенні інтервалу виміру параметрів ТП детекторами транспорту, який повинен бути меншим за горизонт прогнозу.

Відповідно до першого етапу УУ досліджено методи прогнозування параметрів ТП для визначених рівнів системи управління дорожнім рухом. Відомо [205], що в залежності від способу опису тенденцій зміни поведінки об'єкта і формування параметрів об'єкта виділяють різні підходи до прогнозування (рис. 3.8).

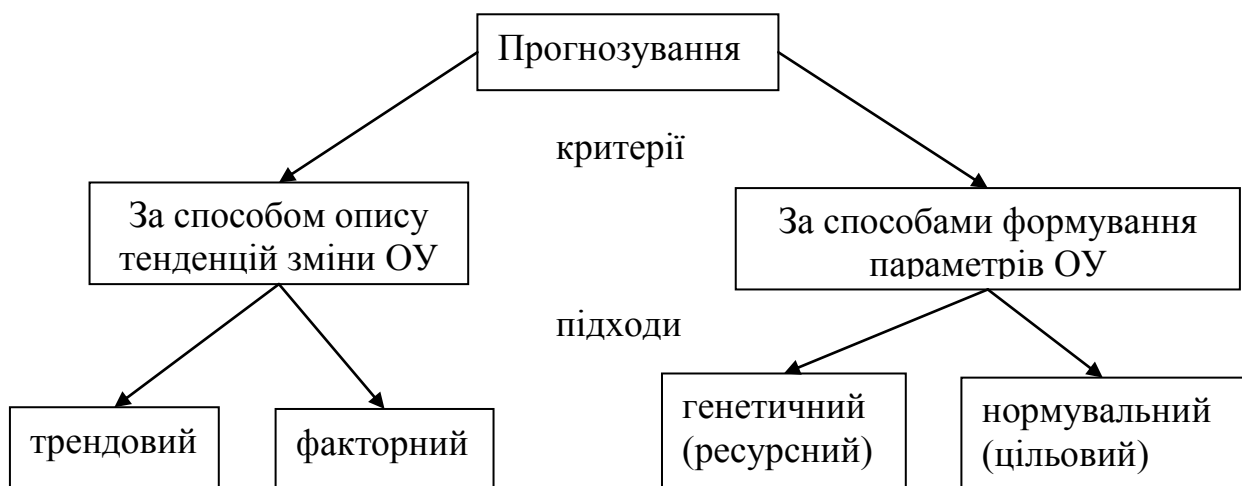


Рисунок 3.8 – Типи прогнозування

Трендовий підхід пропонує екстраполяцію значень динамічного часового ряду, тобто перенесення складних тенденцій з минулого на майбутнє розвиток. Факторний підхід ґрунтується на оцінці впливу різних чинників і їх комбінацій на розвиток майбутнього стану ОУ. Згідно горизонту прогнозу [205], види прогнозування розподіляються наступним чином (табл. 3.1).

Проведений аналіз методів прогнозування [37] дозволив виявити, що задача визначення параметрів руху транспортного потоку у конкретні моменти часу складна тому, що транспортні моделі не мають у складі параметру часу, тому вони не є прогностичними по суті, а тільки відбивають тенденції зміни параметрів.

Таблиця 3.1 – Типи та горизонти прогнозування

Період прогнозування	Опис параметрів	Підхід до прогнозування
Поточне, короткострокове	Передбачення змін в впродовж дня, тижня, місяця. Містять тільки кількісні показники	трендовий підхід
Середньострокове	Прогноз на 3-5 років. Містять як кількісні так і якісні показники	факторний підхід
Довгострокове	Основа стратегічного планування (10-20 років). Містять загальні кількісні та якісні показники	генетичний
Далекострове	Більше 20 років. Містять тільки загальні якісні характеристики	нормувальний

Тому для розв'язання задачі прогнозування зміни інтенсивності ТП, пропонуємо застосування методу апроксимації часового ряду [206]. Поняття часових рядів використовується для відокремлення завдання прогнозування, в першу чергу, від простіших завдань аналізу даних (коли немає системного надходження спостережень) і, по-друге, від аналізу просторових даних, які часто пов'язані з географічним положенням. Модель тимчасового ряду відображає ідею, що близькі значення будуть тісніше пов'язані, ніж віддалені.

Аналіз часових рядів являє собою сукупність математико-статистичних методів аналізу для виявлення структури часових рядів і для їх прогнозування. До них відносяться, зокрема, методи регресійного аналізу. Виявлення структури часового ряду необхідно для побудови математичної моделі процесу зміни інтенсивності в часі.

Суть методики прогнозування полягає в отриманні прогнозної оцінки за допомогою методів екстраполяції, які дозволяють виявити вплив закономірностей минулого розвитку до сьогодення.

Метод експоненціального згладжування обчислює значення згладженого ряду, шляхом оновлення значень, розрахованих на попередньому кроці, використовуючи інформацію з поточного кроку. Інформація з попереднього і поточного кроків обирається із різною вагою, якою можливо управляти [207]. Одинарне згладжування має вигляд



$$S_i = a \cdot x_i + (1-a)S_{i-1}, \quad (3.13)$$

де  $0 \leq a \leq 1$

Параметр  $a$  визначає відповідність між незгладженим значенням на поточному кроці та згладженим з попереднього кроку. Після рекурсивного розкриття співвідношення отримано результат наступного вигляду

$$S_i = a \cdot x_i + (1-a)S_{i-1} = a \sum_{j=0}^{i-1} (1-a)^j x_{i-j}. \quad (3.14)$$

Співвідношення (3.14) свідчить, що всі попередні значення ряду вносять вклад у процес згладження, однак їх внесок згасає експоненціально за рахунок зростання ступеня параметру  $a$ . Це і є перевагою при прогнозуванні методом часових рядів.

Коригування отриманого прогнозу виконується для уточнення отриманих результатів з урахуванням впливу сезонної зміни інтенсивності ТП.

При експоненціальному згладжуванні враховуються всі попередні спостереження з максимальною вагою, ті, що передують їм – із дещо меншою вагою, саме «старі» спостереження впливає на результат з мінімальною статистичною вагою. Але виникає складність при практичному застосуванні методу у визначенні вагових коефіцієнтів. Тому було застосовано наступний підхід до прогнозування параметрів ТП.

Обрана інтерполяційна модель у якості прогнозу дозволяє оцінити значення функціональної залежності даних у інтервалах між її вузловими точками. Для цього застосовують функції, значення яких у вузлових точках збігаються з координатами цих точок. Модель такого виду являє собою кусочно-гладку функцію. Але функції такого виду ускладнюють застосування методу часових рядів у алгоритмах управління дорожнім рухом.

Розроблено метод апроксимації даних, що дозволяє одержувати опис прогнозованої моделі інтенсивності ТП по значеннях у вузлових точках

безперервною залежністю, що є адекватним у разі комп'ютерного моделювання ТП [4]. Графік апроксимуючої функції може не проходити через вузлові точки, але наближати їх з деяким середньоквадратичним відхиленням. Отримана функція безперервна на заданому інтервалі та дає більш широкі можливості для подальших досліджень у порівнянні з інтерполяційною залежністю.

Для підвищення точності апроксимації прогнозу  $N(t)$  було застосовано поліноми високих ступенів наступного вигляду

$$N(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + \dots + a_nt^n, \quad (3.15)$$

де  $a_0, a_1, \dots, a_n$  – коефіцієнти полінома при відповідних ступенях змінної  $t$ .

Якість апроксимації оцінено спеціальним параметром – нормою відхилень Norm. Відповідно до загального запису норми прогнозного вектора  $A$

$$\text{Norm}(A, p) = \left( \sum |A|^p \right)^{\frac{1}{p}} \text{ при } 1 \leq p \leq \infty. \quad (3.16)$$

Для випадку оцінки результатів прогнозу у вигляді поліноміальної регресії отримали

$$\text{Norm}(\vec{e}, 2) = \left( \sum |e_i|^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.17)$$

де  $\vec{e}$  – вектор залишків, який визначається як  $n$  розбіжностей  $e_i = y_i - \hat{y}_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ ;

$y_i$  – величина, що спостерігається;

$\hat{y}_i$  – прогнозна величина, отримана за допомогою регресійної моделі.

Тоді оцінку апроксимації отримали у вигляді

$$\text{Norm} = \sqrt{\sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|^2} . \quad (3.18)$$

Значення норми відхилень дає статистичну оцінку середньоквадратичної похибки. Таким чином, задача пошуку найкращої поліноміальної моделі для прогнозування фактично є оптимізаційною: визначити ступінь апроксимуючого полінома за умовою не перевищення заданого значення помилки моделювання:

$$\begin{aligned} n &\rightarrow \max \\ \text{при } \text{Norm}(\vec{e}, 2) &\leq \text{Norm}_0 , \end{aligned} \quad (3.19)$$

де  $\text{Norm}_0$  – мінімальне значення помилки моделювання.

Для визначення параметрів поліноміальної чи експоненціальної тенденції частіше використовується метод найменших квадратів. При крапковому квадратичному апроксимуванні за міру відхилення полінома

$$Q_m(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m . \quad (3.20)$$

Від даної функції  $y = f(x)$  на безлічі крапок  $x_0, x_1, \dots, x_n$  приймають величину

$$S = \sum_{i=1}^n [Q_m(x_i) - f(x_i)]^2 , \quad (3.21)$$

що відповідає квадратичному відхиленню.

В процесі моделювання потрібно визначити коефіцієнти поліному  $a_0, a_1, \dots, a_m$  шляхом варіювання різними ступенями поліному так, щоб величина  $S$  була найменшою.

Визначення прогнозної моделі дозволяє швидко отримати прогноз зміни інтенсивності ТП відповідно до норми відхилень, на підставі часового ряду значень передісторії процесу, що досліджується.

Серед недоліків слід визначити негативний вплив похибки визначення коефіцієнтів апроксимуючого поліному, однак при великому обсязі вихідних даних передісторії процесу, похибка суттєво зменшується і виключаються ймовірні помилки в моделі прогнозу.

Побудова ступінчастого графіку функції  $N(t)$  на підставі визначення інтенсивності натурними методами або від детекторів транспорту дискретизує значення функції побудови апроксимуючого поліному.

Викладені теоретичні положення було застосовано для прогнозування  $N(t)$  в середовищі комп'ютерної математики (СКМ) Matlab. На підставі методів програмування в СКМ Matlab нами розроблено програмне забезпечення для автоматизованого процесу обробки вихідних даних і опису їх змін в часі [208]. Так, розроблена програма Prog1.m дозволяє оцінити адекватність виконаних замірів. Вхідними значеннями програми є годинні інтенсивності транспортних потоків, отримані шляхом натурних обстежень на ВДМ міста. Результатом роботи програми є значення математичного очікування, дисперсії і кількості необхідних замірів для досліджуваної вибірки.

Отримані вихідні значення інтенсивності ТП в певний час доби, являють собою вузлові точки, опис яких можна представити в наступному вигляді

$$R:(t;N), \quad (3.22)$$

де  $R$  – безліч значень експерименту.

Утворена множина даних  $R$  використовується в подальшому при побудові моделей зміни інтенсивності ТП у часі. Визначення коефіцієнтів апроксимуючого полінома проводиться в середовищі СКМ Matlab із застосуванням розробленої програми Prog2.m, яка дозволяє досліджувати зміну інтенсивності ТП в часі з використанням апроксимуючих поліномів до десятого

ступеня. Результатом моделювання є поліноми і відповідні їм графіки функцій, які найбільш точно описують вихідні дані за критерієм середньоквадратичного відхилення.

Потім, на підставі отриманих моделей, проводимо побудову ступінчастих графіків функцій поліномів. Для цього необхідно розрахувати значення  $N(t)$  за формулою (3.15) для кожної години в досліджуваній період часу і побудувати графік функції  $N = f(t)$  в площині  $N \times t$ . Метод експоненціального згладжування також дає можливість оцінити ступінь впливу трендового компонента на параметр прогнозу, але не відміну від методу ковзких середніх (МКС), ще і може бути використаний для короткострокових прогнозів майбутньої тенденції зміни на один період уперед. Метод комп'ютерного моделювання дає можливість наблизити теоретичні моделі до практичного прогнозування часових змін інтенсивності з великим ступенем адекватності.

Експериментальні дослідження запропонованого методу комп'ютерного моделювання зміни інтенсивності ТП було проведено на ділянці ВДМ м. Харків. Опис процесу моделювання із графіками зміни інтенсивності ТП наведено у Додатку В. Знайдено поліном функції (четвертого, п'ятого та шостого ступеня) зміни інтенсивності транспортного потоку у часі, за допомогою програмного забезпечення Prog2. Що дало змогу дискретизувати значення безупинної функції полінома і визначити значення інтенсивності транспортного потоку у визначену годину доби. Для отриманих моделей розраховано середню помилку апроксимації, за розрахованими значеннями середньої помилки апроксимації до 10 % для параметрів ТП маємо результати, які дають змогу зробити висновок, що моделі адекватні і можуть практично використовуватися. У результаті моделювання отримані регресійні зміни інтенсивності 4-го, 5-го та 6-го порядку із відповідним значенням критерію середньоквадратичного відхилення:  $\epsilon = 6,9463$ ,  $\epsilon = 6,7576$ ,  $\epsilon = 6,6205$ . Наведений результат підтверджує твердження, що моделі більш високого ступеню мають найменше відхилення, тому доцільно використовувати модель з

найменшим значенням середньої помилки апроксимації, тобто поліном функції зміни інтенсивності транспортного потоку у часі шостого ступеня.

Таким чином, для прогнозування інтенсивності ТП для вирішення завдань випереджаючого управління дорожнім рухом приймається модель 6-го ступеню.

Але на використання регресійної поліноміальної моделі існують певні обмеження. По-перше, ця модель наближає всі крапки даних, використовуючи модель у вигляді одного поліному, але не дає задовільного результату, бо їх насправді складно зв'язати однією поліноміальною залежністю. По-друге, загальна поліноміальна модель зайве громіздка для алгоритмів управління ТП та складною для визначення прогнозу із задовільною точністю. Для усунення цих недоліків було використано метод розподілення функції на інтервали для інтервального моделювання. Розподілення функції на інтервали здійснено, виходячи з динаміки поведінки ТП на перегоні.

Алгоритм розрахунку згладжених значень у будь-якій  $i$ -й крапці ряду заснований на трьох величинах: значенні, що спостерігається,  $y_i$  у даній крапці ряду, розрахованому згладженому значенні для попередньої крапки ряду  $\xi_{i-1}$  і деякому заздалегідь заданому коефіцієнті згладжування  $W$ , постійному по всьому ряду. Так, в першій крапці ряду немає згладженого значення для попередньої крапки (немає самої такої крапки), і згладженим значенням  $N_1$  вважається сама величина виміру, що спостерігається в цій крапці,  $y_1$  [206]. Для всіх наступних точок діє правило обчислень

$$N_i^* = W \cdot N_i + (1 - W) \cdot N_{i-1} . \quad (3.23)$$

При рівному ступені згладжування з використанням методу експонентного згладжування коефіцієнт  $W$  зв'язаний з інтервалом вимірювань параметра  $L$  наступним співвідношенням  $W = 2/(L + 1)$ : так згладжування за 5-крапковою схемою еквівалентно по своєму впливу на вихідні дані

експонентному згладжуванню з коефіцієнтом  $W=0,33$ .  $W$  може змінюватись у діапазоні  $0 < W < 1$ , та його обмежують інтервалом від 0,2 до 0,5 [1]. При високих значеннях  $W$  враховуються миттєві поточні спостереження інтенсивності  $i$ , навпаки, при низьких значеннях згладжена величина визначається в більшому ступені минулою тенденцією зміни інтенсивності, ніж поточним її значенням (рис. 3.9 – 3.10).



Рисунок 3.9 – Графік прогнозу з попередженням на добу [1]



Рисунок 3.10 – Узагальнений алгоритм прогнозу інтенсивності ТП [1]

Так було визначено, що метод комп'ютерного прогнозування доцільно застосовувати для добового прогнозу, а інтервального моделювання – на більш довгі періоди, а саме - на тиждень, місяць або сезон. На підставі отриманих результатів прогнозування інтенсивності ТП було визначено гібридний підхід

до прогнозування при УУ в залежності від періодичності формування керуючих впливів у часі.

### 3.3 Визначення взаємозв'язку параметрів ТП у процесі моделювання динаміки руху у міських умовах

Визначено, що ефективним принципом побудови систем є той, який потребує не тільки апріорної інформації про об'єкт управління і умови його функціонування, а й має в наявності поточні параметри ДР.

При цьому існує особливість відокремлення процесів у системі: швидкими процесами в ОУ керує перший рівень системи – регулятор, а повільними змінами другий рівень – адаптор. Тоді дворівнева система управління дорожнім рухом потребує у відповідності до структури опису транспортного потоку швидкими (координатними) та повільними (параметричними) моделями. Так, ознаки координатного процесу має рух транспортного потоку по двовимірній мережі, а параметричного – процес зміни параметрів управління на перетинах ВДМ.

Саме тому основу вирішення задач управління ДР з метою забезпечення пропускної спроможності та працездатності ВДМ складає розробка моделей динаміки транспортного потоку у реальному часі із урахуванням наявності перешкод або впливу технічних засобів регулювання, тобто у реальних умовах міського руху. Розроблені моделі належатимуть до математичного забезпечення СУДР.

Для вирішення задачі розробки моделей руху транспорту, із урахуванням виявлених особливостей при формалізації управління, було розглянуто моделі ТП за наступними ознаками: галузь застосування; рівень деталізації об'єкту моделювання; детерміновані або стохастичні; безперервні або дискретні.

До детермінованих належать моделі, що засновані на функціональних залежностях між основними параметрами ТП – інтенсивністю ( $N$ ), швидкістю ( $V$ ), щільністю ( $q$ ) та дистанцією між АТЗ при русі у потоці. В стохастичних



моделях процес руху ТП має імовірнісний характер опису взаємодії основних параметрів, що ускладнює їх застосування в алгоритмах управління ДР [179].

Тому що до застосування моделей у системах управління ДР головними вимогами є адекватність моделей об'єкту управління та швидкодія їх виконання.

При виборі моделей стратегічного та тактичного рівня управління мають перевагу відомі транспортні моделі ТП. Основу моделювання ТП становлять макро і мікромоделі: перші макроскопічні моделі (гідродинамічні), в яких ТП розглядається подібним потоку стисливої рідини (М. Лайтхілл і Дж. Уїзем, П. Річардс (LWR)) [147, 148] і перші мікроскопічні моделі (слідування за лідером), які описують рух кожного автомобіля (А. Решель, Л. Пайнс) [143]. Для системного управління необхідно надати опис стану транспортного потоку у цілому на підставі макро-моделей ТП, а опис параметрів руху окремих АТЗ у потоці потребує більшої точності та швидкодії відповідно до основ мікро-моделей ТП.

Для алгоритмів управління ДР було обрано детерміновані та безперервні моделі, бо транспортний потік при русі на ВДМ підлягає опису наведеними типами моделювання. У процесі моделювання динаміки руху ТП у містах головною задачею є визначення впливу заторових ситуацій на працездатність транспортної мережі, на навколишнє середовище та його усунення. Так, було досліджено причини виникнення «ударних хвиль», що змінюють стан ТП зі стаціонарного до нестійкого, який зменшує ефективність ДР у містах [201].

З огляду на визначені проблеми при моделюванні зміни стану ТП із відокремленням причини переходу у нестійкий стан, було досліджено процеси формування «ударної хвилі» та отримано їх математичний опис. При аналізі безперервних моделей були виявлені протиріччя, які постають у тому, що швидкість ТП  $V(x, t)$  у точці  $x$  та у часі  $t$  є функцією щільності  $P(x, t)$ . Тоді

$$V(x, t) = V(p(x, t)) , \quad (3.24)$$

де  $V(p(x, t))$  – швидкість руху потоку при щільності  $p(x, t)$ .

Вочевидь, що швидкість руху потоку у звичайних умовах наближається до  $V(p)$ . Але цей висновок не відповідає ситуації на транспортній мережі, коли виникають заторові стани транспортного потоку, де швидкість ТП дорівнює 0, а щільність приймає максимальне значення, що сприяє процесу формування «ударної хвилі», яка потребує додаткових досліджень.

Відповідно до безперервних моделей, хвіст «ударної хвилі» повинен мати меншу щільність при більшій швидкості, ніж основний транспортний потік. Причому, безперервні моделі моделюють фронт «ударної хвилі» при заторовій ситуації, щоб пропускна спроможність була задовільною. Ця особливість робить безперервні моделі неприйнятними для керування транспортними потоками на трасах, де зниження швидкості є однією з головних причин зменшення пропускної спроможності. На ВДМ міста транспортними потоками управляють технічні засоби регулювання й, отже, зниження швидкості є не тільки технологічним процесом, але й керованим.

Порівняльний аналіз безперервних і дискретних моделей дозволив виявити складності подання аналітичних безперервних моделей для алгоритмів управління, тому було виконано удосконалення відомих моделей.

Пропонуємо підхід до побудови макромоделі ТП, який спрямований на формалізацію зміни макропараметрів ТП для опису природи формування «ударної хвилі» у ТП, бо саме цей процес ускладнює дорожній рух, зменшує пропускну спроможність ВДМ та збільшує транспортні затримки при русі.

Формалізацію руху ТП у складних умовах для систем управління дорожнім рухом проведемо наступним чином [143]. Режим руху АТЗ вважаємо стабільним на ділянці ВДМ при відсутності будь-яких зовнішніх впливів, у тому числі керуючих. При наявності на ділянці засобів регулювання, транспортний потік підлягає їх впливу, результатом якого є зміна режиму руху. Враховуючи безперервність параметрів ТП, їх взаємозв'язок у конкретному перерізі  $x$  перегону ВДМ надамо відомою залежністю [28]

$$V(x) = V_{\max} - k \cdot q(x) , \quad (3.25)$$

де  $V(x)$  – швидкість ТП в перерізі  $x$  ділянки ВДМ, м/с;

$V_{\max}$  – максимальна дозволена швидкість руху на ділянці ВДМ, м/с;

$k$  – коефіцієнт, що характеризує зміну швидкості руху на ділянці зі зміною завантаження дороги рухом

$$k = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{q_{\max}} , \quad (3.26)$$

де  $q(x)$  – щільність ТП в перерізі  $x$  ділянки ВДМ, авт./км.

Тоді, шляхом диференціювання (3.25), визначення щільності ТП в певному перерізі перегону проводимо за залежністю

$$q(x) = q_{\max} \cdot e^{-\rho \cdot 10^{-7} (x - S)^2} , \quad (3.27)$$

де  $q_{\max}$  – максимальна щільність ТП, що відповідає пропускній спроможності ділянки ВДМ, авт./км;

$e$  – основа натурального логарифма;

$S$  – довжина ділянки ВДМ, м;

$x$  – координата перерізу на ділянці ВДМ;

$\rho$  – коефіцієнт, що визначається граничними значеннями щільності ТП на ділянці ВДМ і може бути отриманий з виразу

$$\rho = \frac{\ln \left( \frac{q_{\max}}{q_{\min}} \right) \cdot 10^7}{S^2} , \quad (3.28)$$

де  $q_{\min}$  – мінімальна щільність ТП, яка відповідає мінімальній інтенсивності потоку на цій ділянці ВДМ, авт./км.

Для визначення характеру зміни інтенсивності, щільності і швидкості ТП від довжини перегону, приймаємо наступні граничні значення щільності ТП:  $q_{\min}=5$  авт/км;  $q_{\max}=100$  авт/км. Дослідимо зміну щільності ТП на ділянці ВДМ довжиною 1500 м (максимальна довжина перегону за нормативними документами), де наприкінці встановлено світлофорний пристрій. Графік зміни щільності ТП відповідно до (3.27) протягом довжини ділянки ВДМ має вигляд (рис. 3.11).

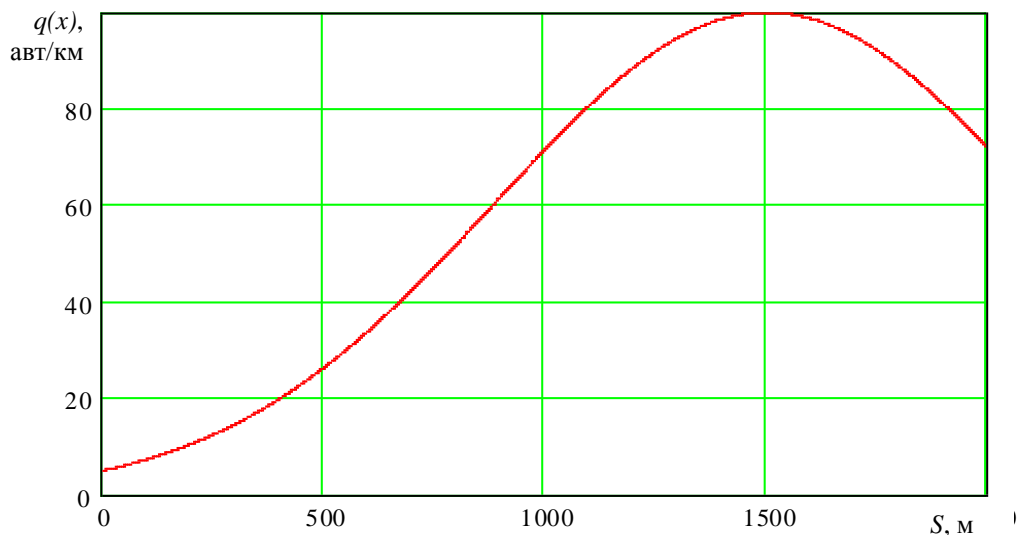


Рисунок 3.11 – Зміна щільності ТП на ділянці ВДМ

Вочевидь, щільність ТП зростає від початку ділянки і досягає максимального значення на перерізі з координатою 1500 м. За цим перетином спостерігається зниження щільності ТП, що фактично характеризує процес роз'їзду черги АТЗ, що накопичилася перед перехрестям.

Побудовано графік зміни швидкості руху від довжини перегону (рис. 3.12) при наявності світлофорного регулювання, згідно з (3.25).

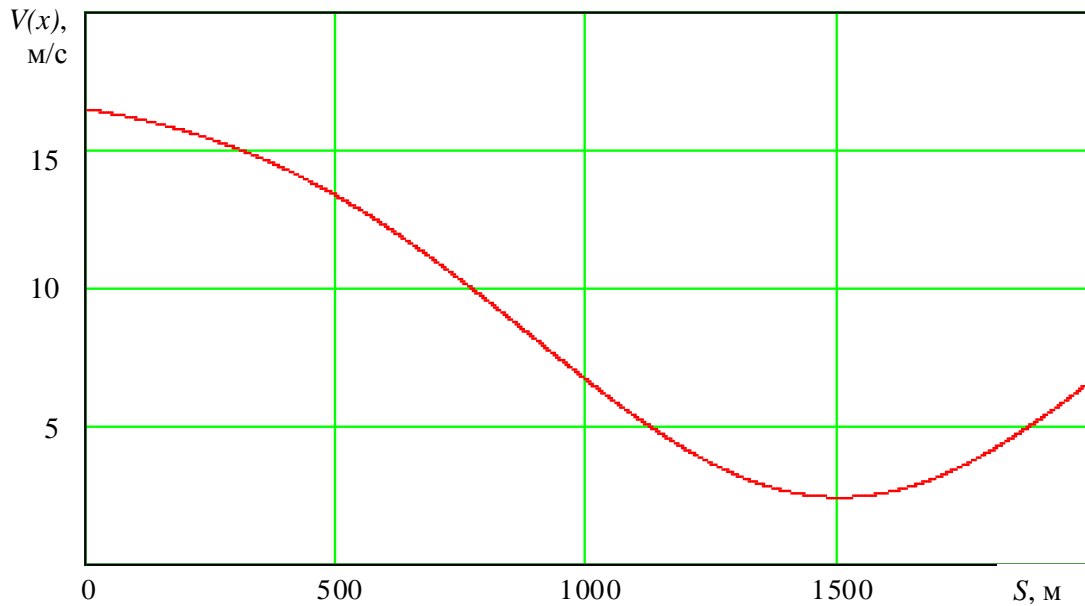


Рисунок 3.12 – Зміна швидкості ТП на ділянці ВДМ

Аналіз графіків (рис. 3.8 – 3.9) свідчить, що з віддаленням від початку перегону, швидкість руху знижується до мінімального значення. Отже, щільність ТП і його швидкість по довжині ділянки ВДМ нерівномірні і характеризуються «критичними» значеннями в певному перерізі ділянки, при цьому мінімальна швидкість руху і максимальна щільність потоку, які можуть спостерігатися на ділянці, є характерними для передзаторового стану ТП. Такий результат відповідає реальній поведінці ТП, оскільки затори зароджуються наприкінці перегону і поширюються назустріч руху потоку.

Тоді на підставі визначення швидкості і щільності ТП на ділянці ВДМ (3.25), (3.27), інтенсивність ТП отримали добутком цих параметрів:

$$N(x) = V_{\max} \cdot q_{\max} \cdot e^{-\rho \cdot 10^{-7} \cdot (x-S)^2} - k \cdot q_{\max} \cdot e^{-2 \cdot \rho \cdot 10^{-7} \cdot (x-S)^2} . \quad (3.29)$$

Графічна інтерпретація залежності (3.29), змінна інтенсивності ТП по довжині ділянки ( $S$ ) має наступний вигляд (рис. 3.13).

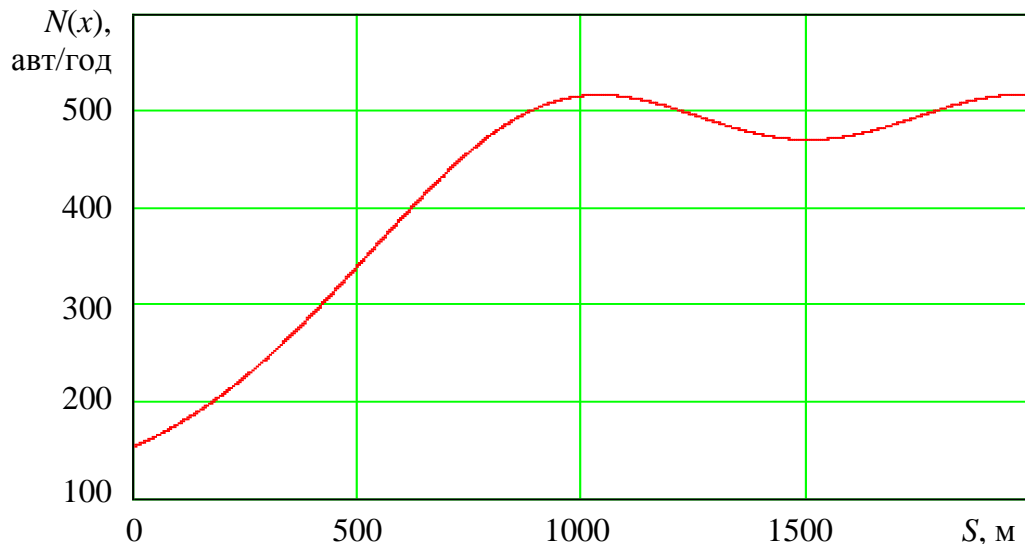


Рисунок 3.13 – Графік зміни інтенсивності ТП на ділянці ВДМ

При фіксованих параметрах ділянки ВДМ, збільшення інтенсивності ТП спостерігається на відстані 1000 м від початку і далі по напрямку руху потоку починає знижуватися. Цей факт підтверджує припущення про те, що в кінці ділянки ВДМ формуються регулярні транспортні затори, які супроводжуються накопиченням АТЗ на ділянці ВДМ. Таким чином, отримана модель визначення інтенсивності ТП у щільному потоці (3.29) є адекватною до реальних процесів ВДМ. подальші дослідження засобами макромоделювання неможливі, бо виникла необхідність визначення параметрів у конкретних перерізах ділянки.

Наступним етапом було проведено визначення параметрів ТП в заторовому режимі [28] засобами мікромоделювання. Інтегрування виразу (3.27) визначає кількість автомобілів, які знаходяться в заданий момент часу на перегоні ВДМ довжиною  $S$ . З урахуванням довжини ділянки ВДМ, кількість автомобілів ( $n$ ), які знаходяться у даний момент часу на перегоні ВДМ, визначається як

$$n = \int_0^S q(x) dx, \quad (3.30)$$

де  $S$  – довжина ділянки ВДМ, м;

Накопичення АТЗ на ділянці ВДМ призводить до зміни у часі щільності ТП в кожній його точці. Для визначення характеру накопичення АТЗ на ділянці ВДМ, необхідно провести диференціювання щільності за часом. Припустимо, що кількість АТЗ, які накопичуються на ділянці ВДМ, визначається інтенсивністю ТП на його вході і виході

$$\Delta n = [N(x) - N(x + \Delta x)] \cdot \Delta t, \quad (3.31)$$

де  $\Delta n$  – величина, на яку зміниться кількість АТЗ на ділянці ВДМ, авт.;

$N(x)$  – інтенсивність ТП на вході ділянки з координатою  $x$ , авт./год.;

$N(x + \Delta x)$  – інтенсивність ТП на виході ділянки з координатою  $x + \Delta x$ , авт./год.;

$\Delta t$  – крок часу виміру, с.

Тоді у відповідності до (3.29) інтенсивність ТП може бути виражена добутком його щільності на швидкість, тоді:

$$\Delta n = [V(x) \cdot q(x) - V(x + \Delta x) \cdot q(x + \Delta x)] \cdot \Delta t, \quad (3.32)$$

де  $q(x + \Delta x)$  – щільність ТП в перерізі ділянки з координатою  $x + \Delta x$ , авт./км.

Якщо швидкість ТП може бути визначена залежністю (3.25), тоді кількість АТЗ, які накопичуються на ділянці ВДМ можна визначити як:

$$\begin{aligned} \Delta n &= [(V_{\max} - k \cdot q(x)) \cdot q(x) - (V_{\max} - k \cdot q(x + \Delta x)) \cdot q(x + \Delta x)] \cdot \Delta t = \\ &= [V_{\max} \cdot q(x) - k \cdot q(x)^2 - V_{\max} \cdot q(x + \Delta x) + k \cdot q(x + \Delta x)^2] \cdot \Delta t. \end{aligned} \quad (3.33)$$

На підставі того, що зміна кількості АТЗ на ділянці перегону призводить до зміни щільності ТП на тій же ділянці, то можна записати:

$$\Delta q \cdot \Delta x = [V_{\max} \cdot q(x) - k \cdot q(x)^2 - V_{\max} \cdot q(x + \Delta x) + k \cdot q(x + \Delta x)^2] \cdot \Delta t. \quad (3.34)$$

Після алгебраїчних перетворень маємо:

$$\frac{\Delta q \cdot \Delta x}{\Delta t} = V_{\max} \cdot [q(x) - q(x + \Delta x)] + k \cdot [q(x + \Delta x)^2 - q(x)^2]; \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta q \cdot \Delta x}{\Delta t} = & V_{\max} \cdot [q(x) - q(x + \Delta x)] + \\ & + k \cdot [(q(x + \Delta x) - q(x)) \cdot (q(x + \Delta x) + q(x))] . \end{aligned} \quad (3.36)$$

Тоді:

$$\frac{\Delta q \cdot \Delta x}{\Delta t} = (q(x) - q(x + \Delta x)) \cdot (V_{\max} - k \cdot (q(x + \Delta x) + q(x))); \quad (3.37)$$

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{(q(x + \Delta x) - q(x)) \cdot (k \cdot (q(x + \Delta x) + q(x)) - V_{\max})}{\Delta x}; \quad (3.38)$$

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{q(x + \Delta x) - q(x)}{\Delta x} \cdot (k \cdot q(x + \Delta x) + q(x) - V_{\max}). \quad (3.39)$$

Отриманий вираз (3.35) визначає зміну щільності ТП у часі на певному перерізі перегону. Розглядаючи нескінченно малу величину перерізу перегону  $\Delta x \rightarrow 0$ , замість першої дробі у правій частині рівняння отримуємо  $\frac{dq}{dx}$  при  $q(x + \Delta x) = q(x)$ . Фактично, величина  $\frac{dq}{dx}$  являє собою характеристику локальної щільності ТП в перерізі  $x$  ділянки ВДМ. Для її визначення проведемо диференціювання (3.36):

$$\frac{dq}{dx} = -2 \cdot q_{\max} \cdot \rho \cdot 10^{-7} \cdot (x - S) \cdot e^{-\rho \cdot 10^{-7} \cdot (x - S)^2}. \quad (3.40)$$



Наведемо результат чисельного диференціювання локальної щільності ТП для ділянки ВДМ у вигляді графіка на рисунку 3.14.

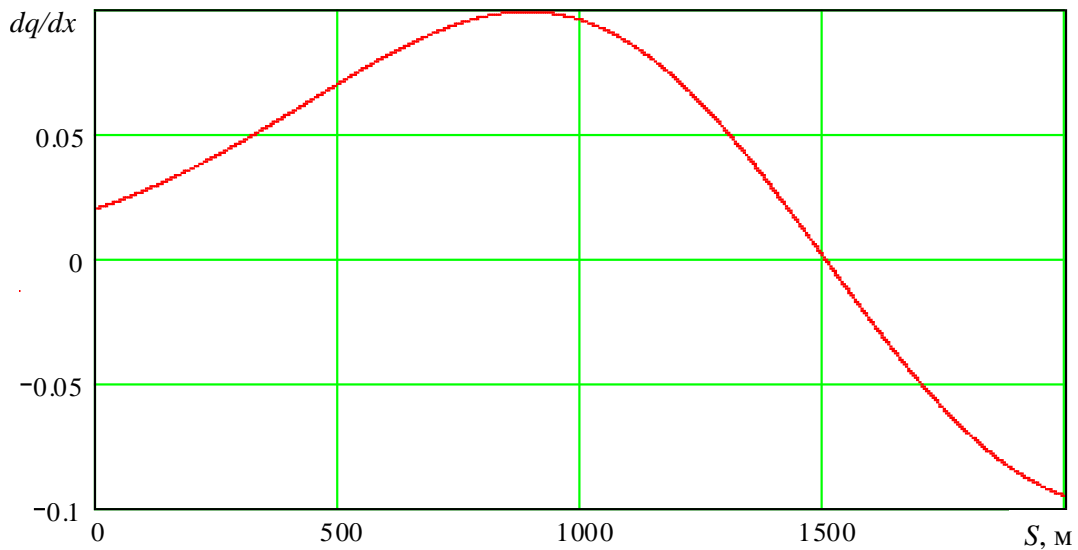


Рисунок 3.14 – Графік зміни локальної щільності по ділянці ВДМ

На графіку застосовані нормовані значення функції  $[-0,1; 0,1]$ , які відображають зміну локальної щільності по довжині ділянки ВДМ та виявляють його нерівномірність, а саме – найбільша локальна щільність спостерігається не на виході ділянки, а ближче до місця установки світлофора (1500 м). Це дозволяє стверджувати, що у випадку, якщо на ділянці починає утворюватися транспортний затор, черга АТЗ буде накопичуватися максимально швидко не наприкінці перегону, а на відстані від нього. Ймовірно, що це є те місце на перегоні, де щільність потоку вже починає зростати, а швидкість ще не знижена. За кінцевою межею ділянки ВДМ темп зростання щільності в певний момент часу носить негативний характер, що свідчить про те, що черга АТЗ певний час роз'їжджається і щільність ТП знижується. Після визначення  $\frac{dq}{dx}$  за допомогою виразу (3.40), вираз (3.39) буде мати вигляд

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dx} \cdot (2 \cdot k \cdot q(x) - V_{\max}) . \quad (3.41)$$

Перехід до безкінечно малого інтервалу часу  $\Delta t \rightarrow 0$  дозволяє отримати похідну від щільності за часом, яка може бути визначена залежністю

$$\frac{dq}{dt} = \frac{dq}{dx} \cdot (2 \cdot k \cdot q(x) - V_{\max}). \quad (3.42)$$

При заміні члена  $V_{\max} - k \cdot q(x)$  швидкістю ТП в визначеному перерізі ділянки ВДМ маємо

$$\frac{dq}{dt} = \frac{dq}{dx} \cdot (k \cdot q(x) - V(x)). \quad (3.43)$$

Таким чином, було визначено темп зміни щільності на ділянці ВДМ, графік якої наведено на рисунку 3.15. Отриманий результат являє собою макромодель зміни основних параметрів транспортного потоку при русі щільного потоку в міських умовах.

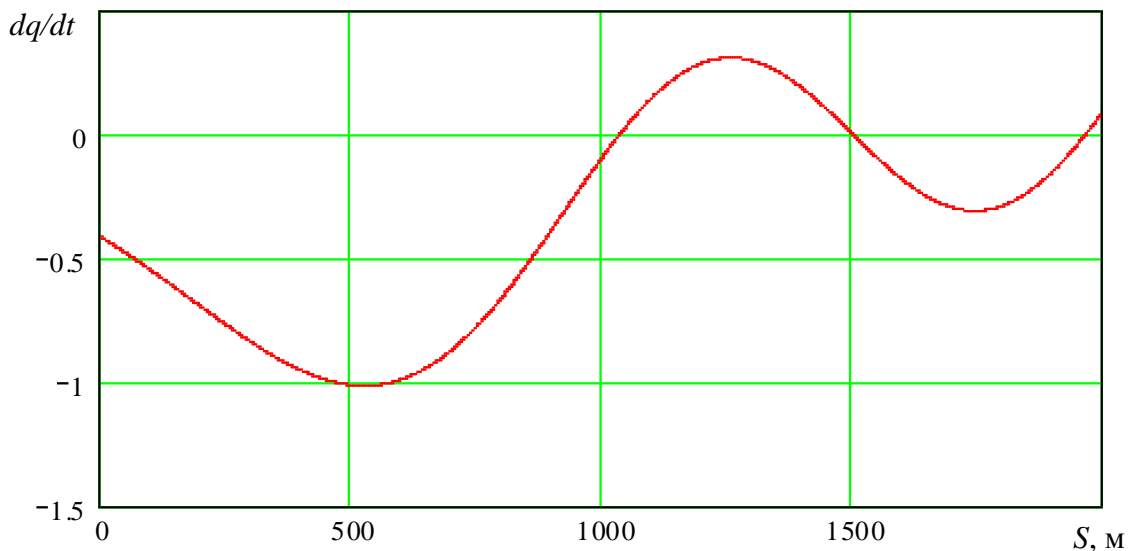


Рисунок 3.15 – Графік темпу зміни щільності на перегоні ВДМ

Отримана макромодель ТП доводить, що впливати на параметри ТП треба наприкінці «ударної хвилі» (УХ), а не на її початку. Це надасть можливість коректно визначити керуючі дії СУДР для запобігання виникнення

заторового режиму руху, який формується при підвищенні щільності ТП. Отже, ефект ударної хвилі стосовно до ТП виявляється в різкому зниженні швидкості на смузі руху та скорочення інтервалів безпеки між автомобілями. Розроблені моделі руху ТП у щільному потоці відрізняється від відомих макро-моделей руху ТП, бо там враховується довжина інтервалу безпеки між АТЗ. Визначена закономірність взаємодії параметрів ТП у щільному потоці доводить, що процесом формування «ударної хвилі» можливо керувати, щоб не допустити її виникнення, бо це різко зменшує пропускну спроможність ВДМ та безпеку дорожнього руху.

Таким чином, отриманий математичний опис руху ТП у заторовому режимі (3.43) свідчить, що було отримано залежності параметрів у «новому» режимі – режимі «щільного потоку», який суттєво відрізняється за параметрами від відомих режимів руху ТП.

### 3.4 Висновки за розділом 3

Розроблена стратегія гібридного управління ДР у містах, завдяки цьому:

Отримано результат взаємодії параметрів дорожнього руху із параметрами управління системи на різних рівнях управління із урахуванням їх нормативних їх значень та формалізовано керуючі впливи кожного рівня. Отримані результати впливають на визначення критерію ефективності за рівнями управління та вибір відповідного методу управління ДР.

Обрано у якості критерію ефективності на стратегічному рівні параметр дорожньо-транспортних витрат, у якому поєднуються параметри ТП та ВДМ. Проведено експеримент на частині ВДМ м. Харків. Також отриманий результат можливо застосувати при визначенні ділянок ВДМ із складними умовами руху.

Проведено формалізацію випереджаючого управління дорожнім рухом на підставі прогнозування зміни вхідних параметрів із урахуванням попередніх керуючих впливів та визначенням горизонту прогнозу, який впливає на точність та вибір методу прогнозування. Доведено доцільність застосування

методів часових рядів, які мають певні переваги перед іншими, що тільки відбивають тенденції зміни параметрів, потребують великого обсягу інформації та ускладнюють розрахунки. Запропоновано альтернативний метод апроксимації даних часового ряду, який дозволяє одержувати короткостроковий прогноз параметрів, наданий кусочно-гладкою функцією – безперервною регресійною залежністю високого ступеню. Запропоновано застосування інтервального прогнозування для довгострокового прогнозування. Побудову прогнозу зміни інтенсивності ТП проведено у середовищі комп'ютерної математики MATLAB. Підтверджено адекватність запропонованого способу експериментальними дослідженнями прогнозування інтенсивності ТП на перегонах ВДМ м. Харків.

Для реалізації на тактичному рівні СУДР заходів для забезпечення пропускнув спроможності ВДМ було проведено моделювання параметрів ТП при наявності перешкод або впливу світлофорного регулювання. Визначено, що причиною заторового стану при міських умовах руху є «ударна хвиля», яка формується при зміні дистанції безпеки між АТЗ у потоці. Отримано математичний опис процесу формування «ударної хвилі» на підставі запропонованої моделі зміни локальної щільності на перегоні, що дозволяє виявити місце її виникнення.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [1, 6, 20, 33, 37, 38, 47, 67].

## РОЗДІЛ 4

КОНЦЕПЦІЯ КОНТУРНОГО УПРАВЛІННЯ ДОРОЖНІМ РУХОМ НА  
СТРАТЕГІЧНОМУ РІВНІ УПРАВЛІННЯ

4.1 Моделювання групового руху транспортних засобів на перегоні вулично-дорожньої мережі

На стратегічному рівні управління СУДР формуються стратегії управління та керуючі принципи, що поширюються на довгострокові цілі і дії.

Стратегію розглядаємо як основний напрям досягнення цілей при розробці основ і поведінки об'єкту управління, що впливають на вибір методів управління ДР.

На підставі визначення відомих принципів [209, 210], розглядаємо стратегічне управління як систему, що складається з двох взаємодоповнюючих підсистем: аналізу і вибору стратегії та оперативного управління ДР.

Визначено, що САУДР, як гібридна система управління ДР з центрально-розподіленим інтелектом, реалізує обрані технології управління ТП за принципами часо-залежного або транспортно залежного управління ДР [211].

Сучасний стан управління ТП в більшості міст має ознаки функціонування пристроїв управління за фіксованим графіком у часі або за зміною часу доби (денний/нічний), тобто має місце часо-залежне управління в режимі off-line (технологія за фіксованими планами), а транспортно-залежне управління здійснюється в режимі поточного часу – online-управління (в англосаксонській літературі має назву Traffic Responsive [211]), що полягає у тому, що час втручання СУДР визначається за зміною транспортної ситуації (технологія ситуаційного управління), складно та дорого для реалізації на транспортній мережі міст. Суттєвою рисою транспортно-залежного управління є наявність в алгоритмах управління макро-моделей, які засновані на детерміністичному підході і алгоритмах оптимізації параметрів ТП у вигляді

складних аналітичних залежностей для реалізації на тактичному рівні управління.

Застосування часо-залежного управління здійснюється для забезпечення стабільності в транспортній мережі, але з певною затримкою у часі. Це знижує його ефективність і виводить управління з режиму реального часу.

Але часо-залежного управління має низку переваг:

- можливість реалізації контролю за параметрами ТП;
- доступність до модифікації сигнальних часових програм;
- відносно низькі витрати на обслуговування та установку.

А до його недоліків було віднесено існуючі обмеження:

- неможливість підвищення ефективності використання часу керуючих сигналів (дозвіл руху для окремих напрямків);
- неможливість втручання в управління з боку АТЗ та пішоходів;
- складність усунення непрогнозованих транспортних заторів.

Тому, на стратегічному рівні доцільно формування процесу управління ДР на підставі часо-залежного управління з усуненням виявлених недоліків для забезпечення ефективності та працездатності транспортної системи міста.

Визначено, що для усунення недоліків необхідно вирішити наступні завдання стратегічного управління ДР:

- підвищення тривалості ефективного часу сигналів світлофорів на перетинах ВДМ з метою зменшення транспортних затримок у напрямку руху ТП;
- визначення існуючого балансу між інтенсивністю ТП і пропускною спроможністю ВДМ, що формує певний резерв працездатності ВДМ та впливає на визначення типів управління ДР ц містах;
- попередження та усунення виникаючих транспортних заторів для забезпечення оптимального часу руху ТП за маршрутами прямування та зниження екологічного навантаження у великих містах.

На підставі проведеного аналізу технологій та методів управління ДР пропонуємо проблему ефективності використання циклу світлофорного

регулювання вирішити шляхом реалізації контурного управління на ВДМ міста; визначення необхідного балансу між інтенсивністю ТП та пропускною спроможністю провести методами дослідження основної діаграми ТП для рівня прийняття рішень; розробкою заходів динамічного управління ТП усунути транспортні затори на ВДМ.

Відповідно до вимог методології системного аналізу необхідно врахувати три основні аспекти, які визначають етапи при дослідженні системи [212]:

- структурний аналіз;
- параметричний аналіз;
- функціональний аналіз.

В результаті, при проведенні структурного аналізу СУДР було розроблено ієрархічну ромбовидну структуру СУДР, що дозволяє розподіляти задачі управління за рівнями. А побудова параметричної моделі системи дозволяє визначити групу факторів, які характеризують стан системи і умови її функціонування. Сутність параметричного аналізу полягає в обґрунтуванні необхідної й достатньої сукупності факторів, які відповідають властивостям СУДР [7].

Розроблена параметрична модель взаємодії трьох підсистем – об'єкту управління (ДР), транспортної мережі міста (ТММ) і центру управління (ЦУ) СУДР, що наведено на рис. 4.1.

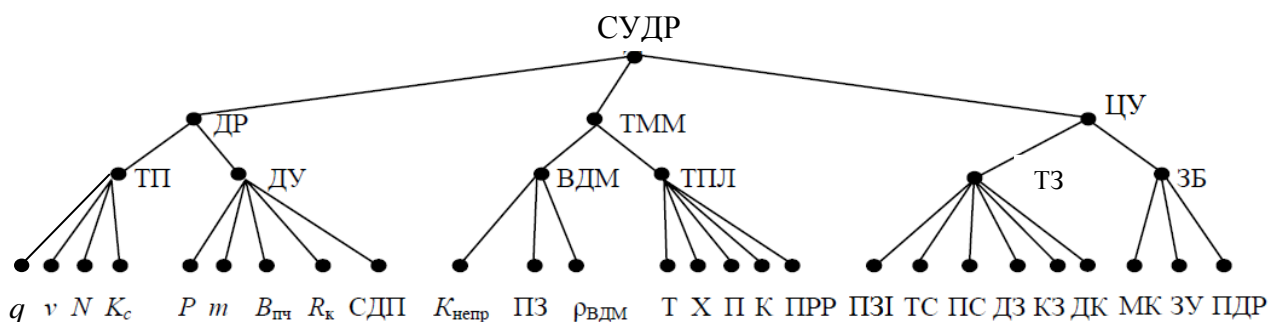


Рисунок 4.1 – Параметрична модель СУДР

Елементи дорожнього руху, транспортний потік і дорожні умови (ДУ), можуть бути описані певним набором характеристик. Основними

характеристиками ТП є: швидкість  $v$ , щільність  $q$ , інтенсивність  $N$  і склад ТП  $K_c$ . Інші характеристики ТП можуть бути визначені шляхом аналітичних розрахунків на підставі визначення основних параметрів. Дорожні умови визначаються сукупністю геометричних параметрів і транспортно-експлуатаційних якостей дороги.

Найважливішими параметрами, що характеризують функціонування дороги, є пропускна спроможність  $P$ , ширина проїзної частини  $B_{пч}$ , кількість смуг руху  $m$ , радіуси поворотів  $R_k$  і стан дорожнього покриття (СДП) [213].

Транспортна мережа міста характеризується типом планування (ТПЛ) і конфігурацією вулично-дорожньої мережі (ВДМ). Відомі принципові геометризовані схеми планування ТММ [140]: вільна, радіальна, радіально-кільцева, трикутна, прямокутна, прямокутно-діагональна, гексагональна й комбінована. Кожна схема планування має певний тип перетинання вулиць, що впливає на заходи управління на перехрестях: т-подібне (Т), х-подібне (Х), п'яти й більше доріг (П), кільцеве (К) і перетинання в різних рівнях (ПРР).

Транспортно-планувальна схема міста визначає конфігурацію ВДМ, її щільність, відстань між перетинаннями і ступінь складності транспортних вузлів. Найбільш важливими характеристиками структури ВДМ міста є [140]: коефіцієнт непрямолінійності сполучення  $K_{непр}$ , пропускна спроможність ВДМ (ПЗ) і щільність ВДМ міста  $\rho_{ВДМ}$ . Значення параметра щільності ВДМ впливає на ефективність функціонування міської транспортної системи в цілому.

Центри управління ДР повинні визначати керуючі впливи на ДР з урахуванням нормативних документів країни та законодавчої бази (ЗБ). Закон України (ЗУ) «Про дорожній рух», укази міжнародних конвенцій (МК). Особливо потрібно виділити правила дорожнього руху (ПДР), які встановлюють єдиний порядок руху АТЗ на всій території України і вимоги до учасників дорожнього руху, а також визначають норми поведінки на дорозі.



Оскільки формалізація управління неможлива без надання інформації про ТП, то одним з основних елементів СУДР є підсистема збору інформації (ПЗІ), до яких належать детектори транспорту (ДТ), засоби відеозйомки та GPS.

Реалізацію управляючих впливів здійснюють технічні засоби (ТЗ) управління ДР у складі СУДР, до яких належать: транспортні світлофори (ТС), пішохідні світлофори (ПС), дорожні знаки (ДЗ), керовані знаки (КЗ) і дорожні контролери (ДК) [141].

Морфологічний і функціональний описи системи взаємозалежні. Опис морфології внутрішніх процесів СУДР формує вихідні дані для визначення параметрів функціональної моделі за типом управління дорожнім рухом.

З урахуванням властивостей дорожньо-транспортної мережі та ієрархічного принципу обробки інформації було визначено де кілька взаємопов'язаних районів управління (рис. 4.2), які і формують підсистеми управління за територіальними ознаками та відрізняються методами управління [31]:

- за окремим напрямком руху на елементах ВДМ міста;
- локальний, в межах окремого перехрестя ВДМ;
- магістральний, на сукупності перехресть ВДМ, об'єднаних міською магістраллю;
- районний чи загальноміський для управління рухом в межах окремого району міста або на ВДМ міста в цілому.

Управління дорожнім рухом по окремому напрямку руху на елементах ВДМ міста застосовано для умовного пропуску спеціальних автотранспортних засобів у загальному транспортному потоці, який можливо реалізувати із застосуванням хмарного сервісу [214].

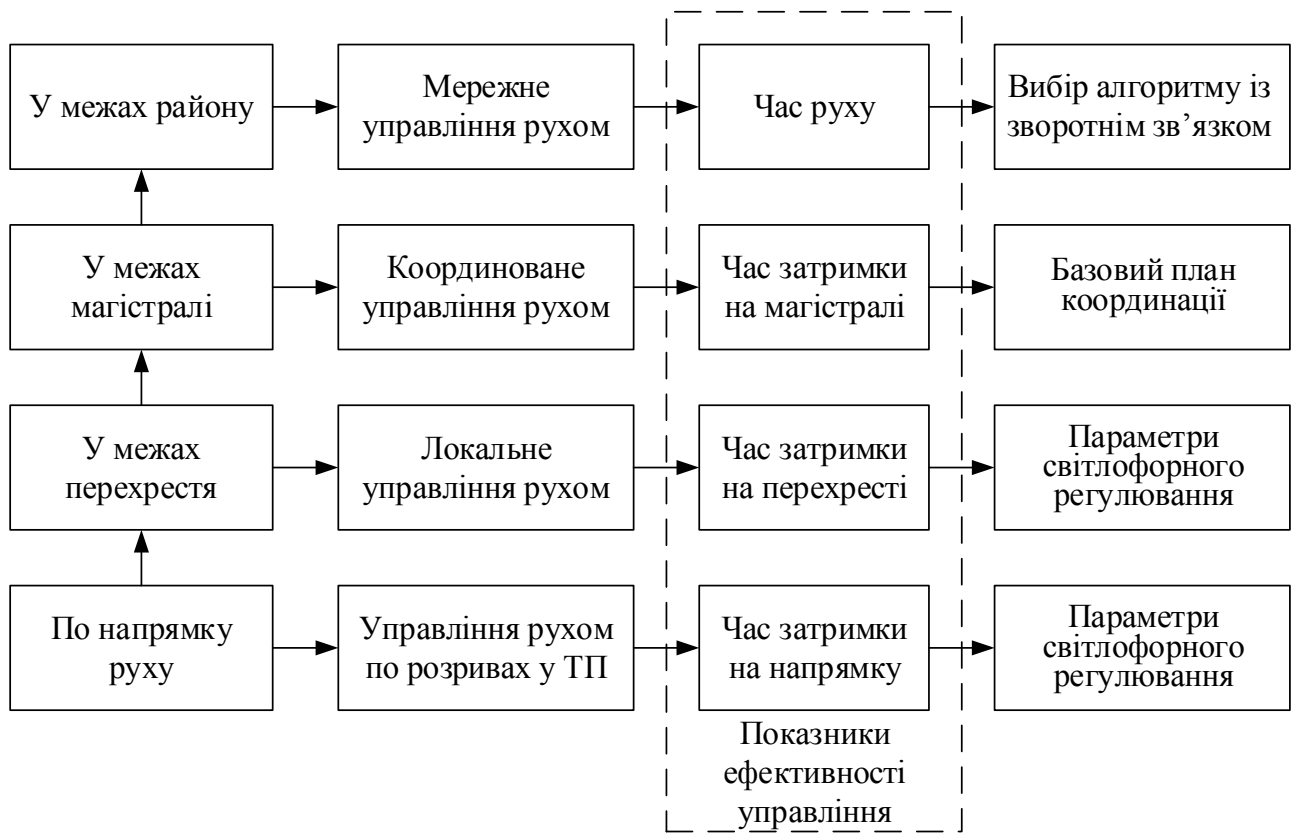


Рисунок 4.2 – Залежність взаємозв'язку методів, параметрів та показників ефективності

Локальне управління передбачає мінімізацію показників ефективності транспорту на одному перехресті в рамках обмежень, що надходять з верхніх рівнів, тобто здійснюється корекція циклів світлофорного регулювання за місцевими умовами. До системних технологічних параметрів локального рівня відносяться тривалості циклів, кількість і черговість фаз регулювання та параметри ТП для алгоритмів пошуку розривів у транспортному потоці.

Мінімізація затримок транспорту на локальному рівні управління перехрестям здійснюється наступними методами:

- використанням масивів сигнальних програм, що обираються залежно від рівня інтенсивностей руху на перехресті;
- збільшенням ефективного часу в циклі світлофорного регулювання на перехресті.

На вибір методу управління транспортом в багатопроцесорних ієрархічних СУДР впливає наступні положення:

1) Згідно до загальної концепції системного управління, на локальному рівні здійснюється управління в рамках системних обмежень. Практично це зводиться до корекції планів регулювання за місцевими умовами у невеликому діапазоні часу (15-20% від загального часу управління).

2) Для підвищення ефективності управління визначальним фактором при виборі алгоритму є його доступність при реалізації у системі.

З цієї точки зору найбільш ефективні методи управління за пошуком розривів у транспортному потоці. У порівнянні зі звичайними формами реалізації вони мають найбільш гнучку форму управління ТП. Розрив у транспортному потоці визначається за кожним напрямком окремо. Вимкнення дозволяючого сигналу у напрямку відбувається при появі тимчасового розриву в потоці і включається дозволяючий сигнал для конфліктуючого з ним напрямку.

Метод реалізується без попереднього розрахунку циклу світлофорного регулювання. Необхідною умовою вимикання напрямку є закінчення мінімального часу зеленого сигналу  $t_{\text{зел min}}$ , який розраховується заздалегідь. Для реалізації означених методів було запропоновано застосування компоненти хмарного сервісу кіберфізичної системи моніторингу та управління ДР у реальному часі засобами глобальних систем позиціонування, навігації (GPS, GPRS) та інтелектуальних дорожніх контролерів (ДК) для пошуку розриву у ТП [34]. Такий підхід реалізує сучасні комп'ютерні технології.

Магістральне управління забезпечує формування керуючих впливів для магістралі міста, яка складається з декількох взаємопов'язаних перехресть та перегонів, що відповідають умовам координації. Основною ознакою магістрального управління дорожнім рухом є стійка залежність затримки руху АТЗ на перехресті від часу перемикання світлофорних сигналів на сусідніх світлофорних об'єктах.

Районне управління передбачає організацію руху на сукупності вулиць міського призначення, де здійснюється управління транспортними потоками на загальних перехрестях.

Управління ДР в двомірних мережах належить до мережевого керування. У цих випадках проста логіка магістрального управління часто є неприйнятною. У загальному випадку існують два методи визначення керуючих параметрів – вибір програм управління (вибирається одна з заздалегідь розроблених) або автоматично, за таймером реального часу обирається відповідна часу програма [215]. Але виникають проблеми управління ДР на межах магістралей, які не поєднані між собою.

Системними технологічними параметрами районного рівня є резервні плани координації, розподіл перехресть по районах єдиного координованого управління, плани управління при заторах, список можливих режимів функціонування обладнання. Завданням магістрального управління є корекція базового плану координації за умовами рівномірного руху на ділянці ВДМ міста з оптимізацією показників ефективності. Базовий план координації розраховується заздалегідь, на основі усереднених за певний інтервал часу параметрів руху та належить до часо-залежного управління ДР.

Визначення планів координації на магістралях проводиться методами координованого управління, проте методи мають ряд особливостей, а саме:

- розрахунок параметрів світлофорного регулювання шляхом розподілу надлишкового часу циклу пропорційно фазовим коефіцієнтам циклу світлофорного регулювання;

- визначення керуючих параметрів графоаналітичним методом на підставі графіку координації;

- оптимізація керуючих параметрів проводиться за непрямим критерієм – часом затримки транспортного потоку на магістралі, що визначається у процесі дорожнього руху;

- перевірка ефективності управління проводиться методом плаваючого автомобіля поза режимом реального часу.

Наведений опис методів координованого управління виявив їх малоефективність при управлінні на системі магістралей вулично-дорожньої

мережі міста, що суттєво обмежує можливості сучасних систем управління дорожнім рухом.

Основний обсяг транспортної роботи в найбільших містах здійснюється по магістральних вулицях, бо вони забезпечують транспортний зв'язок між житловими, промисловими районами і громадськими центрами найбільших міст [201]. Залежно від планувальної структури міста, магістральні вулиці утворюють контури ВДМ різної структури. Тому запропоновано рішення задачі управління дорожнім рухом на контурі магістралей міста. Згідно з наведеною класифікацією, дана задача відноситься до районного рівня управління дорожнім рухом у місті.

Основою запропонованого контурного управління на ВДМ міст є магістральне управління ТП. Високий рівень обслуговування транспортних засобів на елементах ВДМ міст забезпечується, в першу чергу за рахунок підвищення швидкості руху, зменшення кількості зупинок автотранспортних засобів, часу затримки у транспортному потоці в цілому та підвищення екологічної безпеки населення.

Програмне управління засновано на припущенні статистичної сталості характеристик транспортних потоків і полягає у попередньому розрахунку плану координації за заздалегідь визначеними параметрами режимів руху.

У попередніх дослідженнях було виділено окремий клас методів системного управління – програмно-адаптивні, як найбільш перспективні [216]. Залежно від варіювання програмами управління виділяють такі види програмно-адаптивного управління, як:

- зі зміною планів координації за часом доби, тижня, сезону;
- зі зміною планів координації за параметрами транспортних потоків;
- при загальній корекції планів координації.

Із огляду моделей управління ТП на магістралі впливає, що лише для самих простих та грубих моделей [217] формалізовані ефективні методи визначення параметрів координації, які забезпечують оптимальну якість управління.

Серйозною проблемою, що не одержала дотепер необхідного вирішення, є практична реалізація процесу управління ТП на підставі досліджень аналітичних залежностей параметрів ТП, які мають за мету організацію рівномірного руху ТП по перегонам ВДМ.

У роботі проведено моделювання процесу руху ТП на магістралі, який існує у вигляді руху груп АТЗ. Для реалізації контурного управління та його організації на мережі магістральних вулиць міста було розглянуто особливості та обмеження при введенні координованого управління транспортними потоками на магістральних вулицях міст, що є необхідними та достатніми для обґрунтування можливості застосування принципів координації в складі алгоритму контурного управління на мережі магістралей міста.

Магістральні вулиці міського значення – це вулиці, що є основними шляхами як для транзитного руху, так і для забезпечення безпосереднього зв'язку між основними пунктами відправлення та призначення - центральним діловим районом, головними районами зайнятості, центрами розподілу і відправки товарів та селітебними районами міста. Сукупність магістральних вулиць міста, що мають точки перетину, можна визначити як мережу магістралей міста, місця перетину магістралей - як вузлові перехрестя.

На магістралях міста, з метою підвищення безпеки руху та збільшення пропускної спроможності вулично-дорожньої мережі, доцільно реалізувати координацію роботи світлофорних пристроїв. Під координацією розуміємо узгоджену роботу світлофорних об'єктів на магістралі міста з метою організації беззупинного проїзду транспортних засобів через суміжні перехрестя вулично-дорожньої мережі міста [218].

Прогресивний метод координації світлофорних циклів при будь-яких умовах планувальних структур (різні відстані між перехрестями), складі і розмірі потоків транспорту повинен забезпечувати безперервний рух. Складність методу полягає в тому, що при проектуванні прогресивної системи враховуються такі чинники: відстань між перехрестями; швидкості руху між

перехрестями; час прибуття транспорту до перехресть, обумовлений різними швидкостями руху в протилежних напрямках; інтенсивності ТП на магістралях.

Для організації координованого управління необхідне виконання наступних умов [219]:

- а) наявність не менше двох смуг для руху в кожному напрямку;
- б) однаковий цикл регулювання на всіх перехрестях, що входять в систему координації;
- в) відстань між сусідніми перехрестями не повинна перевищувати 800 м.

Перша умова пов'язана із необхідністю безпечного руху транспортних засобів із розрахунковою швидкістю і своєчасного їх прибуття до чергового перехрестя. Їх затримка в дорозі призводить до порушення процесу координації. При вузькій проїзній частині ймовірність затримки в дорозі підвищується, тому що ускладнено об'їзд можливих перешкод на дорозі (автомобілі, що зупинилися біля тротуару, пункти зупинок громадського транспорту та ін.).

Однаковий цикл регулювання світлофорами на всіх перехрестях забезпечує необхідну періодичність зміни сигналів, збереження розрахункового зсуву включення фаз, що дозволяють рух за маршрутом координації. Обмеження, що накладаються на довжину перегону, пов'язане з процесом групоутворення у транспортному потоці. Група автомобілів утворюється при роз'їзді черги, що сформувалася в очікуванні дозволяючого сигналу світлофора. На початку перегону безпосередньо за перехрестям, інтенсивність такої групи близька до величини потоку насичення. В процесі подальшого руху групи починається її розпад через різні обурюючі впливи, такі як: розкид швидкостей транспортних засобів, що складають цю групу, маневрування АТС, якість дорожнього покриття, метеорологічні умови. Тому основною проблемою при здійсненні координації дорожнього руху є формування груп автотransпортних засобів при русі їх по магістралі міста.

Для виявлення залежності взаємодії автотransпортних засобів в групі автомобілів при русі на перегоні магістралі проведено дослідження процесу утворення груп АТЗ у транспортному потоці. Опис схем процесу утворення й

розпаду груп автомобілів біля перехрестя полягає у наступному. При зеленому сигналі на головному напрямку, група АТЗ, що утворилася, розпадається з інтенсивністю  $N_1$ , що дорівнює величині потоку насичення  $M_1$ . Після розвантаження черги автомобілі проїжджають через перехрестя транзитом з інтенсивністю  $N_1'(t)$  до моменту включення жовтого сигналу  $g$ . Після цього відбувається аналогічний процес руху з протилежного напрямку, з характеристиками  $M_2$ ,  $N_2(t)$  та частки потоку, що повертає з другорядної дороги на перехресті –  $a_1$  та  $a_2$  відповідно за напрямками.

Прийmemo наступні позначення та припущення.

Середній час проїзду ( $\bar{\tau}$ ) перегону довжиною  $l$  із дисперсією  $\delta$  залежить лише від сумарної інтенсивності транспортного потоку на перегоні та реального часу проїзду ( $\tau$ ). Випадковий час руху по перегону розподілено за нормальним законом

$$f(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot e^{-\frac{(\tau-\bar{\tau})^2}{2\delta}}. \quad (4.1)$$

У цьому випадку зв'язок інтенсивності на вході ( $N_1$ ) і на виході перегону ( $N_1'$ ) можливо записати у вигляді

$$N_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} N_1'(t)(t-\tau) \cdot e^{-\frac{(\tau-\bar{\tau})^2}{2\delta}} dt. \quad (4.2)$$

Достовірність і статистична надійність отриманої залежності підтверджено у роботі [220].

Припускаємо, що час проїзду перегону не перевищує тривалості циклу. Тому будемо розглядати тільки ту частину потоків з обох напрямків, які потрапляють на перегін за час циклу. При вирішенні даного завдання вплив групи другорядного напрямку на розподіл автомобілів по перегону і розподіл



часу прибуття до наступного перехрестя не розглядається. Тоді вираз (4.2) буде мати вигляд

$$N_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot \int_0^t N'_1(t-\tau) \cdot e^{-\frac{(\tau-\bar{\tau})^2}{2\delta}} dt; \quad (4.3)$$

$$N_2(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot \int_0^{t-g} N'_2(t-\tau) \cdot e^{-\frac{(\tau-\bar{\tau})^2}{2\delta}} dt. \quad (4.4)$$

Наведено опис  $N'_1(t)$  и  $N'_2(t)$  у вигляді ступінчастих функцій

$$N'_1(t) = \begin{cases} M_1, & 0 < t \leq a_1 \\ N_1, & a_1 < t \leq g \\ 0, & g < t \leq T \end{cases}; \quad (4.5)$$

$$N'_2(t) = \begin{cases} M_2, & g < t \leq a_2 \\ N_2, & a_2 < t \leq T \\ 0, & t \leq g \end{cases}. \quad (4.6)$$

Означений процес руху наведено за допомогою ступінчастих функцій (рис. 4.3).

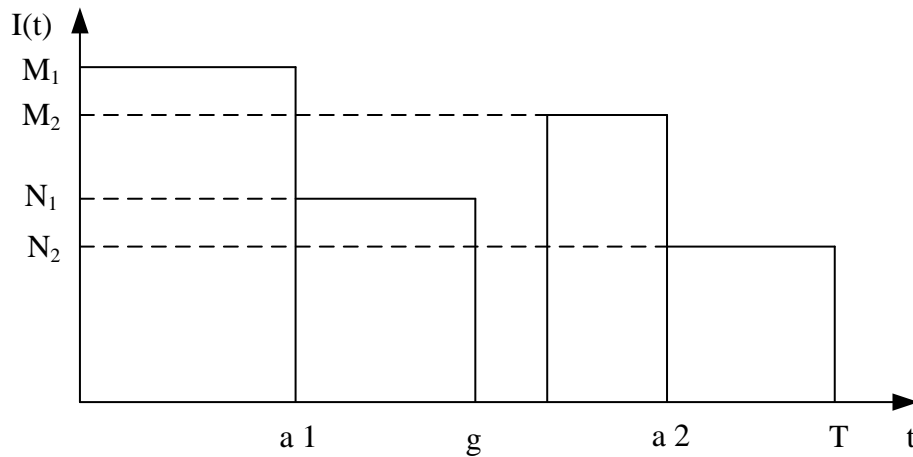


Рисунок 4.7 – Графік утворення груп АТЗ на перехресті

Ступінь ефективності координації може визначатися співвідношенням складових  $M$  і  $N$  в формулах (4.5) і (4.6).

Було розглянуто зміну значень  $N_1(t)$ ,  $N_2(t)$  на інтервалі  $g \leq t \leq T$ , тому як в момент  $g$  починається рух з перетинаючого (другорядного) напрямку і формується сумарна інтенсивність  $N_1(t) + N_2(t)$ .

Припускаємо, що розташовані групи не мають взаємного впливу один на одного, тобто процес дифузії обох груп автомобілів відбувається як би на окремих смугах, що можливо, виходячи з визначення магістралі. В цьому випадку сумарна інтенсивність  $N_1(t) + N_2(t)$  на будь-якому перетині перегону буде характеризувати «взаємопроникнення» груп. З урахуванням (4.5) і (4.6) співвідношення (4.3) і (4.4) приймуть наступний вигляд:

$$N_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \left( \int_{t-a_1}^{t-g} M_1 e^{-\frac{(\tau-\bar{\tau})^2}{2\sigma}} dt + \int_{t-g}^{t-a_1} N_1' e^{-\frac{(\tau-\bar{\tau})^2}{2\sigma}} dt \right); \quad (4.7)$$

$$N_2(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \left( \int_{t-a_2}^{t-g} M_2 e^{-\frac{(\tau-\bar{\tau})^2}{2\sigma}} dt + \int_0^{t-a_2} N_2 e^{-\frac{(\tau-\bar{\tau})^2}{2\sigma}} dt \right), & g < t \leq a_2 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_0^{t-g} M_2 e^{-\frac{(\tau-\bar{\tau})^2}{2\sigma}} dt, & a_2 < t \leq T. \end{cases} \quad (4.8)$$

Також, припустимо, що по даним підходам до перехрестя рух ідеально скоординовано, тобто до моменту включення зеленого сигналу на  $i$ -му напрямку на вхід перегону надходить група автомобілів з тимчасовою довжиною  $P_i(0)$  та інтенсивністю  $N_i$ . Тоді співвідношення (4.7) и (4.8) будуть виглядати таким чином

$$N_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{t-P_1(0)}^t N_1 e^{-\frac{(\tau-\bar{\tau})^2}{2\sigma}} dt, \quad g < t \leq P_1(0); \quad (4.9)$$

$$N_2(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_0^{t-g} N_2 e^{-\frac{(\tau-\bar{\tau})^2}{2\sigma}} dt, & g < t \leq P_2(0) \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{t-P_2(0)}^{t-g} N_2 e^{-\frac{(\tau-\bar{\tau})^2}{2\sigma}} dt, & P_2(0) < t \leq T. \end{cases} \quad (4.10)$$

Тоді інтервали між групами АТЗ при русі по перегону можливо визначити на підставі співвідношень

$$\begin{aligned} \Delta t_{1,2} &= g - P_1(0); \\ \Delta t_{2,1} &= T - g - P_2(0), \end{aligned} \quad (4.11)$$

де  $\Delta t_{ij}$  – часовий інтервал між групами з  $i$ -го  $j$ -го напрямків.

Такий підхід надає можливість визначення довжини перегону за умовою, при виконанні якої перехрестя функціонує як ізольоване [221].

На підставі отримання аналітичних залежностей процесу формування груп АТЗ при русі на прямолінійних ділянках ВДМ було визначено обмеження на довжину перегону, яка не буде впливати на розпад груп АТЗ, а навпаки - буде забезпечувати рівномірний рух по магістралі.

Отримано нерівність, що має вигляд

$$l \geq \max \left\{ 125 \cdot V \cdot \ln \frac{G}{P_1(0)}, 125 \cdot V \cdot \ln \frac{T - G}{P_2(0)} \right\}, \quad (4.12)$$

де  $G$  – тривалість зеленої фази циклу;

$V$  – середня швидкість потоку;

$T$  – період циклу;

$P_i(0)$  – часова довжина групи автомобілів на вході до  $i$ -го перегону;

$l$  – довжина перегону.

Тоді показником взаємодії груп автомобілів прямого і поворотного потоків може бути сумарне значення (4.7) і (4.8) в один і той же момент часу. У результаті проведених обчислень при різних комбінаціях значень параметрів умов руху на перегоні і параметрів циклу світлофорного регулювання за формулою (4.12) було визначено граничні значення довжини перегону, на якому інтервал часу між групами не перевищує середнього інтервалу між автомобілями в групі, тобто потік стає стаціонарним при певних параметрах перегону вулично-дорожньої мережі, що забезпечує сталий рух ТП, а розрахункова довжина перегону варіюється в інтервалі 170 – 1200 м.

Це має значення при організації ДР у центральних частинах міста при наявності прямокутного транспортного планування (стара частина міста), бо саме при такій схемі планування довжина перегонів складає до 200 м (наприклад, центральна частина м. Харків, Київський район міста).

При застосуванні діючих методів координації транспортних потоків здійснюється управління тільки тією частиною транспортних потоків, які

потрапляють на перегін за час циклу. У такій постановці завдання не розглядається вплив групи другорядного напрямку на розподіл автомобілів по перегону, що впливає на нерівномірність прибуття до наступного перехрестя чи можливість утворення черги перед перехрестям. В сучасних умовах функціонування мережі магістральних доріг великих міст існує проблема скупчення груп транспортних засобів перед перехрестями магістралей, які можуть впливати на рух основної «пачки» автотранспортних засобів по магістралі. Цей процес обумовлений недостатнім часом на розвантаження черги перед перехрестям у напрямку координації. Існуючі алгоритми визначення параметрів координованого управління транспортними потоками не дозволяють вирішити дану проблему [222].

Запропоноване рішення збереження режиму координації на контурі ВДМ базується на принципах координації, а саме на існуванні надмірного часу циклу на перехрестях магістралі і обмеженості ширини стрічки часу. Це визначає практичну можливість зміщення стрічки часу при побудові графіка координації уздовж осі часу в довільному напрямку в рамках основного такту світлофорного регулювання. Часовий інтервал, де може відбуватися зсув стрічки часу, регламентується лише як основний такт регулювання, при цьому положення стрічки часу в рамках інтервалу не розглядається. Даний факт не має істотного впливу на ефективність координації транспортних потоків в умовах малого завантаження магістральних вулиць рухом. Аналіз поточного стану завантаження ВДМ міст свідчить про збільшення інтенсивності транспортних потоків в «пікові» періоди до 80-100 % можливого потоку насичення (до моменту виникнення передзаторової ситуації).

Було виявлено, що в умовах руху щільного потоку необхідно визначати положення стрічки часу не тільки в області основного такту світлофора, але і розраховувати її положення щодо початку основного такту з урахуванням часу на розвантаження черги, що утворилася перед перехрестям у напрямку координації за попередній цикл світлофорного регулювання. Це можливо реалізувати шляхом зменшення інтервалу часу між закінченням руху «пачки»

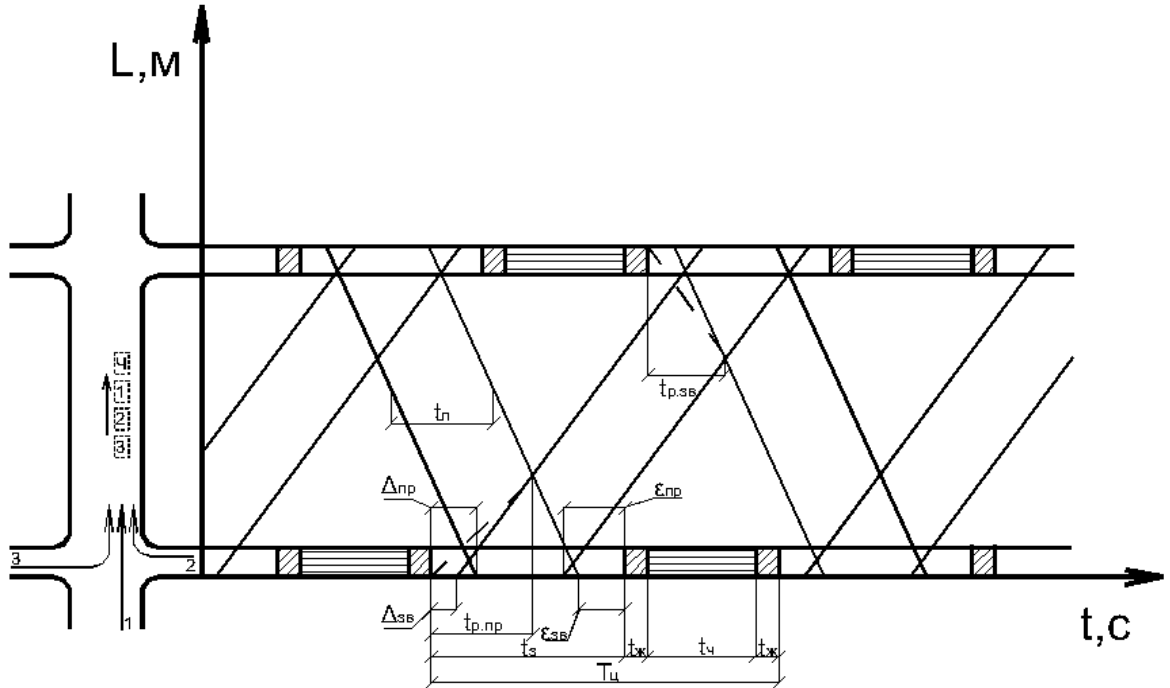
автотранспортних засобів через перехрестя і перемиканням основного такту світлофорного регулювання.

Існуючий підхід дозволяє визначити положення стрічки часу інженерно-інтуїтивним шляхом за критерієм забезпечення невпинного руху, а саме графоаналітичним методом визначають таке місце стрічки часу на графіку координації, щоб вона проходила через зелений сигнал світлофору в напрямку координації на всіх перехрестях ділянки координації. Цей факт надає можливість зсуву початку стрічки часу та основного такту світлофорного регулювання на одному або декількох перехрестях магістралі, що не дозволяє розвантажувати чергу перед перехрестями магістралі, ускладнює рух основний «пачки» автотранспортних засобів по магістралі із заданою рекомендованою швидкістю. При цьому відсутня можливість формалізації положення стрічки часу на графіку координації аналітичним шляхом [223].

Було розглянуто основні процеси організації координованого управління, а також параметри координації та їх взаємозв'язок. На рис. 4.8 наведено графік координації, що ілюструє черговість руху груп автотранспортних засобів (АТЗ) на перехресті магістралі, на якому позначено 4 групи руху АТЗ та основні часові параметри світлофорного регулювання:

- «1» група АТЗ, що рухаються в прямому напрямку по магістралі;
- «2» група АТЗ, які виїжджають на перегін магістралі із другорядного напрямку, виконуючи маневр правого повороту;
- «3» група АТЗ, що виїжджають на перегін магістралі із другорядного напрямку, виконуючи маневр лівого повороту;
- «4» група АТЗ, що виїжджають на перегін магістралі з черги перед перехрестям;
- $t_3$  – час зеленого сигналу світлофору;
- $t_ч$  – час красного сигналу світлофору;
- $t_ж$  – час жовтого сигналу світлофору, проміжний такт;
- $T_ц$  – час циклу світлофорного регулювання;

–  $t_{p,пр}$ ,  $t_{p,зв}$  – час розгону лідера групи АТЗ, що утворилася в результаті черги перед перехрестям магістралі, до рекомендованої швидкості руху по магістралі.



Умовні позначення:

— траєкторія руху лідера «пачки» АТЗ на магістралі;  
 - - - - - траєкторія руху лідера групи АТЗ, що утворили чергу перед перехрестям магістралі за час червоного та жовтого сигналів світлофора.

Рисунок 4.8 – Графік координації

При русі АТЗ на перехресті в напрямку координації першими на перегін потрапляють транспортні засоби, які стояли в черзі перед перехрестям до включення зеленого сигналу світлофора, далі продовжує рух транспорт, який прямує в прямому напрямку по магістралі, потім на перегін виїжджають право- й лівоповоротні потоки з другорядної дороги.

Математичний опис процесу утворення груп автомобілів на перегоні магістралі дозволяє визначити існуючий взаємозв'язок розподілу часу

основного такту між стрічкою часу та інтервалами зеленого сигналу світлофора до її початку і після її закінчення та має вигляд залежностей

$$\varepsilon_{зв} = t_0 - t_{л} - \Delta_{зв}; \quad (4.13)$$

$$\varepsilon_{пр} = t_0 - t_{л} - \Delta_{пр}, \quad (4.14)$$

де  $t_0$  – час основного такту в напрямку координації;

$t_{л}$  – ширина стрічки часу програми координації;

$\Delta_{пр}$  – інтервал часу від початку основного такту в напрямку координації до початку стрічки часу, яка визначає рух в прямому напрямку;

$\Delta_{зв}$  – інтервал часу від початку основного такту в напрямку координації до початку стрічки часу, яка визначає рух в зворотному напрямку;

$\varepsilon_{пр}$  – інтервал часу від закінчення стрічки часу, яка визначає рух в прямому напрямку, до закінчення основного такту в напрямку координації;

$\varepsilon_{зв}$  – інтервал часу від закінчення стрічки часу, яка визначає рух в зворотному напрямку, до закінчення основного такту в напрямку координації.

Після отримання математичного опису (4.13-4.14) було запропоновано при розробці плану координації враховувати можливість розвантаження черги перед перехрестям до моменту наближення першої «пачки» транспортних засобів, що рухаються по магістралі. Це можливо реалізувати шляхом зменшення інтервалу часу між закінченням руху «пачки» АТЗ через перехрестя і перемиканням основного такту світлофорного регулювання, а саме зменшенням значень  $\varepsilon_{пр}$  та  $\varepsilon_{зв}$ .

Визначення мінімально можливих значень  $\varepsilon_{пр}$  и  $\varepsilon_{зв}$  на етапі моделювання параметрів управління є доцільним як додаткових до опису процесу координації руху ТП на магістралі.



Фізичний сенс запропонованих параметрів та процесу оптимізації параметрів координації було пояснено на підставі графоаналітичної моделі координованого управління, де  $L$  – довжина магістралі,  $t$  – час руху (рис. 4.9).

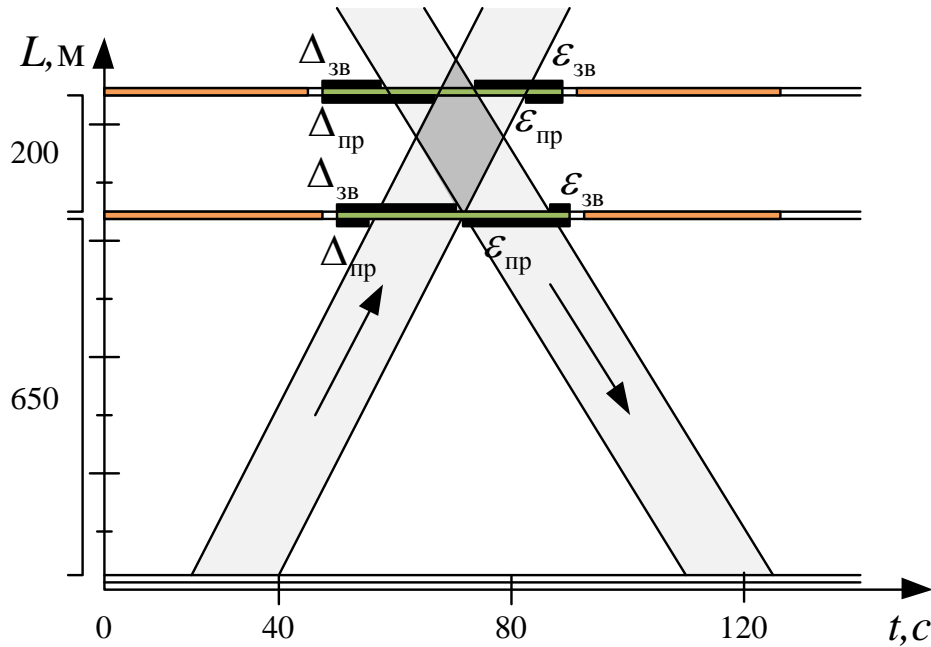


Рисунок 4.9 – Моделювання розподілу часу на перехрестях

На підставі (4.13) та (4.14) цільова функція оптимізації параметрів координації для контурного управління була отримана у вигляді системи цільових функцій:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{пр}}^i = t_0^i - t_{\text{л}} - \Delta_{\text{пр}}^i \rightarrow \min \\ \varepsilon_{\text{зв}}^i = t_0^i - t_{\text{л}} - \Delta_{\text{зв}}^i \rightarrow \min \end{cases}, \quad (4.15)$$

де  $i$  – номер перехрестя магістралі.

Систему обмежень сформовано на підставі визначення параметрів світлофорного регулювання та координованого управління, яка має наступний вигляд:

$$\Omega: \begin{cases} \Delta_{\text{пр}}^i \geq t_{\text{розв}}^{\text{пр } i} \\ \Delta_{\text{зв}}^i \geq t_{\text{розв}}^{\text{зв } i} \\ 0,25 \cdot T_{\text{ц}} \leq t_{\text{л}} \leq 0,4 \cdot T_{\text{ц}} \\ t_{\text{о}}^{\text{баз } i} \leq t_{\text{о}}^i \leq t_{\text{о}}^{\text{баз } i} + \Delta T_{\text{ц}} \end{cases}, \quad (4.16)$$

де  $t_{\text{розв}}^{\text{пр } i}$ ,  $t_{\text{розв}}^{\text{зв } i}$  – час розвантаження черги транспортних засобів перед перехрестям у напрямку координації у прямому і зворотному напрямках руху по магістралі;

$t_{\text{о}}^{\text{баз } i}$  – час основного такту дозволяю чого сигналу світлофору у напрямку координації до введення координованого управління;

$\Delta T_{\text{ц}}$  – зміна часу циклу світлофорного регулювання при введенні координованого управління.

Таким чином, з урахуванням (4.14)-(4.15) формалізована задача визначення оптимальної довжини стрічки часу, що збільшує час дозволяючої (зеленої) фази світлофорного регулювання.

На підставі проведеного аналізу найбільш прогресивних методів управління транспортними потоками, показників якості управління та відповідних параметрів, було отримано математичний опис задачі умовної оптимізації параметрів координованого управління. Сформульована задача оптимізації дозволяє отримати умовні екстремуми функції та визначити параметри координованого управління, для зменшення затримок транспортних засобів на перехрестях магістралі.

Це сприяє розв'язанню проблеми стратегічного управління, а саме проблеми підвищення ефективності використання часу дозволяючих сигналів світлофорів задля руху на перетинах ВДМ з метою зменшення транспортних затримок і забезпечення пропускної спроможності. Отриманий результат буде застосовано при моделюванні параметрів контурного управління транспортними потоками ВДМ міста.

## 4.2 Формалізація процесу контурного управління транспортними потоками на ВДМ міста

Задачу контурного управління транспортними потоками було формалізовано з математичної точки зору, при виконанні умов координації:

– сформульовано мету управління – визначено в аналітичному вигляді функціонал, який обрано критерієм якості управління;

– визначено систему обмежень, що відображає діапазон зміни параметрів об'єкта управління;

– визначено обмеження параметрів, що характеризують вулично-дорожню мережу, режим світлофорного регулювання і координоване управління рухом, які забезпечують і не порушують можливі стани системи управління.

Модель узгодженого програмного координованого управління в аналітичному вигляді представлено відношенням

$$A = f(t, x, R), \quad (4.17)$$

де  $A$  – програма координації;

$t$  – час доби;

$x$  – функція початкових характеристик транспортного потоку і умов руху;

$R$  – функціонал характеристик управляючих впливів системи світлофорних об'єктів на магістралі.

Програму координації надамо, як багатомірний вектор, компонентами якого є параметри транспортних потоків і дорожніх умов руху. Функція характеристики транспортного потоку і умов руху має вигляд

$$x = f(N_{ij}, V, B_{пч}, t), \quad (4.18)$$

де  $N_{ij}$  – інтенсивність руху транспортного потоку у  $j$ -му напрямку на  $i$ -му перехресті магістралі (авт/год);

$V$  – рекомендована швидкість транспортного потоку на магістралі (км/год);

$B_{пч}$  – ширина проїзної частини магістралі (перехрестя і перегону) (м).

Одним із прямих засобів визначення ефективності розрахункових програм координованого управління транспортними потоками є визначення часових затримок транспортних засобів при проїзді по перехрестях магістралі.

Затримку транспортних засобів на перехрестях магістралі в загальному вигляді ( $\mu$ ) було визначено функціоналом, який залежить від початкових характеристик транспортного потоку, умов руху і керуючих впливів системи світлофорних об'єктів на магістралі

$$\mu = \sum_{i=1}^h y^i(x, R) , \quad (4.19)$$

де  $h$  – кількість регульованих перехресть магістралі;

$y^i$  – функція, що визначає затримку транспортних засобів на  $i$ -му перехресті магістралі.

З огляду на умови розглянутої задачі, зниження затримок транспортних засобів на магістралі при координованому управлінні, було виявлено як найменше можливе значення функції затримок при наявності умов, за яких ці значення будуть досягатися. Ця задача вирішується за допомогою методів оптимізації [163].

Тоді цільова функція може бути визначена із співвідношення (4.19) і мати наступний вигляд

$$\sum_{i=1}^h y^i(x, R) \rightarrow \min_{x, R \in \Omega} , \quad (4.20)$$

де  $\Omega$  – площина допустимих значень параметрів оптимізації.

Граничні умови, що визначають  $\Omega$ , поширюються на функції, які характеризують параметри транспортного потоку, умови руху і функціонування технічних засобів регулювання дорожнього руху:

- $R$  – функціонал характеристик керуючих впливів, до яких належать:
- $t_0^i(x_1^i)$  – час основних тактів  $i$ -го світлофорного об'єкта;
- $t_n^i(x_2^i)$  – час проміжних тактів  $i$ -го світлофорного об'єкта;
- $t_k^i(x_3^i)$  – тривалість фаз управління  $i$ -го світлофорного об'єкта;
- $t_{\text{ц}}^i(x_4^i)$  – час циклу світлофорного регулювання  $i$ -го світлофорного об'єкта;
- $Z^i(t)$  – послідовність фаз у циклі світлофорного регулювання  $i$ -го світлофорного об'єкта у момент часу  $t$ ;
- $\varphi^i(x_5^i)$  – зсув включення фаз світлофорного регулювання  $i$ -го світлофорного об'єкта;
- $V$  – швидкість транспортного потоку;
- $B_{\text{пч}}$  – ширина проїзної частини.

Тоді багатовимірний вектор параметрів координованого управління має вигляд

$$\bar{R} = \left\{ N_{ij}, t_0^i, t_n^i, t_k^i, t_{\text{ц}}^i, Z^i, \varphi^i, V, B_{\text{пч}} \right\}. \quad (4.21)$$

Сформовані граничні умови задачі оптимізації при двохсторонній обмеженості параметрів мають вигляд

$$\Omega: \bar{R}^+ \leq \bar{R} \leq \bar{R}^{++}. \quad (4.22)$$

Граничні умови параметрів оптимізації можливо отримати шляхом розрахунку за значеннями параметрів транспортного потоку, при цьому

розмірність даної задачі складає  $h \times l$  ( $h$  – кількість регульованих перехресть магістралі,  $l$  – розмірність вектора  $\bar{R}$ ).

ВДМ сучасного мегаполісу містить магістралі, де можлива реалізація постійної швидкості руху при відповідних керуючих параметрах. Ці ділянки поєднані перехрестями. Точки перетину ділянок відповідно, належить до вузлових перехресть міста. У роботі вирішена задача координації світлофорних пристроїв на перехрестях контуру мережі.

Для вирішення завдання координації роботи світлофорних пристроїв при вирівнюванні швидкості руху транспортних засобів на магістралях контура ВДМ було розроблено імітаційну модель визначення параметрів рівномірного руху АТЗ.

Вхідні параметри моделювання обираються на підставі отриманих результатів побудови геоінформаційної моделі ВДМ (рис. 2.16):

- $n$  – кількість перехресть;
- $m$  – кількість перегонів;
- $X_k, Y_k$  – координати  $k$ -го перехрестя на площині,  $k = 1, \dots, n$ ;
- $L_{EW_k}, L_{NS_k}$  – лінійні розміри перехрестя по горизонталі (зі сходу на захід) і вертикалі (з півночі на південь);
- $N$  – інтенсивність транспортних потоків на підходах до перехрестя;
- $C_{H_j}, C_{K_j}$  – індекс початку та закінчення  $j$ -го перегону,  $j = 1 \dots n$ ;
- $\alpha$  – коефіцієнт кривизни перегону;
- $l_{CH-CK}, l_{CK-CH}$  – кількість смуг руху на перегоні в обох напрямках;
- $V_b_{CH-CK}, V_b_{CK-CH}$  – базові швидкості руху транспортних засобів на перегоні.

В процесі моделювання проводиться розрахунок коефіцієнта насичення у напрямку на підході до перехрестя ( $M_k$ ), значення якого залежить від геометричних параметрів перехрестя і перегону ( $y_k$ ) та має вигляд:

$$M_k = \begin{cases} 0, r_i = 0 \\ \sum_{j=1}^4 N_{kij} \cdot \left(1 + \frac{6}{L_{EWk} + L_{NSk}}\right) \cdot \frac{1}{1800}, \\ r_i \neq 0 \wedge l(k,i) = 1 \\ \sum_{j=1}^4 N_{kij} \cdot \left(1 + \frac{6}{L_{EWk} + L_{NSk}}\right) \cdot \frac{1}{3000}, \\ r_i \neq 0 \wedge l(k,i) = 2 \end{cases}, \quad (4.23)$$

де  $l(k,i)$  – допоміжна функція, значення якої дорівнює кількості смуг з боку  $i$ -го в'їзду до  $k$ -го перехрестя;

$r_i$  – ознака наявності смуг з боку  $i$ -го в'їзду на перехрестя.

Поточний або мінімально необхідний час світлофорного циклу на ділянці мережі в локальному режимі визначаємо на підставі значення суми проміжних тактів і максимальних значень коефіцієнта насичення напрямків по фазах

$$T_{\min} = \frac{1,5T_{\Pi} + 5}{1 - y_{13} - y_{24}} \leq 120, \quad (4.24)$$

де  $T_{\Pi}$  – сума проміжних тактів;

$y_{13} = \max(y_1; y_3)$  – максимальне значення коефіцієнта насичення в напрямку схід-захід (за геоінформаційною моделлю ВДМ);

$y_{24} = \max(y_2; y_4)$  – максимальне значення коефіцієнта насичення в напрямку північ-південь.

На наступному етапі розраховували основні такти світлофорного регулювання. Розрахунок циклу світлофорного регулювання проводили для двофазного режиму функціонування:

$$T_{\min 13} = (T_{\min} - 2T_{\Pi}) \frac{y_{13}}{y_{13} + y_{24}}; \quad (4.25)$$

$$T_{\min 24} = (T_{\min} - 2T_{\Pi}) \frac{y_{24}}{y_{13} + y_{24}} . \quad (4.26)$$

Перевірка:

$$T_{\min 13} + T_{\Pi} + T_{\min 24} + T_{\Pi} = (T_{\min} - 2T_{\Pi}) \frac{y_{13} + y_{24}}{y_{13} + y_{24}} + 2T_{\Pi} = T_{\min} . \quad (4.27)$$

Період регулювання руху по контуру мережі обрано, як максимальний цикл світлофорного регулювання на контурі ВДМ

$$T_{\max} = \max(T_k) . \quad (4.28)$$

Для реалізації контурного управління потрібно визначити швидкість руху транспортних засобів на кожному перегоні магістралі, виходячи з розрахункового часу проїзду перегону

$$V = \frac{3,6L}{\Delta t + zT_{\max}} , \quad (4.29)$$

де  $\Delta t$  – час руху по перегону;

$z$  – ціле число.

Визначений баланс часу світлофорного регулювання на магістралях відповідає різниці між значеннями максимального циклу світлофорного регулювання по мережі і циклом регулювання в локальному режимі на певному перехресті ( $T_i$ )

$$B_{k_i} = T_{\max} - T_{\min i} . \quad (4.30)$$

Тоді до керуючих параметрів руху по контуру ВДМ відносяться:



- $O_k$  – зсув часу включення світлофорного об'єкту на  $k$ -м перехресті (с);
- $B_k$  – баланс часу між командним циклом світлофорного регулювання та світлофорним циклом на  $k$ -м перехресті;
- $V_{CH-CK}$ ,  $V_{CK-CH}$  – швидкості руху транспортних засобів на даному перегоні, для забезпечення беззупинного проїзду (км/год).

Організацію контурного управління транспортними потоками на елементах ВДМ для забезпечення рівномірного руху автотранспортних засобів по сусідніх перегонах контуру було формалізовано наступним чином. Для визначення часу руху по перегону  $\Delta t_{CH-CK}$  за умовою пропорційності часу прибуття АТЗ на перехрестя контуру ВДМ отримали залежність

$$\Delta t_{CH-CK} = t_{CK} - t_{CH} + zT_{\max} . \quad (4.31)$$

Тоді швидкість руху визначили відношенням

$$V_{CH-CK} = \frac{3,6L_{CH-CK}}{\Delta t_{CH-CK} + zT_{\max}} . \quad (4.32)$$

Для реалізації задачі контурного управління розроблено комп'ютерну модель визначення керуючих параметрів процесу руху транспортних потоків на контурі вулично-дорожньої мережі [18].

Отримана формалізація задачі контурного управління ТП на мережі магістралей міста доводить, що відмінною особливістю запропонованого контурного управління є застосування балансу циклів світлофорного регулювання (змінюється в межах  $[0; 1]$ ) та процесу розподілу надлишкового часу світлофорного циклу, який визначається шляхом вирішення задачі оптимізації керуючих параметрів за критерієм вирівнювання швидкостей руху на сусідніх перегонах контуру ВДМ міста.

Для налаштування світлофорів транспортної мережі для практичної реалізації на кожному перехресті поставлено у відповідність два параметри:

1) зсув фаз – це час між включенням дозволяючого сигналу в північно-південному напрямку від командного світлофора до включення дозволяючого сигналу в тому ж напрямку наступного світлофора на магістралі. У гіперпросторовій моделі цей параметр має нормований вигляд (вимірюється від 0 до 1), тобто як частка від  $T_{\max}$ ; 2) баланс часу циклів світлофорного регулювання на перехрестях визначається як коефіцієнт, що визначає тривалість включення дозволяючого сигналу в напрямку північ-південь, також вимірюється від 0 до 1. Якщо баланс для даного світлофорного циклу дорівнює 0, то час включення дозволяючого сигналу в північно-південному напрямку дорівнює мінімальному значенню, а в західно-східному – дорівнює часу, що залишився, тобто  $T_{\max} - T_{13} - 2T_{II}$ . Якщо ж баланс дорівнює 1, то навпаки – час включення дозволяючого сигналу в північно-південному напрямку максимальний, а в західно-східному - мінімальний. Фактично такий підхід визначає, яким чином розподіляється різниця між максимальним циклом транспортної мережі і поточним циклом даного перехрестя. Тобто, якщо максимальний цикл на мережі 100 с, а за формулами (4.25-4.27) були отримані значення дозволяючих сигналів 30 с і 35 с, то мінімальний цикл світлофорного регулювання дорівнює  $30 + 35 + 3 + 3 = 71$  с. Оскільки світлофор повинен працювати в загальному циклі, то залишок 29 с було розділено для збільшення тривалості його дозволяючих фаз регулювання. Час в секундах (29 с) множиться на баланс (нормоване число від 0 до 1) і додається до тривалості фази у північно-південному напрямку. Потім 29 с множиться на  $(1-B)$  і додається до тривалості фази у західно-східному напрямку.

Для системи управління ДР такий підхід було реалізовано методами багатопараметричної оптимізації у розробленому програмному середовищі, етапи якого наведено на рис. 4.10 [15].

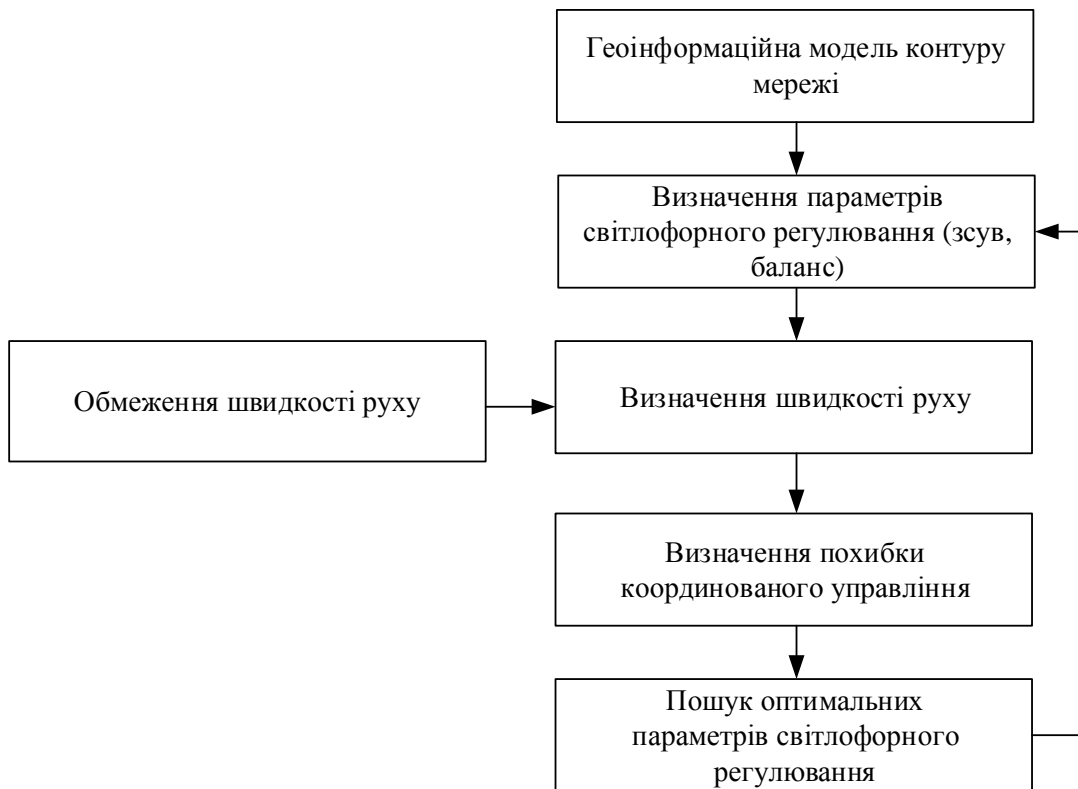


Рисунок 4.10 – Етапи визначення параметрів контурного управління на ВДМ

Процес забезпечення рівномірного режиму руху автотранспортних засобів на мережі магістралей міста досягається шляхом визначення параметрів координації роботи технічних засобів регулювання дорожнього руху з урахуванням параметрів транспортного потоку і елементів вулично-дорожньої мережі міста. Параметри управління на мережі магістралей міста можна умовно розділити на три групи: параметри вулично-дорожньої мережі, параметри транспортного потоку і керуючі параметри моделі. Параметри елементів вулично-дорожньої мережі приймаємо як незмінні. Точність параметрів ВДМ визначається виключно інструментальною із суб'єктивною похибкою вимірювань. Було припущено, що точність визначення параметрів вулично-дорожньої мережі істотного впливу на ефективність управління дорожнім рухом не має.

Визначення поточних параметрів транспортного потоку є завданням складним і трудомістким. Дані інтенсивності і швидкості транспортного потоку, які були отримані відомими методами вимірювання або натурних спостережень,

також мають інструментальну та суб'єктивну похибку. В окремих випадках можливий прояв методичної похибки. Застосування сучасних методів і способів вимірювання параметрів транспортного потоку, заснованих на моніторингу ДР, відеоспостереженні і розпізнаванні образів, впливає на підвищення точності визначення керуючих параметрів дорожнього руху, однак вимог до вибору методу їх визначення немає, тому як вихідні дані параметрів транспортного потоку, отримані в online режимі, вимагають узагальнення до середньогодинних значень.

Результати імітаційної моделі отримано у вигляді діаграм координації параметрів контурного управління ТП по перегонах частини м. Харків з урахуванням положення стрічки часу та розрахунку циклів світлофорного регулювання на контурі ВДМ. Отримані діаграми, наведені у Розділі 6, свідчать про реалізацію безупинного та рівномірного руху ТП по контуру частини ВДМ м. Харків.

При цьому, реалізація контурного управління на ВДМ міста вимагає інформування водія щодо рекомендованої швидкості руху та змін в схемах організації дорожнього руху за напрямками на маршрутах руху. Тому потрібно реалізувати на ВДМ установку керованих дорожніх знаків із відображенням рекомендованої швидкості руху транспортного потоку на поточній ділянці контуру магістралей ВДМ.

#### 4.3 Оптимізація параметрів контурного управління дорожнім рухом у містах

Для отримання параметрів світлофорного регулювання рівномірного руху на мережі було вирішено завдання оптимізації з обмеженнями. Цільова функція визначена як сума квадратів відхилень реальної швидкості на перегоні ( $R_j$ ) від розрахованого значення швидкості ( $T_j$ ) або від швидкості руху на суміжному перегоні. Тоді область обмеження параметрів оптимізації визначає допустимий

інтервал зміни параметрів в множині значень кожного з параметрів, а критерій оптимізації має вигляд

$$\sum_{j=1}^m (D_j - F_j)^2 \rightarrow 0 ; \quad (4.33)$$

$$D_j = \begin{pmatrix} a_1 \cdot V_{C_H-C_K}^j \\ a_2 \cdot V_{C_K-C_H}^j \\ a_3 \cdot V_{C_H-C_K}^j \\ a_3 \cdot V_{C_K-C_H}^j \end{pmatrix} \quad (4.34)$$

$$F_j = \begin{pmatrix} a_1 \cdot V_{b,C_H-C_K}^j \\ a_2 \cdot V_{b,C_K-C_H}^j \\ a_3 \cdot V_{C_H-C_K}^{j-1} \\ a_3 \cdot V_{C_K-C_H}^{j-1} \end{pmatrix} \quad (4.35)$$

де  $V_{C_K-C_H}^j$  – швидкість у напрямку  $C_K - C_H$  на  $j$ -му перегоні,  $j = 1, \dots, m$ ;

$V_{C_H-C_K}^j$  – швидкість у напрямку  $C_H - C_K$  на  $j$ -му перегоні,  $j = 1, \dots, m$ ;

$V_{b,C_K-C_H}^j$  – розрахована швидкість, що вимагається у напрямку  $C_K - C_H$  на  $j$ -му перегоні,  $j = 1, \dots, m$ ;

$V_{b,C_H-C_K}^j$  – розрахована швидкість, що вимагається у напрямку  $C_H - C_K$  на  $j$ -му перегоні,  $j = 1, \dots, m$ ;

$V_{C_K-C_H}^{j-1}$  – швидкість у напрямку  $C_K - C_H$  на  $(j-1)$ -му перегоні;

$V_{C_H-C_K}^{j-1}$  – швидкість у напрямку  $C_H - C_K$  на  $(j-1)$ -му перегоні;

$C_H, C_K$  – індекс початку та закінчення перегону;

$m$  – кількість перегонів на досліджуваній мережі магістралей міста;

$a_1$  – ознака наявності умови вирівнювання розрахункової швидкості в напрямку  $C_H - C_K$ ;

$a_2$  – ознака наявності умови вирівнювання розрахункової швидкості в напрямку  $C_K - C_H$ ;

$a_3$  – ознака наявності умови вирівнювання швидкості на суміжних перегонах.

Розмірність задачі оптимізації ( $Z$ ) визначається на підставі кількості перехресть на мережі магістралей, що мають цикл світлофорного регулювання менш ніж максимальний, який обирається однакою для усіх перехресть мережі магістралей:

$$Z = 2n - k_{\max}, \quad (4.36)$$

де  $n$  – кількість перехресть з розрахунковим часом циклу менш ніж максимальний;

$k_{\max}$  – кількість перехресть з розрахунковим часом циклу, що дорівнює максимальному.

При формалізації задачі оптимізації та визначенні цільової функції було застосовано параметр координації – баланс циклу світлофорного регулювання (4.30). Тоді до керуючих параметрів рухом на контурі магістралей належать:

- $O_k$  – зсув часу включення світлофорного об'єкту на  $k$ -м перехресті;
- $B_k$  – баланс циклу на  $k$ -м перехресті;
- $V_{C_H - C_K}, V_{C_K - C_H}$  – швидкості руху транспортних засобів на даному перегоні у прямому та зворотному напрямках.

Обраний метод оптимізації вимагає нормування параметрів оптимізації в інтервалі  $[0; 1]$ . Визначення оптимальних параметрів зсуву ( $O_k$ ) фаз світлофорного регулювання на перехрестях і балансу циклів світлофорного регулювання проводили на підставі наступних співвідношень:

$$O_k = H_{0,x} \cdot T_{\max}; \quad (4.37)$$

$$B_k = H_{0,x+1} , \quad (4.38)$$

де  $H_{0,x}$  – елементи матриці гіперпросторових точок на поточному етапі моделювання.

Для вирішення поставленої задачі оптимізації було обрано метод прямого пошуку. Для обґрунтування застосування методу розв'язання задачі мінімізації відмінності швидкості руху АТЗ з обмеженнями розглянемо особливості обраного класу методів оптимізації. У методах прямого пошуку мінімуму цільової функції використовується інформація тільки про значення досліджуваної функції. Методи прямого пошуку не мають строгого теоретичного обґрунтування і побудовані на основі евристичних міркувань. Застосування даних методів для мінімізації цільової функції дозволяє мати лише можливість визначення значень функції в будь-якій точці області її визначення. Саме це надає можливість ефективного застосування методів прямого пошуку оптимуму функції в автоматичному режимі вирішення задачі. Найбільш поширеним способом оцінки ефективності методів прямого пошуку є обчислювальний експеримент, в результаті якого визначається час виконання завдання і його відповідність вимогам дослідження.

Для вирішення завдання оптимізації було обрано метод Нелдера-Міда, який відноситься до пошукових методів оптимізації. Особливість методу Нелдера-Міда полягає у використанні довільного (нерегулярного) симплекса, який отримують шляхом розширення або стискання симплекса в залежності від того, як оцінюється попередній крок пошуку мінімуму досліджуваної функції [224]. У загальному вигляді обраний метод прямого пошуку відноситься до симплексних методів оптимізації. Алгоритм симплексного пошуку полягає у наступному: в вершинах симплекса обчислюють значення функції, що мінімізується, потім вершину з найбільшим значенням функції замінюють за певним правилом новою вершиною, утворюючи тим самим новий симплекс.

Далі процедура повторюється до закінчення заданої кількості ітерацій, або до виконання умов досягнення необхідного мінімуму функції.

Принцип роботи більшості методів оптимізації ґрунтується на аналізі значень функцій в області поточної точки та її пересування в бік зменшення функції. Типовим прикладом є метод покоординатного спуску, у якому поточна точка переміщується паралельно до осей, напрямком руху при цьому залежить від того, в позитивному чи негативному напрямку осі функція зменшується. У більш складних алгоритмах градієнтних методів оптимізації необхідно пересувати поточну точку в бік максимального зменшення функції.

Але подібні методи мають один загальний недолік – при їх застосуванні висока ймовірність отримання локального мінімуму. Так, якщо функція змінюється, як наведено на рис. 4.11, то результат роботи градієнтного методу залежить від місця розташування початкової точки, оскільки для точки А основним напрямком руху буде негативний напрямок щодо осі X, а для точки В – позитивний.

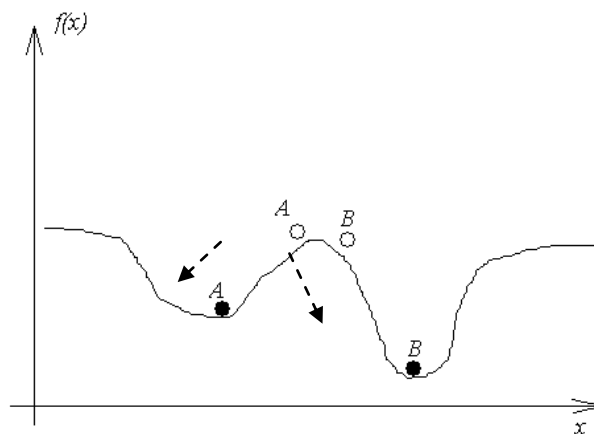


Рисунок 4.11 – Ілюстрація визначення глобального і локального мінімуму градієнтним методом оптимізації

Тому, якщо початковою точкою роботи градієнтного методу була точка А, то буде визначений локальний мінімум, а якщо точка В – тоді глобальний. Отже, оптимальне значення  $f(x)$  буде знайдено тільки для початкових точок, які



мають місце справа від точки В (рис. 4.12) та відповідає 50 % ймовірності визначення глобального мінімуму.

Результат визначення глобального мінімуму із заданою точністю досягається тільки при використанні методу прямого перебору, в якому ділянка функції  $f(x)$  розділяється на відрізки, довжина яких залежить від точності результату, і в кожній точці відрізка обчислюється значення функції, після чого визначається мінімальне з них. Однак метод прямого перебору вимагає великої кількості обчислень функції, що зростає в експоненційній залежності від розмірності задачі. Наприклад, для пошуку глобального мінімуму в тривимірній задачі всередині нормованого куба зі стороною 1 і точністю  $10^{-3}$  необхідно розподілити кожену сторону на  $10^3$  відрізків та вирахувати значення функції  $(10^3)^3 = 10^9$  разів. Якщо на кожне обчислення функції потрібно 0,5 с машинного часу, то процес вирішення задачі оптимізації буде тривати 15 років. Саме тому методи прямого пошуку не надають очікуваного результату.

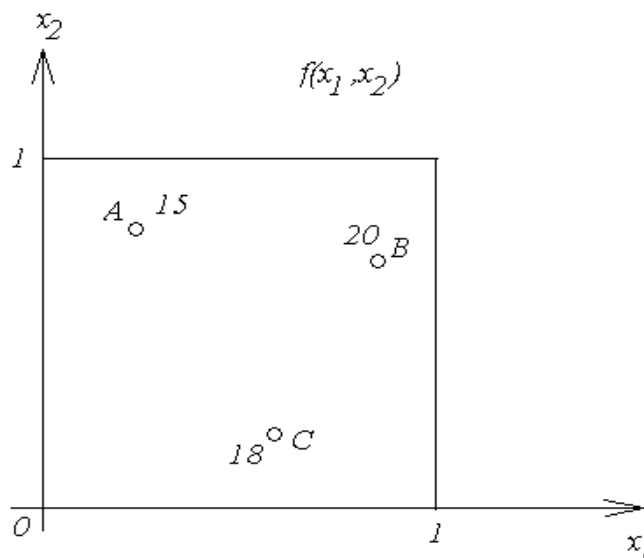


Рисунок 4.12 – Початкове положення точок на площині  $x_1 - x_2$

Виявлено метод комплексу, що поєднує два основних принципи розв'язання задачі оптимізації: охоплення всього діапазону аргументів функції, та аналіз значень функції при визначенні напрямку руху або необхідної області для наступної ітерації процесу оптимізації.

Визначено, що принцип роботи алгоритму для двомірної задачі оптимізації, яка надається у вигляді визначення мінімуму функції двох аргументів  $f(x_1; x_2)$  у нормованих межах зміни аргументів  $x_{1,2} \in [0;1]$ , полягає у наступному.

Було розглянуто випадок, коли на всій площині області аргументів  $x_{1,2} \in [0;1]$ , точки А, В і С розподіляються у випадковому порядку (рис. 4.12).

Кожна точка має двокоординатний опис –  $x_{1,2} \in [0;1]$ , отже, в кожній точці визначаємо значення функції  $f(x_1; x_2)$ . В даному випадку  $f(A)=15; f(B)=20; f(C)=18$ . При цьому обирали точку, в якій функція має мінімальне значення, зокрема, на рис. 4.13 це точка А. Отже, при подальших дослідженнях діапазону  $x_{1,2} \in [0;1]$  в області точки А було зроблено переміщення точок В і С. Математичні перетворення координат проведено на підставі аналітичних виразів:

$$\begin{aligned} x_{B1} &= x_A + (x_B - x_A) \cdot \beta \\ x_{C1} &= x_A + (x_C - x_A) \cdot \beta \end{aligned} \quad (4.39)$$

де  $\beta \in (0;1)$ .

В окремих випадках  $\beta=0$  крапки переміщуємо в напрямку А, при  $\beta=1$  точки залишаються в початкових координатах, при  $\beta=0,5$  точки переміщуємо на середину відрізків АВ і АС (рис. 4.13).

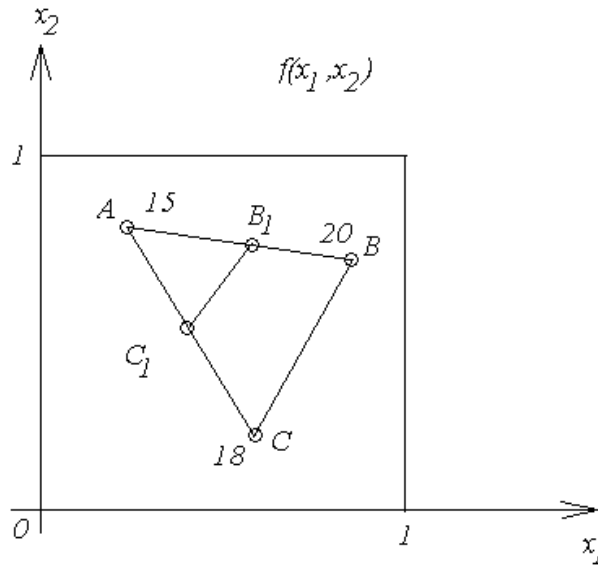
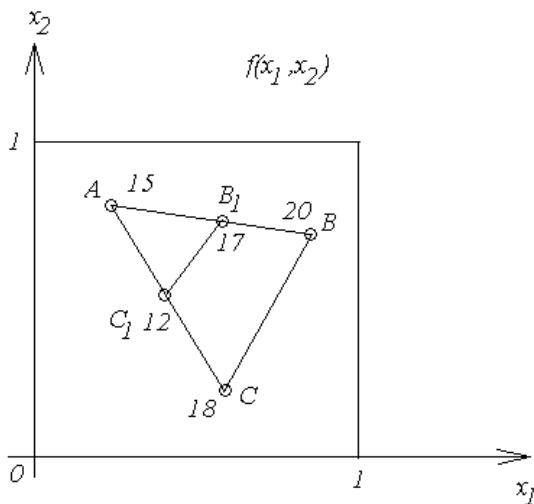


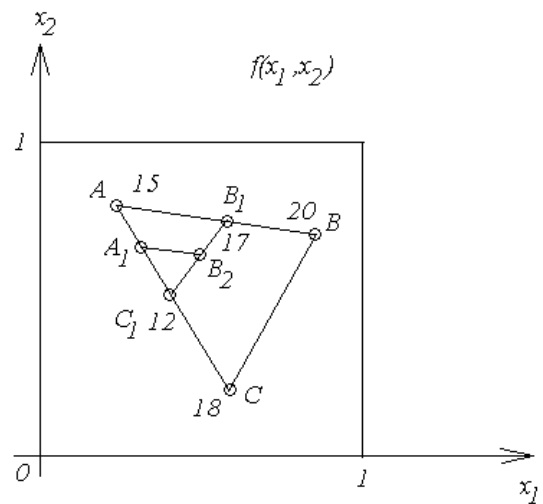
Рисунок 4.13 – Схема переносу точок у випадку  $\beta=0,5$

Для більш детального дослідження діапазону  $x_{1,2} \in [0;1]$  приймаємо значення  $\beta$ , які наближаються до 1, тобто  $\beta = 0,9$ . При цьому точки  $B_1$  і  $C_1$  знаходяться ближче до  $A$ , ніж  $B$  і  $C$  відповідно.

Тоді визначимо значення функції у нових точках  $B_1$  і  $C_1$  (рис. 4.14 а). Поетапне переміщення крапок відповідно відображено на рис. 4.14 б.



а) – перший етап



б) – другий етап

Рисунок 4.14 – Процес переміщення крапок для визначення оптимальної області

Таким чином, при кожному переміщенні крапок максимальні розміри області, що досліджується, зменшуються за рахунок множення їх на  $\beta$ . Якщо початковий набір крапок був розподілений всередині простору  $x_{1,2} \in [0;1]$ , то після першої ітерації весь набір точок буде розташований у квадраті зі стороною  $\beta$ , після другої – зі стороною  $\beta^2$  тощо. Таким чином, через  $n$  ітерацій усю безліч крапок буде розташовано в квадраті зі стороною  $\beta^n$ , яке може бути яким завгодно малим числом.

Для визначення необхідної точності оптимізації  $\varepsilon$  та розміру отриманої області зміни параметрів оптимізації було визначено кількість ітерацій ( $n$ ) у процедурі оптимізації, а саме:

$$\beta^n = \varepsilon^{-1} . \quad (4.40)$$

Тоді

$$n = -\frac{\ln \varepsilon}{\ln \beta} . \quad (4.41)$$

Тобто можливо стверджувати, що у результаті проведення  $n$  ітерацій з високою ймовірністю буде визначено глобальний мінімум функції  $f(x_1; x_2)$  на нормованому діапазоні  $x_{1,2} \in [0;1]$ . Імовірність визначення глобального (а не локального) мінімуму залежить від кількості крапок на площині оптимізації та від величини  $\beta$ .

Аналогічно як для функції двох аргументів, метод оптимізації придатний для функції будь-якої кількості аргументів. У загальному вигляді таку функцію можливо навести як  $f(\bar{x})$ , де  $\bar{x} = (x_1; x_2; x_3 \dots x_n)$ ,  $n$  – кількість аргументів.

Під функцією у процедурі оптимізації може розумітися будь-яка математична, аналітична залежність або складний алгоритм, зі збереженням

основного принципу: кожному набору аргументів  $\bar{x} = (x_1; x_2; x_3 \dots x_n)$  відповідає єдине число, яке відповідає значенню функції  $f(\bar{x})$ . При цьому функція може бути складною або у вигляді алгоритму, що оцінює ефективність руху АТЗ в залежності від параметрів світлофорних циклів.

Для отримання результату за обраним методом необхідно виконання умови, що усі аргументи  $\bar{x} = (x_1; x_2; x_3 \dots x_n)$  знаходяться всередині куба із нормованими значеннями сторін,  $x_i \in [0;1]$ .

Таким чином, чим більше значення функції  $f(\bar{x})$ , тим нижче ефективність координованого руху, а результатом застосування обраного методу оптимізації є пошук набору аргументів  $\bar{x} = (x_1; x_2; x_3 \dots x_n)$ , для якого  $f(\bar{x}) = 0$ .

Отримали опис формування складної функції  $f(\bar{x})$  для оптимізації наступним чином. В якості аргументів було застосовано баланс часу дозволяючого і забороняючого сигналу для всіх світлофорів (змінюється від 0 до 1), а також зсув фаз по відношенню до циклу командного світлофора ( $0 \leq T_{\max} \leq 120$  с). Оскільки баланс часу є нормованою величиною, то до аргументу функції  $f(\bar{x})$  він належить безпосередньо, а зсув фаз світлофорного регулювання необхідно розділити на  $T_{\max}$ , щоб отримати нормовану величину для виконання першої умови.

Динамічна зміна форми симплекса дозволяє проводити процес адаптації отриманої конфігурації симплекса до виду графіка оптимізаційної функції. Для реалізації обраного методу оптимізації керуючих параметрів контурного управління було розроблено загальну схему процесу оптимізації (рис. 4.15), яка є адаптованою для застосування у складі СУДР у містах.

Алгоритм Нелдера-Міда відноситься до методів нульового порядку, тобто не вимагає диференційованої цільової функції, а використовує тільки  $n + 1$  значення цільової функції в  $n + 1$  вершині багатогранника. Крім того, даний метод призначений для вирішення завдань безумовної оптимізації виду

$$f(x) \rightarrow \underset{X \in R^n}{opt}, \quad (4.42)$$

де  $x$  – вектор параметрів;

$R^n$  – множина натуральних чисел.

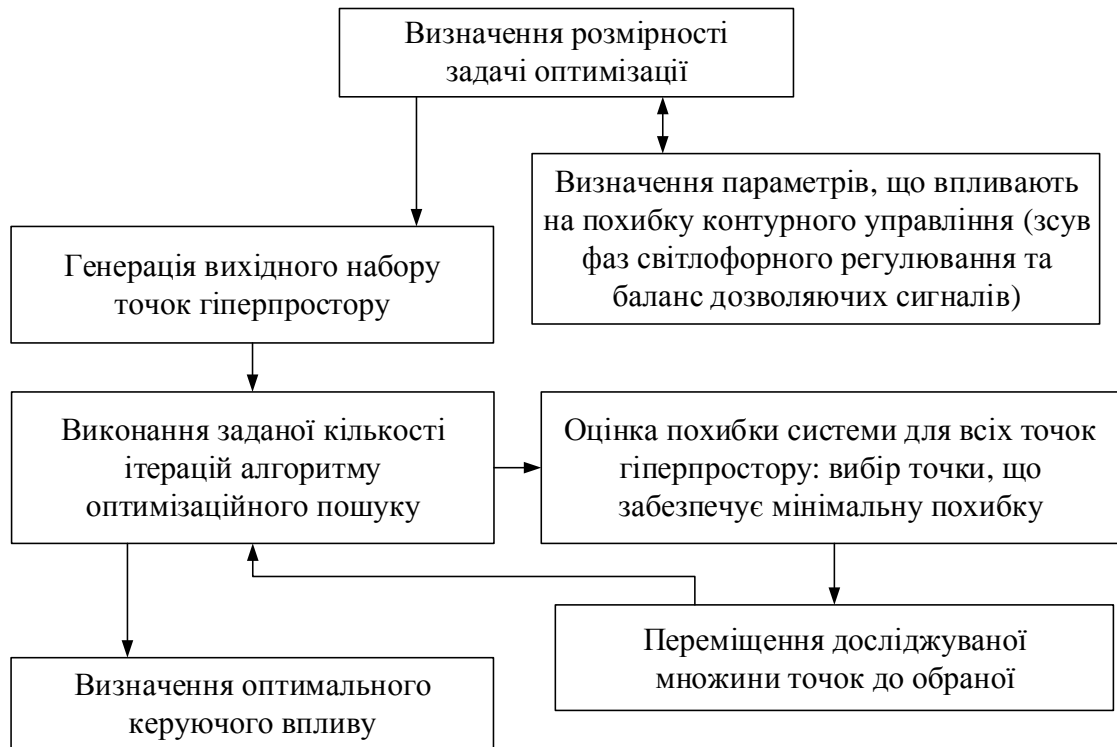


Рисунок 4.15 – Загальна схема процесу оптимізації

Для обґрунтування можливості застосування даного методу для вирішення завдання при наявності обмежень на параметри оптимізації, було визначено спосіб розв'язання задачі умовної оптимізації методом Нелдера-Міда

$$f(x) \rightarrow \underset{X \in \Omega}{opt}; \quad (4.43)$$

$$\Omega = \left\{ x_j \mid x_j^- < x_j < x_j^+, j \in \overline{1, n} \right\}; \Omega \in R^n. \quad (4.44)$$

Нехай  $x_i^{(k)} = (x_{i1}^{(k)}, x_{i2}^{(k)}, \dots, x_{in}^{(k)})$ ,  $i = \overline{1, (n+1)}$  є  $i$ -ою вершиною (крапкою) у просторі  $R^n$  на  $k$ -ом етапі пошуку,  $k = 0, 1, \dots$  та значення цільової функції у точці  $x_i^{(k)}$  дорівнює  $f(x_i^{(k)})$ . Значення цільової функції для кожної фіксованої точки  $x_i^{(k)}$  обчислюється після проєкції поточної точки  $x_i^{(k)}$  на багатогранник системи обмежень задачі.

Під проєкцією розуміємо заміну поточних значень змінних по кожній координаті вектора параметрів  $x_i^{(k)}$  на крайні значення системи обмежень  $\Omega$ , керуючись наступними правилами

$$x_i^{(k)} = \pi_{\Omega}(x_i^{(k)}); \quad (4.45)$$

$$\pi_{\Omega}(x_i^{(k)}) = \begin{cases} x_j^{\min}, & x_{ij}^{(k)} < x_j^{\min}; \\ x_j^{\max}, & x_{ij}^{(k)} > x_j^{\max}; \\ x_{ij}^{(k)}, & x_j^{\min} < x_{ij}^{(k)} < x_j^{\max}. \end{cases}, \quad (4.46)$$

де  $\Omega = \{x_j \mid x_j^- < x_j < x_j^+, j \in \overline{1, n}\}$ .

Таким чином, при перевірці умов оптимальності рішення на черговому кроці оптимізації не відбувається порушення умов обмеженості параметрів. Отже доведено, що обраний метод можливо застосовувати для вирішення задачі оптимізації з обмеженнями, шляхом його модифікації з введенням процедури проєкції.

Потім визначено вектори  $x$  багатогранника, які дають максимальне і мінімальне значення  $f(x)$ .

Вектори  $x$ , що задовольняють умовам (4.47) та (4.48) дозволяють досягти локального максимуму і мінімуму (відповідно) на  $k$ -ій ітерації розрахунків:

$$f(x_h^{(k)}) = \max \left\{ f(x_1^{(k)}), f(x_2^{(k)}), \dots, f(x_n^{(k)}), f(x_{n+1}^{(k)}) \right\}, \quad (4.47)$$

де  $x_h^{(k)} = x_i^{(k)}$ , та

$$f(x_l^{(k)}) = \min \left\{ f(x_1^{(k)}), f(x_2^{(k)}), \dots, f(x_n^{(k)}), f(x_{n+1}^{(k)}) \right\}, \quad (4.48)$$

де  $x_l^{(k)} = x_i^{(k)}$ .

Оскільки багатогранник множини  $R^n$  складається з  $(n+1)$  вершин  $x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}, x_{n+1}^{(k)}$ , нехай  $x_{n+2}^{(k)}$  буде центром тяжіння всіх вершин, виключаючи  $x_h^{(k)}$ .

Визначимо координати центру тяжіння всіх вершин  $x_{n+2}^{(k)}$  відношенням

$$x_{n+2,j}^{(k)} = \frac{1}{n} \left[ \left( \sum_{j=1}^{n+1} x_{i,j}^{(k)} \right) - x_{i,j}^{(k)} \right], \quad (4.49)$$

де індекс  $j$  означає координатний напрямок,  $j = \overline{1, n}$ .

Процедура пошуку вершини в множині  $R^n$ , у якій  $f(x)$  має краще значення, складається з наступних операцій:

- відображення;
- розтягнення, стиснення;
- редукція;
- проекція на багатогранник;
- оцінка критерію закінчення пошуку.

Процедура відображення полягає в проектуванні  $x_h^{(k)}$  через центр тяжіння на многогранник  $\Omega$ , у відповідності до співвідношення



$$x_{n+3}^{(k)} = x_{n+2}^{(k)} + \alpha \left( x_{n+2}^{(k)} - x_h^{(k)} \right), \quad (4.50)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт відображення,  $\alpha > 0$ ;

$x_{n+2}^{(k)}$  – центр тяжіння;

$x_h^{(k)}$  – вершина області допустимих значень, в якій функція  $f(x)$  приймає найбільше з  $n+1$  її значень на  $k$ -м етапі.

Операція розтягування виконується в залежності від значення цільової функції на  $k$ -м кроці і полягає в наступному: якщо на  $k$ -м кроці виконується співвідношення  $f(x_{n+3}^{(k)}) \leq f(x_l^{(k)})$ , тоді результуючий вектор  $(x_{n+3}^{(k)} - x_{n+2}^{(k)})$  розтягується відповідно до співвідношення

$$x_{n+4}^{(k)} = x_{n+2}^{(k)} + \gamma \left( x_{n+3}^{(k)} - x_{n+2}^{(k)} \right), \quad (4.51)$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт розтягнення.

За виконання умови  $f(x_{n+4}^{(k)}) < f(x_l^{(k)})$  проводимо заміну вектора  $x_h^{(k)}$  на  $x_{n+4}^{(k)}$ , і повторюємо розрахунок за формулою (4.51); якщо остання умова не виконується, то робимо заміну вектора  $x_h^{(k)}$  на  $x_{n+3}^{(k)}$ , але на попередньому етапі необхідно провести процедуру проєкціювання.

Процедура стиснення аналогічна розтягуванню, але по суті протилежна їй. Якщо  $f(x_{n+3}^{(k)}) > f(x_l^{(k)})$  для всіх  $l \neq h$ , то результуючий вектор  $(x_h^{(k)} - x_{n+2}^{(k)})$  стискається відповідно до формули

$$x_{n+5}^{(k)} = x_{n+2}^{(k)} + \beta \left( x_h^{(k)} - x_{n+2}^{(k)} \right), \quad (4.52)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт стиснення,  $0 < \beta < 1$ .

Після процедури проєкціювання проводиться заміна  $x_h^{(k)}$  на  $x_{n+5}^{(k)}$ .

Редукція виконується при дотриманні умови  $f(x_{n+3}^{(k)}) > f(x_h^{(k)})$ , тоді все результуючі вектори  $(x_i^{(k)} - x_l^{(k)})$ ,  $i = \overline{1, n+1}$  зменшуються в два рази з відліком від  $x_l^{(k)}$  відповідно до співвідношення

$$x_i^{(k)} = x_l^{(k)} + 0,5(x_i^{(k)} - x_l^{(k)}) , \quad (4.53)$$

де  $i$  – індекс змінної,  $i = \overline{1, n+1}$ .

Критерієм закінчення пошуку мінімуму цільової функції було обрано дві умови: по-перше, по кількості ітерацій, по-друге, при виконанні умови вигляду

$$\left\{ \frac{1}{m+1} \sum_{i=1}^{n+1} \left[ f(x_i^{(k)}) - f(x_{n+2}^{(k)}) \right]^2 \right\}^{1/2} \leq \varepsilon , \quad (4.54)$$

де  $\varepsilon$  – довільно мале число;

$f(x_{n+2}^{(k)})$  – значення цільової функції в центрі ваги  $x_{n+2}^{(k)}$ .

На підставі розглянутих процедур і застосовуваного методу оптимізації Нелдера-Міда, пропонуємо алгоритм пошуку мінімуму цільової функції у задачі з обмеженнями параметрів. Схема алгоритму наведена у Додатку Г.

Застосування даного методу оптимізації дозволило забезпечити необхідну точність і швидкість вирішення поставленого завдання оптимізації у програмному середовищі моделювання параметрів контурного управління. Для практичної реалізації методу контурного управління дорожнім рухом на мережі магістралей міста було розроблено програмне забезпечення «Контур», яке має модульну структуру [31].

Це дозволяє, при необхідності, розширювати її шляхом додавання нових модулів до існуючої системи без істотних змін в структурі даних і зв'язках між

функціональними блоками програми. Структура програмного комплексу включає в себе наступні елементи:

- підсистему інтерфейсу користувача;
- підсистему аналізу експериментальних даних;
- підсистему визначення параметрів управління;
- підсистему оптимізації контурного управління;
- підсистему прогнозування параметрів транспортних потоків;
- підсистему визначення ефективності ДР на контурі ВДМ.

Структурна схема взаємозв'язку елементів програмного середовища представлена на рис. 4.16.

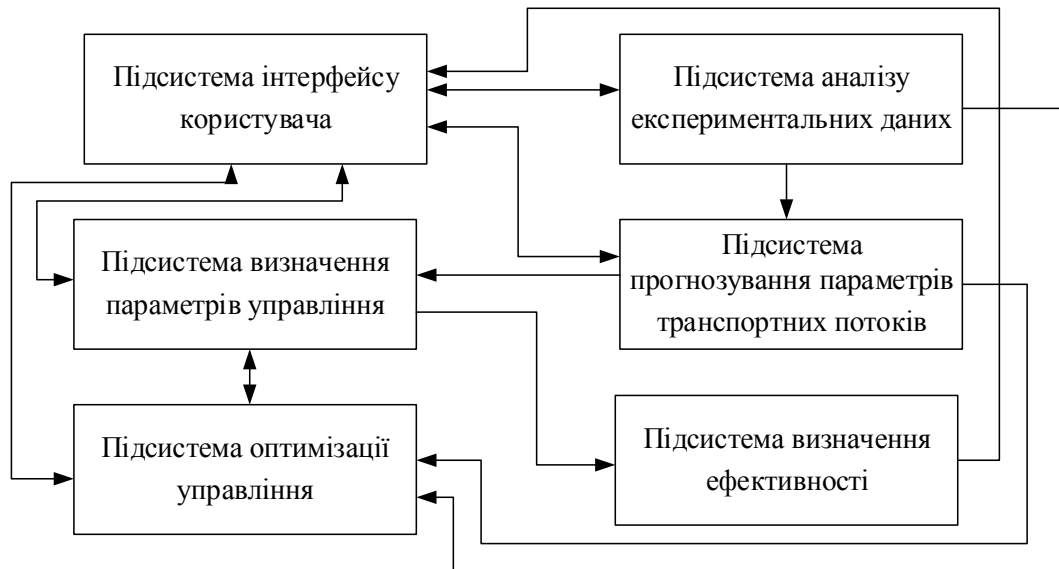


Рисунок 4.16 – Структурна схема програмного середовища

Кожна з підсистем програмного комплексу є окремим програмним модулем, що характеризується строго визначеною структурою даних, структурою об'єктів, набором внутрішніх процедур та протоколом взаємодії з іншими підсистемами.

Єдина структура даних програмного комплексу передбачає взаємодію з елементами автоматизованих систем управління дорожнім рухом і дозволяє формувати автоматичну передачу керуючих параметрів відповідно до вимог

інтерфейсу і протоколу передачі даних програмного середовища. Це досягається шляхом застосування уніфікованого протоколу передачі даних.

Взаємодія підсистем програмного середовища здійснюється під управлінням оператора за допомогою підсистеми інтерфейсу користувача, що призначена для інтерактивного управління процесом визначення керуючих параметрів дорожнього руху. За допомогою цієї підсистеми забезпечується інтуїтивно зрозумілий доступ до налаштувань програми, введення експериментальних даних, імітаційного моделювання режиму координації, управління аналітичними розрахунками та інтерпретації отриманих результатів.

#### 4.4 Висновки за розділом 4

Отримані аналітичні залежності формування та взаємодії груп АТЗ при русі на перегонах магістралей міста в результаті макромодельовання ступеневих функцій інтенсивності ТП із урахуванням параметрів циклу регулювання на перехресті, часового інтервалу між групами АТЗ та їх часової довжини, що впливає на середню швидкість ТП. Це надало змогу отримати обмеження на довжину перегону, яка сприятиме рівномірному руху ТП по магістралі та відрізняється від існуючого.

Формалізовано задачу контурного управління ДР на мережі ВДМ із урахуванням основ координованого управління дорожнім рухом, що дозволяє отримати набір значень швидкості руху за умови їх вирівнювання на суміжних перегонах магістралей. При цьому показник ефективності – величину транспортної затримки – введено до сукупності керуючих параметрів контурного управління ДР.

Вирішено одно із завдань стратегічного управління СУДР, а саме - проблему підвищення ефективності використання часу дозволяючих фаз світлофорного регулювання на перехрестях контуру за рахунок оптимального розподілу часу основного такту світлофорного регулювання між довжиною стрічки часу та часовими інтервалами до її початку та після її закінчення,

шляхом визначення аналітичних залежностей інтервалів часу та формалізації процесу їх мінімізації, що сприяло визначенню нового параметру контурного управління – балансу часу світлофорного регулювання.

Обґрунтовано та доведено доцільність вибору методу Нелдера-Міда для розв'язання формалізованої задачі умовної оптимізації керуючих параметрів контурного управління, який належить до методів деформації симплекса за оцінкою на попередньому кроці пошуку мінімуму оптимізаційної функції, що описує процес адаптації поточної конфігурації симплекса до рельєфу наявного графіку функції. Для реалізації методу Нелдера-Міда розроблено алгоритм оптимізації та програмне забезпечення «Контур», яке має модульну структуру та доведено до практичного застосування у складі СУДР у містах.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [12, 18, 31, 34, 66, 68, 73].

## РОЗДІЛ 5

### МЕТОДОЛОГІЯ ДИНАМІЧНОГО УПРАВЛІННЯ ДОРОЖНІМ РУХОМ НА ТАКТИЧНОМУ РІВНІ

#### 5.1 Обґрунтування доцільності впровадження динамічного управління дорожнім рухом

З урахуванням того, що метою управління ДР на стратегічному рівні є підвищення екологічної безпеки міста за рахунок організації рівномірного руху ТП, на тактичному рівні СУДР вирішуються задачі підвищення пропускної спроможності ВДМ для підвищення ефективності та надійності ДР у містах. Тому, однією з проблем систем управління дорожнім рухом для сучасних міст є розвиток та реалізація методів управління для забезпечення працездатності ВДМ, що безпосередньо впливає на ефективність логістичних процесів у транспортній системі та раціональне вирішення задач пасажирських і вантажних перевезень.

Але існує проблема зміни інтенсивності ТП у часі та просторі ВДМ. Отже, необхідно оптимізувати час проїзду транспортних засобів по ділянках ВДМ, які входять до маршрутів руху ТП по мережі. Такий підхід дозволяє дослідити просторово-часові особливості дорожнього руху у містах.

Визначено, що однією з причин зниження пропускної спроможності є зміна режимів руху ТП, що впливає на виникнення заторових ситуацій на складних ділянках ВДМ. При цьому довжина, тривалість та кількість заторів АТЗ мають певні наслідки для транспортного процесу у містах. На елементах ВДМ за умовами підвищеної щільності ТП виникає необхідність вирішувати проблеми дорожнього руху особливими заходами управління, але заходи, що стосуються окремих елементів ВДМ, одночасно впливають на суміжні елементи. Тоді результат управління може бути різномірним: або заходи будуть компенсувати один одного, або підсилювати результати управління, або зменшувати ефект від управління ДР. Тобто просторові взаємовідносини між

транспортними ситуаціями на окремих елементах ВДМ мають складний характер, який залежить від топології транспортної мережі та інтенсивності транспортного потоку, а керуючі впливи мають бути або дієвими та результативними, або (у гіршому випадку) – нейтральними по відношенню один до одного та вирішувати однакові завдання.

До проблем управління ДР слід віднести наявність декількох керуючих впливів на дорожній рух за короткий період часу. Наявність посиленої керованості дорожнім рухом впливає на ефективність дорожнього руху, але ускладнює процес управління. Тому треба визначати компроміс між необхідною ефективністю дорожнього руху та керуючими впливами, для формування яких необхідні поточні параметри дорожнього руху.

У сучасних умовах необхідний обсяг параметрів ДР повинен бути доступний як у режимі on-line або off-line (в режимі реального часу або поза ним) для визначення керуючого впливу. Проте повна сукупність інформації не застосовується а ні операторами центру управління системи, бо вони користуються евристичними методами, що до прийняття рішень, а ні в алгоритмах управління, які засновані на поточних даних від вимірюючих пристроїв ВДМ. Параметри ДР повинні містити інформацію що до випадкових збурень (кліматичні умови, перешкоди на проїжджій частині). Системи автоматичного управління заходами обробки наданої інформації визначають керуючі впливи на дорожній рух на підставі вибору розроблених моделей руху. Тоді спрямований рух транспорту по мережі повинен мати дві складові управління – узгодження керуючих впливів та передбачення виникнення транспортних ситуацій щодо зміни режимів руху, які з'являються у напрямі руху і впливають на утворення заторів та, як наслідок, формування ударних хвиль. Визначений підхід до управління має ознаки спрямованого управління, тому саме об'єктно-орієнтована технологія управління ДР має низку переваг у разі формування керуючих впливів на підставі передбачення зміни параметрів ДР із ознаками узгодження на інших елементах ВДМ [225]. Саме таку

спрямованість має динамічне управління дорожнім рухом для оптимізації працездатності транспортної мережі у цілому засобами попередження складних ситуацій або для перешкоджання їх появі, замість тільки реагування на них засобами локального управління.

Впровадження динамічного управління може бути альтернативою розширення ВДМ та дозволить підвищити безпеку та ефективність транспортного процесу у цілому. Засіб динамічного управління, при якому призводиться зміна напрямку або режиму руху потоків транспорту за інтенсивністю або за щільністю ТП, в залежності від стану ВДМ (або від транспортної ситуації) можливо реалізувати на підставі замкнутого контуру управління. Проблему реагування на зміну транспортної ситуації або зміну параметрів руху транспорту необхідно вирішувати засобами управління ТП. Було визначено, що при розробці динамічного управління найбільш дієвими є параметри транспортної системи: об'єктно-технологічні – параметри дорожнього руху; об'єктно-структурні – схема організації дорожнього руху; системно-технологічні – метод управління; системно-структурні – склад технічних засобів, їх взаємний зв'язок та дислокація на дорозі.

Визначено, якщо інтенсивність ТП є нормованою величиною за існуючими стандартами, а щільність ТП залежить від інтенсивності, то швидкість ТП необхідно вимірювати або розраховувати, тобто при дослідженні має місце макромодельовання ТП. В свою чергу, швидкість ТП залежить від режимів руху та від динамічних параметрів окремих автомобілів у потоці, які формують основу мікромоделей руху ТП та залишаються незмінними у часі. На підставі того, що параметри руху ТП змінюються у часі та мають суттєву взаємозалежність, пропонуємо розробку заходів динамічного управління ДР на підставі визначених типів моделей.

Причина зниження ефективності функціонування ВДМ є результатом нераціонального завантаження її елементів, коли ТП утворює транспортний затор, що являє собою чергу АТЗ на перегоні мережі, ускладнює рух ТП та



збільшує рівень навантаження ВДМ. Для забезпечення працездатності функціонування транспортної мережі визначено існуючі заходи запобігання переходу ТП на перегонах ВДМ в заторовий стан, які було розподілено за двома основними напрямками. Напрямки реалізації заходів наведено на рисунку 5.1.

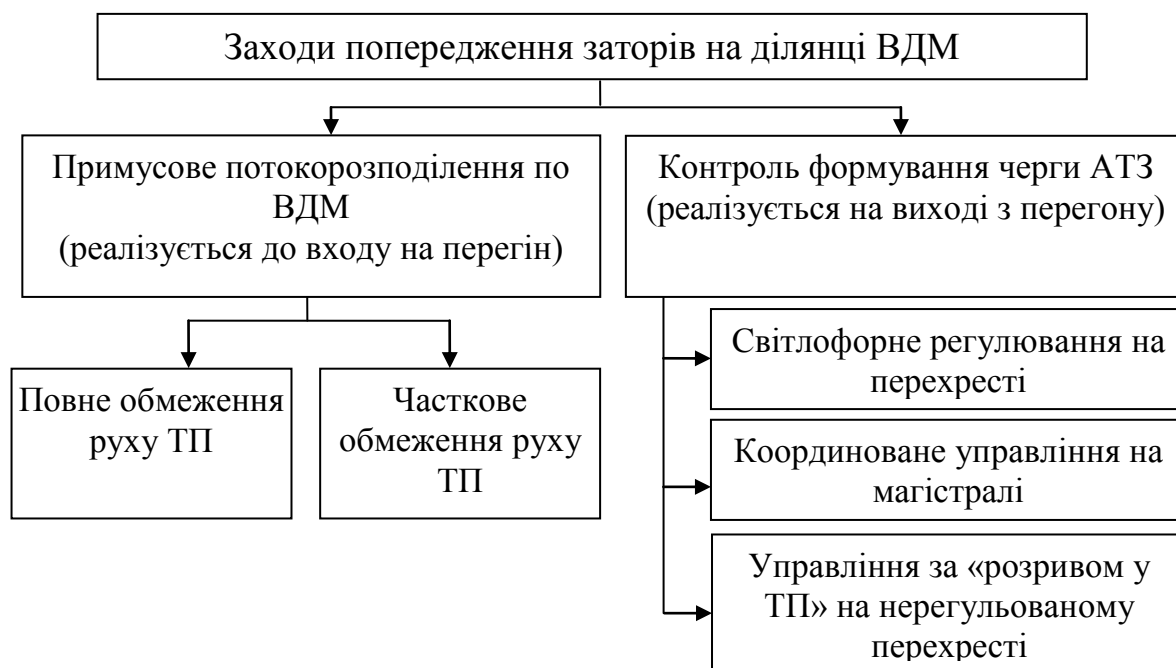


Рисунок 5.1 – Типи управління дорожнім рухом для попередження транспортних заторів

До особливостей заходів першого напрямку, які передбачають поточкорозподіл на ВДМ, можливо віднести їх реалізацію на стратегічний рівень СУДР за відповідними методами поточкорозподілу. При цьому проблема виникнення складних умов руху вирішується перерозподілом потоку АТЗ з перевантаженої ділянки на інші шляхом часткового або повного обмеження руху ТП до ділянки ВДМ, на якій спостерігається затор [226]. Суттєвим недоліком такої організації дорожнього руху є те, що на підставі алгоритму перерозподілу ТП рух буде спрямовано за альтернативним маршрутом, де в свою чергу буде зростати рівень завантаження інших перегонів ВДМ. У випадку недостатнього запасу пропускної спроможності на цих перегонах,

виникають передумови для виникнення заторів і, відповідно, перерозподіл ТП по ВДМ сприяє переміщенню затору з одного перегону на інший. Також має місце примусова зміна напрямку руху АТЗ, що негативно впливає на час руху по мережі та неоднозначно сприймається водіями транспортних засобів.

Суть другого напрямку полягає у забезпеченні пропускної спроможності заходами регулювання на виході ділянки ВДМ технічними засобами регулювання на перехресті. Найпоширенішим заходом є світлофорне регулювання, параметри якого повинні бути узгоджені із параметрами руху ТП на перегоні. Але такі заходи характеризуються складністю реалізації в умовах щільних ТП. Заходи обох напрямків реалізуються складними алгоритмами управління ДР, але мають однакову рису – у першому та другому напрямку керуючий вплив заходів спрямовано на початок руху ТП на перегоні, тобто на його «фронт». На підставі аналізу заходів було виявлено, що необхідна розробка нового підходу задля запобігання транспортного затору на ВДМ.

Заторові стани ТП виникають з багатьох причин, з яких основною є неефективність управління транспортними потоками.

У роботі Б. Кернера [227] при дослідженні заторів на ВДМ запропонована концепція «синхронізованого потоку», згідно з якою автор виділяє два якісно різних стану (фази) ТП: фаза так званого «синхронізованого руху» і фаза «широких пробок, що переміщуються», які слід розрізняти в заторовому режимі транспортного потоку.

Основним твердженням концепції «синхронізованого потоку» є гіпотеза про наявність стійких станів ТП. Це означає, що на ділянках стійкості ТП, на яких всі транспортні засоби рухаються з утриманням дистанції безпеки та з однаковою постійною швидкістю, яка задана АТЗ відносно щільності в потоці без урахування множини поточних швидкостей АТЗ. Такий підхід надає напрям та підстави до теоретичних досліджень фізичної природи процесів у ТП, але не сприяє практичному визначенню параметрів ТП. В результаті аналізу моделей ТП було виявлено два підходи для опису транспортних заторів:

1. На підставі властивостей самого ТП згідно до класифікації фазових переходів Б. Кернера та його співавторів, а також класифікації, запропонованої вченими Національного дослідницького центру Лос-Аламоса (Los Alamos National Lab [227]).

2. На підставі урахування зовнішніх причин – впливу різних «звужень» (К.Ф. Даганзо, Інститут Берклі [139]). Під звуженнями автор розуміє сполучення ділянок ВДМ із різною кількістю смуг руху і, відповідно, з різною пропускною спроможністю. Так К. Даганзо розвиває теорію звужень для побудови їх класифікації, в якій визначається необхідність вивчення проблеми «зворотного фазового переходу» в ТП, тоді як транспортний затор виникає досить швидко, а розсмоктується повільно та некеровано.

Ділянки ВДМ, на яких застосовується світлофорне регулювання, зміна ширини проїзної частини, наявність полос руху для паркування або руху міського пасажирського транспорту, також характеризуються зміною пропускної спроможності. Тому вирішити задачу підвищення пропускної спроможності ВДМ можливо шляхом управління процесом утворення заторів на її ділянках.

Подальші дослідження було спрямовано на процеси, що відбуваються у ТП при проїзді «вузьких місць». При незначній завантаженості ділянки ВДМ, коли рух ТП відбувається в незв'язаному режимі, кожен водій має можливість обирати швидкість руху в межах дозволеної на цій ділянці. Але з підвищенням завантаження ділянки ВДМ, збільшується щільність ТП і він переходить у зв'язаний режим руху. При цьому кожен водій АТЗ підпорядковується умовам руху ТП, що впливає на відсутність можливості вибору швидкості руху і реалізації маневрів по проїжджій частині. Підвищення щільності ТП не є проблемою до моменту, доки інтенсивність потоку не досягає максимального значення, яке змінює рівень обслуговування ВДМ у конкретних дорожніх умовах, після чого в потоці спостерігається зниження швидкості руху та перехід ТП у нестійкий стан. Це призводить до зміни умов руху АТЗ та

виникненню ознак щільного стану ТП, що впливає на припинення руху та перехід до заторового режиму руху. Транспортний затор на локальній ділянці ВДМ може стати причиною розповсюдження затору по мережі, якщо інтенсивність прибуття АТЗ до складної ділянки не змінюється.

Для реалізації методу динамічного управління пропонуємо зміну швидкісного режиму ТП на ділянці ВДМ, для обмеження доступу до місця скупчення АТЗ на початку перегону, а не на його кінці перед світлофорним пристроєм. Доцільність застосування такого засобу управління, як керування швидкістю АТЗ на підході до ділянок підвищеної щільності, доведена у Розділі 3 дисертації, де було отримано результат взаємного впливу параметру щільного потоку та надано опис процесу утворення «ударної хвилі» із виявленням особливостей її розповсюдження на перегонах ВДМ. Також доведено, що для запобігання утворення «ударної хвилі» необхідно управляти ТП.

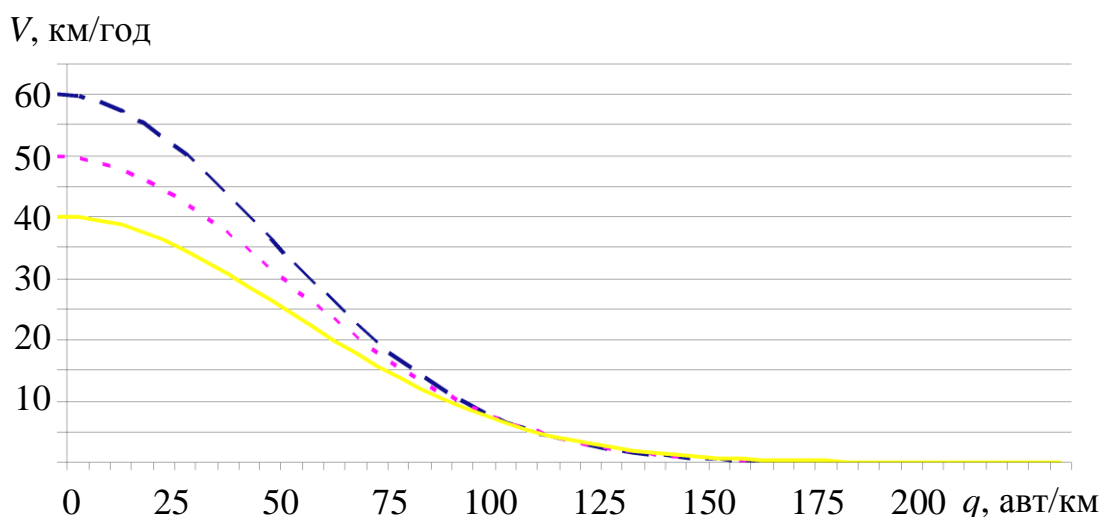
На підставі отриманих результатів доцільно дослідити можливість керування швидкістю руху та його використання у динамічному управлінні методами моделювання дорожнього руху. Для визначення швидкості підходу ТП до складної ділянки застосовуємо математичну залежність [228, 229], яка належить до макромоделей руху ТП та має у своєму складі параметр управління ( $u$ ), що надає можливість оцінити вплив зміни швидкісного режиму на перегонах ВДМ

$$V(q, u) = V_{\max} \cdot u \cdot e^{-\left(\frac{q}{q_{\max}}\right)^2 \frac{u+1}{4}}, \quad (5.1)$$

де  $u \in (0;1]$  – рівень керуючого параметру, що обмежує швидкість руху.

Для дослідження реакції керуючого впливу на зміну швидкісного режиму ТП та щільність ВДМ, застосовано реальні значення максимальної щільності ТП  $q_{\max}=50$  авт./км [159], та швидкості вільного руху  $V_{\max}=60$  км/год (дозволена швидкість руху в місті [141]). Отримали залежності швидкості ТП від щільності

при різних рівнях керуючого сигналу (рис. 5.2). Реалізуємо таку залежність при умові, що рівень керуючого сигналу передбачає зниження швидкості руху на перегоні не більш ніж на 20 км/год від дозволеної [230, 231]. Отримали результат моделювання при 3-х рівнях керуючого параметру  $u=1,0; 0,83; 0,67$ , що відповідають швидкості руху  $V_{max}=60$  км/год;  $V_{max}=50$  км/год;  $V_{max}=40$  км/год.



Криві відповідають наступним значенням управляючого сигналу:

— — —  $u = 1,0$ ; - · - · -  $u = 0,83$ ; — — —  $u = 0,67$ .

Рисунок 5.2 – Графік зміни швидкості руху та щільності потоку при різних рівнях керуючого параметру

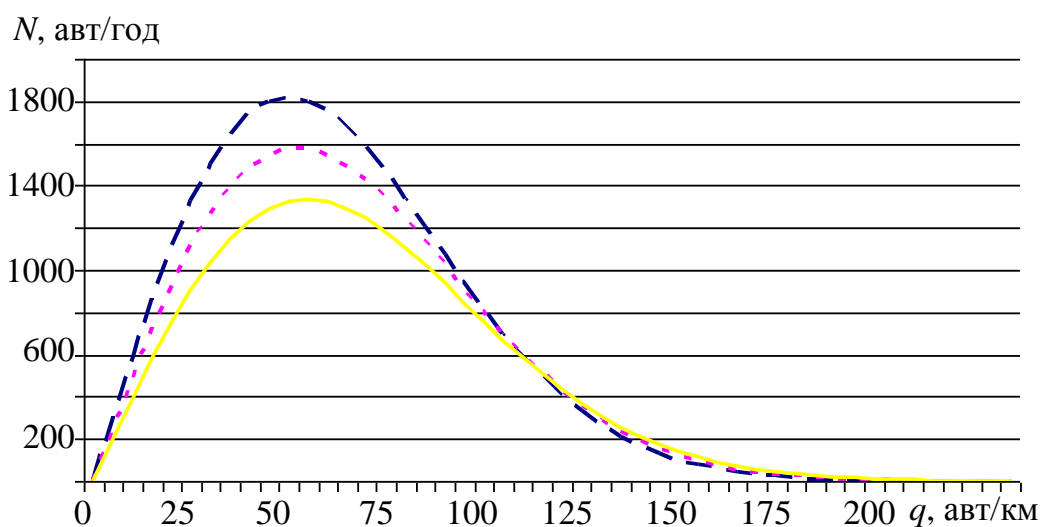
Аналіз отриманих результатів моделювання доводить, що керуючий параметр впливає на існуючий швидкісний режим на ділянці ВДМ лише при певній щільності ТП. Так, вже при щільності потоку 100 авт./км дія керуючого параметру втрачає свій вплив на швидкість ТП, а далі щільність ВДМ збільшується, а швидкість падає до 0. Отриманий результат можливо пояснити параметрами руху ТП в умовах підвищеної щільності, коли виникають взаємні перешкоди, а водії змушені різко гальмувати та зменшувати швидкість руху, тобто має місце пов'язаний та заторовий режим руху ТП.

Для визначення інтенсивності ТП на підставі фундаментальної залежності  $N=P \cdot V$  із урахуванням обраної макромоделі (5.1) було отримано

аналітичну залежність інтенсивності не тільки від швидкості руху, а й від впливу керуючого параметру  $u$  на швидкість ТП ( $V$ )

$$N(q, u) = q \cdot V_{\text{св}} \cdot u \cdot e^{-\frac{(q - q_{\kappa})^2 \cdot u + 1}{4}}. \quad (5.2)$$

На рисунку 5.3 наведено графік зміни інтенсивності ТП від щільності при  $q_{\kappa} = 50$  авт./км та при різних рівнях керуючого параметру  $u$ .



Криві відповідають наступним значенням управляючого сигналу:

— — —  $u = 1,0$ ; - - -  $u = 0,83$ ; — — —  $u = 0,67$ .

Рисунок 5.3 – Графік зміни інтенсивності ТП від щільності

Аналіз результатів дозволяє стверджувати, що запропонований керуючий параметр, що змінює швидкість руху, має також вплив на інтенсивність, коли щільність ВДМ змінюється у діапазоні 0-100 авт./км, тоді як подальше зростання щільності призводить до переходу ТП в заторовий стан і зміна швидкості не має сенсу, бо інтенсивність стрімко падає до 0.

Отриманий результат доводить, що управляти інтенсивністю ТП засобом зміни швидкісного режиму руху необхідно на ділянках перегону, де щільність

ТП ще не критична, а саме на підходах до міста утворення затору для запобігання формування та розповсюдження «ударної хвилі». Це підтверджує доцільність та необхідність розробки динамічного управління ТП засобом зменшення швидкості ДР на ділянках ВДМ із складними умовами руху.

Отже, отримані моделі належать до типу безперервних макромоделей ТП, згідно з якими «хвіст» ТП має меншу щільність при більшій швидкості. Але для практичного застосування при управлінні ДР в СУДР для визначення параметрів динамічного управління виникають складнощі, оскільки при незначному інтервалі часу (30 с вже вважається великим інтервалом) зміни параметрів настільки значні, що їх похідна не визначається аналітично. Тому виникає необхідність у розробці мікромоделей руху АТЗ у потоці підвищеної щільності при наявності «вузьких місць» на ВДМ.

Для реалізації методу динамічного управління швидкістю руху ТП на підході до ділянок підвищеної щільності, що утворюються у «вузьких місцях» ВДМ (до яких належать регульовані перехрестя), вважаємо за необхідне визначити вплив технічних засобів регулювання на ТП. Для цього запропонували введення додаткового параметру  $R$ , що дозволяє при моделюванні швидкості руху ТП ( $V$ ) враховувати координати місця розташування технічного засобу регулювання ( $x$ , м) та час його дії на ТП ( $t$ , с), а саме

$$R(x,t) = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}. \quad (5.3)$$

Тоді формалізувати дію заборонного сигналу на перехресті ділянки ВДМ з координатою  $x_i$  в момент часу  $t$ , що впливає на  $i$ -й автомобіль в потоці можливо наступним чином

$$R(x,t) = \begin{cases} 0, & \text{если } (x_i > X - \Delta x) \wedge (x_i < X) \wedge t \bmod T < t_0, \\ 1 & \end{cases} \quad (5.4)$$

де  $X$  – координата початку ділянки ВДМ, м;

$\Delta x$  – довжина ділянки, на яку розповсюджується дія технічних засобів регулювання, м;

$T$  – час зупинки, с;

$t_0$  – тривалість заборонного сигналу, с.

На підставі того, що режим руху транспортного потоку визначається його швидкістю, яка впливає на щільність ТП на ділянці ВДМ в конкретний момент часу  $t$  будемо визначати локальну щільність із урахуванням двох АТЗ на смузі руху відносно один до одного. Так визначення локальної щільності вважаємо доцільним, бо вона впливає на параметри руху кожного АТЗ у ТП. При цьому, в якості координати АТЗ пропонується визначати положення його геометричного центру (рис. 5.4), що дозволяє враховувати склад ТП при мікромоделюванні.

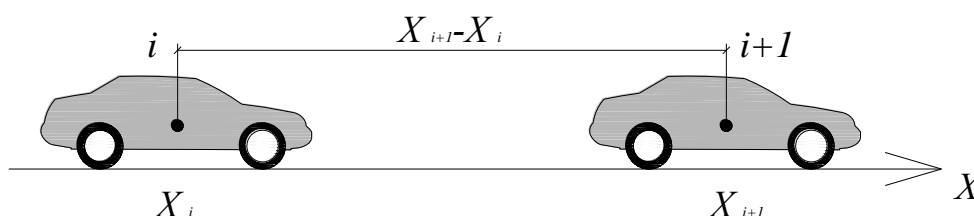


Рисунок 5.4 – Схема для визначення локальної щільності ТП

Іншого підходу до урахування складу ТП при аналізі моделей ТП [36] не відомо, бо склад ТП визначається за допомогою коефіцієнта приведення до легкового транспортного засобу, що дає неоднозначні та неточні результати.

Тоді модель локальної щільності ( $q_{л}$ ) ТП при русі у складних умовах визначаємо наступним чином



$$q_{\text{л}} = \frac{1000}{x_{i+1} - x_i}, \quad (5.5)$$

де 1000 – довжина ділянки ВДМ (1000 м).

Для визначення швидкості ТП  $V(t)$  в поточний момент часу  $t$  із урахуванням впливу технічних засобів регулювання та значенням локальної щільності ТП (5.5) отримуємо залежність:

$$V(t) = V(q_{\text{л}} \cdot u). \quad (5.6)$$

Швидкість  $i$ -го АТЗ ( $V_i$ ), в загальному випадку, не дорівнює сталій швидкості в потоці, але прагне до неї за наступним законом:

$$\bar{V}_i(t + \Delta t) = \bar{V}_i(t) + \Delta t \cdot a_{\text{max}} \cdot k(\Delta V), \quad (5.7)$$

де  $a_{\text{max}}$  – максимальне прискорення АТЗ, м/с<sup>2</sup>;

$\Delta t$  – проміжок часу (шаг моделювання), с;

$k(\Delta V)$  – функція, що визначає режим руху АТЗ (розгін або гальмування) в залежності від різниці між поточною швидкістю транспортного засобу  $\bar{V}_i(t)$  і сталою швидкістю руху в потоці  $V_i(t)$

$$\Delta V = \bar{V}_i(t) - V_i(t), \quad (5.8)$$

При цьому визначаємо

$$\Delta V = \begin{cases} 1 & \text{– розгін АТЗ;} \\ -1 & \text{– гальмування АТЗ} \end{cases}. \quad (5.9)$$

Таким чином, запропоновані аналітичні залежності для визначення

параметрів руху АТЗ надають опис взаємодії параметрів руху АТЗ із параметрами руху ТП на перегоні ВДМ з урахуванням впливу технічних засобів регулювання при утворенні затору. Такий підхід при дослідженні причин виникнення на ВДМ ділянок з підвищеною щільністю. Надає спосіб визначення взаємозалежності параметрів руху АТЗ та ТП. Отриманий результат взаємодії параметрів макро- та мікромоделювання надає опис динаміки руху ТП при наявності зміни умов руху на ВДМ.

Параметри зміни швидкісного режиму на ділянці ВДМ для підвищення його пропускної спроможності мають ґрунтуватися на вимірах параметрів ТП в режимі реального часу. Контроль за параметрами ТП може здійснюватися шляхом застосування детекторів транспорту на перегонах ВДМ. Інформацію щодо зміни швидкості ТП необхідно доводити до учасників ДР шляхом застосування багатопозиційних дорожніх знаків [232], які дозволяють відображати значення швидкості в реальному масштабі часу.

## 5.2 Розробка мікромоделі руху АТЗ у міських умовах руху

Для розробки моделей руху АТЗ у ТП необхідно урахувати виявлені недоліки та обмеження при застосуванні відомих моделей для опису руху окремих АТЗ у щільному транспортному потоці. Виявлено підхід, що об'єднує розглянуті моделі щодо необхідності визначення двох параметрів мікромоделювання, які впливають на швидкість руху АТЗ: 1) дистанція між АТЗ у потоці, яка впливає на безпеку руху та залежить від швидкості руху ТП та технічних характеристик АТЗ; 2) прискорення окремих АТЗ у потоці, що впливає на дистанцію безпеки між транспортними засобами.

Тоді можливо стверджувати, що основою мікромоделювання руху АТЗ у щільному потоці є залежність

$$V = f(d, V_0), \quad (5.10)$$

де  $V$  – швидкість руху окремого АТЗ, км/год;

$d$  – дистанція безпеки при русі, м;

$V_0$  – швидкість руху попереднього АТЗ, км/год.

Такий підхід дозволяє урахувувати початкові умови руху кожного окремого АТЗ у щільному потоці, які мають вплив на формування режиму руху ТП. Саме тому особливе значення при формалізації швидкості АТЗ у потоці має прискорення або уповільнення АТЗ

$$V_{ATZ} = f(a, d), \quad (5.11)$$

де  $a$  – прискорення (уповільнення) АТЗ, м/с<sup>2</sup>.

Натурні виміри, що проводилися у Росії та Україні за останні роки, вказують на наявність у ТП дистанцій між АТЗ в межах 1-5 с, що відповідає дистанціям 20-60 м, в той час як облік повного гальмівного шляху визначає дистанції 80-200 м [160, 222, 233].

Для усунення визначених обмежень узагальнюючого підходу та розбіжностей у процесі отримання основних параметрів мікромоделювання, пропонуємо підхід до нормалізації основних параметрів моделей на підставі реальних характеристик АТЗ для визначення параметрів динамічного управління ТП.

Для визначення дистанції безпеки приймаємо в якості вихідної залежності визначення безпечної дистанції в потоці [14]

$$d = \frac{V^2}{2 \cdot a_{\max}}, \quad (5.12)$$

де  $a_{\max}$  – максимальне уповільнення (прискорення) автомобіля, м/с<sup>2</sup>.

Тоді, значення необхідної швидкості руху транспортного засобу, що перебуває на відстані до найближчої перешкоди в потоці (автомобіль, що

рухається попереду або стоп-лінія при забороняючому сигналі світлофора) визначається як

$$V = \sqrt{2 \cdot a_{\max} \cdot d} . \quad (5.13)$$

Прискорення транспортних засобів в потоці відрізняється за величиною, у залежності від складу транспортного потоку.

З урахуванням умов руху АТЗ у щільному потоці існує обмеження на швидкість руху АТЗ ( $V$ ), що пов'язана із технічними характеристиками АТЗ ( $V_{\min}$ ), яку необхідно визначити

$$V > V_{\min} . \quad (5.14)$$

Далі визначаємо мінімальну швидкість АТЗ на основі залежності [234]

$$V_{\min} \approx \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{\text{д}} \cdot n_e \cdot 3,6}{60 \cdot i} \approx 0,377 \cdot \frac{r_{\text{д}} \cdot n_e}{i} , \quad (5.15)$$

де  $\pi$  – const;

$n_e$  – кількість обертів колінчастого вала двигуна, об./хв;

$i$  – загальне передавальне число трансмісії автомобіля.

За умови, що мінімальні обороти двигуна при русі не можуть бути нижче 1000 об./хв для легкового автомобіля з передавальним числом трансмісії, при русі на першій передачі  $i = 7,97$ , можлива мінімальна швидкість руху відповідає 13,9 км/год.

Подальше визначення прискорення транспортного засобу при моделюванні було виконано з урахуванням параметрів реальної характеристики розгону АТЗ [235]. Для цього обираємо залежність нормованого крутного

моменту двигуна  $M \in [0;1]$  від нормованої кутової швидкості колінчатого вала  $\omega \in [0;1]$  (дані нормовані величини не мають розмірності) рис. 5.5

$$M(\omega) = 1 - (\omega - 0,5)^2 \quad . \quad (5.16)$$

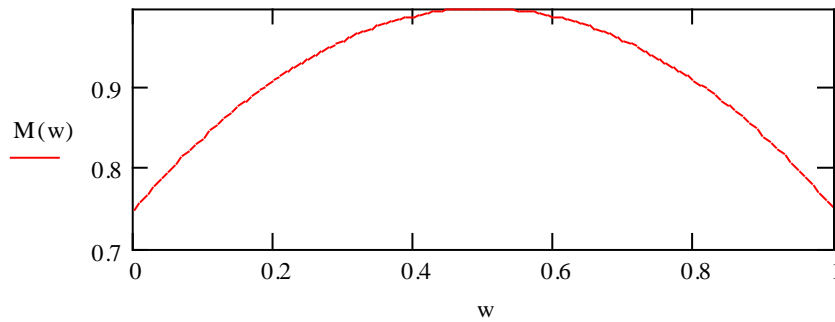


Рисунок 5.5 – Графік зміни швидкості колінчатого вала при розгоні

Надалі розглядаємо передатні відносини коробки передач АТЗ (у цьому випадку чотиришвидкісної),  $i = (1,2; 1,7; 3,0; 4,4)$ . За допомогою нормованої характеристики двигуна й передатних відносин було визначено залежність прискорення від поточної швидкості автомобіля. Для цього отримали їх нормовані значення, які відповідають позначенню  $V = 1$  – максимальній швидкості руху (170 км/год за замовчуванням),  $a(V) = 1$  максимальному прискоренню (3 м/с<sup>2</sup>). Тоді прискорення  $a(V)$  визначається за рівнянням (5.18), а графік його зміни від швидкості руху АТЗ наведено на рис. 5.6.

$$a(V) = a_{\max} \cdot M\left(\frac{4 \cdot V}{i_{\min([4V]+1;1)}}\right) \quad . \quad (5.17)$$

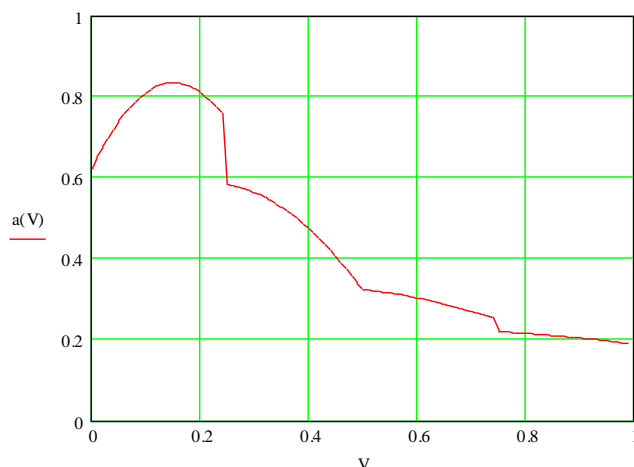


Рисунок 5.6 – Графік залежності прискорення від поточної швидкості АТЗ

Тоді швидкість АТЗ у потоці  $V_{\text{АТЗ}}(t)$  дорівнює

$$V_{\text{АТЗ}}(t) = 2,78 + \int_0^t a(x) dx, \quad (5.18)$$

де 2,78 – мінімально допустима швидкість руху, м/с (нижче 10 км/год водії приймають рішення про обстановку).

На підставі (5.18) визначаємо швидкість ТП в умовах підвищеної щільності як

$$V_{\text{ТП}}(t) = \int_0^{20} V_{\text{АТЗ}}(t) dx. \quad (5.19)$$

Верхня межа інтегрування прийнята з міркування, що автомобіль, що рухається зі швидкістю 10 км/год, прискорюючись, досягає швидкості 60 км/год через 20 с.

Отримані результати визначення прискорення АТЗ та дистанції безпеки при русі АТЗ у щільному потоці створили основу для розробки мікромоделі у вигляді матриці  $A$  засобами імітаційного моделювання.

Математична модель являє собою опис динамічного масиву однакових об'єктів – транспортних засобів, розмір якого непостійний і може змінюватися в процесі моделювання від 0 до 4000. На початку моделювання розмір масиву ( $n$ ) дорівнює 0. Опис кожного елемента даного масиву містить чотири параметри руху АТЗ: прискорення ( $\dot{x}_n$ ), швидкість ( $\ddot{x}_n$ ), поточна координата транспортного засобу ( $x_n$ ) та лічильник часу імпульсу ( $j_n$ ). Таким чином, стан моделі описується матрицею

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_n \\ \dot{x}_1 & \dot{x}_2 & \dot{x}_3 & \dots & \dot{x}_n \\ \ddot{x}_1 & \ddot{x}_2 & \ddot{x}_3 & \dots & \ddot{x}_n \\ j_1 & j_2 & j_3 & \dots & j_n \end{bmatrix}. \quad (5.20)$$

На кожному кроці інтегрування виконуються наступні дії

$$1. \quad n = 0 \vee x_n > S_\Gamma \rightarrow \begin{cases} n = n + 1 \\ x_n = \dot{x}_n = \ddot{x}_n = 0 \end{cases}. \quad (5.21)$$

Якщо на магістралі немає автомобілів або координата останнього згенерованого АТЗ більше, ніж параметр генератора  $S_\Gamma$ , то створюється новий автомобіль.

У масив додається новий елемент, який відповідає АТЗ, що в'їхав: на початку розглянутого перегону він не володіє ні швидкістю, ні прискоренням (зрушення в момент дозволяючого сигналу або в'їзд з примикаючої другорядної проїжджої частини). Наступне АТЗ буде створено в момент, коли попереднє покине "зону генератора"  $S_\Gamma$  – невеликий відрізок на початку розглянутого перегону, на якому згідно запропонованого рішення не може перебувати більше одного АТЗ. Варіювання зони генератора дозволяє регулювати щільність транспортного потоку при моделюванні.

$$2. \quad \forall n: x_n > 12000 \rightarrow n = n - 1 . \quad (5.22)$$

З математичної моделі виключаються всі автомобілі, координати яких більше 12000 (задана довжина ділянки ВДМ дорівнює 12 км).

Коли АТЗ покидає ділянку ВДМ, воно далі не розглядається.

$$3. \quad \forall n \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (x_{n-1} - x_n > [d]) \wedge [\dot{x}_n < V_{\text{lim}}(x_n)] \rightarrow \ddot{x}_n = a(\dot{x}_n) \cdot a_{1\text{max}} \\ \dot{x}_n > V_{\text{lim}}(x_n) \rightarrow \ddot{x}_n = -0,25 \cdot a_{2\text{max}} \\ (x_{n-1} - x_n \leq [d]) \vee (x_{n-1} - x_n \leq d_{\text{min}}) \vee (j_n > 0) \rightarrow \ddot{x}_n = -a_{2\text{max}} \end{array} \right. . \quad (5.23)$$

На цьому етапі моделювання проводиться урахування часу реакції водія при моделюванні дій водія АТЗ та виконується наступним чином. Вважаємо, що водій орієнтується по дистанції до АТЗ, що їде попереду, по швидкості свого ТЗ та швидкості АТЗ попереду. Якщо умови дозволяють підвищити швидкість (перша дія етапу 3), автомобіль отримує позитивне прискорення в залежності від власної швидкості (чим вище швидкість, тим нижче можливе прискорення автомобіля). Якщо поточна швидкість АТЗ вище безпечної, що визначається дистанцією до попереднього автомобіля, то застосовується штатне гальмування (друга дія етапу 3). У безпосередній близькості від попереднього АТЗ або в разі наявності перешкоди в напрямі руху, виконується повна зупинка АТЗ (не екстрене гальмування, але і не плавне пригальмовування, в даному випадку АТЗ зупиняється більш інтенсивно до нульової швидкості) – третя дія етапу 3.

$$4. \quad \forall n \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_n = \dot{x}_n + \Delta t \cdot \ddot{x}_n \\ \dot{x}_n < 0 \rightarrow \dot{x}_n = 0 \\ x_n = x_n + \Delta t \cdot \dot{x}_n \\ j_n = j_n - \Delta t \\ j_n < 0 \rightarrow j_n = 0 \end{array} \right. . \quad (5.24)$$



З кроком інтегрування  $\Delta t$  визначається нова швидкість і координата транспортного засобу, а також зменшується лічильник часу імпульсу, якщо він був позитивний. З точки зору безпеки руху, необхідна дистанція  $d$  обчислюється таким чином, щоб у разі раптового зупинення транспортного засобу попереду поточний автомобіль встиг загальмувати з прискоренням  $a_{2\min}$  та зупинитися за 1 м до нього

$$d = L + 1 + \frac{\dot{x}_i^2}{a_{2\min}}, \quad (5.25)$$

де  $L$  – довжина автомобіля, прийнята 5 м.

Структуру запропонованої математичної моделі руху АТЗ у потоці наведено на рис. 5.7.

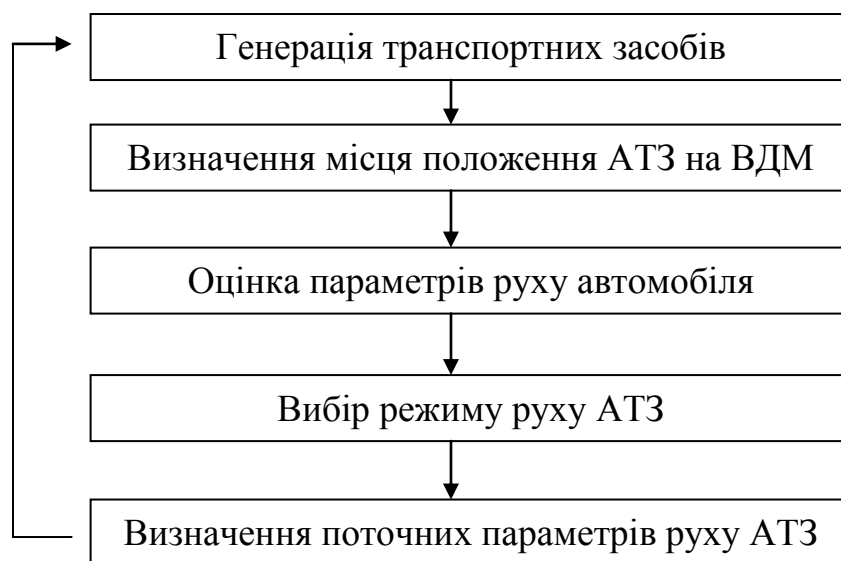


Рисунок 5.7 – Структура імітаційної мікромоделі руху АТЗ у потоці

У блоці «Генерація транспортних засобів» перевіряється умова можливості генерації нового автомобіля і включення його в загальну математичну модель руху ТП. Умова можливості генерації автомобіля - достатня відстань між останнім згенерованим автомобілем і початком

координат. Новий автомобіль генерується на початку координат з нульовою швидкістю та прискоренням.

Блок «Визначення місця положення АТЗ на ВДМ». В даному блоці виконується перевірка знаходження автомобіля в межах траси (до 12 км).

У блоці «Оцінка параметрів руху автомобіля» визначається взаємне розташування автомобілів (поточний та попередній) і враховується обмеження швидкості на даній ділянці ВДМ.

При здійсненні вибору режиму руху, залежно від параметрів руху приймається рішення про можливість розгону, необхідності гальмування або екстреного гальмування.

Визначення поточних параметрів руху автомобіля здійснюється на підставі вибору режиму руху АТЗ шляхом інтегрування прискорення для визначення нової швидкості та положення автомобіля на дорозі.

Розроблена мікромодель руху АТЗ у цільному потоці належить до класу дискретних моделей, у яких кожний окремий АТЗ самовідтворюється із урахуванням параметрів руху, які залежать від технічних характеристик транспортного засобу та поведінки водія. Наведений результат було отримано на підставі удосконалення елементів теорії клітинних автоматів [155] та динамічних параметрів руху АТЗ.

Програмне забезпечення для імітаційної моделі поведінки АТЗ у транспортному потоці реалізовано в інтегрованому середовищі розробки додатків Delphi 7.0. Алгоритм імітаційної моделі наведено у додатку Д.

Головну форму екрану програми та сам процес генерації АТЗ при наявності перешкод у напрямку руху наведено на рис. 5.8.

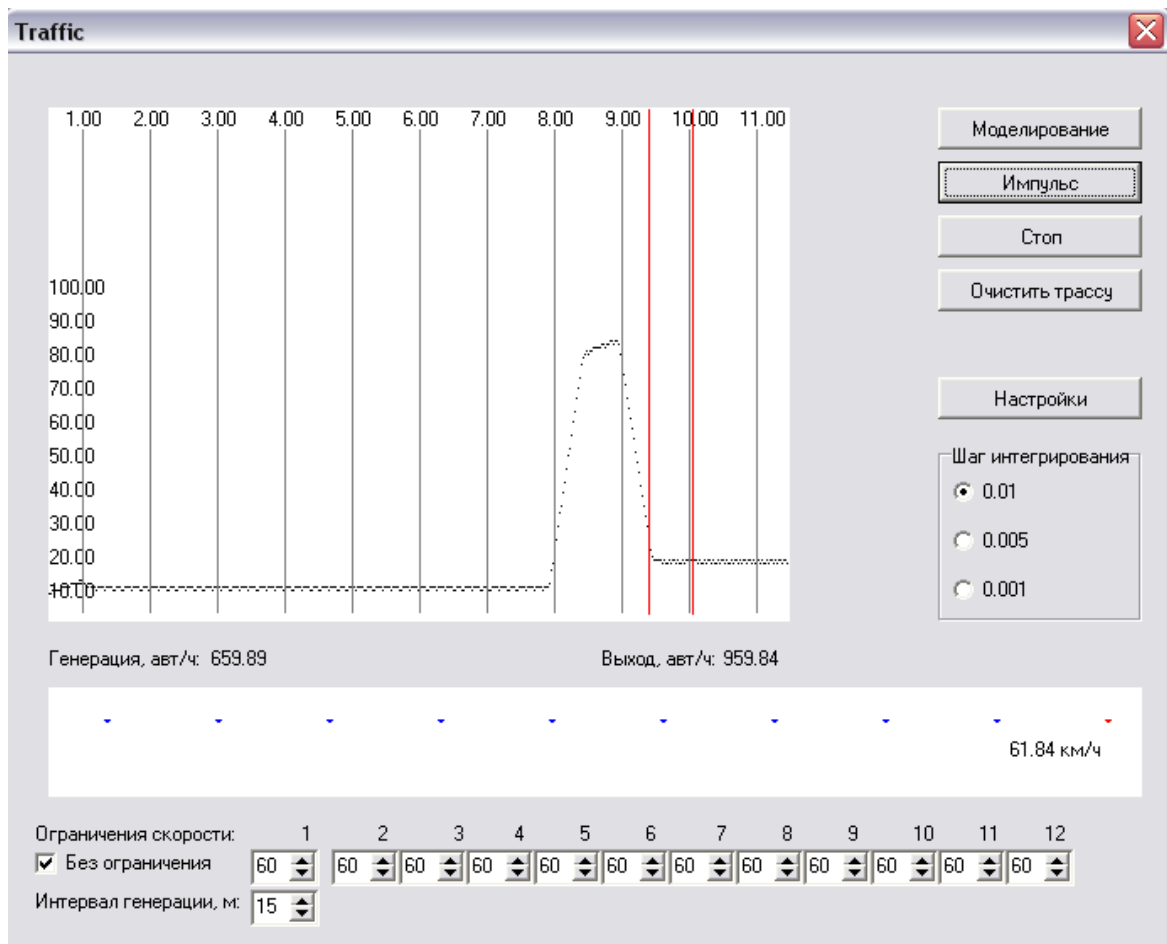


Рисунок 5.8 – Головна екранна форма програмної реалізації імітаційної моделі

Вхідні параметри моделі визначаються як:

- максимальна технічна швидкість транспортного засобу  $V_{\max}$ , за замовченням 170 км/год;
- максимальне прискорення при розгоні,  $a_{1\max}$ , за замовченням 3 м/с<sup>2</sup>;
- максимальне прискорення при гальмуванні,  $a_{2\max}$ , за замовченням 5 м/с<sup>2</sup>;
- тривалість збудовуючого імпульсу,  $T_{\text{и}}$ , за замовченням 600 с;
- мінімальна дистанція при русі з місця,  $d_{\min}$ , за замовченням 10 м;
- набір обмежень швидкостей на кожному кілометрі магістралі,  $V_{\text{лім}}$ , за замовченням усі обмеження дорівнюють 60 км/ч;
- відстань, яку треба пройти останньому згенерованому автомобілю, щоб був створений наступний,  $S_{\text{г}}$ , за замовченням 15 м.

Особливістю запропонованої моделі є можливість у режимі діалогу досліджувати вплив перешкод, які виникають у напрямку руху ТП, таких як наявність регульованого перетинання або ДТП, які впливають на зміну параметрів руху автотранспортних засобів у потоці із урахуванням поведінки водія АТЗ.

Запропонована математична модель руху окремого АТЗ в потоці відрізняється від відомих мікромоделей, які надають опис параметрів руху двох АТЗ, що у заторовому режимі, коли не утримується дистанція безпеки руху та не враховується вплив довжини динамічного габариту АТЗ.

Результати розробленої мікромоделі руху АТЗ у щільному ТП із отриманням аналітичних залежностей його швидкості та інтенсивності за наявності параметру управління у напрямку руху ТП та проведеної формалізації впливу перешкод на рух АТЗ (чи світлофорне регулювання, чи попередній транспортний засіб – (5.4)) із визначенням поточної швидкості АТЗ (5.6), у подальших дослідженнях основ динамічного управління надають підґрунтя для мікромоделювання параметрів «ударної хвилі» як основної причини виникнення заторів на ВДМ.

Але рішення такої задачі аналітичними методами є складним, оскільки при наявності світлофорного регулювання щільність і швидкість ТП на перегоні в різні моменти часу буде змінюватися. Тому, для опису зміни параметрів ТП на складних ділянках ВДМ з метою дослідження поведінки ТП розроблено імітаційну модель, яка дозволяє вирішувати завдання, де аналітичні методи не застосовуються, наприклад, у разі безперервно-дискретних чинників, випадкових збурень, нелінійних характеристик елементів системи, які мають місце у процесі руху щільного ТП. На рисунку 5.9 наведено загальну схему розробленої імітаційної моделі ТП, до складу якої входить модель (5.20).

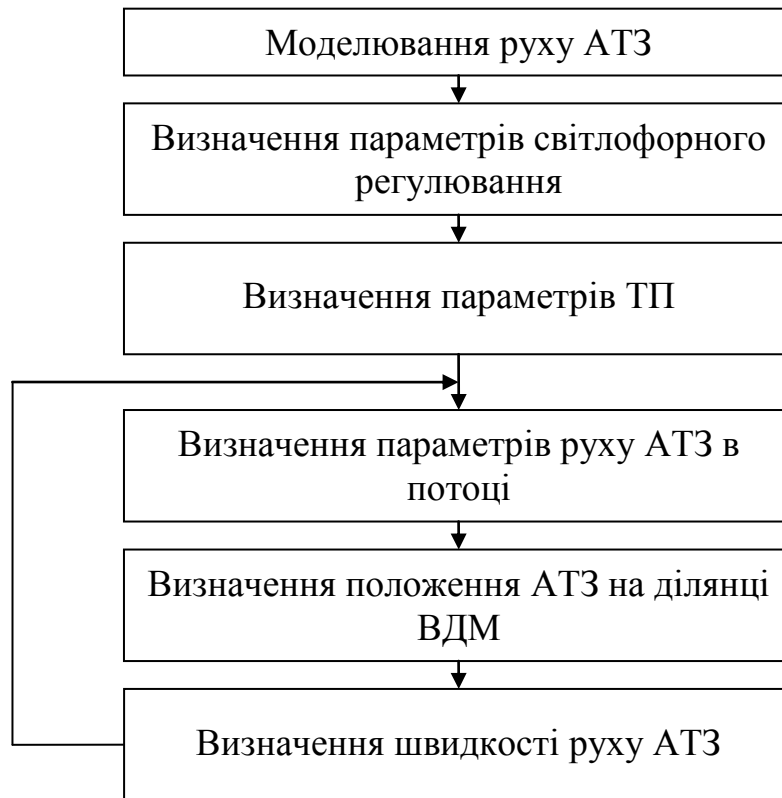


Рисунок 5.9 – Основні етапи імітаційного моделювання «ударної хвилі»

Початковими умовами для моделювання є інтенсивність ТП на вході ділянки; довжина розглянутої ділянки ВДМ  $x_{\max}$ ; координата перерізу ділянки  $x_0$ , де розташована стоп-лінія регульованого перехрестя; кількість АТЗ  $n$ , що знаходяться на перегоні. Для кожного АТЗ у нульовий момент часу визначається координата його положення на ділянці

$$x_i = i \cdot \frac{x_{\max}}{N}, \quad (5.26)$$

де  $i$  – порядковий номер АТЗ в потоці.

Процес моделювання починається в момент часу  $t=0$ , в який всі АТЗ рівномірно розподілені по довжині досліджуваного перегону ВДМ та для кожного з них відомі локальні щільності (5.5) та поточна швидкість руху (5.6).

Координати положення АТЗ на ділянці ВДМ розраховуються з урахуванням швидкості його руху наступним чином

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + \Delta t \cdot \frac{V_i(t) + V_i(t + \Delta t)}{2}. \quad (5.27)$$

Результати моделювання процесу утворення ударної хвилі при русі ТП зі швидкістю  $V_{\text{св}} = 60$  км/год для  $n=80$  авт. на перегоні довжиною 2000 м в залежності від часу моделювання, наведено на рисунках 5.10-5.12.

Наявність перешкоди при русі моделюється обурюючим впливом на відстані 1500 м від початку перегону, що відповідає наявності світлофорного пристрою на перехресті ВДМ.

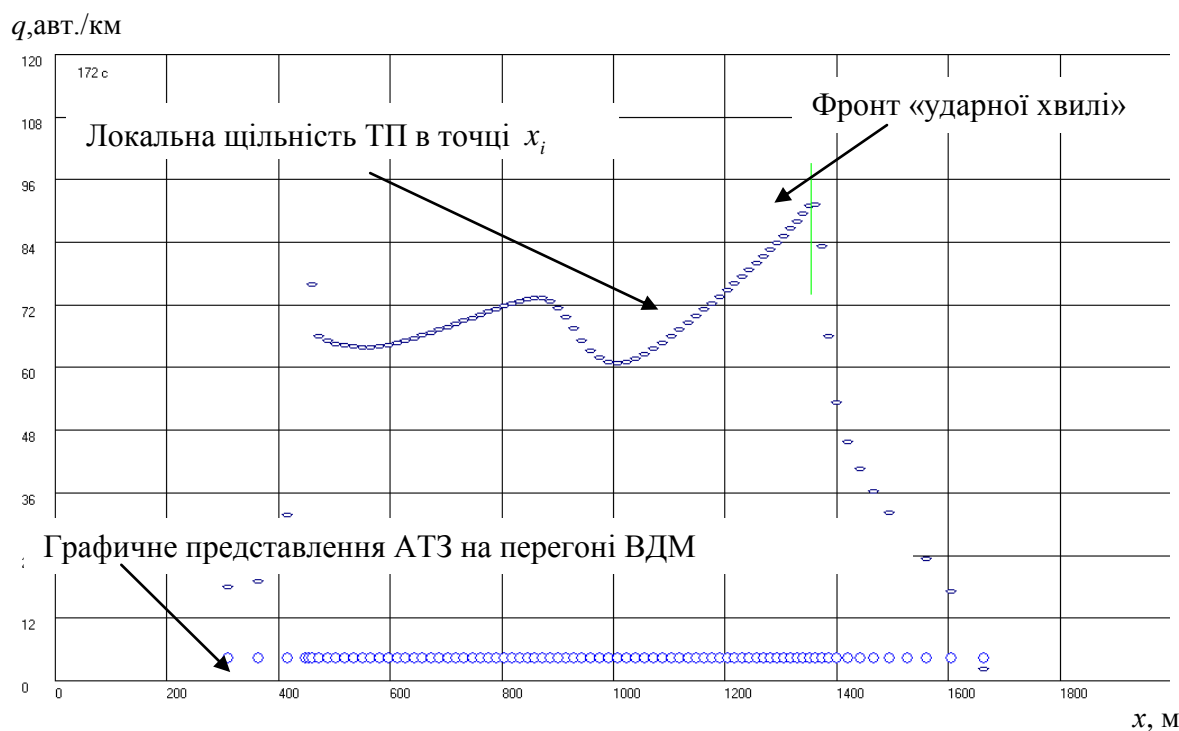


Рисунок 5.10 – Результати моделювання ударної хвилі ( $n=80$  авт.,  $t=172$  с)

У процесі моделювання координата положення кожного АТЗ змінюється в часі, в залежності від сформованих параметрів руху. Заборонний сигнал світлофора формує чергу на проїзд перехрестя, а на перегоні утворюється УХ. На рисунку 5.10 наочно доведено, що за час моделювання  $t=172$  с фронт УХ формується в перерізі перегону з координатою  $x=1350$  м. При збільшенні часу

моделювання ( $t=202$  с) отримали пересування фронту УХ на координату  $x=1100$  м (рис. 5.11).

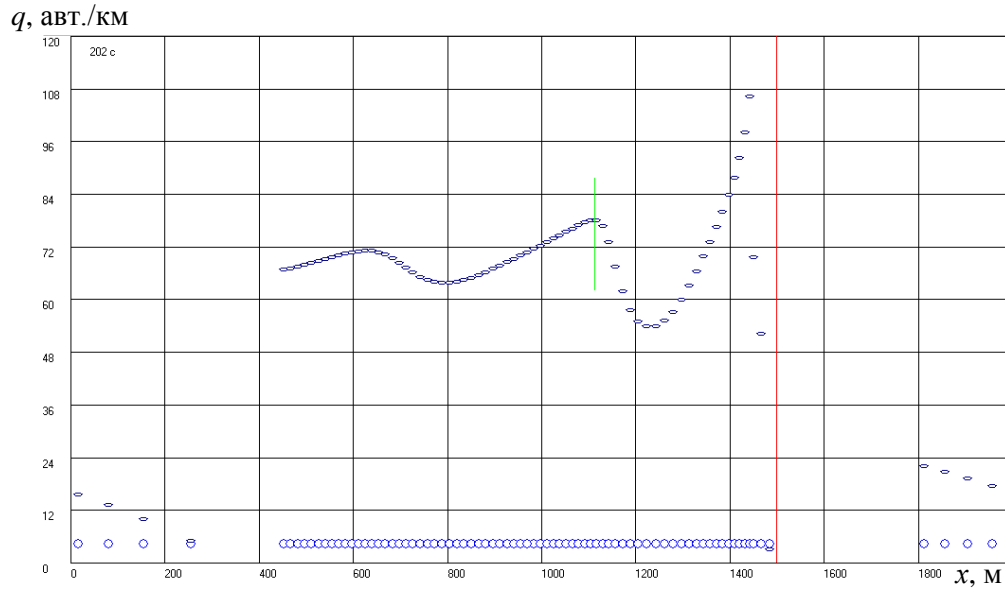


Рисунок 5.11– Результати моделювання ударної хвилі ( $n=80$  авт.,  $t=202$  с)

Подальше збільшення часу моделювання до 242 с (рис. 5.12) доводить, що фронт УХ пересувається на координату  $x=800$  м.

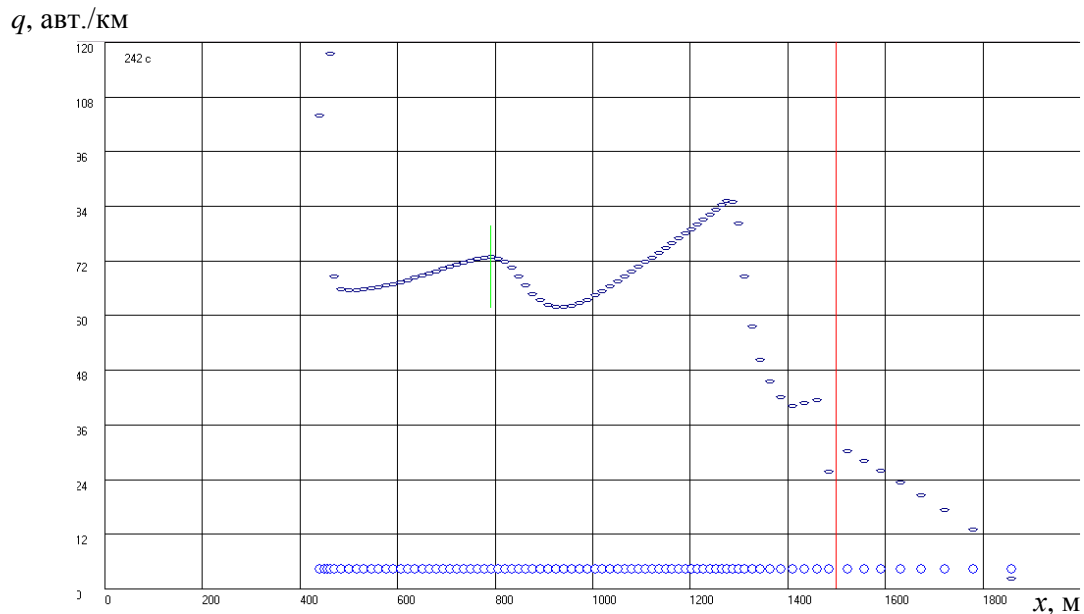


Рисунок 5.12 – Результати моделювання ударної хвилі ( $n =80$  авт.,  $t =242$  с)

Аналіз отриманих результатів імітаційного моделювання руху щільного ТП на перегоні ВДМ протягом часу у вигляді графіків щільності ТП від довжини ділянки ВДМ, дозволили зробити наступні висновки:

– за 50 с (172-202 с) фронт ударної хвилі переміщується на 230 м (координати  $x=1350$  м,  $x=1120$  м), що відповідає швидкості поширення ударної хвилі – 4,6 м/с=16,7 км/год. За наступні 40 секунд (202-242 с) фронт рухається зі швидкістю 8,25 м/с=29,7 км/год у напрямку, протилежному напрямку руху ТП. Підвищення швидкості поширення ударної хвилі з віддаленням від координати її виникнення, характеризується зменшенням кута нахилу графіка щільності від фронту ударної хвилі до початку координат;

– ударна хвиля за фронтом поширюється повільніше, ніж перед ним. При моделюванні руху транспортних засобів на перегоні із збільшенням інтенсивності ТП ( $n=120$ ), перші 200 метрів від світлофору ударна хвиля проходить зі швидкістю 7,5 м/с, наступні – 8,3 м/с. Таким чином, швидкість розповсюдження ударної хвилі знаходиться у зворотній залежності від щільності транспортного потоку і в прямій залежності від швидкості руху АТЗ.

Отримані параметри поширення УХ на ділянці ВДМ дозволяють зробити висновок про те, що управління фронтом УХ засобами світлофорного регулювання не ефективно, оскільки затор утворюється швидше, ніж черга АТЗ роз'їжджається. Тому, для запобігання заторового стану ТП, керуючий вплив необхідно спрямовувати в кінець УХ.

У якості експерименту було проведено моделювання швидкісного режиму на ділянці ВДМ та виявлено, що при різних швидкісних режимах щільність потоку розподіляється по довжині ділянки однаково. Отже, однаковий швидкісний режим руху АТЗ по всій довжині перегону не дозволяє попередити утворення затору і не змінює щільність ТП по довжині перегону. Це надає підстави запропонувати обмеження інтенсивності ТП на перегоні, зробити зміни швидкості руху ТП не по всій довжині ділянки, а на певному її відрізку. Така пропозиція ґрунтується на тому, що максимальна інтенсивність



ТП на перегоні спостерігається на певній відстані від кінцевої межі ділянки ВДМ, а далі у напрямку руху потоку вона знижується і формує зону низької пропускної спроможності, яка саме створює передумови для поширення УХ в потоці. При цьому найбільша швидкість зростання щільності ТП також спостерігається не біля самої кінцевої межі ділянки ВДМ, а на відстані від неї. Отже, зниження швидкості руху на підході до цієї ділянки дозволить змінити умови утворення черги АТЗ. Для реалізації запропонованої зміни швидкісного режиму на ділянці ВДМ необхідно визначити її параметри.

### 5.3 Розробка імітаційної моделі руху ТП для динамічного управління дорожнім рухом

Для зміни часу проїзду перегону за рахунок попередження виникнення заторів на ВДМ пропонується зменшення інтенсивності ТП на підході до стоп-лінії перехрестя шляхом зміни його швидкості руху.

Розглянемо процес руху АТЗ на умовній ділянці ВДМ в одному напрямку і по одній смузі. У цьому випадку АТЗ позбавлені можливості маневрувати по ширині проїзної частини, що відповідає умовам руху у щільному потоці на реальній ВДМ. Зниження швидкості ТП в певній зоні ділянки ВДМ, сприяє обмеженню інтенсивності підходу АТЗ до перехрестя, що зменшує чергу АТЗ біля стоп-лінії перехрестя. У попередніх дослідженнях процесу руху АТЗ у щільному потоці було виявлено, що перед перехрестям необхідно скасувати обмеження швидкісного режиму, бо це дозволить звільнити зону перед перехрестям. Такий підхід надає можливість організувати зону вільного руху для проїзду АТЗ перехрестя без уповільнення, останову та розгону, бо саме означені режими руху АТЗ суттєво впливають на показники ефективності ДР. Якщо зона вільного руху за зоною обмеження швидкісного режиму буде відсутня, то утворюється ділянка високої щільності, що призводить до



При цьому визначати довжину черги АТЗ перед стоп-лінією перехрестя необхідно із урахуванням параметрів циклу світлофорного регулювання та поточних значень інтенсивності ТП на перегоні за залежністю

$$l_{\text{оч}} = \frac{N_{\text{ТП}} \cdot (l_{\text{авт.}} + \Delta l)}{n_{\text{ц}} \cdot (1 - \lambda)}, \quad (5.29)$$

де  $N_{\text{ТП}}$  – інтенсивність руху транспортного потоку на перегоні, авт./год.;

$l_{\text{авт.}}$  – середня довжина автомобіля в транспортному потоці, м;

$\Delta l$  – зазор безпеки між автомобілями в черзі, м;

$n_{\text{ц}}$  – параметр, що характеризує частоту зміни циклу світлофорного регулювання протягом години ( $n_{\text{ц}} = \frac{3600}{T_{\text{ц}}}$ , де  $T_{\text{ц}}$  – тривалість циклу світлофорного регулювання, с) [106];

$\lambda$  – параметр, що характеризує частку основного такту в циклі світлофорного регулювання та визначає долю ефективного часу для проїзду АТЗ через перехрестя [141]

$$\lambda = \frac{t_o}{T_{\text{ц}}}, \quad (5.30)$$

де  $t_o$  – тривалість основного такту в даному напрямку на перехресті, с.

Тоді  $(1 - \lambda)$  визначає частку неефективного часу, яка відповідно впливає на формування черги перед перехрестям. На підставі отриманої залежності (5.29) припускаємо, що довжина черги АТЗ залежить не тільки від прямих параметрів циклу світлофорного регулювання, а більш від введених параметрів  $n$  та  $\lambda$ . Це пов'язано із визначенням збільшення ефективного часу для проїзду АТЗ в циклі світлофорного регулювання, тому моделювання зміни цих параметрів вважаємо необхідним для визначення їх взаємодії при поточній

інтенсивності ТП на підході до регульованого перехрестя. Розрахункові значення довжини черги в залежності від інтенсивності руху ТП на перегоні представлені в табл. 5.1. На рис. 5.14 наведено результати виявленого взаємного впливу параметрів  $n$  та  $\lambda$  на довжину черги перед перехрестям.

Оскільки параметри перегону ВДМ незмінні, час проїзду по ньому залежить тільки від швидкості руху. Умовна схема розподілу довжини перегону на зони керуваної швидкості наведено на рис. 5.15.

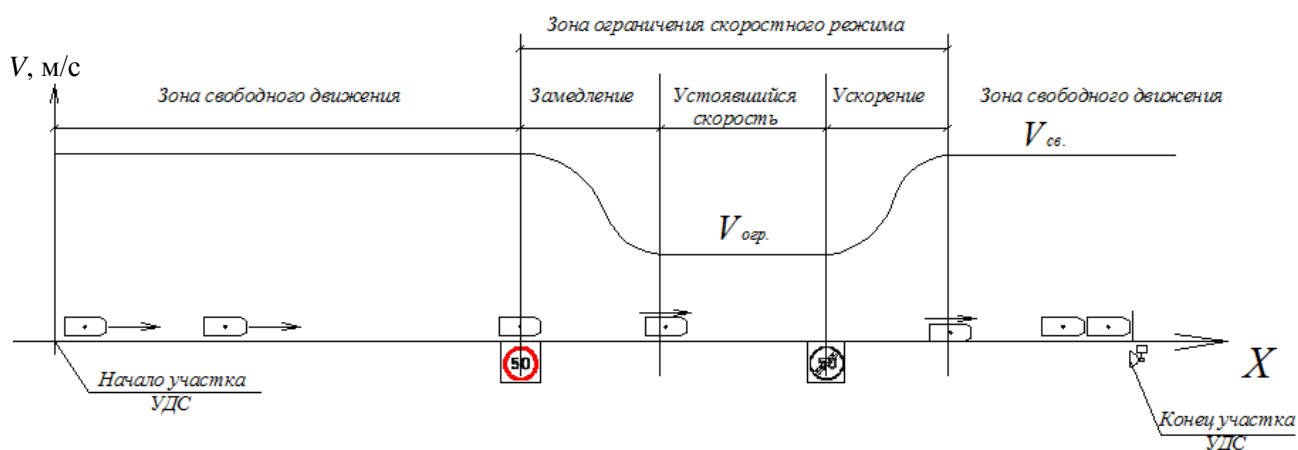


Рисунок 5.15 – Схема розміщення зон швидкісного режиму

На підставі міркувань щодо необхідності введення перед перехрестям зони вільного руху АТЗ, пропонуємо на перегоні ВДМ відокремити три основних зони:

- зону вільного руху, яка починається на вході ділянки і триває до зони обмеження швидкісного режиму;
- зону обмеження швидкісного режиму;
- зону вільного руху, що починається наприкінці зони обмеження швидкісного режиму і триває до стоп-лінії перехрестя.

Таблиця 5.1 – Визначення довжини черги на підході до регульованого перехрестя

Інтенсивність транспортного потоку ( $N$ ), авт./год.	Середня довжина автомобіля в потоці ( $l_{авт.}$ ), м	Зазор безпеки між автомобілями в черзі ( $\Delta l$ ), м	Кількість циклів регулювання за годину ( $n_{ц}$ ), од. тривалістю				Довжина черги ( $l_{очередь}$ ), м, при $\lambda$											
			30 с	60 с	90 с	120 с	0,3				0,5				0,7			
100	5	2	120	60	45	30	8	17	22	33	12	23	31	47	19	39	52	78
200	5	2					17	33	44	67	23	47	62	93	39	78	104	156
300	5	2					25	50	67	100	35	70	93	140	58	117	156	233
400	5	2					33	67	89	133	47	93	124	187	78	156	207	311
500	5	2					42	83	111	167	58	117	156	233	97	194	259	389
600	5	2					50	100	133	200	70	140	187	280	117	233	311	467
700	5	2					58	117	156	233	82	163	218	327	136	272	363	544
800	5	2					67	133	178	267	93	187	249	373	156	311	415	622
900	5	2					75	150	200	300	105	210	280	420	175	350	467	700
1000	5	2					83	167	222	333	117	233	311	467	194	389	519	778
1100	5	2					92	183	244	367	128	257	342	513	214	428	570	856
1200	5	2					100	200	267	400	140	280	373	560	233	467	622	933

$\lambda = 0,3$

$\lambda = 0,5$

$\lambda = 0,7$

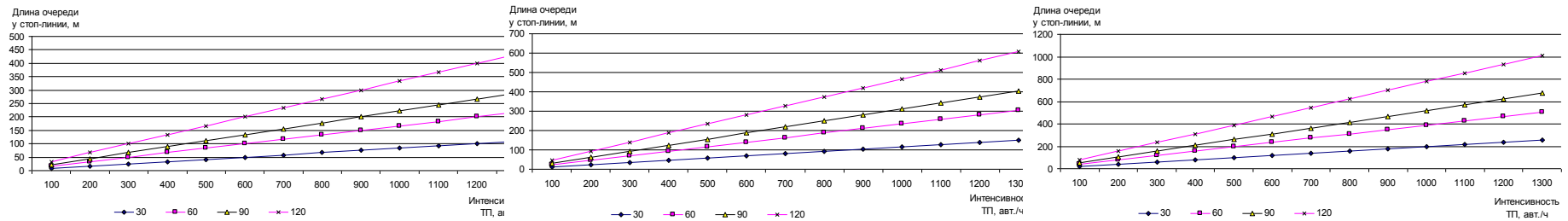


Рисунок 5.14 – Графіки залежності довжини черги від ефективної частки циклу світлофорного регулювання (зліва направо відповідно  $\lambda=0,3$ ;  $\lambda=0,5$ ;  $\lambda=0,7$ )

Розглянемо окремо параметри руху АТЗ у кожній зоні. Рух АТЗ в зоні обмеження швидкісного режиму складається з трьох фаз: фаза уповільнення зі швидкості вільного руху до розрахованої швидкості; фаза руху з обмеженням швидкості (розрахованої); фаза прискорення після скасування обмеження швидкості (рис. 5.15).

З урахуванням запропонованого рішення розподілу довжини перегону на три окремі зони руху, час руху АТЗ по перегону ( $t_{\text{пер.}}$ ) можливо визначити за формулою

$$t_{\text{пер.}} = (t_{\text{св.1}} + t_{\text{замедл.}} + t_{\text{огр.}} + t_{\text{ускор.}} + t_{\text{св2}}), \quad (5.31)$$

де  $t_{\text{пер.}}$  – час проїзду перегону ВДМ, с;

$t_{\text{св.1}}$  – час проїзду зони перегону зі швидкістю вільного руху до зони обмеження швидкості, с;

$t_{\text{замедл.}}$  – час уповільнення до зони обмеження швидкості руху, с;

$t_{\text{огр.}}$  – час проїзду зони обмеження швидкості руху, с;

$t_{\text{ускор.}}$  – час прискорення АТЗ до швидкості вільного руху, с;

$t_{\text{св2.}}$  – час проїзду зони вільного руху до перехрестя, с.

Визначимо час проїзду АТЗ по перегону для кожної зони руху.

1) Час проїзду зони вільного руху на початку перегону визначаємо як

$$t_{\text{св.1}} = \frac{l_{\text{св}} - l_{\text{замедл.}}}{V_{\text{св}}}, \quad (5.32)$$

де  $l_{\text{св.}}$  – відстань від початку перегону ВДМ до початку зони обмеження швидкості руху, м;

$l_{\text{замедл.}}$  – довжина зони уповільнення швидкості, м;

$V_{\text{св.}}$  – нормативна швидкість вільного руху, м/с.

2) Час уповільнення при підході до зони обмеження швидкості руху визначаємо за залежністю

$$t_{\text{замедл.}} = \frac{V_{\text{св}} - V_{\text{огр}}}{3,6 \cdot 2 \cdot a_T}, \quad (5.33)$$

де  $V_{\text{огр}}$  – розрахункове обмеження швидкості руху перегону, км/год.;

$a_T$  – середнє уповільнення автомобіля, м/с<sup>2</sup>;

3,6 – коефіцієнт приведення одиниць вимірювання.

3) Час проїзду зони обмеження швидкісного режиму

$$t_{\text{огр.}} = \frac{l_{\text{огр.}}}{V_{\text{огр.}}}, \quad (5.34)$$

де  $l_{\text{огр.}}$  – довжина зони обмеження швидкості руху, м.

4) Час прискорення до швидкості вільного руху після обмеження швидкості руху

$$t_{\text{ускор.}} = \frac{V_{\text{св}} - V_{\text{огр}}}{3,6 \cdot 2 \cdot a_P}, \quad (5.35)$$

де  $a_P$  – середнє прискорення АТЗ в потоці, м/с<sup>2</sup>.

5) Час проїзду ділянки ВДМ зі швидкістю вільного руху, після зони обмеження

$$t_{\text{св.2}} = \frac{l_{\text{зн.}}^{\text{отм}}}{V_{\text{св}}}, \quad (5.36)$$

де  $l_{\text{зн.}}^{\text{отм.}}$  – відстань від стоп-лінії до зони обмеження швидкості, м.

Після визначення складових часу проїзду відповідних зон руху по перегону, критерій оптимізації часу руху АТЗ відповідно до постанови задачі зменшення часу проїзду перегону ВДМ можливо отримати як

$$t_{\text{пер}} \rightarrow \min . \quad (5.37)$$

При цьому система обмежень має вигляд

$$\begin{cases} V_{\text{св}} = \text{const}; \\ V_{\text{огр.}} = \text{const}; \\ l_{\text{зн.}}^{\text{отм.}} = \text{const}; \\ a_{\text{T}} = \text{const} \\ a_{\text{P}} = \text{const}, \end{cases} . \quad (5.38)$$

Тоді довжина зони обмеження швидкісного режиму ( $l_{\text{огр.}}$ ) повинна бути достатньою для зменшення швидкості руху з заданим уповільненням

$$l_{\text{огр.}} \geq l_{\Delta V} , \quad (5.39)$$

де  $l_{\Delta V}$  – відстань, яку долає АТЗ за час зниження швидкості вільного руху до рівня обмеженої швидкості, м.

Знак нерівності в умові (5.39) обумовлений стохастичним характером поведінки водіїв АТЗ. Процес проїзду зони обмеження швидкісного режиму може відбуватися за двома сценаріями:

1) водій АТЗ, наближаючись до ділянки обмеження швидкісного режиму, розпізнає інформацію дорожнього знака обмеження швидкості руху і завчасно вживає заходів до зниження швидкості руху. При такому алгоритмі руху АТЗ надходить на ділянку обмеження зі швидкістю, рівної швидкості обмеження. У



цьому випадку, довжина зони обмеження швидкісного режиму може бути мінімальною ( $l_{\text{огр.}} > l_{\Delta V}$ );

2) водій АТЗ, наближаючись до ділянки обмеження швидкісного режиму, розпізнає інформацію дорожнього знака, але заходи щодо зниження швидкості руху вживає тільки після в'їзду на ділянку обмеження. У цьому випадку довжина зони обмеження швидкісного режиму повинна бути достатньою для уповільнення АТЗ зі швидкості вільного руху до обмеження швидкості. Такий алгоритм проїзду вимагає більшої, в порівнянні з першим алгоритмом, довжини ділянки обмеження. Беручи до уваги «найгірший» алгоритм проїзду зони обмеження, можна визначити умову визначення довжини зони обмеження ( $l_{\text{огр.}} = l_{\Delta V}$ ).

Надалі визначаємо довжину зони зниження швидкості руху АТЗ за умовою  $l_{\text{огр.}} = l_{\Delta V}$  на підставі наявності різниці швидкості вільного руху  $V_{\text{св}}$  та при її обмеженні ( $V_{\text{огр}}$ )

$$\Delta V = V_{\text{св}} - V_{\text{огр}} . \quad (5.40)$$

Для цього доцільно урахувати гальмівний шлях АТЗ [236], що впливає на час уповільнення. Тоді

$$l_{\text{огр.}} = l_{\Delta V} = \Delta V \cdot \left( \tau_c + \frac{\tau_n}{2} \right) + \frac{\Delta V^2}{2 \cdot a_{\text{уст}}} - \frac{a_{\text{уст}} \cdot \tau_n^2}{24} , \quad (5.41)$$

де  $\tau_c$  – час запізнювання гальмової системи АТЗ, с;

$\tau_n$  – час розгону або гальмування, с;

$a_{\text{уст}}$  – стале уповільнення АТЗ, м/с<sup>2</sup>.

Стале уповільнення є показником ефективності гальмування [234] і його мінімальним значенням є нормативний показник. Відповідно до правил застосування дорожніх знаків [232], умови зниження швидкості не повинні

вимагати від водіїв необхідності вдаватися до екстреного гальмування. Тому застосовуємо середнє значення прискорення/уповільнення, яке характерне для процесу руху ТП у міських умовах у відповідності до стандартів.

На наступному кроці необхідно визначити швидкість руху в зоні обмеження. Пропонуємо провести ці розрахунки за вимогою, що пропускна спроможність перегону відповідає пропускній спроможності перехрестя для організації безупинного проїзду АТЗ

$$P_{\text{огр}} = P_{\text{пер}} , \quad (5.42)$$

де  $P_{\text{огр}}$  – пропускна спроможність перегону ВДМ в зоні обмеження швидкісного режиму, авт./год.;

$P_{\text{пер}}$  – пропускна спроможність регульованого перехрестя, авт./год.

Такий підхід дозволить визначити швидкість руху АТЗ для забезпечення необхідної інтенсивності ТП на ділянці ВДМ.

Для узгодження параметрів руху АТЗ на перегоні та перехресті необхідно визначити вплив параметрів світлофорного регулювання на пропускну спроможність перехрестя, яку визначаємо наступним чином

$$P_{\text{пер}} = \frac{3600 \cdot \left( t_o - \frac{V}{26 \cdot a} \right)}{t_{\text{п}} \cdot T_{\text{ц}}} , \quad (5.43)$$

де  $V$  – швидкість руху АТЗ на перехресті, км/год;

$t_o$  – час основного такту циклу регулювання, с;

$t_{\text{п}}$  – проміжний час циклу світлофорного регулювання, с;

$T_{\text{ц}}$  – цикл світлофорного регулювання, с.

Тоді на підставі фундаментальної залежності параметрів ТП  $P = q \cdot V$  можливо визначити швидкість руху АТЗ на перегоні за наявності її обмеження

$$V_{\text{орг}} = \frac{P_{\text{пер}}}{q} . \quad (5.44)$$

Таким чином, визначена за допомогою виразу (5.44) швидкість руху в зоні обмеження забезпечує проїзд АТЗ перехрестя без зупинки, що попереджає виникнення черги на проїзд перехрестя та формування затору.

На підставі отриманих аналітичних залежностей було запропоновано методику визначення параметрів зміни швидкісного режиму на ділянці ВДМ, до складу якої належать наступні операції:

- Визначення інтенсивності ТП та параметрів світлофорного регулювання на перехресті;
- Розрахунок пропускної спроможності на стоп-лінії перехрестя

$$P_{\text{пер}} = \frac{3600 \cdot \left( t_3 - \frac{V}{26 \cdot a} \right)}{t_c \cdot T_{\text{ц}}} ; \quad (5.45)$$

- Розрахунок рівня швидкості АТЗ у зоні обмеження

$$V_{\text{орг}} = \frac{P_{\text{пер}}}{q} ; \quad (5.46)$$

- Розрахунок довжини зони обмеження швидкісного режиму

$$l_{\text{орг}} = (l_{\Delta V}) = \Delta V \cdot \left( \tau_c + \frac{\tau_{\text{н}}}{2} \right) + \frac{\Delta V^2}{2 \cdot a_{\text{уст}}} - \frac{a_{\text{уст}} \cdot \tau_{\text{н}}^2}{24} ; \quad (5.47)$$

- Розрахунок довжини ділянки вільного руху перед перехрестям

$$l_{\text{зн.}}^{\text{отм.}} = \frac{N_{\text{ТП}} \cdot (l_{\text{авт.}} + \Delta l)}{n_{\text{ц}} \cdot (1 - \lambda)}. \quad (5.48)$$

Таким чином, було теоретично обґрунтовано та методично визначено параметри динамічного управління швидкістю руху ТП для зменшення інтенсивності ТП на підході до складної ділянки мережі для запобігання утворення заторового стану ВДМ. Запропоновані заходи зменшують час руху по перегону в цілому, що підвищує пропускну спроможність елементів ВДМ.

Проведення експериментальних досліджень по управлінню швидкістю ТП на перегоні ВДМ обмежено з ряду причин, основними з яких є високі витрати на реалізацію експерименту, а також, що особливо важливо, вимогами забезпечення безпеки дорожнього руху. Тому для дослідження режимів руху АТЗ в умовах затору імітаційне моделювання є більш ефективним [163, 237]. Воно дозволяє розглядати функціонування складного процесу ДР як зміну станів, що описуються основною фазовою змінною – щільністю транспортного потоку.

Прикладом відомих пакетів імітаційного моделювання в сфері організації руху транспортних потоків є програмні продукти VISSIM (PTV AG, Німеччина) [238], GERTRAM / AIMSUN [239], Paramics [240]. Існуючі системи моделювання відображають реакцію транспортного потоку на збурюючий вплив (заборонний сигнал світлофора), який є однією з причин утворення УХ. Але існуючі системи імітаційного моделювання дозволяють управляти тільки фронтом УХ, тоді як ми пропонуємо змінювати параметри «хвоста» УХ. Тому для модельного експерименту необхідно розробити імітаційну модель руху ТП на ділянці ВДМ, яка дозволить визначити параметри руху АТЗ на перегоні ВДМ.

Необхідними параметрами імітаційного моделювання є:

- максимальна швидкість транспортного потоку  $V_{\text{max}}$ , км/год;
- максимальне прискорення при розгоні  $a_{1\text{max}}$ , м/с<sup>2</sup>;
- максимальне прискорення при гальмуванні  $a_{2\text{max}}$ , м/с<sup>2</sup>;

- тривалість циклу світлофорного регулювання,  $T_{\text{ц}}$ , с;
- інтенсивність руху транспортного потоку  $N$ , авт/год;
- максимальна щільність транспортного потоку  $q_{\text{max}}$ , авт/км.

На рис. 5.16 представлено загальну схему імітаційного моделювання параметрів ТП.

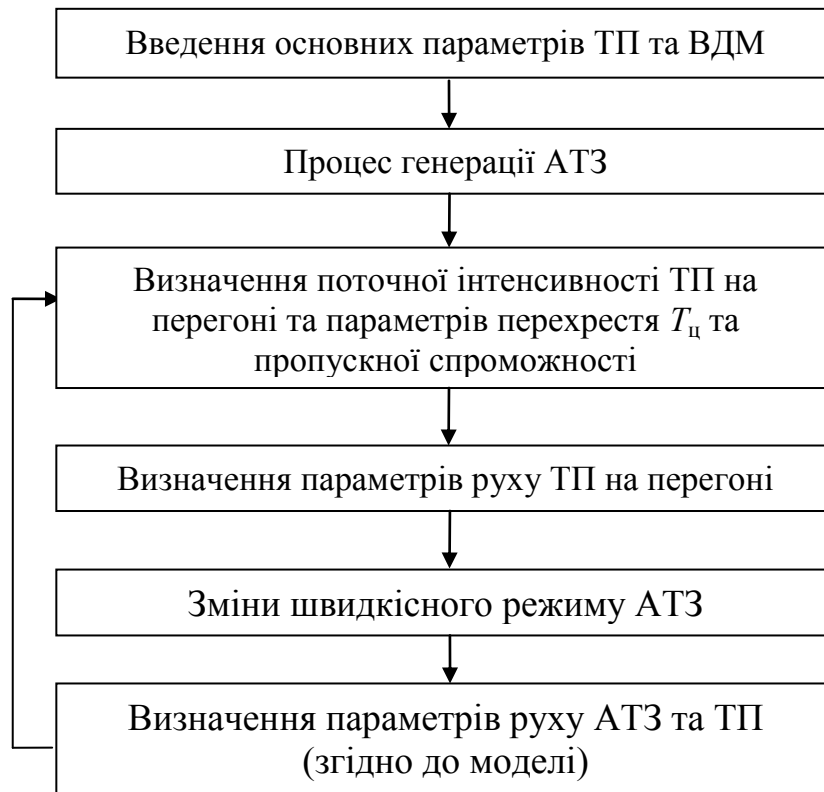


Рисунок 5.16 – Етапи імітаційного моделювання управління ТП

В імітаційній моделі виконуються наступні операції:

- у блоці генерації АТЗ перевіряється умова генерації нового АТЗ і включення його в загальну математичну модель ТП. Умова генерації АТЗ полягає в тому, що відстань між останнім згенерованим АТЗ і початком координат осі руху має дорівнювати або бути більше величини дистанції між АТЗ в потоці. Нове АТЗ генерується на початку координат випадковим чином з нульовою швидкістю і прискоренням за розробленою мікромоделлю руху АТЗ;

– у блоці визначення параметрів перехрестя враховується місце установки світлофора, тривалість циклу світлофорного регулювання для визначення пропускної спроможності перехрестя;

– у блоці визначення параметрів руху ТП проводиться контроль за зміною інтенсивності ТП на перегоні і перевіряється відповідність інтенсивності пропускної спроможності перехрестя. У разі невідповідності визначається необхідна швидкість руху ТП на перегоні;

– у блоці зміни швидкісного режиму руху в залежності від поточних параметрів руху приймається рішення про можливість розгону, необхідності гальмування або екстреного гальмування АТЗ;

– у блоці визначення нових параметрів руху автомобіля визначається необхідне значення швидкості руху, його положення на ділянці моделювання і поточна інтенсивність ТП на перегоні.

Алгоритм процесу імітаційного моделювання представлено на рис. 5.17.

На підставі наведеного опису блоків загальної схеми моделювання виділяємо робочі параметри імітаційної моделі, якими є:

- довжина перегону ВДМ, м;
- середні значення динамічних характеристик АТЗ у потоці (прискорення, уповільнення, максимальна швидкість АТЗ на перегоні);
- інтенсивність ТП на вході перегону ВДМ, авт./год;
- максимальна щільність ТП на перегоні ВДМ, авт./км;
- параметри світлофорного об'єкту (розміщення світлофорів, параметри циклу світлофорного регулювання у даному напрямку).

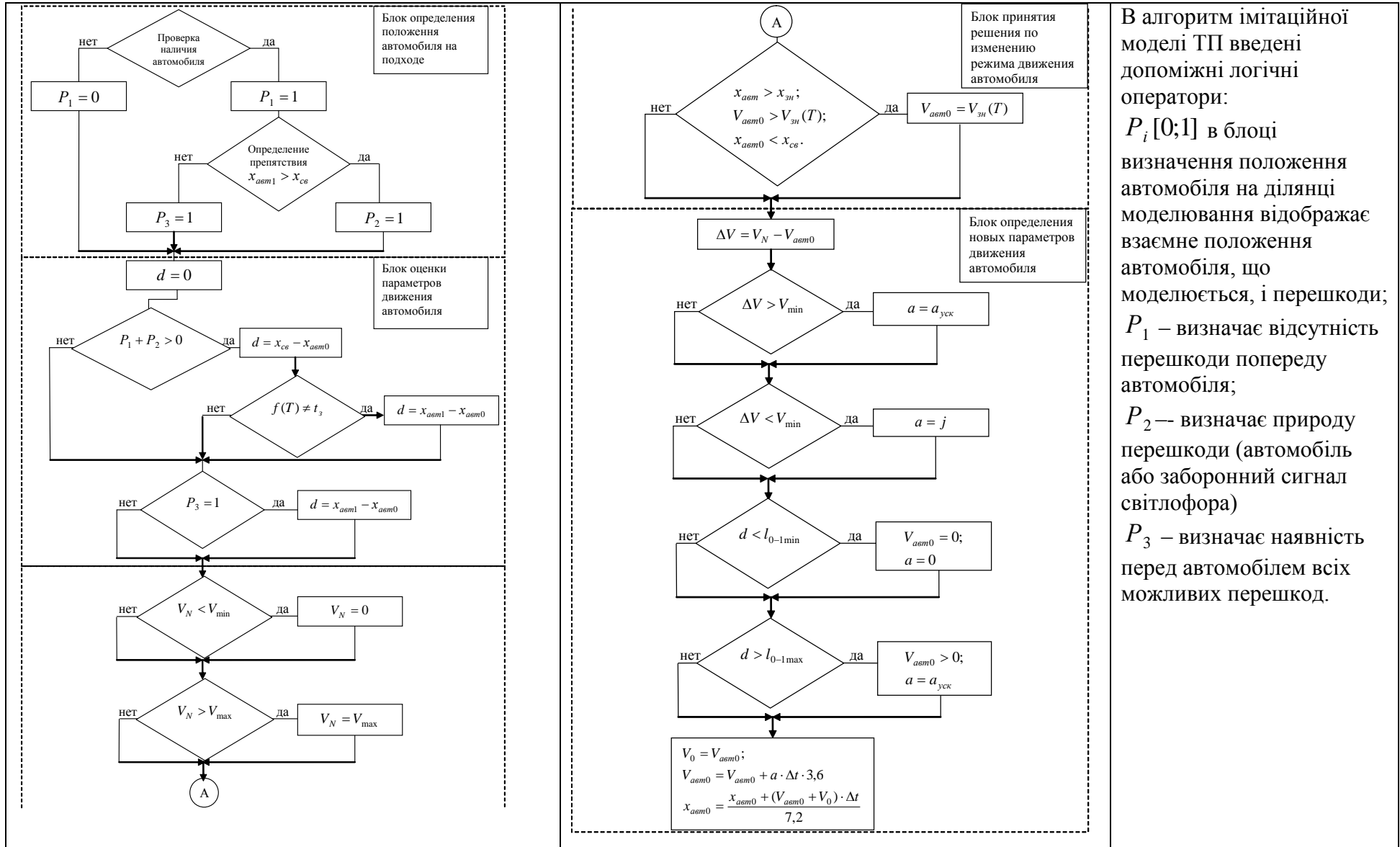


Рисунок 5.17 – Блок-схема імітаційної моделі ТП

В алгоритм імітаційної моделі ТП введені допоміжні логічні оператори:  
 $P_i [0;1]$  в блоці визначення положення автомобіля на ділянці моделювання відображає взаємне положення автомобіля, що моделюється, і перешкоди;  
 $P_1$  – визначає відсутність перешкоди попереду автомобіля;  
 $P_2$  – визначає природу перешкоди (автомобіль або заборонний сигнал світлофора)  
 $P_3$  – визначає наявність перед автомобілем всіх можливих перешкод.

При цьому отримуємо вихідні параметри імітаційної моделі, які описують параметри руху ТП і окремих АТЗ у потоці:

- щільність ТП, авт./км;
- швидкість руху ТП, км/год;
- швидкість руху кожного АТЗ в потоці, м/с;
- кількість накопичених АТЗ на підході до перехрестя, од.
- параметри зони обмеження швидкісного режиму, до яких відносяться: місце установки дорожніх знаків регулювання (що обмежують швидкість руху та скасовують це обмеження) та розрахункова швидкість руху ТП при обмеженні швидкості.

Програмна реалізація запропонованого алгоритму виконана у інтегрованому середовищі розробки додатків Delphi 7.0. На рис. 5.18-5.19 представлені робоча область інтерфейсу користувача та робоча область програмної реалізації імітаційної моделі ТП.

Управление		Динамическое управление	
Цикл регулирования, с	60	Длина участка, м	2000
Длительность запрещающего сигнала, с	40	Доп. ограничение, км/ч	60
Координата светофора, м	1500	Действие знака, м	57
Координата ограничивающего знака, м	1323	(зарезервировано)	0
Ограничение скорости знаком, км/ч	60	(зарезервировано)	0
Система		Транспортное средство	
Расчетная интенсивность, авт/ч	700	Ускорение, м/с <sup>2</sup>	1,5
Максимальная плотность, авт/км	120	Замедление, м/с <sup>2</sup>	4
Шаг интегрирования, с	0,1	Предельная скорость, км/ч	60

Buttons: OK, Отмена

Рисунок 5.18 – Робоча область інтерфейсу користувача



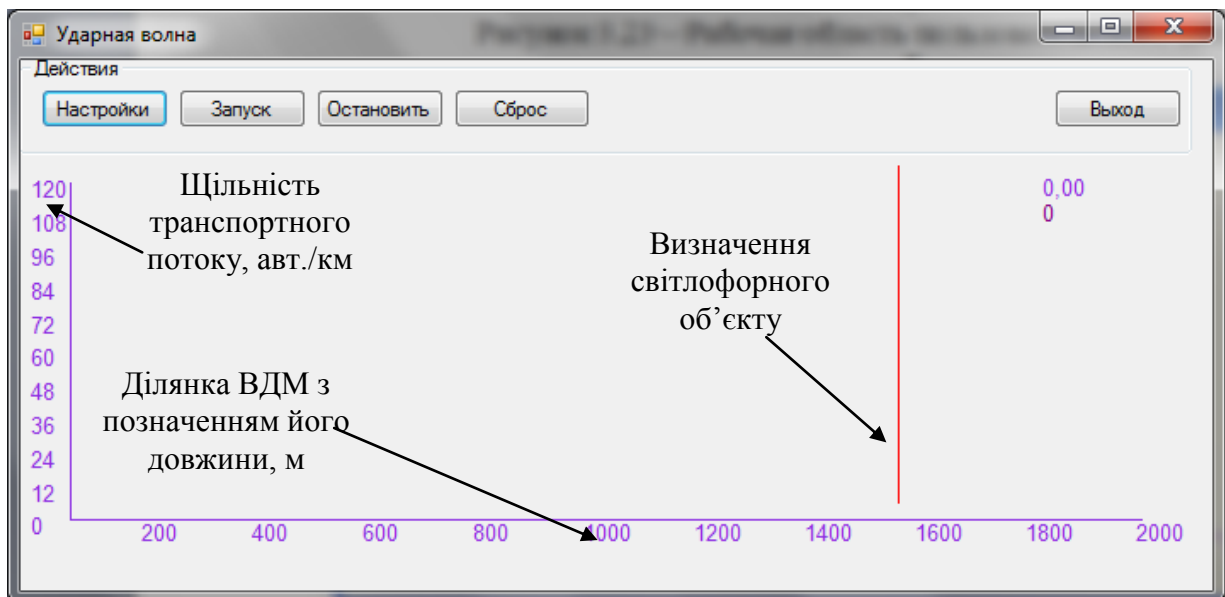


Рисунок 5.19 – Робоче вікно програмної реалізації

В процесі моделювання руху на ділянці ВДМ зі світлофорним регулюванням, при відсутності перешкод руху (включений дозволяючий сигнал світлофора), АТЗ, що надходять, розподіляються по ділянці відповідно до заданої годинної інтенсивності (рис. 5.20).

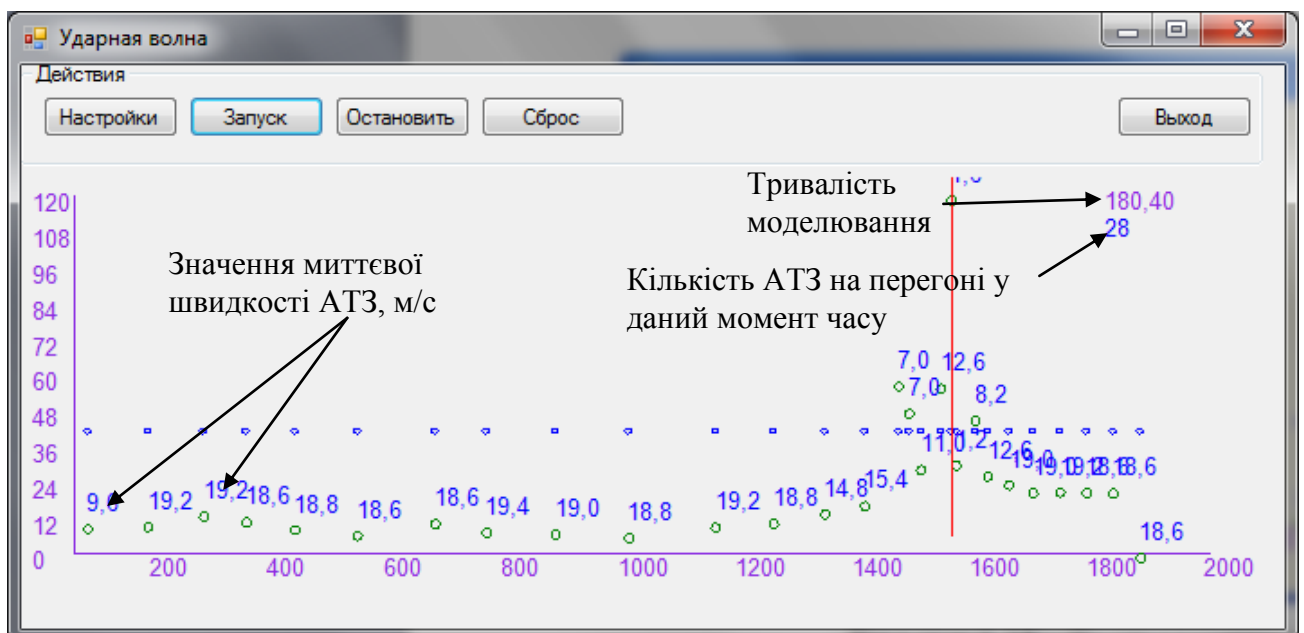


Рисунок 5.20 – Розподіл АТЗ на ділянці ВДМ за відсутності перешкод

У процесі моделювання виробляється збурюючий імпульс – відображення заборонного сигналу світлофора, на час дії якого найближче до світлофору АТЗ зупиняється, якщо відстань від координати його розташування до світлофора менше його гальмівного шляху. Процес зародження ущільнення транспортного потоку при його зупинці в протилежному руху напрямку саме утворює УХ.

Наданий опис імітаційної моделі руху АТЗ у ТП за розробленою методикою визначення параметрів динамічного управління ДР на складних ділянках ВДМ підтверджує результати моделювання параметрів руху. Таким чином, на підставі визначення параметрів ДР, які формують основу методики реалізації засобу управління швидкістю руху на перегонах міста, та за розробленою імітаційною моделлю необхідно провести модельний експеримент із вхідними даними реального процесу ДР у місті для підтвердження її адекватності при подальшому застосуванні.

#### 5.4 Висновки за розділом 5

Розроблено методологію динамічного управління дорожнім рухом для тактичного рівня СУДР, а саме:

Науково обґрунтовано та доведено доцільність зменшення інтенсивності ТП за рахунок управління швидкістю руху АТЗ у потоці для запобігання виникнення заторових режимів руху на ВДМ, що надає ресурс для забезпечення ефективного та працездатного стану ВДМ у цілому. Це дозволило дослідити природу утворення ударних хвиль із визначенням швидкості та часу їх розповсюдження на проїжджій частині, які є основою оцінки параметрів динамічного управління дорожнім рухом для забезпечення безперервного та економічного руху транспортного потоку підвищеної щільності у складних умовах міста.

Проведені дослідження параметрів умов руху АТЗ у ТП дозволили отримати аналітичні залежності взаємодії параметрів макро- та мікромоделювання на підставі формалізації впливу перешкод, що формують

складні умови руху у щільному потоці, та визначити переваги управляючої дії наприкінці сформованого потоку у порівнянні із відомими керуючими впливами на його початок;

Розроблено імітаційну модель руху АТЗ, що належить до типу мікромоделей з урахуванням основних параметрів руху в потоці, а саме – прискорення, швидкість руху та дистанції до перешкоди при русі, визначення яких базується на аналітичних залежностях взаємодії технічних характеристик АТЗ із параметрами ТП;

Запропоновано методику визначення параметрів динамічного управління ДР на підставі отриманих мікромоделей параметрів руху АТЗ у щільному потоці із урахуванням реакції та поведінки водія при русі у складних умовах, а також із оцінкою фази прискорення або уповільнення АТЗ при русі у міських умовах.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [9, 14, 22, 28, 36, 38, 52].

## РОЗДІЛ 6

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ  
ДОРОЖНІМ РУХОМ У МІСТАХ6.1 Модельний експеримент реалізації рівномірного руху ТП на контурі  
ВДМ м. Харків

Для проведення модельного експерименту з управління дорожнім рухом по контуру ВДМ з метою забезпечення рівномірного руху ТП було розроблено програмне забезпечення, загальну блок-схему якого наведено на рис. 6.1.

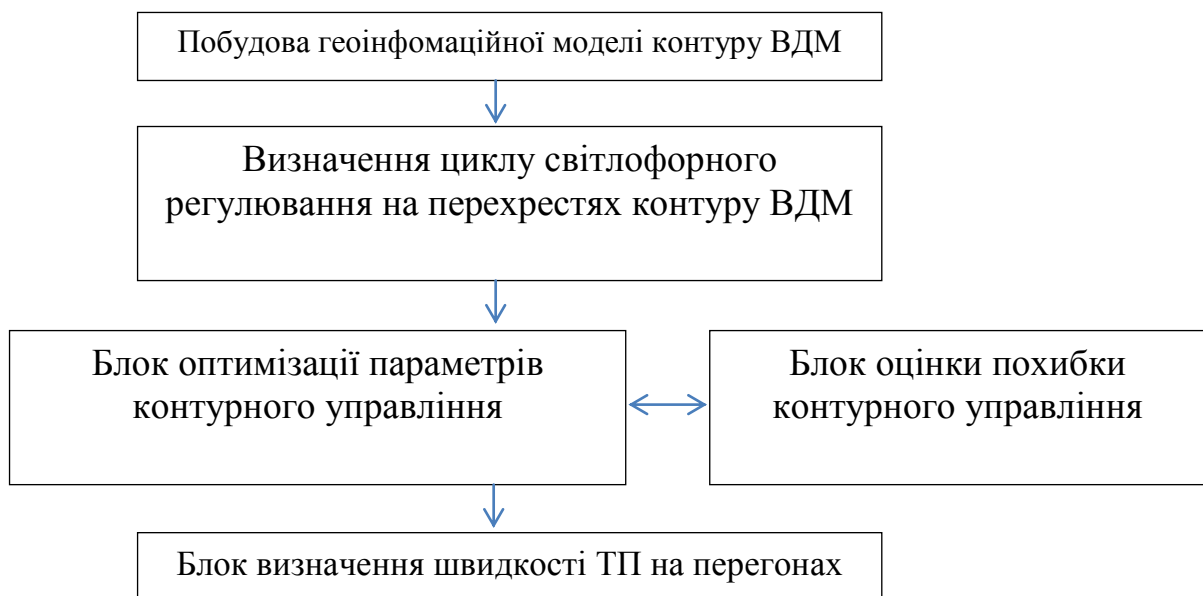


Рисунок 6.1 – Загальна блок-схема програмного забезпечення

Для модельного експерименту по визначенню параметрів управління дорожнім рухом [15] на контурі магістралей м. Харків в програмному комплексі була побудована геоінформаційна модель контуру ВДМ м. Харків із визначенням наявних технічних засобів регулювання: дорожніх знаків пріоритету, одностороннього руху та наявності або відсутності світлофорних пристроїв. Об'єкт містить 34 перехрестя, які об'єднані магістральними вулицями. Фрагмент карти об'єкту дослідження наведено на рис. 6.2.

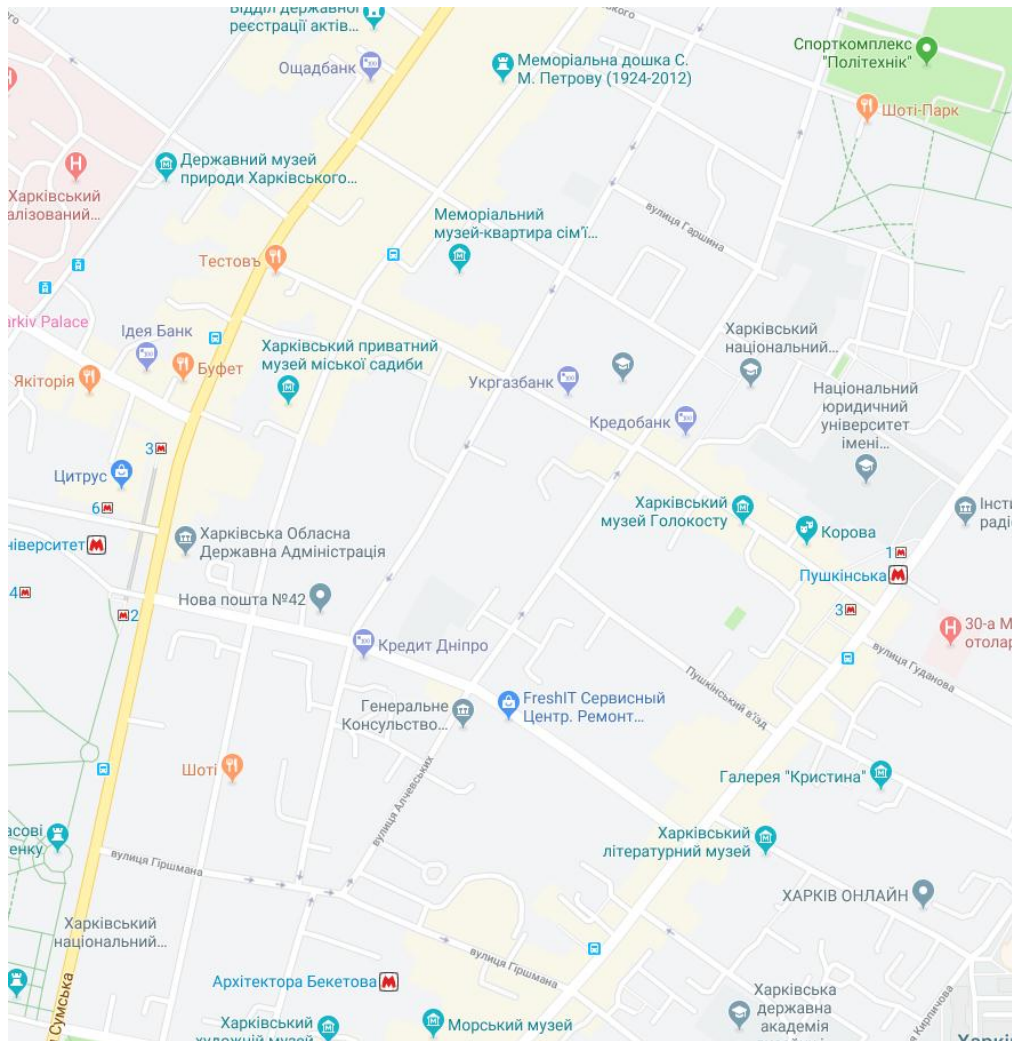


Рисунок 6.2 – Фрагмент карти ВДМ м Харків

Досліджуваний контур ВДМ утворюють вулиці: вул. Сумська (5, 1, 2, 26), вул. Я. Мудрого (26, 4, 22, 17), вул. Алчевських (27, 21, 22), вул. Чернишевська (7, 4), вул. Свободи (27, 7, 6, 5), вул. Пушкінська (17, 16, 15, 14, 13, 12) із позначенням примикань другорядних напрямків руху, схему якого наведено на рис. 6.3.

Особливістю даної мережі є велика кількість вулиць із одностороннім рухом, перехресть без світлофорного регулювання, висока завантаженість вул. Пушкінській, вул. Я. Мудрого та вул. Сумської, де права смуга завжди зайнята припаркованими АТЗ, а також на вул. Свободи та вул. Я. Мудрого має місце складний роз'їзд зустрічних АТЗ.



Рисунок 6.3 – Граф контуру ВДМ м. Харків

Програмне забезпечення для проведення експерименту містить підсистеми для опису елементів ВДМ – перехресть і перегонів. Інтерфейс введення даних по перегону забезпечує введення вхідних даних по перегону. Приклад опису перегонів та перехресть із урахуванням введеної порядкової нумерації перегонів, наведено у Додатку Е.

Магістралі контуру розглядаються як послідовність перегонів, для яких визначається рекомендована швидкість, але напрямки руху розраховуються окремо. Такий підхід надає змогу розглядати ділянки одностороннього руху. За правилами дорожнього руху по магістралях прийнята дозволена швидкість 50 км/год. Наприклад, для вул. Сумська два напрямки руху – 26-2-1-5 і 5-1-2-26. Надалі визначаємо параметри циклів світлофорного регулювання ( $T_{ц}$ ) для дев'яти перехресть зі світлофорним регулюванням, що входять до складу

даного контуру мережі. Вихідними даними для розрахунку параметрів циклу є матриця інтенсивностей 4x4, яку сформовано шляхом натурних вимірювань інтенсивностей (Додаток Ж) на основних перехрестях транспортної мережі в ранковий час, в час пік з 08:00 до 09:00:

$$N_k = \begin{bmatrix} N_{k11} & N_{k12} & N_{k13} & N_{k14} \\ N_{k21} & N_{k22} & N_{k23} & N_{k24} \\ N_{k31} & N_{k32} & N_{k33} & N_{k34} \\ N_{k41} & N_{k42} & N_{k34} & N_{k44} \end{bmatrix}, \quad (6.1)$$

де  $N_{kij}$  – інтенсивність потоку, що рухається на  $k$ -м перехресті від в'їзду  $i$  до виїзду  $j$ ;  $k = 1, \dots, n$ ;  $i, j = 1, \dots, 4$ .

Результати розрахунків параметрів для перехрестя №2 та №4 наведено у Додатку И. Аналогічно визначено параметри циклів світлофорного регулювання для всіх перехресть досліджуваного контура ВДМ (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 - Параметри  $T_{ц}$  на перехрестях

№ перехрестя	T	T <sub>13</sub>	T <sub>24</sub>
1	22	9	7
2	25	7	12
4	26	10	9
5	24	7	11
7	20	7	7
12	21	7	8
17	30	9	15
22	32	14	12
26	23	7	10
27	20	7	7

Командним перехрестям обрано перехрестя № 22.

Розмірність задачі оптимізації визначається як

$$Z = 2n - k_{\max}, \quad (6.2)$$

де  $n$  – кількість перехресть, де  $T_{\text{ц}} < T_{\text{ц max}}$ ;

$k_{\text{max}}$  – кількість перехресть, де  $T_{\text{ц}} = T_{\text{ц max}}$ .

Баланс дозволяючих сигналів світлофора визначено за залежністю:

$$B_k = T_{\text{max}} - T_{\text{min}}^k. \quad (6.3)$$

де  $T_{\text{max}}$  – максимальний час  $T_{\text{ц}}$  на контурі;

$T_{\text{min}}^k$  – час  $T_{\text{ц}}$  на  $k$ -му перехресті в локальному режимі.

Обраний метод оптимізації вимагає нормування необхідних параметрів оптимізації в інтервалі  $[0; 1]$ . Отримання оптимальних параметрів зсуву часу включення світлофорного об'єкта і балансу дозволяючі фаз руху ТП в натуральному вигляді проводиться на підставі наступних співвідношень:

$$O_k = H_{0,x} \cdot T_{\text{max}}; \quad (6.4)$$

$$B_k = H_{0,x+1}, \quad (6.5)$$

де  $H_{0,x}$  – елементи матриці гіперпросторових точок на поточному етапі моделювання.

З метою організації безупинного проїзду АТЗ можливо збільшити тривалість дозволяючого сигналу в необхідному напрямку для підвищення ефективної частки часу  $T_{\text{ц}}$ . Тоді була сформована вхідна інформація по перехрестях для моделювання руху ТП на перегонах у вікнах інтерфейсу (Додаток К).

У процесі комп'ютерного моделювання для реалізації запропонованого алгоритму контурного управління були проведені експерименти по вибору тривалості циклів командного світлофора 40 с, 50 с і 60 с. Варіанти 40 с і 50 с забезпечили лише частково коректне рішення, при якому частина автомобілів



не встигали проїхати на дозволяючий сигнал, запізнюючись на 1-2 с, тому було обрано  $T_{ц} = 60$  с.

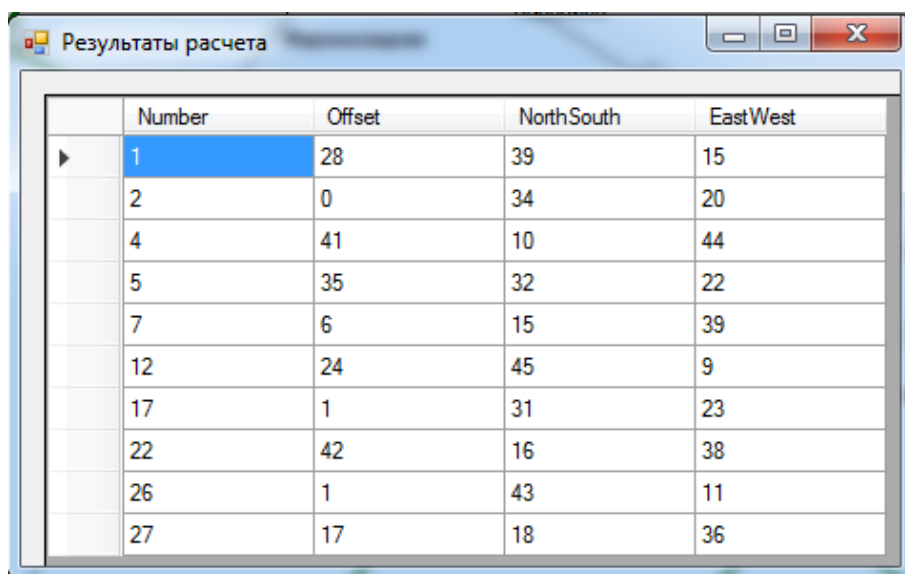
Результати розрахунку параметрів контурного керування по вул. Сумська для забезпечення рівномірного руху ТП наведені у табл. 6.2. Результати розрахунків параметрів управління для інших магістралей контуру ВДМ м. Харків надано у Додатку Л.

Таблиця 6.2 – Результати розрахунку параметрів контурного управління по вул. Сумська (напрямок на північ)

№ перехрестя	5	1	2	26
Відстань від попереднього	0	218	196	169
Відстань від першого	0	246	470	667
Зсув відповідно мережі	35	28	0	1
Приведений зсув	35	28	60	61
Зсув відносно першого	0	-7	25	26
Тривалість дозволяючого сигналу	32	39	34	43
Завершення дозволяючого сигналу	32	32	59	69
Час при 50 км/год, с	0	17,7	33,8	48,0
Ширина смуги пропуску, с		14,3	25,2	21,0

Загальні результати моделювання наведено у вигляді електронної таблиці у формі «Список перехресть» (рис. 6.4), які містять основні керуючі параметри координованого управління на мережі магістралей міста – зсуви фаз світлофорного регулювання (Offset), параметри  $T_{ц}$  (NorthSouth, EastWest) за напрямками перегонів на перехрестях об'єкту дослідження.

Результати моделювання візуалізуються у вигляді діаграм для кожної магістралі, яка входить до контуру ВДМ.



	Number	Offset	NorthSouth	EastWest
▶	1	28	39	15
	2	0	34	20
	4	41	10	44
	5	35	32	22
	7	6	15	39
	12	24	45	9
	17	1	31	23
	22	42	16	38
	26	1	43	11
	27	17	18	36

Рисунок 6.4 – Інтерфейс виводу даних «Список перехресть»

На рис. 6.5 наведено положення стрічки часу для координації двостороннього руху ТП по вул. Я. Мудрого. У Додатку Л наведено отримані діаграми для інших магістралей контуру ВДМ: вул. Свободи, вул. Пушкінської, вул. Сумської, вул. Алчевських та вул. Чернишевської.

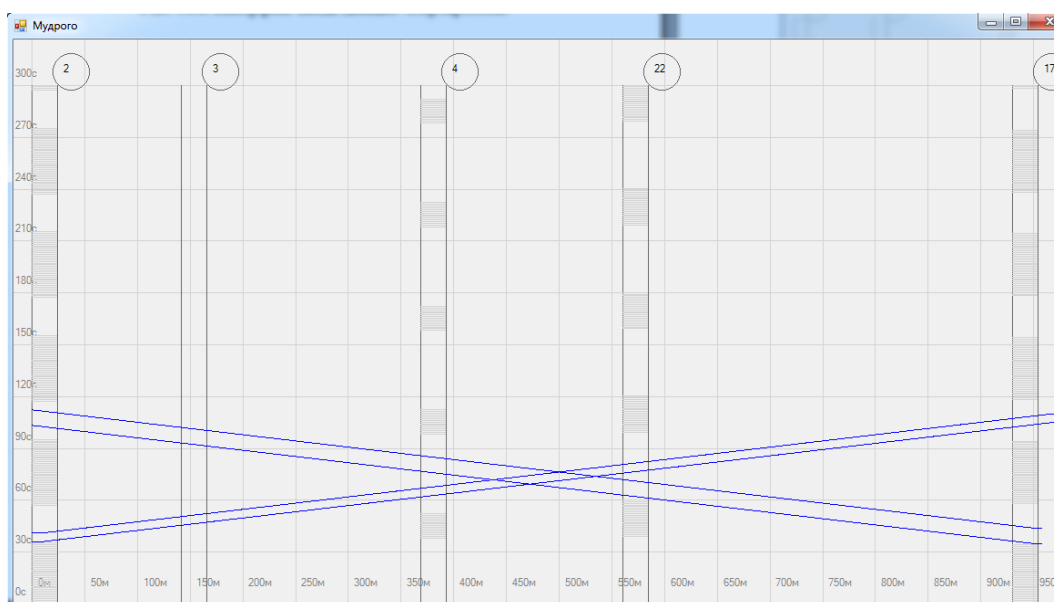


Рисунок 6.5 – Діаграма координації параметрів управління ТП по вул. Я. Мудрого

Процес передачі параметрів контурного управління в центр управління СУДР міста здійснюється за допомогою формування файлу даних в універсальних форматах, який може бути переведений в будь-який необхідний формат для програмного забезпечення СУДР.

Таким чином, отримано розрахунок оптимальних параметрів мережного контурного управління із застосуванням програмного забезпечення, яке дозволяє отримати необхідний рівень точності і швидкості визначення керуючих параметрів.

У світовій практиці набули широкого використання відомі програмні продукти імітаційного моделювання у сфері організації руху ТП, такі як VISSIM (PTV AG, Німеччина) [238], GETRAM/AIMSUN [241] та Paramics [240]. У розглянутих системах моделювання є функція відображення у реальному часі реакції ТП на вплив світлофорного регулювання, що є наслідком обраної управляючої дії при контурному управлінні на ВДМ. Тому визначення ефективності організації рівномірного руху по контуру ВДМ м. Харків проведено у програмному середовищі PTV VISSIM. Програмне забезпечення імітації PTV VISSIM дозволяє в значній мірі спростити роботу проектувальника і створює достовірну платформу для проектування дорожньо-транспортних та містобудівних об'єктів [242].

На відміну від більш простих моделей, в яких за основу беруться постійні швидкості і незмінна поведінка слідування за транспортними засобами, що йдуть попереду, PTV VISSIM використовує психофізіологічну модель сприйняття WIEDEMANN'а (1974 р., 1999 р.). Основна ідея моделі полягає в тому, що водій АТЗ, який рухається з більш високою швидкістю, починає гальмувати при досягненні свого індивідуального порогу сприйняття щодо віддаленості від того, що їде попереду, коли дистанція до нього починає сприйматися ним як занадто мала. Так як він не може точно оцінити швидкість АТЗ, що їде попереду, то його швидкість буде падати нижче швидкості АТЗ, що їде попереду до тих пір, поки він не почне знову прискорюватися після досягнення свого порогу сприйняття, коли він почне сприймати виниклу між

ним і АТЗ, що їде попереду, дистанцію як занадто велику. Це веде до постійного прискорення і уповільнення. Тому за допомогою функцій розподілу для швидкості і дистанції імітується різна поведінка водіїв.

Результат імітації – це анімація руху транспорту у вигляді графіки в режимі реального часу із подальшим визначенням транспортно-технічних параметрів, таких як розподіл часу в дорозі, часові затримки транспортних засобів, довжина затору, час простою, емісія оксидів вуглецю та азоту, емісія летючих органічних сполук та витрати палива.

Побудова моделі дорожньої мережі в PTV VISSIM виконується за наступною схемою:

1. Побудова дорожньої мережі: зображення відрізків доріг; зображення поворотів; організація зустрічного руху; створення смуг розгону і гальмування; нанесення дорожньої розмітки;

2. Введення транспортного потоку: завдання інтенсивності потоку; визначення складу транспортних засобів; завдання маршрутів транспортних засобів; введення правил пріоритету в конфліктних зонах;

3. Додавання світлофорних об'єктів: створення сигнального пристрою; створення сигнальних груп; створення сигнальних програм; встановлення сигнальних пристроїв на дорозі; візуалізація світлофорних об'єктів;

4. Моделювання руху пішоходів: створення пішохідного потоку; визначення щільності і складу потоку; завдання маршрутів руху пішохідних потоків; визначення конфліктних зон; створення та встановлення світлофорних об'єктів;

5. Моделювання руху громадського транспорту: створення зупинок; завдання маршрутів транспорту із зазначенням зупинок і розкладу;

6. Додавання паркувань та автостоянок;

7. Додавання фону і статичних 3D елементів.

PTV VISSIM – це не стільки модель транспортного потоку, скільки інструмент для створення таких моделей. Тому для модельного експерименту було розроблено таку імітаційну модель руху ТП на ділянці ВДМ, яка

дозволить визначити як параметри руху АТЗ, так і показники ефективності дорожнього руху. Вихідними даними для створення моделі були обрані: довжина ділянок ВДМ, м; ширина проїжджої частини, м; кількість смуг руху на ділянках ВДМ; інтенсивність ТП на вході ділянок ВДМ, авт./год; склад ТП; наявність зупинок громадського транспорту; параметри світлофорного об'єкту (розміщення світлофорів, тривалість циклу і основного такту регулювання в даному напрямку), правила пріоритету та конфліктні зони на перехрестях і на підході до них, наявність зупинок громадського транспорту тощо (рис. 6.6).

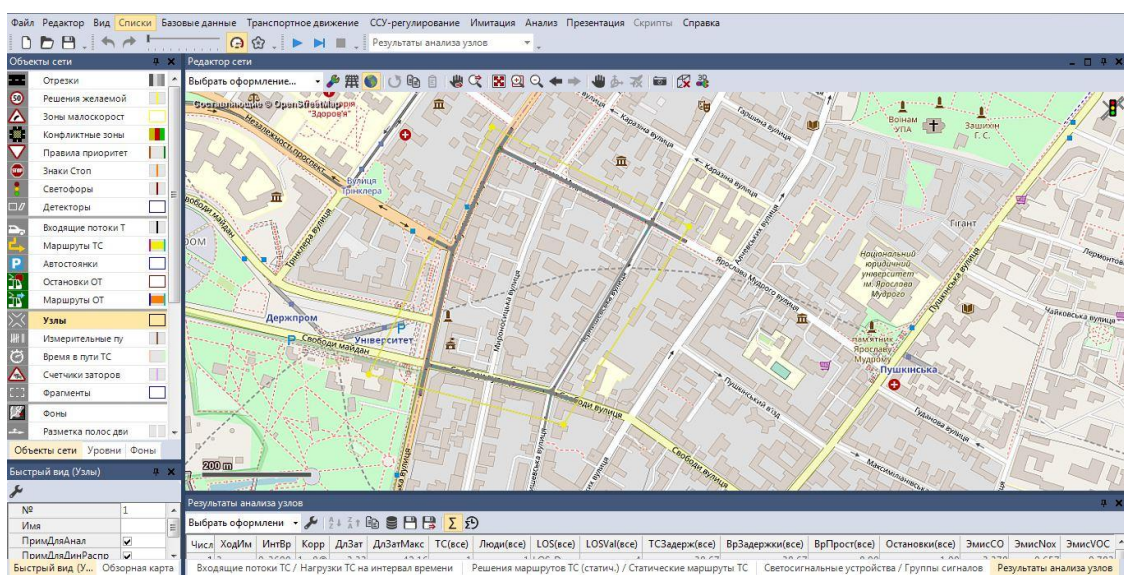


Рисунок 6.6 – Імітаційна модель руху ТП по об'єкту дослідження у програмному середовищі PTV VISSIM

Результати порівняльного аналізу даних імітаційного моделювання при локальному та контурному управлінні свідчать про зменшення часових затримок руху АТЗ на 13%, викидів забруднюючих речовин у повітря – на 15%, витрат палива – на 15% (табл. 6.3).

Таким чином доведено, що впровадження заходів контурного управління ДР для організації рівномірного руху ТП на магістралях міста не тільки зменшує часові затримки при русі, а й підвищує екологічну безпеку міста.

Таблиця 6.3 – Порівняльний аналіз показників ефективності контуру

	Часові затримки ТЗ, с	Емісія CO, г	Емісія NOx, г	Емісія летючих органічних сполук, г	Витрати палива, л
При локальному управлінні	1050,94	859,266	167,184	199,143	46,527
При контурному управлінні	914,69	731,708	142,363	169,581	39,629

Розроблений спосіб контурного управління ДР було впроваджено Департаментом інфраструктури Харківської міської ради (акт про прийняття до впровадження № 4146/0/78-19 від 20.12.2019 р.) для підвищення ефективності ДР у м. Харків.

6.2 Експериментальні дослідження режимів дорожнього руху на перегонах ВДМ м. Харків

Відповідно до розроблених теоретичних положень динамічного управління дорожнім рухом шляхом зміни швидкісного режиму на підході до регульованого перехрестя було проведено експериментальні дослідження на ВДМ м. Харків. Об'єктом експериментальних досліджень обраний перегін ВДМ м. Харків, що належить до просп. Науки, на ділянці від перетину з вул. Отакара Яроша до перетину з вул. Мінською, фрагмент карти просп. Науки наведено у Додатку М. На перегоні спостерігаються незадовільні умови руху постійно у години «пік», і як наслідок, формуються заторові ситуації із невиправданою втратою працездатності ВДМ при збільшенні часу руху АТЗ.

Функціонування світлофорного об'єкта на перетині просп. Науки – вул. Мінська здійснюється по одній добовій програмі з параметрами: роз'їзд на перехресті – двофазний; тривалість зеленої фази на підході по просп. Науки з боку вул. Отакара Яроша – 25 с; тривалість заборонного сигналу на цьому ж підході – 22 с; тривалість проміжного такту – 4 с.

Параметри ділянки просп. Науки: довжина ділянки – 380 м; ширина ділянки – 28,0 м; кількість смуг руху – 6; ширина центральної розподільної смуги – 4 м; тип дорожнього одягу, вид покриття – капітальне, асфальтобетон; стан покриття – відмінно; криві у плані – відсутні; поперечні ухили – у межах містобудівних норм; поздовжні ухили складають: у бік вул. Отакара Яроша – 44 ‰, у бік вул. Минської – 41 ‰.

В ході експерименту проведено вимір параметрів руху ТП і часу проїзду ділянки при різній інтенсивності ТП. Також були визначені параметри ТП, при яких рух переходить в заторовий стан. Експериментальні вимірювання інтенсивності ТП на перегоні проводилися натурних методом в будні дні в ранковий та вечірній час «пік». В інший час протягом доби на досліджуваній ділянці заторового стану ТП не спостерігалось. Паралельно були проведені експериментальні заїзди методом «плаваючого автомобіля» [103] по перегону для вимірювання інтенсивності ТП. Цей метод дослідження передбачає використання АТЗ (автомобіля-лабораторії), що має рухатися зі швидкістю, властивою більшості транспортних засобів в потоці. Типовим прикладом використання цього методу є дослідження просторової характеристики швидкості на протязі магістралі.

Результати експериментальних досліджень параметрів руху по ділянці просп. Науки в м. Харків представлені у таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Результати експериментальних вимірів параметрів руху

Період часу, год	Інтенсивність ТП на перегоні, авт./год	Інтенсивність ТП на смузі, авт./год	Початок експериментального заїзду, год.:хв.:с	Момент перетину стоп-лінії, год.:хв.:с	Час проїзду ділянки, хв.:с
7:30-8:30	853	316	8:11:26	8:12:17	0:52
8:30-09:30	3286	1217	9:12:17	9:20:53	08:36
17:00-18:00	1340	496	17:34:52	17:36:04	1:12
18:00-19:00	1492	553	18:17:33	18:19:30	1:57

Дані табл. 6.4 показують залежність часу проїзду ділянки ВДМ від поточної інтенсивності ТП. Так, на ділянці дослідження при інтенсивності потоку 316 авт./год, час проїзду варіювався від 0:31 до 1:12 хв.:с, що в середньому становить 0:52 хв.:с. При збільшенні інтенсивності ТП до 1200 авт/год час проїзду збільшився до 8:36 хв.:с. Отже, час проїзду ділянки збільшився майже у 10 разів, що зменшує пропускну спроможність ділянки.

На підставі отриманих натурних даних було проведено модельний експеримент за допомогою розробленої імітаційної моделі руху ТП. Збільшення інтенсивності ТП при незмінному циклі регулювання призводить до накопичення АТЗ у стоп-лінії, які не роз'їжджаються за час дозволяючого сигналу світлофора, в результаті чого утворюється черга АТЗ. В кожний наступний цикл регулювання довжина черги збільшується, що викликає утворення «ударної хвилі». Вікна імітаційної моделі при проведенні експерименту наведено у Додатку М.

У процесі імітаційного моделювання отримано значення часу проїзду по ділянці ВДМ, параметри якого відповідають реальним параметрам руху на досліджуваній ділянці просп. Науки у м. Харків. Проведений порівняльний аналіз значень часу проїзду по ділянці, отриманих на підставі натурних досліджень на реальній ВДМ та у результаті імітаційного моделювання представлено у таблиці 6.5.

Отриманий результат підтвердив адекватність розробленої імітаційної моделі визначення швидкості АТЗ у потоці, оскільки середнє відносне відхилення значень часу проїзду по досліджуваній ділянці ВДМ не перевищує 5 %. Узгодженість емпіричного та теоретичного (за моделлю) розподілу оцінювалась для довірчої ймовірності  $P = 0,95$  та допустимої помилки  $\varepsilon = 0,05$  [153]. Отже, запропонована імітаційна модель може бути застосована для визначення параметрів умов руху для складних ділянок ВДМ та дослідження процесу формування «ударних хвиль» як причини виникнення заторових ситуацій.



Таблиця 6.5 – Порівняльний аналіз реального та модельного часу проїзду у часи «пік»

№ експериментального вимірювання часу проїзду	Час проїзду ділянки (експериментальні дослідження), с	Час проїзду ділянки (імітаційна модель), с	Абсолютне відхилення, с	Відносне відхилення, %
1	546	543	3	0,55
2	542	524	18	3,32
3	611	522	89	14,57
4	484	514	30	6,20
5	602	547	55	9,14
6	538	535	3	0,56
7	547	546	1	0,18
Середні значення	552,86	533,00	19,86	4,93

Надалі проведено модельний експеримент руху ТП на об'єкті дослідження, коли інтенсивність ТП має максимальне значення, а саме – 1217 авт/год на смузі руху. Отриманий результат моделювання припускає виникнення транспортного затору не тільки на перегоні, а й на підході до нього, що підтверджується і реальною транспортною ситуацією на ВДМ міста. Так, після 24 хв моделювання було отримано повне заповнення смуги руху ТП із подальшою зупинкою на перегоні (рис. 6.7) та поширенням впливу на сусідній перегін, тобто має стійкий заторів стан ВДМ та відмову при функціонуванні.

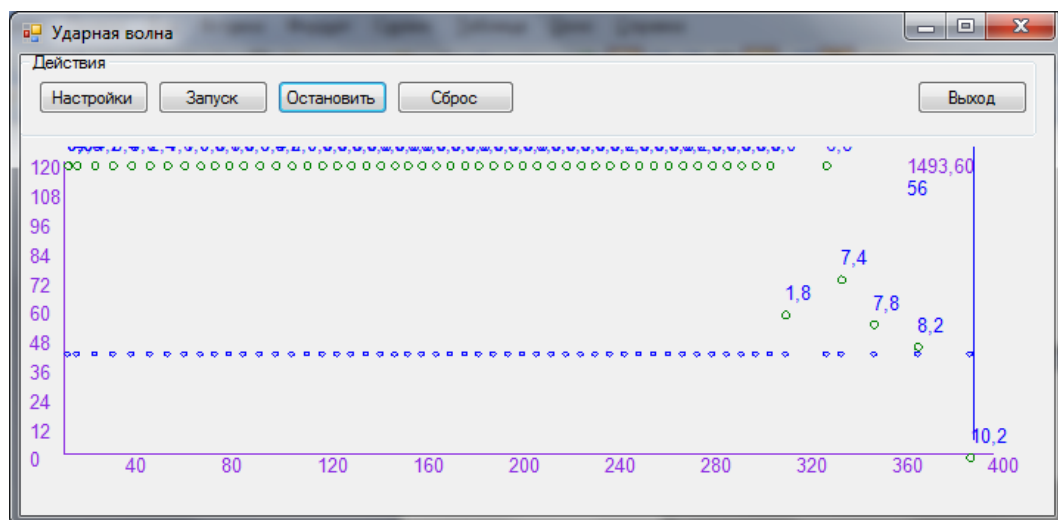


Рисунок 6.7 – Процес формування ділянки ВДМ підвищеної щільності

Для перевірки засобу управління швидкістю руху ТП на початку перегону було проведено модельний експеримент із зменшенням швидкості руху до 10 км/год.

У процесі моделювання отримано результат, який підтверджує, що при інтенсивності 1217 авт./год та швидкості ТП 10 км/год режим руху ТП є сталим і не переходить у заторовий стан (рис. 6.8).

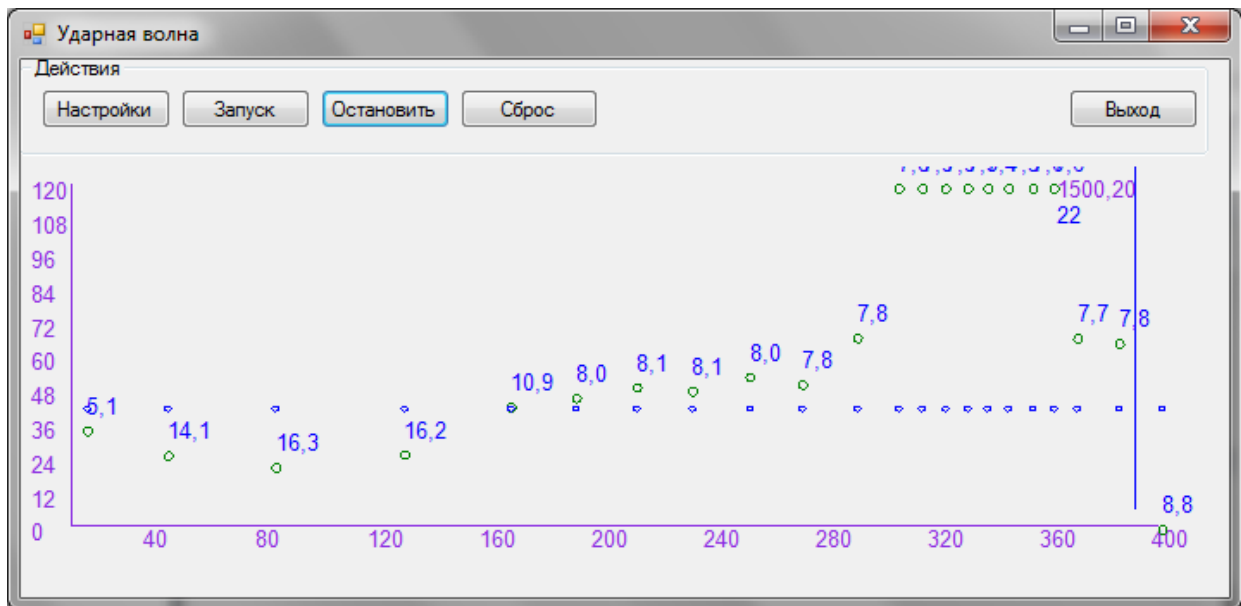


Рисунок 6.8 – Процес руху АТЗ без затору при  $V=10$  км/год

Темп накопичення АТЗ у стоп-лінії доводить, що АТЗ після зупинки на перехресті проїжджають перехрестя за час основного такту регулювання (наступного). Визначено модельний час проїзду по перегону, який дорівнює 41 с. Отриманий результат моделювання підтверджує, що шляхом зниження швидкісного режиму на ділянці ВДМ можливо запобігти переходу ТП в заторовий стан та підвищити пропускну спроможність, що безпосередньо впливає на працездатність та надійність ВДМ та зменшує час проїзду АТЗ.

Порівняльні результати вимірювань фактичного та модельного часу проїзду по ділянці дослідження після введення обмеження швидкісного режиму представлено в таблиці 6.6.

Таблиця 6.6 – Результати визначення часу проїзду перегону ВДМ

Період часу, год	Інтенсивність ТП на перегоні, авт./год	Час проїзду ділянки фактичний, с	Час проїзду ділянки при обмеженні швидкісного режиму, с	Різниця до та після введення обмеження швидкісного режиму, с	Відносне відхилення, %
7:30-8:30	853	52	41	11	21,15
8:30-09:30	3286	516	41	475	92,05
17:00-18:00	1340	72	41	31	43,06
18:00-19:00	1492	117	41	76	64,96

Отримане значення зменшення часу проїзду ТП на перегоні пр. Науки підтверджує коректність та адекватність теоретичних досліджень, проведених у роботі, а саме – спрямування керуючого впливу на кінець «ударної хвилі» підвищує показники ефективності у міських умовах руху. Доведено, що в результаті впровадження динамічного управління ДР шляхом усунення заторових ситуацій час проїзду експериментальної ділянки зменшується у середньому на 22 % за чотири години дослідження.

Практична реалізація запропонованих заходів щодо управління швидкістю руху на перегонах ВДМ можлива за наявності технічних засобів регулювання: детекторів транспорту і дорожніх контролерів, які реалізують алгоритми ситуаційного керування ТП.

Таким чином, на підставі розроблених математичних та імітаційних моделей руху АТЗ на перегоні ВДМ міста ули визначені параметри управління ДР, що підтверджує актуальність та доцільність теоретичних досліджень.

Розроблений спосіб управління швидкістю руху на перегонах ВДМ було впроваджено відділом транспорту, зв'язку та енергетики Краматорської міської ради (акт про прийняття до впровадження від 22.01.2020 р.) для підвищення ефективності ДР у м. Краматорськ.

### 6.3 Експериментальна розробка моделей калібрування перегонів геоінформаційної моделі ВДМ м. Харків

При дослідженнях формування системи підтримки прийняття рішень в ІСУ була розроблена геоінформаційна модель (ГІМ) частини ВДМ м. Харків, яка необхідна для наочності відображення структури ВДМ у центрі управління ДР м. Харків. Але для рівня прийняття рішень необхідна інформація щодо зміни основних параметрів ТП на ВДМ. Поточні значення виміру параметрів повинні надходити від первинних вимірюючих пристроїв – детекторів транспорту, GPS, або з камер відеозйомки для формування баз даних. Тобто інформація моніторингу параметрів ТП полягає в основу процесу прийняття рішень для визначення керуючих впливів на дорожній рух. Але другу складову рівня прийняття рішень формують моделі взаємодії параметрів ТП, які містяться у базі моделей.

Із визначенням основних параметрів ТП у якості ваги ребра графа ГІМ, було розроблено геоінформаційну систему (ГІС) дорожнього руху міста, яка окрім наочності сприйняття дорожньо-транспортних ситуацій забезпечує оперативний рівень управління СУДР необхідною інформацією, не тільки для формування керуючих впливів, а й для визначення часу, коли потрібні зміни при управлінні ДР. Таким чином необхідна наявність поточної (реальної) інформації щодо параметрів ТП та визначення існуючих меж для їх зміни протягом часу, які можуть бути реалізовані на перегонах в залежності від їх топологічних параметрів.

У роботі було запропоновано побудову моделей для калібрування ГІМ у вигляді трикутної основної діаграми ТП для перегонів ВДМ із урахуванням категорії вулиць міста. У подальших дослідженнях запропоновано розробку діаграми ТП для кожного типу міських вулиць на емпіричних даних ТП. У фаховій провідній літературі також визначається необхідність проведення аналізу вимірюваних даних та нормативних (або абстрактних) параметрів, які дозволяють визначити «вузькі місця» на ВДМ, наявність ділянок із підвищеною

щільністю ТП для оцінки стану ДР у місті [243]. Наявність можливості на рівні прийняття рішень проведення порівняння модельних та реальних даних впливає на прогнозування місць виникнення транспортних заторів, або ділянок із підвищеним рівнем небезпеки. Такий підхід надає підґрунтя для визначення рівня завантаження ділянки ВДМ та оцінки її працездатності при існуючих керуючих впливах на ДР, або необхідність зміни методу управління.

Для побудови діаграм ТП у вигляді трикутника було визначено відповідні параметри: максимальну щільність ТП на перегоні ( $q_{\max}$ ); щільність, при якій утворюється затор ( $q_{\text{зат}}$ ); критичну щільність, при якій ТП переходить до складних режимів руху ( $q_{\text{кр}}$ ); реальну інтенсивність ( $N_p$ ); максимальну інтенсивність ТП (модельну) за наявністю існуючих дорожніх умов на перегоні ( $N_{\max}$ ) та інтенсивність ТП, що призведе до заторового стану ( $N_{\text{зат}}$ ) [45]. Необхідну нормативно-довідкову інформацію обрано за діючими нормативними документами [244].

Аналітичні залежності параметрів діаграми мають вигляд:

1) критична щільність ТП

$$q_{\text{кр}} = \frac{N}{V}, \quad (6.6)$$

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

$V$  – швидкість ТП в залежності від категорії вулиці ВДМ, км/год [244].

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

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

бо  $c$  знаходиться у прямій залежності від інтенсивності ТП та у зворотній до щільності ТП.

Об'єктом дослідження обрано ділянку ВДМ м. Харків, що належить до контуру ВДМ, де було визначено параметри контурного управління (рис. 6.9).

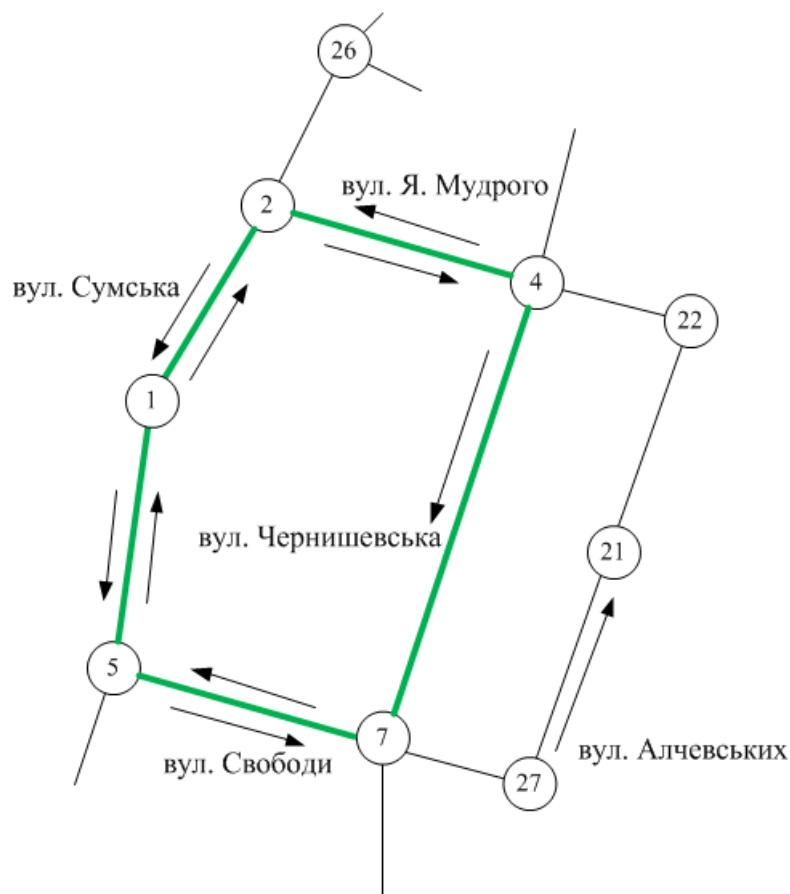


Рисунок 6.9 – Об'єкт дослідження

Розраховані параметри побудови діаграм ТП за перегонами ділянки ВДМ наведено у таблиці 6.7 із визначенням реальної інтенсивності ТП ( $\max N_p$ ,  $\min N_p$ ). Швидкість руху ( $V$ ) обрано у відповідності до категорії вулиці об'єкту дослідження.

Таблиця 6.7 – Визначені параметри для побудови діаграм перегонів ВДМ

Перегін	$N_{\max} - N_{\min}$ , авт/ГОД	Довжина ділянки, $l_{\text{пер}}$ , м	Кількість смуг руху, од	$q_{\text{зат}}$ , авт/км	$q_{\text{max}}$ , авт/км	$q_{\text{кр}}$ , авт/км	$N_{\text{зат}}$ , авт/ГОД	$N_{\text{max}}$ , авт/ГОД	$V$ , км/ГОД
Вул. Сумська (Я.Мудрого - вул. Свободи)	600 – 450	414	2	118	92	10,5	533	400	50
Вул. Чернишевського (вул. Я.Мудрого - вул. Свободи)	400 – 260	362	1	52	40	9,5	292	198	35
Вул. Я.Мудрого (вул. Пушкінська - вул. Алчевських)	640 – 476	340	2	97	76	16	485	384	35
Вул. Я.Мудрого (вул. Алчевських - вул. Чернишевського)	568 – 500	172	2	38	50	15	288	195	35
Вул. Свободи (вул. Пушкінська - вул. Алчевських)	377 – 344	312	2	90	70	10	310	300	35
	377 – 344	312	1	44	35	10	264	242	35
Вул. Я.Мудрого (вул. Чернишевського - вул. Сумська)	570 – 450	312	2	90	70	7,15	470	385	50
	570 – 450	312	1	45	35	14,5	256	195	35

Моделі калібрування у вигляді діаграм ТП для магістралі районного значення наведено на рис. 6.10.

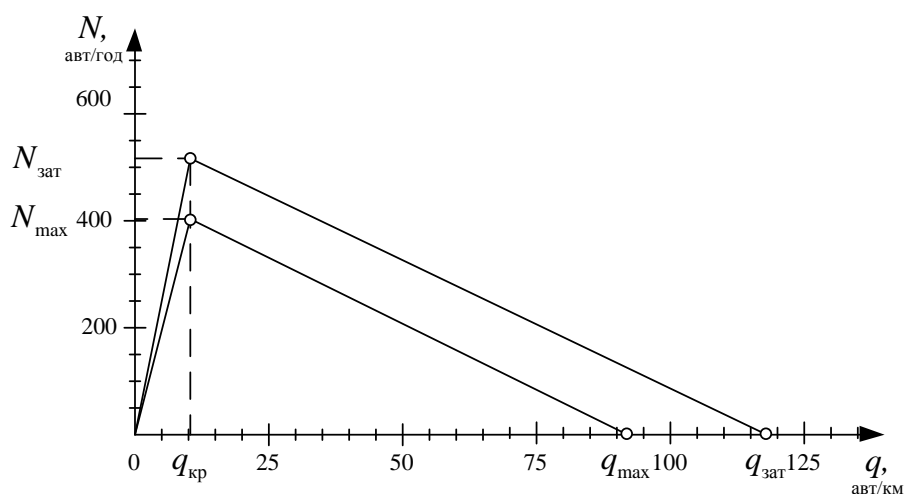
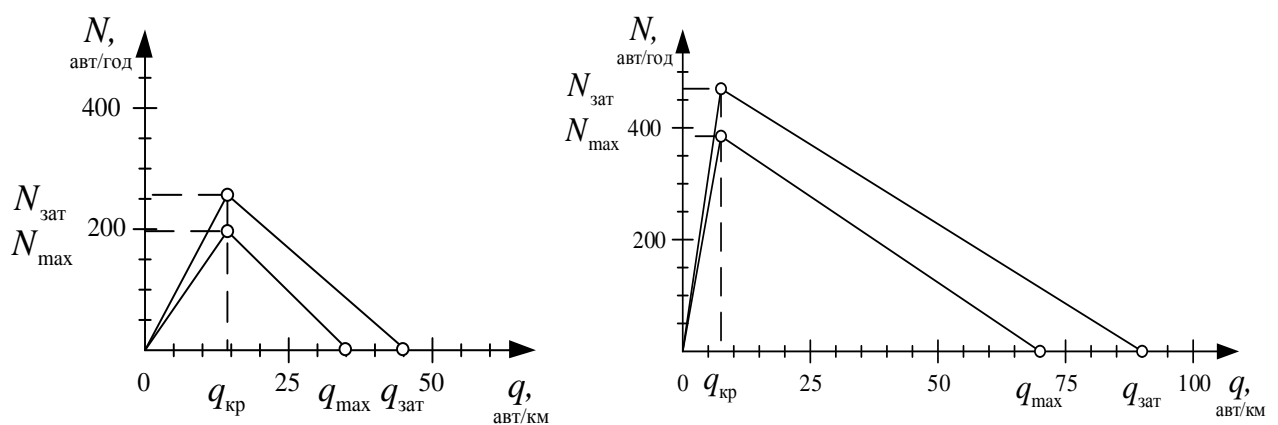


Рисунок 6.10 – Діаграма ТП для ділянки вул. Сумська (вул. Я. Мудрого – вул. Свободи)

Вимір інтенсивності було проведено методом натурних спостережень (Додаток Ж) у години «пік» – це максимальне значення (табл. 6.7) та мінімальне значення у між пікові години доби.

Побудована модель свідчить, що реальна інтенсивність, навіть  $N_{\min}$ , перевищує  $N_{\max}$  за моделлю:  $N_p < N_{\max}$ . Пояснити цей результат можливо наступним чином. Було розраховано модельні параметри за вимогами ДБН, а саме при дозволений швидкості руху  $V=50$  км/год та за наявності двох смуг руху у кожному напрямку. Але такі умови руху не відповідають реальним умовам руху, бо одна смуга постійно зайнята припаркованими АТЗ, що ускладнює режим пересування перегонном та зменшує швидкість руху ( $V_p < 50$  км/год). Отримана модель свідчить про складні умови руху ( $N_{\text{зат}} < N_p$ ), які не відповідають параметрам руху на магістралях районного значення та потребують керуючих впливів – будь то заборона паркування або керування швидкістю руху на вул. Сумській.

Для моделі ТП по вул. Я. Мудрого, яка належить до магістралей районного значення із двома смугами руху при дозволений швидкості руху 50 км/год було побудовано дві діаграми – для однієї смуги руху та для двох смуг руху (рис. 6.11 а,б).



а) для однієї смуги руху

б) для двох смуг руху

Рисунок 6.11 – Діаграма ТП для ділянки вул. Я. Мудрого  
(вул. Чернишевського – вул. Сумська)



Такий підхід обумовлено також зайнятою смугою руху припаркованими АТЗ. Отриманий результат за діаграмою (рис. 6.11 а) свідчить про наявність заторового режиму руху ( $N_p \gg N_{зат}$ ) на ділянці. Реальна транспортна ситуація підтверджує модельний експеримент. Діаграма руху ТП (рис. 6.11 б) на двох смугах перегону доводить, що  $N_{max} < N_p < N_{зат}$ . Саме такий діапазон зміни інтенсивності ТП необхідно утримувати засобами управління для попередження заторового стану ВДМ.

На вул. Чернишевського, яка належить до вулиць місцевого значення, організовано однобічний рух транспорту при наявності двох смуг руху. Але для проїзду існує лише одні смуга, на якій швидкість руху є мінімальною  $V_p < 20$  км/год. Тому постійний стан руху – заторовий, або має місце рух у щільному потоці. саме ці умови руху ТП пояснює діаграма ТП (рис. 6.12), на якій визначені модельні параметри ( $N_{зат} < N_p$ ).

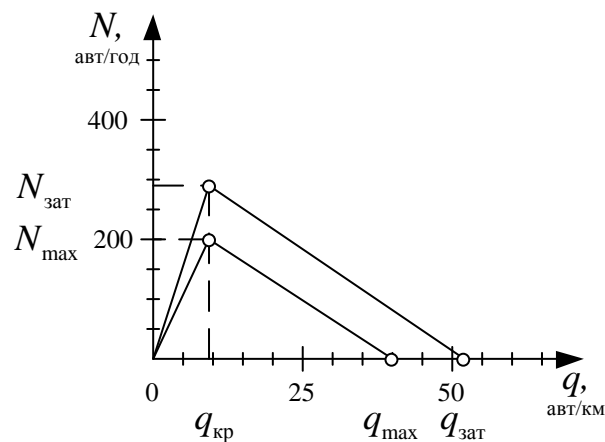
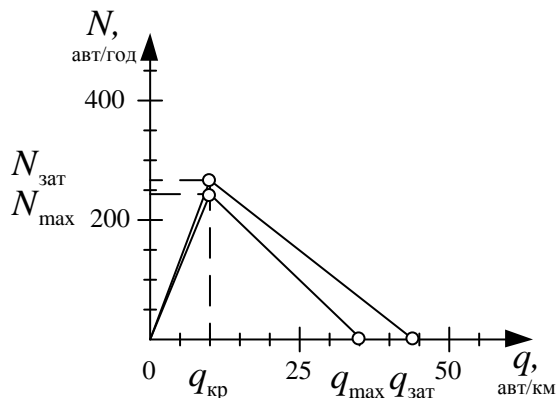


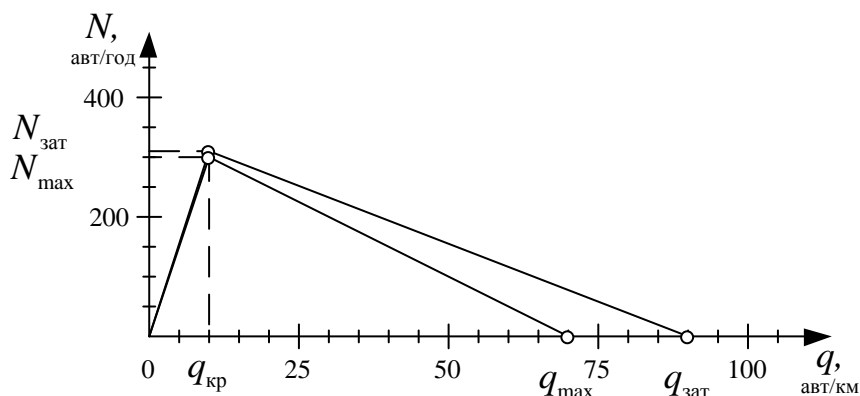
Рисунок 6.12 – Діаграма ТП для ділянки вул. Чернишевського (вул. Я.Мудрого – вул. Свободи)

На підставі отриманих результатів на рівні прийняття рішень можливо обрати керуючі дії для перегону з метою підвищення пропускної спроможності вул. Чернишевського.

Вул. Свободи належить до вулиць місцевого значення із проектувальними нормами на дві смуги руху. Побудова діаграми ТП (рис. 6.13) пояснює складні умови руху по одній смузі протягом доби.



а) для однієї смуги руху



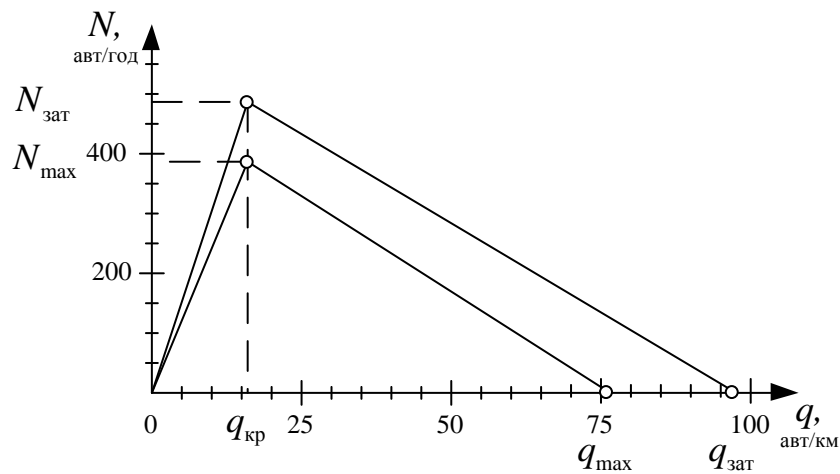
б) для двох смуг руху

Рисунок 6.13 – Діаграма ТП для ділянки  
вул. Свободи (вул. Пушкінська – вул. Алчевських)

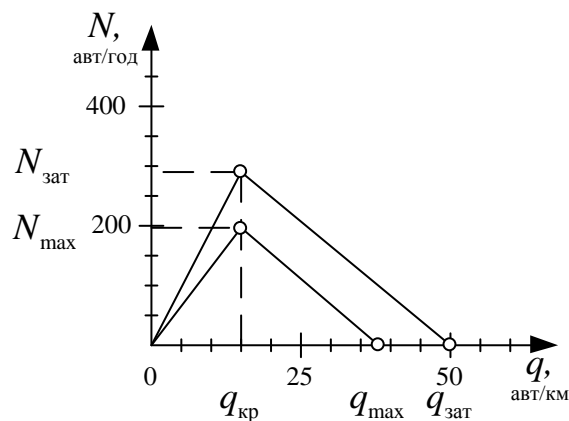
Навіть наявність двох смуг руху не впливає на покращення умов ДР на ділянці –  $N_p \gg N_{зат}$ . Отриманий результат доводить, що означена вулиця міста потребує або реконструкції, або розробки дієвих методів управління ДР.

За заявкою від Департаменту інфраструктури Харківської міської ради було розроблено та досліджено ділянку вул. Я. Мудрого, яка складається із

двох перегонів різної довжини та характеризується інтенсивністю ТП, що перевищує нормативні параметри –  $N_p = 640$  авт/год (рис. 6.14).



а) вул. Пушкінська – вул. Алчевських



б) вул. Алчевських – вул. Чернишевського

Рисунок 6.14 – Діаграма ТП для ділянки вул. Я. Мудрого

Отримані результати моделювання для калібрування ГІМ свідчать щодо наявності складних режимів руху на ділянках ВДМ м. Харків. Визначена на перегонах поточна інтенсивність ТП у часи «пік» має більше значення  $N_{max}$ , отримане за моделлю, що відповідає реальній ситуації на вулицях міста. Такий підхід надає не тільки наочну інформацію стану ДР у місті, а й відокремлює ділянки ускладненого руху.

Тому для ОПР запропоноване рішення підвищує швидкість при виборі керуючого впливу (при наявності інформації щодо поточного виміру інтенсивності ТП) та надає підґрунтя для оперативного рівня щодо вибору методу управління ДР.

Таким чином, в ході експерименту було побудовано діаграми ТП для ділянок вул. Я. Мудрого (магістраль районного значення) та вул. Свободи (вулиця міського значення) – для двох та однієї смуги руху, тому як права смуга протягом дня зайнята під парковку АТЗ. При порівнянні отриманих результатів, можливо стверджувати, що необхідно не тільки ліквідувати тимчасову парковку для покращення умов ДР та формуванню заторів на дорозі, що впливає на зниження пропускної спроможності ВДМ, а й розробити дієві методи управління ДР, зокрема на вул. Свободи.

#### 6.4 Висновки за розділом 6

Для практичного впровадження запропонованих методів управління багаторівневих СУДР у відділах департаментів інфраструктури міст України було проведено модельні та натурні експерименти визначення керуючих впливів для підвищення ефективності функціонування транспортної мережі міст. Експериментальні дослідження проведено на ділянках ВДМ м. Харків засобами імітаційного моделювання; отримані результати підтвердили доцільність запропонованого системного підходу до проектування систем управління ДР у містах.

Для забезпечення рівномірного руху ДР на контурі ВДМ для стратегічного рівня СУДР розроблено спеціальне програмне забезпечення для моделювання параметрів системного управління на контурі магістралей центральної ділової частини м. Харків. В результаті моделювання отримані параметри системного світлофорного регулювання на перехрестях контуру ВДМ, що забезпечують безупинний проїзд транспортних засобів по вул. Я. Мудрого, вул. Свободи, вул. Пушкінській, вул. Сумській,

вул. Алчевських і вул. Чернишевського із рівномірною швидкістю 50 км/год. Запропонований підхід до управління ДР забезпечує зменшення часових затримок руху АТЗ на 13% та витрат палива на 15% за рахунок скорочення часу пересування АТЗ, а також зменшення викидів забруднюючих речовин у навколишнє середовище на 15 %.

З метою формування керуючих впливів на дорожній рух на тактичному рівні управління проведено модельний експеримент реалізації динамічного управління ДР на просп. Науки, м. Харків. Розроблено імітаційну модель руху ТП, яка підтверджує адекватність та коректність запропонованого методу динамічного управління швидкістю ТП за параметром середнього відхилення експериментального та модельного часу проїзду по перегонам ВДМ, що не перевищує 5 %. Під час проведення експерименту було досліджено природу формування «ударних хвиль» та довжину їх розповсюдження по перегонах просп. Науки, які впливають на формування заторів та зменшення пропускної спроможності ВДМ. Доведено, що в результаті впровадження динамічного управління ДР шляхом усунення заторових ситуацій час проїзду експериментальної ділянки зменшується у середньому на 22 % за чотири години дослідження.

З метою формування баз моделей взаємодії основних параметрів ТП для рівня прийняття рішень в СУДР побудовані вибіркові моделі калібровки перегонів центральної ділової частини ВДМ м. Харків. Результати представлено у вигляді основних діаграм транспортного потоку для чотирьох перегонів - вул. Сумська, вул. Чернишевського, вул. Я. Мудрого та вул. Свободи - за наявності особливих умов, а саме – зайнятості правої смуги руху припаркованими транспортними засобами. Існуючі умови обумовлюють розбіжності у визначенні параметрів моделей для різних станів ділянки дослідження, що підтверджує адекватність розроблених діаграм ТП.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [15, 45, 48].

## ВИСНОВКИ

1. На підставі проведеного аналізу структури, принципу дії та алгоритмів управління СУДР систематизовано класифікаційні ознаки систем, що дозволило виявити ієрархічну структуру системи з елементами децентралізації як більш ефективну для реалізації ситуаційного управління, що відповідає IV-му поколінню систем управління. Наразі в Україні діють АСУДР II-го покоління з елементами III-го, які не мають можливості реалізувати адаптивні методи управління в умовах невизначеності параметрів ТП та наявності ризиків у процесі ДР. Виявлено, що методологія визначення характеристик ДР заснована на макро- та мікромодельованні та ґрунтується на функціональній діаграмі ТП, але фундаментальна діаграма не відображає складності процесів у ТП, бо застосовується лише при ідеальних умовах руху: однорідному складі ТП та незмінному стані параметрів ВДМ і зовнішнього середовища.

2. Розроблено концепцію проектування СУДР в містах на підставі розподілення функцій управління за визначеними рівнями функціонування з ознаками багатопараметричності та багатокритеріальності ДР як об'єкту управління. Для цього розроблено ромбовидну архітектуру ієрархічної СУДР за наявності двох центрів управління – технічного та прийняття рішень, що дозволило розподілити не тільки рівні управління за цілями, а й відокремити інформаційні та технологічні параметри за алгоритмами управління. Такий підхід сприяє розробці та реалізації гібридного управління на підставі формалізації знань у поєднанні із традиційними методами визначення керуючих впливів на ДР.

3. Реалізовано системний підхід до формування рівнів СУДР на підставі методів теорії управління: робастного, адаптивного та інтелектуального управління на етапі прийняття рішень. Розроблено принципові схеми для кожного рівня управління – локального, тактичного та стратегічного. Розроблено елементи програмного забезпечення у вигляді інтелектуальних агентів та засоби інформаційного забезпечення, які містять діаграми ТП на

перегонах ВДМ для калібрування ГІМ. Розроблено структуру інтелектуальних агентів як елементів гібридної СУДР, де функції агентів відображені у вигляді абстрактного математичного опису.

4. Отримано опис процесу формування та розповсюдження обурюючих впливів (ударних хвиль) із визначенням місця їх утворення у ТП на підставі удосконалення макромоделей ТП шляхом введення параметру локальної щільності для складних умов руху як основи заходів попередження переходу стану ТП з детермінованого до стохастичного у міських умовах руху.

5. Визначено аналітичні залежності формування та взаємодії груп АТЗ на перегонах із урахуванням параметрів циклу регулювання на перехрестях, часового інтервалу між групами АТЗ та їх часової довжини, які впливають на довжину перегону та на визначення рекомендованої швидкості рівномірного руху ТП по магістралям контуру ВДМ за рахунок збільшення ефективного часу циклу світлофорного регулювання.

6. Розроблено концепцію визначення параметрів контурного управління ДР, яка містить геоінформаційну модель ВДМ міста, моделі руху ТП та алгоритм розв'язання формалізованої задачі умовної оптимізації методом Нелдера-Міда. Розроблено алгоритм управління, що забезпечує отримання діаграм координації руху ТП по магістралям контуру із визначеною швидкістю рівномірного руху на підставі узгодження параметрів циклу світлофорного регулювання із параметрами ТП. Для реалізації алгоритму розроблено програмне забезпечення «Контур» та доведено до практичного застосування у складі СУДР у містах.

7. Розроблено методологію динамічного управління ДР для зменшення інтенсивності ТП за рахунок управління швидкістю руху ТП на підставі математичного опису процесу виникнення УХ. Розроблено імітаційну мікромодель руху АТЗ з урахуванням основних параметрів руху в потоці шляхом визначення аналітичних залежностей взаємодії технічних характеристик АТЗ із параметрами режимів руху ТП та урахуванням реакції і поведінки водія; методику доведено до практичного застосування.

8. Для забезпечення рівномірного руху ДР на контурі ВДМ для стратегічного рівня СУДР розроблено спеціальне програмне забезпечення для моделювання параметрів системного управління. В результаті моделювання отримані параметри системного світлофорного регулювання на перехрестях контуру ВДМ, що забезпечують безупинний проїзд транспортних засобів по вул. Я. Мудрого, вул. Свободи, вул. Пушкінській, вул. Сумській, вул. Алчевських і вул. Чернишевського із рівномірною швидкістю 50 км/год. Запропонований підхід до управління ДР забезпечує зменшення часових затримок руху АТЗ на 13% та витрат палива на 15% за рахунок скорочення часу пересування АТЗ, а також зменшення викидів забруднюючих речовин у навколишнє середовище на 15 %.

З метою формування керуючих впливів на дорожній рух на тактичному рівні управління проведено модельний експеримент реалізації динамічного управління ДР на просп. Науки, м. Харків. Розроблено імітаційну модель руху ТП, яка підтверджує адекватність та коректність запропонованого методу динамічного управління швидкістю ТП за параметром середнього відхилення експериментального та модельного часу проїзду по перегонам ВДМ, що не перевищує 5 %. Доведено, що в результаті впровадження динамічного управління ДР шляхом усунення заторових ситуацій час проїзду експериментальної ділянки зменшується у середньому на 22 % за чотири години дослідження.

З метою формування баз моделей взаємодії основних параметрів ТП для рівня прийняття рішень в СУДР побудовані вибіркві моделі калібрування перегонів ВДМ м. Харків у вигляді основних діаграм ТП для чотирьох перегонів – вул. Сумська, вул. Чернишевського, вул. Я. Мудрого та вул. Свободи із урахування змінних умов руху. Існуючі умови обумовлюють розбіжності у визначенні параметрів моделей для різних станів ділянки дослідження, що підтверджує адекватність розроблених діаграм ТП.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамова Л.С., Кардаш І.П. Прогнозування інтенсивності транспортного потоку. *Вісник ХНАДУ*. 2003. № 22. С. 96-98.
2. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С. Моделирование параметров транспортных потоков. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2004. №6(12). С. 213-215.
3. Абрамова Л.С., Решетников Є.Б. Науково-технічне забезпечення автоматизованих систем управління дорожнім рухом. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2004. № 42. С. 79-83.
4. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С., Ширин В.В. Моделирование параметров транспортного потока. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2004. № 6(12). С. 213-215.
5. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С., Бугаев И.С. Алгоритм определения оптимальных параметров координированного управления транспортными потоками. *Вісник ХНАДУ*. 2004. № 25. С. 114-117.
6. Абрамова Л.С., Решетников Е.Б., Чернобаев Н.С., Ширин В.В. Анализ организации дорожного движения в центральной части города Харькова. *Вісник ХНАДУ*. 2005. №29. С. 116-122.
7. Абрамова Л.С., Чернобаев М.С. Элементы системного анализа при вивченні автомобільно-дорожньої системи міста. *Автомобільний транспорт*. 2006. №18. С. 67-71.
8. Абрамова Л.С., Чернобаев М.С. Аналіз методів прогнозування інтенсивності транспортного потоку. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2006. № 6. С.158-163.
9. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Методи підвищення ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі міста. *Автомобільний транспорт*. 2006. №19. С. 51-55.

10. Абрамова Л.С., Ширін В.В. Моделирование и оптимизация транспортной сети. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2006. № 2/2 (20). С. 98-101.
11. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Імітаційна модель руху транспортних засобів при маневруванні. *Комунальне господарство міст*. 2006. Вип. 69. С. 221-228.
12. Абрамова Л.С., Чернобаєв М.С. Щодо вирішення задачі оптимізації параметрів координованого управління транспортними потоками. *Вісник ХНАДУ*. 2007. № 37. С. 83-86.
13. Дербунович Л.В., Абрамова Л.С. Иерархические структуры систем управления дорожным движением. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2008. Вип. 31. С. 40-48.
14. Абрамова Л.С., Рогов А.В. Моделирование параметров транспортных потоков. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2008. №46. С.9-15.
15. Абрамова Л.С., Чернобаєв Н.С. Программная среда координированного управления транспортными потоками. *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту*. 2008. № 1. С. 22-25.
16. Абрамова Л.С., Бугайов І.С., Горбатій П.О. Оптимізація параметрів локального управління на багатосмугових перехрестях у містах. *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту*. 2008. № 2. С. 28-34.
17. Дербунович Л.В., Абрамова Л.С., Ширін В.В. До питання оцінки ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2008. Вип. 56. С. 72-79.
18. Абрамова Л.С., Чернобаєв Н.С. Имитационная модель управления транспортными потоками. *Вісник ХНАДУ*. 2009. № 47. С. 93-96.
19. Абрамова Л.С., Птиця Г.Г. Дослідження рівнів аварійності на автомобільних дорогах. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2006. № 3/2 (21). С. 17-20

20. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С. Постановка задачи адаптивного управления дорожным движением. *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту*. 2009. № 1. С. 7-12.
21. Абрамова Л.С., Капинус С.В. Анализ методов теории принятия решений с позиции управления дорожным движением. *Вісник ХНАДУ*. 2009. №47. С. 90-92.
22. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Моделирование заторовых ситуаций по улично-дорожной сети. *Автомобільний транспорт*. 2009. №25. С. 66-69.
23. Абрамова Л.С., Капинус С.В. К вопросу выбора критериев эффективности организации дорожного движения методами теории полезности. *Автомобільний транспорт*. 2009. №25. С. 62-65.
24. Абрамова Л.С., Капинус С.В. Анализ функционирования автоматизированных систем управления дорожным движением в мегаполисах. *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту*. 2009. № 1. С. 13-20.
25. Абрамова Л.С. Модели управления дорожным движением для АСУДД. *Вісник ХНАДУ*. 2010. №50. С. 57-63.
26. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С. Обоснование выбора показателей эффективности контурного управления дорожным движением. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2010. № 4/3. С. 58-61.
27. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Способ повышения пропускной способности регулируемых перекрестков. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2010. № 4/3. С. 62-65.
28. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Формализация параметров движения автотранспортных средств при движении в плотном потоке. *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту*. 2011. № 3. С. 4-11.
29. Абрамова Л.С., Наглюк И.С., Капинус С.В. Анализ структуры систем поддержки принятия решений в АСУДД. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2012. №18. С. 45-51.
30. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Модельный эксперимент поведения транспортного потока на улично-дорожной сети города в заторовом режиме движения. *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту*. 2012. №1. С. 47-55.

31. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С. Координированное управление дорожным движением на сети магистралей города. Монография. Харьков: издательство "Точка". 2012. 160 с.
32. Абрамова Л.С. Элементы теории штучного інтелекту в управлінні дорожнім рухом. *Вісник ХНАДУ*. 2013. Вип. 61-62. С. 32-36.
33. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. К вопросу надежности транспортных систем. *Вісник ХНАДУ*. 2009. №47. С. 139-142
34. V. Hahanov, W. Gharibi, L.S. Abramova, S. Chumachenko, E. Litvinova, A. Hahanova, V. Rustinov, V. Miz, A. Zhalilo, A. Ziarmand. Cyber physical system-smart cloud traffic control. *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS 2014)*. SEP 26-29, 2014. PP. 49-66. (WoS:000380470800069). (Scopus)
35. Абрамова Л.С. Особенности аудита дорожной безопасности. *Автомобільний транспорт*. 2015. Вип. 36. С. 161-165.
36. Абрамова Л.С., Наглюк І.С., Птиця Г.Г. Аналіз методів визначення складу транспортного потоку. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2012. Вип. 17. С. 35-41.
37. Абрамова Л.С., Ширін В.В. Прогнозування параметрів транспортних потоків при плануванні автомобільних доріг. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2015. № 5/3(25). С 47-51.
38. Абрамова Л.С. Спосіб динамічного управління автомобільним рухом на залізничному переїзді. *Автомобільний транспорт*. 2016. Вип. 38. С. 34-38.
39. Абрамова Л.С., Птиця Г.Г. Дослідження показників безпеки руху на дорогах. *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту*. 2009. №1. С.20-26
40. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Метод классификации частных коэффициентов аварийности для автомобильных дорог различных технических категорий. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2014. Вип. 44. С. 41-55.
41. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Выявление латентных факторов частных коэффициентов аварийности. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2012. № 5/4 (59). С. 32-37.

42. Абрамова Л.С., Наглюк І.С., Левченко О.С. Аналіз методів проведення камеральних та польових досліджень аудиту безпеки дорожнього руху. *Вісник ХНАДУ*. 2016. Вип. 75. С. 182-190.

43. Абрамова Л.С., Ширин В.В., Птица Г.Г. Анализ методов определения показателей безопасности дорожного движения. *Вісник ХНАДУ*. 2015. №69. С.118-123

44. Нагорний Є.В., Абрамова Л.С. Концептуальний підхід до проектування систем управління дорожнім рухом. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2017. Вип. 12. С. 94-100.

45. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Визначення балансу між параметрами дорожнього руху. *Комунальне господарство міст*. 2018. Вип. 140. С. 91-97.

46. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Концепция управления безопасностью дорожного движения. Перспективные тренды развития науки: техника и технологии. В 2 книгах. К. 1. Глава 6.: кол. монографія. Одесса: Куприенко С.В., 2016. С. 169-190

47. Liudmyla Abramova, Yevhen Nahornyi, Henadii Ptytsia. Structure of transformation of the road motion parameters in the control system. *SHS Web of Conferences*. 2019. №67, 05001. NTI-UkrSURT 2019: DOI <https://doi.org/10.1051/shsconf/20196705001>. <https://www.shs-conferences.org/articles/shsconf/abs/2019/08/contents/contents.html> (WoS)

48. Abramova L. Model experiment of dynamic control implementation at the transport network in Kharkiv, Ukraine. *Theoretical and scientific foundations of engineering: collective monograph. International Science Group*. Boston: Primedia eLaunch. 2020. PP. 150-164. URL: <http://isg-konf.com>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

49. Абрамова Л.С., Чернобаев М.С. Визначення оптимальних параметрів координованого управління. Сборник научных трудов. «*Научные исследования и их практическое применение*»: Международная научно-практическая конференция. Том I. Транспорт. Физика и математика. Одесса, 2007, с. 42-44.

50. Абрамова Л.С., Тонконошко Г.А. Дослідження впливу показників видимості на безпеку дорожнього руху. *«Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях»*: праці науково-технічної конференції з міжнародною участю. ХНУ ім. В.Н. Каразіна. Харків, 2010. С. 17-20.

51. Абрамова Л.С. Проектирование систем управления дорожным движением. *«Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях»*: праці науково-технічної конференції з міжнародною участю. ХНУ ім. В.Н.Каразіна. Харків, 2010. С. 14-17.

52. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Имитационная модель поведения транспортного потока на улично-дорожной сети городов в условиях затора. *«Логістика промислових регіонів»*: IV Міжнародна науково-практична конференція. Донецьк, 23-25 квітня 2012 р. С. 171-172.

53. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Влияние параметров дорожных условий на безопасность дорожного движения. *«Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов»*: Материалы Межд. науч.-практ. конф., г. Минск 22-26 октября 2012 г., БНТУ. С. 68-70.

54. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Подход к усовершенствованию оценки уровня безопасности дорожного движения. *«Безпека дорожнього руху: правові та організаційні аспекти»*: Матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Донецьк 15-16 листопада 2012 р., ДААТ. С. 168-172.

55. Абрамова Л.С. Напрямки розвитку сучасного управління дорожнім рухом. *«Проблеми підвищення рівня безпеки, комфорту та культури дорожнього руху»*: Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції, 16-17 квітня Харків: ХНАДУ. 2013. С.33-35.

56. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Классификация методов определения показателей безопасности. *«Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе»*: Материалы международной научно-практической конференции г. Пермь, 25 - 27 апреля 2013, том 2, С. 8 - 16.

57. Абрамова Л.С., Капинус С.В. Признаки эргатических систем в управлении дорожным движением. *«Інформаційні технології і мехатроніки»*: Всеукраїнська науково-практична конференція. 15 квітня 2014 р. Харків. С. 5-6.

58. Абрамова Л.С., Наглюк И.С. Концепция управления дорожным движением в городах. *VII российско-германская конференция по безопасности дорожного движения*. Санкт-Петербург, 6-7 июня 2014 г.

59. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Результаты редукции частных коэффициентов аварийности при определении уровня безопасности дорожного движения. *Академическая наука – проблемы и достижения*: Материалы IV международной научно-практической конференции. 7-8 июля 2014 г. Москва. CreateSpace 4900 LaCross Road, North Charleston, SC, USA 29406, 2014. С. 165-169.

60. Абрамова Л.С. Концепція управління безпекою дорожнього руху. *«Новітні технології в автомобілебудуванні та на транспорті»*: Наукові праці. Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 85-річчю заснування ХНАДУ, 85-річчю автомобільного факультету, а також з нагоди Дня автомобіліста та дорожника. 15-16 жовтня 2015 р. ХНАДУ. Харків, 2015. С. 61.

61. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Экспериментальная проверка экспресс-метода определения уровня безопасности дорожного движения. *«Транспорт, экология – устойчивое развитие»*: Материалы науч.-технич. конф. с международным участием. г. Варна, Болгария 2016. С. 288-292.

62. Абрамова Л.С., Капинус С.В. Особенности системы управления дорожным движением. *«Транспорт, экология – устойчивое развитие»*: Материалы науч. технич. конф. с международным участием. г. Варна, Болгария. 2016. с.107-110.

63. Абрамова Л.С., Ширін В.В., Птица Г.Г. Формування інноваційних рішень для системи управління безпекою дорожнього руху. *Автомобільний транспорт та інфраструктура*: I Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, Україна, 26-28 квітня 2018 р.: тези конференції. Київ. 2018. С. 140-143.

64. L.S. Abramova. Substantiation of distribution of road traffic management of road traffic in the cities. *«Experience of the past, practice of the future»*: Proceedings of 48<sup>th</sup> International Scientific Conference. New York 2019. 6-14.

65. Абрамова Л.С., Нагорний Є.В. Підхід до формування гібридного управління дорожнім рухом. *«Сучасні інноваційні та інформаційні технології на транспорті»*: Збірка матеріалів XI Міжнародної науково-практичної конференції. Херсонська державна морська академія, Херсон, 2019, С.28-31.

66. Абрамова Л.С. Особливості моделювання групового руху транспортних засобів у містах. *«Scientific achievements of modern society»*: Abstracts of the 1st International scientific and practical conference. September 11-13, 2019, Cognum Publishing House, Liverpool, United Kingdom. 2019. PP. 8-17.

67. Абрамова Л.С., Нагорний Є.В., Птиця Г.Г. Структура перетворення параметрів дорожнього руху у системі управління. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика*: 15-та науково-практична міжнародна конференція, м. Харків, Україна, 6-8 червня 2019 року: тези доповідей. Вісник економіки транспорту і промисловості. №66 (Р2), УкрДУЗТ, Харків. 2019. С. 61-63.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

68. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С., Ширин В.В. Формализация задачи управления транспортными потоками на улично-дорожной сети крупных городов. *Прикладная радиоэлектроника*. 2009. Том 8, № 2. С. 188-192.

69. Абрамова Л.С., Бакуліч О.О. Автоматизовані системи управління дорожнім рухом: навч. посібник. Харків: ХНАДУ. 2014. 184 с.

70. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Побудова дерева рішень для управління дорожнім рухом на залізничному переїзді. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2016. Вип. 54 (спецвипуск). С. 33-34.

71. Абрамова Л.С., Птиця Г.Г. Риск возникновения ДТП как фактор надежности транспортных систем. *«Совершенствование организации*



*дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов»*: Материалы Межд. науч.-практ. конф., г. Минск 23-24 октября 2009 г., БНТУ.

72. Абрамова Л.С., Наглюк І.С., Ширін В.В., Птица Г.Г., Капінус С.В. Аудит безпеки дорожнього руху. Підручник. Харків: ХНАДУ. 2015. С. 281.

73. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Системный анализ систем управления дорожным движением. *Молодий вчений*. 2016. №7. С. 177-181.

74. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Управління дорожнім рухом на залізничному переїзді з елементами теорії корисності. *Економіка, управління та адміністрування (Вісник ЖДТУ)*. 2016. Вип. №2(77). С. 13-17.

75. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Влияние параметров дорожных условий на безопасность дорожного движения. М-во образования Республики Беларусь Белорусский национальный технический университет: сб. науч. тр., 2013. С. 29-36.

76. Абрамова Л.С., Чернобаєв М.С. Постановка задачі оптимізації параметрів координованого управління. *Актуальні проблеми забезпечення безпеки дорожнього руху*: Науково-практичний семінар. ХНУВС, Харків, 18.04.2008 р. С. 5.

77. Абрамова Л.С., Птица Г.Г., Ширін В.В. Довідковий словник термінів та визначень з організації та безпеки дорожнього руху: словник. Харків: ХНАДУ. 2017. 226 с.

78. Абрамова Л.С., Наглюк І.С., Ширін В.В., Птица Г.Г., Капінус С.В., Левченко О.С., Харченко Т.В. Практикум з проведення аудиту безпеки дорожнього руху: Навчальний посібник. Харків: ХНАДУ. 2019. 140 с.

79. Абрамова Л.С. Моделі управління дорожнім рухом для АСУДР: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49011. Державна служба інтелектуальної власності. 29.04.13.

80. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Метод классификации частных коэффициентов аварийности для автомобильных дорог различных технических категорий: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49010. Державна служба інтелектуальної власності. 29.04.13.

81. Абрамова Л.С., Капінус С.В. До питання вибору критеріїв ефективності організації дорожнього руху методами теорії корисності: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49009. Державна служба інтелектуальної власності. 29.04.13.

82. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С. Монографія. Координированное управление дорожным движением на сети магистралей города: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 53862. Державна служба інтелектуальної власності. 27.02.14.

83. Абрамова Л.С. Элементы теории искусственного интеллекта в управлении дорожным движением: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 53587. Державна служба інтелектуальної власності. 10.02.14.

84. Абрамова Л.С. Особенности аудита дорожной безопасности: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 63002. Державна служба інтелектуальної власності. 13.10.15.

85. Абрамова Л.С., Капинус С.В. Системный анализ систем управления дорожным движением: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 69151. Державна служба інтелектуальної власності. 13.12.16.

86. Абрамова Л.С. Способ динамического управления автомобильным движением на железнодорожном переходе: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 69150. Державна служба інтелектуальної власності. 13.12.16.

87. Абрамова Л.С., Ширин В.В., Птица Г.Г. Анализ методов определения показателей безопасности дорожного движения: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 69149. Державна служба інтелектуальної власності. 13.12.16.

88. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Прогнозирование параметров транспортных потоков при планировании автомобильных дорог: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 68955. Державна служба інтелектуальної власності. 06.12.16.

89. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Управление дорожным движением на железнодорожном переходе с элементами теории полезности: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 70197. Державна служба інтелектуальної власності. 21.01.17.

90. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Визначення балансу між параметрами дорожнього руху: Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 88932. Державна служба інтелектуальної власності. 24.05.19.
91. Дэвид А.М., МакГоцэн К. Методология структурного анализа и проектирования. Москва: Мир, 2002. 264 с.
92. Губинский А.И. Надежность и качество функционирования эргатических систем. Ленинград: Наука, Ленинградское отделение, 1982. 268 с.
93. Михеев С.В., Михеева Т.И., Золотовицкий А.В. Автоматизированная система контроля и управления дорожным движением. В кн. Математика. Компьютер. Образование. Москва: Прогресс – Традиция, 2000. С. 207-214.
94. Ветлицкий В.Н., Осипов А.В. Автоматические системы управления движением транспорта. Ленинград: Машиностроение, 1986. 216 с.
95. Andy H.F. Chow, Rui Sha, Shuai Li. Centralised and decentralised signal timing optimisation approaches for network traffic control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2020. Vol. 113. P. 108-123. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.05.007>
96. Highway Capacity Manual 2000: Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C., USA, 2000. 1207 p.
97. Петров Е.А., Даниель Вольф. Адаптивная система управления дорожным движением в составе городской интеллектуальной транспортной системы. *Дорожная держава*. № 40. 2012. С. 2-5.
98. Cohen, S.L. Concurrent Use of the MAXBAND and TRANSYT Signal Timing Programs for Arterial signal optimization. *62nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, №906. 1983. PP. 81-84.
99. Barcelo J., Casas J., Ferrer J., Garcia D. Modelling Advanced Transport Telematic Application with Microscopic simulators. *Traffic and Mobility*. Springer, 1999. Vol.17. P. 205-221.
100. Asencio-Cortés G., Florido E., Troncoso A., Martínez-Álvarez F. A novel methodology to predict urban traffic congestion with ensemble learning. *Soft Comput*. №20. 2016. PP. 4205–4216. <https://doi.org/10.1007/s00500-016-2288-6>.

101. ДСТУ 2935:2018. Безпека дорожнього руху. Терміни та визначення понять. [Чинний від 01.06.2019] – К.: Держстандарт України, 2019. – (Державний стандарт України)
102. Бабков В.Ф. Дорожные условия и безопасность движения: учебник для вузов. Москва: Транспорт, 1993. 271 с.
103. Клинковштейн Г.И., Афанасьев М.Б. Организация дорожного движения: 5-е изд., перераб. и доп. Москва: Транспорт, 2001. 247 с.
104. Говорущенко Н.Я. Основы управления автомобильным транспортом: учеб. пособие. Харьков: Вища шк., 1978. 224 с.
105. Хомяк Я.В. Организация дорожного движения. Киев: Высшая школа, 1986. 270 с.
106. Бакуліч О.О., Дзюба О.П., Єресов В.І. та ін. Організація та регулювання дорожнього руху: підручник. За заг. ред. В.П. Поліщука. Киев: Знання України, 2012. 467 с.
107. Васильев А.П., Фримштейн М.И. Управление движением на автомобильных дорогах. Москва: Транспорт, 1979. 295 с.
108. Гаврилов Э.В., Гридчин А.М., Ряпухин В.Н. Системное проектирование автомобильных дорог: Учебное пособие. Москва–Белгород: Издательство АСВ, 1998. Ч. I. 138 с.
109. Степанов И.С., Покровский Ю.Ю., Ломакин В.В., Москалева Ю.Г. Влияние элементов системы водитель–автомобиль–дорога–среда на безопасность дорожного движения: учебное пособие. Москва: МГТУ «МАМИ», 2011. 171 с.
110. Лобашов О.О. Моделювання впливу мережі паркування на транспортні потоки у містах: монографія. Харків: ХНАМГ, 2010. 170 с.
111. Рейцен Є.О. Організація і безпека міського руху: навчальний посібник. Киев: ТОВ «СІК ГРУП Україна», 2014. 454 с.
112. Угненко Е.Б. Обоснование проектных решений по повышению безопасности дорожного движения. *Проблеми підвищення рівня безпеки,*

*комфорту та культури дорожнього руху*: III міжнародна науково-практична конференція, 16-17 квітня 2013 р.: матеріали. ХНАДУ, 2013. С. 174-175.

113. Ротенберг Р.В. Основы надежности системы Водитель-Автомобиль-Дорога-Среда. Москва: Машиностроение, 1986. 216 с.

114. Амбарцумян В.В. Безопасность дорожного движения. Том 1. Безопасность водителей и участников дорожного движения: учебное пособие. Под общей редакцией д.т.н., профессора В.В. Сильянова. Москва: МАДИ, 2008. 350 с.

115. Бегма И.В., Гаврилов Э.В., Калужский Я.А. Учет психофизиологии водителей при проектировании автомобильных дорог. Москва: Транспорт, 1976. 88 с.

116. Давідіч Ю.О. Проектування автотранспортних технологічних процесів з урахуванням психофізіології водіїв. Харків: ХНАДУ, 2006. 292 с.

117. Клеббельсберг Д. Транспортная психология. Москва: Транспорт, 1989. 367 с.

118. М 218-03450778-652:2008. Методика оцінки рівнів безпеки руху на автомобільних дорогах України. [Чинний від 10.12.2008] – Київ: ДерждорНДІ, 2008. 31 с. (Державні будівельні норми України).

119. Гаврилов Е.В., Дмитриченко М.Ф., Доля В.К. та ін. Системологія на транспорті. Підручник: у 5 кн. Під заг. ред. Дмитриченка М.Ф. – Кн. 4: Організація дорожнього руху. Київ: Знання України, 2012. 452 с.

120. Мишуринов В.М., Романов А.Н. Надежность водителя и безопасность движения. Москва: Транспорт, 1990. 167 с.

121. Банатов А.В. Оценка безопасности движения в городских условиях: диссертация кандидата технических наук : 05.23.11. Волгоград, 2002. 170 с.

122. Козлов Ю.С., Меньшова В.П., Святкин И.А. Экологическая безопасность автомобильного транспорта: учебное пособие. Москва: Агар, 2000. 176 с.

123. Юхименко В.Ф., Яценко А.А. Безопасность транспортных средств: учебное пособие. Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2009. 208 с.

124. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими: пер. с англ. Коваленко Е.Г. и Шермана Г.Д., под. редакцией чл.-корр. АН СССР Н.П. Бусленко. Москва: Транспорт, 1972. – 424 с.
125. Бондаренко Е.В., Дворников Г.П. Дорожно-транспортная экология: учебное пособие. Под. ред. А.А. Цыцур. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. 113 с.
126. Четверухин Б.М. Технические средства регулирования дорожного движения. Киев: КАДИ, 1978. 88 с.
127. Четверухин Б.М., Єресов В.І. Спектрально-кореляційна теорія транспортних потоків. *Автомобільні дороги та дорожнє будівництво*. 1983. № 33. С. 29 – 35.
128. Рунэ Эльвик, Аннэ Боргер Мюсен, Трулс Ваа. Справочник по безопасности дорожного движения. Пер. с норв. под редакцией проф. Сильянова В.В. Москва: МАДИ(ГТУ), 2001. 746 с.
129. Столяров В.В. Проектирование автомобильных дорог с учетом теории риска. Саратов: СГТУ, 1994. Ч. I. 184 с.
130. Elvic R. Which are the relevant costs and benefits of road safety measures designed for pedestrians and cyclists? *Accident Analysis & Prevention*. Vol. 32, 2000, P. 37-45. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(99\)00046-9](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(99)00046-9) Get rights and content
131. Говорущенко Н.Я., Волков В.П., Шаша И.К. Обеспечение безопасности движения на автомобильном транспорте. Харьков: ХНАДУ, 2007. 361 с.
132. Єресов В.І. Повышение эффективности контроля и управления движением на автомобильных дорогах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. 05.22.10. Киев: 1984. 19 с.
133. Shahgholian M., Gharavian D. Advanced Traffic Management Systems: An Overview and A Development Strategy. *Computer Science, Engineering*. 2018. 39 p. <https://arxiv.org/abs/1810.02530>
134. Сильянов В.В., Домке Э.Р. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц: учебник. Москва: Академия, 2008. 352 с.

135. Borja Alonso, Ángel Ibeas, Giuseppe Musolino, Corrado Rindone, Antonino Vitetta. Effects of traffic control regulation on Network Macroscopic Fundamental Diagram: A statistical analysis of real data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Vol. 126, August 2019, P. 136-151. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.05.012>
136. Иносе Х., Хамада Т. Управление дорожным движением: пер. с англ. под. ред. М.Я. Блинкина. Москва: Транспорт, 1983. 248 с.
137. Крылов Ю.С. Режим движения и пропускная способность автомобильных дорог. *Автомобильные дороги*. 1959. №6. С.10-11.
138. Cremer M., Ludvig J. A fast simulation model for traffic flow on the basis of Boolean operations. *Math. Comp Simul.* 1986. V. 28. P. 297-303.
139. Daganzo C.F. Remarks on Traffic Flow Modeling and Its Applications. *Traffic and Mobility. Dept. of Civil and Environmental Engineering University of California, Berkeley*. 105–115. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-60236-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-60236-8_7).
140. Фишельсон М.С. Транспортная планировка городов. Москва: Высшая школа, 1985. 239 с.
141. Кременец Ю.А., Печерский М.П., Афанасьев М.Б. Технические средства организации дорожного движения. Москва: Академкнига, 2005. 279 с.
142. Булавина Л.В. Расчет пропускной способности магистралей и узлов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2009. 44 с.
143. Семенов В.В. Смена парадигмы в теории транспортных потоков. Москва, 2006. 32 с. (Препринт ИПМ № 46 / Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, Москва, 2006).
144. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. [Чинний від 01.09.2019] – К: ДП «ДерждорНДІ», 2016. 104 с. (Державні Будівельні Норми).
145. Семенов В.В. Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса. Москва, 2004. 44 с. (Препринт № 34/Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша; Москва, 2004)

146. Greenshields B.D. A study of traffic capacity. *Proc. (US) highway research board*. 1934. vol. 14, PP. 448-494.

147. Lighthill M.J., Whitham G.B. On kinematic waves: II. Theory of traffic flow on long crowded roads. *Proc. R. Soc. London, Ser. A*. 1955. Vol. 229. PP. 281-345.

148. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. Пер. с англ. В.В. Жаринова. Под ред. А.Б. Шабата. Москва: Мир, 1977. 624 с.

149. Lighthill M.J., Whitham G.B. On kinematic waves II: A theory of traffic flow on long, crowded roads. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A*, №229, 317–345. <https://doi.org/10.1098/rspa.1955.0089>.

150. Kerner B.S. Three-phase traffic theory and highway capacity. *Physics, Mathematics. Physica A-statistical Mechanics and Its Applications*. 2002. P. 79.

151. Daganzo C.F., Fernando Bouthelier, Yosef Sheffi. Multinomial probit and qualitative choice a computationally efficient algorithm. *Transportation Science*. 1977. №11. P. 338-358.

152. Neubert L., Santen L., Schadscheneider A., Schreckenberg M. Single-vehicle data of highway traffic: A statistical analysis. *Physical review. E, Statistical physics, plasmas, fluids, and related interdisciplinary topics*. 1999. V. 60, P. 6480-6490.

153. Швецов В.И. Математическое моделирование транспортных потоков. *Автоматика и телемеханика*. 2003, № 11. С. 3-46. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1027348026919>

154. Хейт Ф. Математическая теория транспортных потоков; пер. с англ. Москва: Мир, 1966. 286 с.

155. Burks, A.W. (ed), von Neumann, J. (1966). *The Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press, Urbana. Рус. перевод: Дж. фон Нейман. Теория самовоспроизводящихся автоматов. М.: Мир, 1971. 382 р.

156. Коваленко Л.А. Оценка пропускной способности двухполосных автомобильных дорог с учетом закономерностей поведения водителя: автореф.



дисс. канд. тех. наук: спец. 05.22.11 «Автомобильные дороги и аэродромы». ХНАДУ. Харьков. 2003. 18 с.

157. Takashi Nishimura, Yasuo Hino, Jun Kawanishi. Analysis of the Road Network Capacity and Intensive by Cut Theory with Partial Cut. *Mem. Fac. Eng. Osaka Univ*, 1990. Vol. 32. P. 87-95.

158. Takashi Nishimura, Yasuo Hino, Jun Kawanishi, Analysis of the Interaction between the Road Network Capacity and Intensive Land Use in Central Business District. *Mem. Fac, Eng, Osaka Univ*. 1990. Vol. 31, p. 147-156.

159. Васильев А.П. Проектирование дорог с учетом влияния климата на условия движения. Москва: Транспорт, 1986. 284 с.

160. Филиппов В.В. Моделирование на ЭВМ движения автомобильных потоков при проектировании автомобильных дорог: учебное пособие. Киев: Минвуз УССР. КАДИ, 1984. С. 36.

161. Филиппов В.В. Моделирование автомобильного потока с использованием цепей Маркова. Москва: Центральный экономико-математический институт (ЦЭМИ) АН СССР, 1976. С. 41-47. (В кн. Некоторые вопросы исследования транспортных потоков).

162. Кунда Н.Т. Дослідження операцій у транспортних системах: навчальний посібник. Київ: Видавничий Дім «Слово», 2008. 400 с.

163. Буслаев А.П., Новиков А.В., Приходько В.М., Таташев А.Г., Яшина М.В. Вероятностные и имитационные подходы к оптимизации автодорожного движения. Под ред. чл.-корр. РАН В.М. Приходько. Москва: Мир, 2003. 368 с.

164. Solomon H., Wang P. Nonhomogeneous Poisson fields of random lines with applications to traffic flow. *Proc. Sixth Berkeley Symp. on Math. Statist. and Prob*, 1972. Vol. 3. P. 383–400.

165. Раскин Л.Г. Анализ сложных систем и элементы теории оптимального управления. Москва: «Советское радио», 1976. 344 с.

166. ДСТУ 4158-2003. Автоматизовані системи керування дорожнім рухом. Загальні вимоги. [Чинний від 01.07.2004] – К: МВД. 2003. 53 с. (Державні стандарт України)
167. Биркгоф Г. Теория решеток. Москва: Наука, 1984. 566 с.
168. Подлесный Н.И., Рубанов В.Г. Элементы систем автоматического управления и контроля: Учебник. – 3-е изд., перераб. и доп. Киев: Вышая школа, 1991. 461 с.
169. Таран В.А. Эргатические системы управления. Москва: Машиностроение, 1976. 188 с.
170. Дегтярев А.А. Принятие политических решений. Москва: КДЦ, 2004. С. 93-94.
171. Elnaz Namazi, Jingyue Li, Chaoru Lu. Intelligent Intersection Management Systems Considering Autonomous Vehicles: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*. Vol. 7. P. 91946– 91965. [https://doi.org/10.1109 / ACCESS.2019.2927412](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2927412).
172. Zhi (Aaron) Cheng, Min-Seok Pang, Paul A. Pavlou. Mitigating Traffic Congestion: The Role of Intelligent Transportation Systems. *Information Systems Research*. 21 May 2020. <https://doi.org/10.1287/isre.2019.0894>
173. Первозванский А.А., Гайцгори В.Г. Декомпозиция, агрегирование и приближенная оптимизация. Москва: Наука, 1979. 344 с.
174. Whoibin Chung, Mohamed Abdel-Aty, Ho-Chul Park. Development of Decision Support System for Integrated Active Traffic Management Systems Considering Travel Time Reliability. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2020. Vol. 2674. P. 167-180. <https://doi.org/10.1177/0361198120905591>
175. Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН України та МОН України. URL: <https://irtc.org.ua>. (дата звернення: 15.11.2019).
176. Пугачев И.Н, Маркелов Г.Я. Интеллектуальное управление транспортными системами городов. *Транспорт и сервис*. 2014. №2. С. 58-66.

177. Розенберг И.Н. Интеллектуальное управление. *Современные технологии управления*. 2017. №4 (76). Номер статьи 7608. URL: <http://sovman.ru/article/7608/> (дата звернення: 18.09.2019).
178. Ujval J. Solanki. Smart Urban Traffic Management System. *Trends in Transport Engineering and Applications*. Vol. 4, № 1, 2017. PP 48-55.
179. Taras Postranskyu, Mykola Boikiv, Maksym Afonin, Roman Rogalskyi. Selection of a Traffic Management Scheme at an Intersection Taking Into Consideration the Traffic Flow Composition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. PP. 39-46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.195327>
180. T. Henzinger and S. Sastry, eds. Hybrid Systems: Computation and Control. New York: Springer Verlag, 1998. № 1386 in LNCS.
181. Цвиркун А.Д. Структура сложных систем. Москва: Сов. радио, 1975. 200 с.
182. Методы робастного нейро-нечеткого и адаптивного управления: учебник, под ред. Н.Д. Егупова. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002. 744 с.
183. ДСТУ ISO/IEC 38500:2016. Інформаційні технології. Управління ІТ в організації (ISO/IEC 38500:2015, IDT). [Чинний від 01.10.2017] – К: ДП «УкрЕЛЕКОН». 2016. 53 с. (Державний стандарт України)
184. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем: учебник для вузов. СПб.: Питер, 2000. 384 с.
185. Капский Д.В., Навой Д.В., Пегин П.А. Разработка модели транспортных потоков на улично-дорожной сети города. *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 1. С. 47–54. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-47-54>
186. Клачек П.М., Корягин С.И. и др. Гибридные адаптивные интеллектуальные системы. Ч.1. Теория и технология разработки: монография. Калининград: изд-во БФУ им. И. Канта, 2011. 374 с.
187. Klebanov L., Rachev S. T., Fabozzi F. Robust and Non-Robust Models in Statistics. New York: Nova Scientific Publishers, 2009. 307 p.

188. Джексон П. Введение в экспертные системы. 3-е изд. Москва: "Вильямс", 2001. 624 с.
189. Уотермен Д. "Руководство по экспертным системам: Пер. с англ. под ред. В. Л. Стефанюка. Москва: «Мир». 1989. 388 с.
190. Doyle I. What is rational psychology? Toward a modern mental philosophy. *All magazine*. 1983. 4(3), p. 50-53.
191. Годяев А. И. Методологические основы и принципы построения систем поддержки принятия решений в задачах обеспечения безопасности управления движением на железнодорожном транспорте: дис. ... д-ра техн. наук. М.: 2006. 436 с.
192. Edwards J.S. Expert Systems in Management and Administration – Are they really different from Decision Support Systems? *European Journal of Operational Research*, 1992. Vol. 61. P. 114–121.
193. Москвин Б. В. Теория принятия решений: учебник. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2005. 383 с.
194. A H Ashara, S Saleh, U Hassan, M J Kaura. Traffic Management System in Abuja City Center, using Geographic Information Systems (GIS) and Global Positioning System (GPS). A case study of FCT, Nigeria. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1529 (052068), *The 2nd Joint International Conference on Emerging Computing Technology and Sports (JICETS)*. November 2019, Bandung, Indonesia.
195. Kerner B.S. Breakdown in traffic networks. Fundamentals of transportation science. *Springer-Verlag*. Berlin Heidelberg, 2017. 652 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54473-0>
196. Kerner B.S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-Phase Traffic Theory, *Springer*, Berlin, New York, 2009. 188 p.
197. Helbing D. Traffic and related self-driven many particle systems. *Reviews of moder physics*. 2001. Vol. 73, №4. P. 1067–1141.

198. Chowdhury D., Santen L., Schadchneider A. Statistical physics of vehicular traffic and some related system. *Phys. Rep.* 2000. Vol. 329. P. 199-329.
199. Куржанский А. Б., Куржанский А. А., Варайя П. Роль макромоделирования в активном управлении транспортной сетью. *Труды МФТИ*. 2010. Т. 2. №4. С. 100-137.
200. Victor L. Knoop & Winnie Daamen Automatic fitting procedure for the fundamental diagram. *Journal Transportmetrica B: Transport Dynamics*. 2017. Vol. 5, P. 129-144 Received 09 Oct 2014, Accepted 30 Oct 2016, Published online: 28 Nov 2016.
201. Лобанов Е. М. Транспортная планировка городов. Москва: Транспорт, 1990. 240 с.
202. Peterson В.Е. Calculation of capacity, queue length and delay in traffic facilities. *Traffic Eng. and Contr.* 1977. Vol.18. №6. P. 310-312.
203. Воронов А.А., Рутковский В.Ю. Современное состояние и перспективы развития адаптивных систем. *Вопросы кибернетики*. 1985. С. 5-48.
204. Qinzhong Hou, Junqiang Leng, Guosheng Ma, WeiyiLiu, YuxingCheng. An adaptive hybrid model for short-term urban traffic flow prediction. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Vol. 527, August 2019. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121065>
205. Владимирова Л.П. Прогнозирование и планирование в условиях рынка. Москва: ИД «Дашков и К<sup>о</sup>», 2001. 308 с.
206. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление: Пер. с англ. Под ред. В.Ф. Писаренко. Москва: Мир, 1974, кн. 1. 406 с.
207. Мишулина О.А. Статистический анализ и обработка временных рядов. Москва: МИФИ, 2004. 180 с.
208. Гилат А. МАТЛАВ. Теория и практика. 5-е изд. Пер. с англ. Смоленцева Н. К. Москва: ДМК Пресс, 2017. 416 с.
209. Ансофф И. Стратегическое управление. Пер. с англ. Москва: Экономика, 2013. 285 с.

210. Маврина И.Н. Стратегический менеджмент: уч. пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2014. 132 с.
211. Власов А.А., Орлов Н.А. Управление насыщенными транспортными потоками в городах: моногр. Пенза: ПГУАС, 2014. 188 с.
212. Шарапов О.Д., Дербенцев В.Д., Семьонов Д.С. Системный анализ. Київ: КНЕУ, 2003. 154 с.
213. Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения. Москва: Транспорт, 1977. 303 с.
214. Хаханов В., Ваде Гариби, Чумаченко С., Литвинова Є. Кіберфізична система хмарного управління транспортом. *Фундаментальные и прикладные исследования в Америке, Европе и Азии: материалы II Междунар. науч. конгр., 27 сент 2014 г., Нью Йорк, США.* 2014.
215. Хилажев Е.Б., Кондратьев В.Д. Микропроцессорная техника в управлении транспортными потоками. Москва: Транспорт, 1987. 174 с.
216. Кочерга В.И., Зырянов В.В., Коноплянка В.И. Интеллектуальные транспортные системы в дорожном движении: учебное пособие. Ростов-на-Дону: РГСУ. 2008. 108 с.
217. Григоров М.А. Інформаційне забезпечення для оптимізації транспортних потоків: Монографія. Одеса: Астропринт, 2004. 392 с.
218. Михеев С.В., Михеева Т.И., Золотовицкий А.В. Автоматизированная система контроля и управления дорожным движением. В кн. Математика. Компьютер. Образование. Москва: Прогресс-Традиция, 2000. С.207-214.
219. Поліщук В. П., Кунда Н. Т. Інформаційне забезпечення учасників дорожнього руху. Київ: ІЗМН, 1998. 132 с.
220. Михайленко И.В., Четверухин Б.М. Управление движением на автомобильных дорогах. Киев: Урожай, 1991. 193 с.
221. Traffic Control Devices Handbook. Federal Highway Administration. U.S.: DOT, 1975. p. 231.
222. Баженов М.Ю. Методика расчета временных интервалов в транспортных потоках. *Актуальные проблемы эксплуатации*

*автотранспортных средств*: Материалы XIV Международной научно-практической конференции. Владимир, 21-23 ноября 2011. С.47-50.

223. Ветлицкий В.Н. Автоматическое управление движением автотранспортных средств. Перспективы и опыт разработки. Москва: О-во «Знание», 1990. 28 с.

224. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс: Пер. с англ. Москва: Радио и связь, 1988. 128 с.

225. Галкина Г.А., Негров Н.С. Особенности разработки системы классификации ситуаций в рамках системы адаптивного управления транспортными потоками на сети. «*Строительство 2011*»: Материалы международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону: РГСУ, 2011. С. 54-56.

226. Daganzo, C.F. (1999). Remarks on Traffic Flow Modeling and Its Applications. *Traffic and Mobility*. Springer, Berlin, Heidelberg, 105-115. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-60236-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-60236-8_7)

227. Boris S. Kerner. The Physics of Traffic: Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications, and Theory. Springer, Berlin, Heidelberg. 2004. 682 p.

228. Cremer M. On the calculation of individual travel times by macroscopic models. in *Proceedings of the 1995 Vehicle navigation and information Systems Conference*. Washington, 1995. P. 187-193.

229. Cremer M., Der Verkehrsfluss auf Schnellstrassen (Traffic flow on freeways). of *Fachberichte Messen, Steuern, Regeln*. Berlin: Springer-Verlag, 1979. vol. 3. 203 p.

230. Говорущенко Н.Я., Туренко А.Н. Системотехника транспорта (на примере автомобильного транспорта): Изд. 2-е, перераб. и дополн. Харьков: РИО ХГАДТЦ, 1999. 468 с.

231. Говорущенко Н.Я., Нагорный Е.В., Варфоломеев В.Н., Нефедов Н.А. Повышение энергетической эффективности автомобилей и снижение экологической нагрузки крупных городов. «*Транспорт, экология – устойчиво*

*развитие*”: Научно-техническая конференция с международным участие. 23-26 май 2005. Ековарна: Технически университет, 2005.

232. ДСТУ 4100:2014. Безпека дорожнього руху. Знаки дорожні. Загальні технічні умови. Правила застосування. [Чинний від 01.07.2015] – К: ЦБДР та АС при МВС України, 2014. 106 с. (Державний стандарт України)

233. Волков В.П., Ефимчук В.М. Безопасная скорость движения автомобиля при опережающем блокировании передних колес в процессе торможения. *Вестник СевГТУ*. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2002. Вып. 36: Автоматизация процессов и управление. С. 121-123.

234. Подригало М.А., Волков В.П. и др. Квалиметрия, стандартизация и унификация тормозного управления колесных машин. Харьков: Из-во ХНАДУ, 2007. 446 с.

235. Фалькевич Б.С. Теория автомобиля: 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Машгиз, 1963. 239 с.

236. ОСТ 37.001.067-86.Тормозные свойства автотранспортных средств. [Чинний від 20.03.2012]. Методы испытаний: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України. 64 с.

237. Завадский Ю.В. Решение задач автомобильного транспорта методом имитационного моделирования. Москва: Транспорт, 1977. 72 с.

238. PTV Group: *an official site*. URL: <http://www.ptv.de> (дата звернення: 15.05.2019).

239. Офіційний сайт Корпорація AGA Group. URL: <http://www.againc.net/ru> (дата звернення: 15.05.2019).

240. Quadstone Paramics: *an official site*. URL: <http://www.paramics-online.com/what-is-microsimulation.php> (дата звернення: 15.05.2019).

241. Aimsun: *an official site*. URL: <https://www.aimsun.com/> (дата звернення: 15.05.2019).

242. Якимов М.Р., Попов Ю.А. Транспортное планирование: практические рекомендации по созданию транспортных моделей городов в



программном комплексе PTV Vision® VISUM: монографія. Москва: Логос, 2014. 200 с.

243. Thiemann, C., Treiber, M. Traffic Flow Dynamics. *Springer-Verlag* Berlin Heidelberg. 2013. №1. 511 p. DOI: 10.1007/978-3-642-32460-4\_18.

244. ДБН В.2.3-5:2018. Вулиці та дороги населених пунктів. [Чинний від 20.03.2012]. – Київ: Інформаційний бюлетень Мінрегіону України, №5, 2018. 55 с.

ДОДАТОК А  
ХАРАКТЕРИСТИКА РІВНІВ ОБСЛУГОВУВАННЯ РУХУ

Таблиця А.1 – Характеристика рівнів обслуговування руху

Рівень обслуговування руху	Коефіцієнт завантаження $z$	Коефіцієнт швидкості руху $c$	Коефіцієнт насичення рухом $\rho$	Характеристика потоку автомобілів	Стан потоку	Емоційне завантаження водія	Зручність роботи водія	Економічна ефективність роботи дороги
A	< 0,20	> 0,90	< 0,10	Автомобілі рухаються в вільних умовах, взаємодія між автомобілями відсутня	Вільний рух одиночних автомобілів з великою швидкістю	Низьке	Зручно	Неефективна
B	0,20 - 0,45	0,70 - 0,90	0,10 - 0,30	Автомобілі рухаються групами, здійснюється багато обгонів	Рух автомобілів малими групами (2 - 5 од.).  Обгони можливі	Нормальне	Мало зручно	Мало ефективна
C	0,45 - 0,70	0,55 - 0,70	0,30 - 0,70	У потоці ще існують великі інтервали між автомобілями, обгони неможливі	Рух автомобілів великими групами (5 - 14 од.). Обгони ускладнені	Високе	Незручно	Ефективна
D	0,70 - 0,90	0,40 - 0,55	0,70 - 1,00	Суцільний потік автомобілів, що рухаються з малими швидкостями	Колонний рух автомобілів з малою швидкістю. Обгони неможливі	Дуже високе	Дуже незручно	Неефективна
E	0,90 - 1,00	< 0,40	1,00	Потік рухається із зупинками, виникають затори, режим пропускної спроможності	Щільний	Дуже високе	Дуже незручно	Неефективна
F	> 1,00	0,30	1,00	Повна зупинка руху, затори	Понад щільний	Вкрай високе	Вкрай незручно	Неефективна

ДОДАТОК Б  
РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ  
ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ І ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ  
ДОСЛІДЖУВАНОЇ ЧАСТИНИ МІСТА

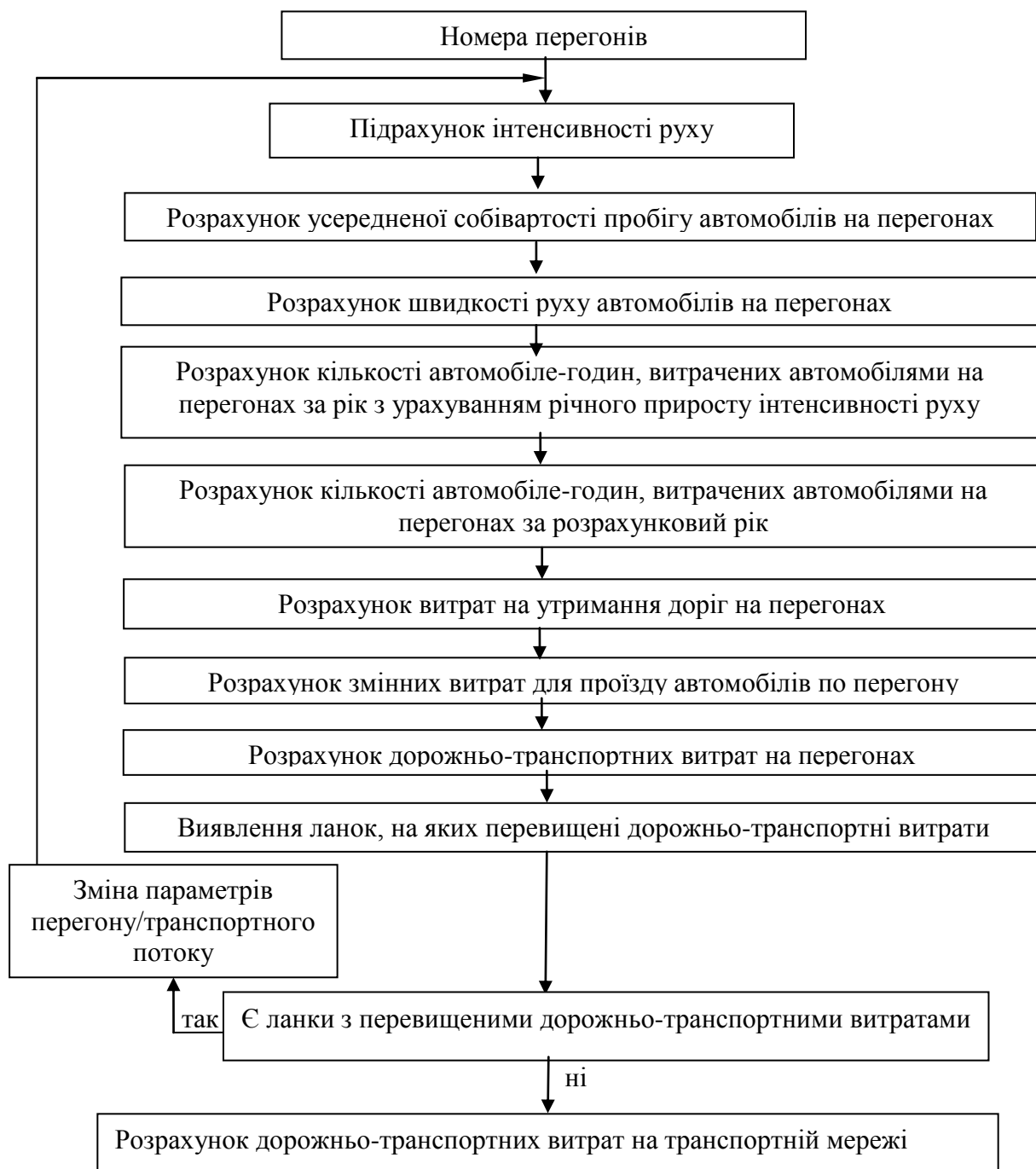


Рисунок Б.1 – Схема визначення незадовільних умов руху на підставі використання дорожньо-транспортних витрат

Таблиця Б.1 – Дорожньо-транспортні витрати на перегонах

Перегони	Дорожньо-транспортні витрати на перегоні, тис.грн.	Перегони	Дорожньо-транспортні витрати на перегоні, тис.грн.	Перегони	Дорожньо-транспортні витрати на перегоні, тис.грн.
1 – 2	3841	19 – 21	66	39 – 40	644
1 – 4	6819	20 – 22	148	39 – 44	311
2 – 3	1304	21 – 22	464	40 – 45	3512
2 – 5	1180	21 – 23	73	41 – 42	92
3 – 6	166	22 – 24	123	41 – 46	2864
3 – 8	5692	23 – 24	475	42 – 43	75
4 – 5	2347	23 – 27	72	42 – 47	668
4 – 13	3069	24 – 28	155	43 – 44	41
5 – 6	589	25 – 26	67	43 – 48	115
5 – 14	1994	25 – 29	2318	44 – 45	175
6 – 7	282	26 – 27	105	45 – 49	2646
6 – 15	689	26 – 30	1752	46 – 47	384
7 – 8	1796	27 – 28	108	46 – 50	1835
7 – 10	224	27 – 31	236	47 – 48	327
8 – 9	4642	28 – 32	169	48 – 49	307
8 – 11	332	29 – 30	408	48 – 52	140
9 – 12	1656	29 – 36	5628	49 – 53	1917
10 – 11	219	30 – 31	648	50 – 51	333
10 – 16	296	30 – 37	2604	50 – 54	864
11 – 12	288	31 – 32	557	51 – 52	296
12 – 33	21256	31 – 38	335	51 – 55	111
13 – 14	550	32 – 33	1231	52 – 53	274
13 – 17	3521	32 – 34	194	52 – 56	326
14 – 15	459	33 – 35	3048	53 – 56	1795
14 – 18	1839	34 – 35	171	54 – 55	44
15 – 16	456	34 – 39	197	54 – 57	1331
15 – 19	157	35 – 40	2371	55 – 56	91
16 – 20	195	36 – 37	750	56 – 58	2256
17 – 18	400	36 – 41	3724	57 – 58	234
17 – 25	2964	37 – 38	760	57 – 59	4214
18 – 19	440	37 – 42	1698	58 – 60	3855
18 – 26	2073	38 – 39	863	59 – 60	910
19 – 20	445	38 – 43	209	–	–
Сумарні дорожньо-транспортні витрати по мережі 136900					

ДОДАТОК В  
ОПИС ПРОЦЕСУ МОДЕЛЮВАННЯ ІЗ ГРАФІКАМИ ЗМІНИ  
ІНТЕНСИВНОСТІ ТП

Для експериментальних досліджень було обрано ділянку м. Харкова, що примикає до вул. 23 Серпня та є в'їздом до торговельного центру «Класс». Ця ділянка має виражені пікові періоди руху транспорту у ранковий та вечірній час, бо вранці ця ділянка використовується для стоянки АТЗ які є не клієнтами торговельного центру, а ввечері клієнтами торговельного центру.

Враховуючи задачі даної роботи для отримання об'єктивної інформації про інтенсивність транспортного потоку доцільно використовувати метод натурних спостережень. Після проведення обстеження було проведено обробку інформації. Результати наведені у таблиці В.1.

Таблиця В.1 – Результати натурних спостережень

Час доби	26.11.2018			28.11.2018			30.11.2018			01.12.2018		
	заїхало ТЗ	виїхало ТЗ	$\Delta$	заїхало ТЗ	виїхало ТЗ	$\Delta$	заїхало ТЗ	виїхало ТЗ	$\Delta$	заїхало ТЗ	виїхало ТЗ	$\Delta$
08:00-09:00	99	65	34	75	51	24	106	48	58	41	26	15
09:00-10:00	119	70	49	199	105	94	143	120	23	72	54	18
10:00-11:00	167	115	52	163	92	71	148	119	29	131	107	24
11:00-12:00	154	129	25	124	113	11	160	128	32	169	125	44
12:00-13:00	147	124	23	159	132	27	158	118	40	185	181	4
13:00-14:00	188	161	27	142	146	-4	223	182	41	181	174	7
14:00-15:00	185	181	4	163	146	17	185	167	18	203	179	24
15:00-16:00	176	149	27	169	145	24	159	142	17	202	191	11
16:00-17:00	187	151	36	165	156	9	162	123	39	209	176	33
17:00-18:00	231	187	44	202	189	13	234	226	8	189	188	1
18:00-19:00	229	238	-9	297	234	63	265	229	36	175	182	-7
19:00-20:00	222	233	-11	217	255	-38	278	237	41	82	73	9

Знайдено поліном функції четвертого, п'ятого та шостого ступеня (рис. В.1 – В.3) зміни інтенсивності транспортного потоку у часі, за допомогою програмного забезпечення Prog2, що створено у середовищі MatLab та отримано відповідні коефіцієнти функції (рис. В.4 – В.9).



Лістинг робочої програми Prog2.m:

```
function prog2(N) %y=[99,119,167,154,147,188,185,176,187,231,229,222];
n=length(N);
k=n+7;
t=8:k;
xlabel('x'); ylabel('y'); hold on
plot(t,N,'rx');
legend('Data',4)
```

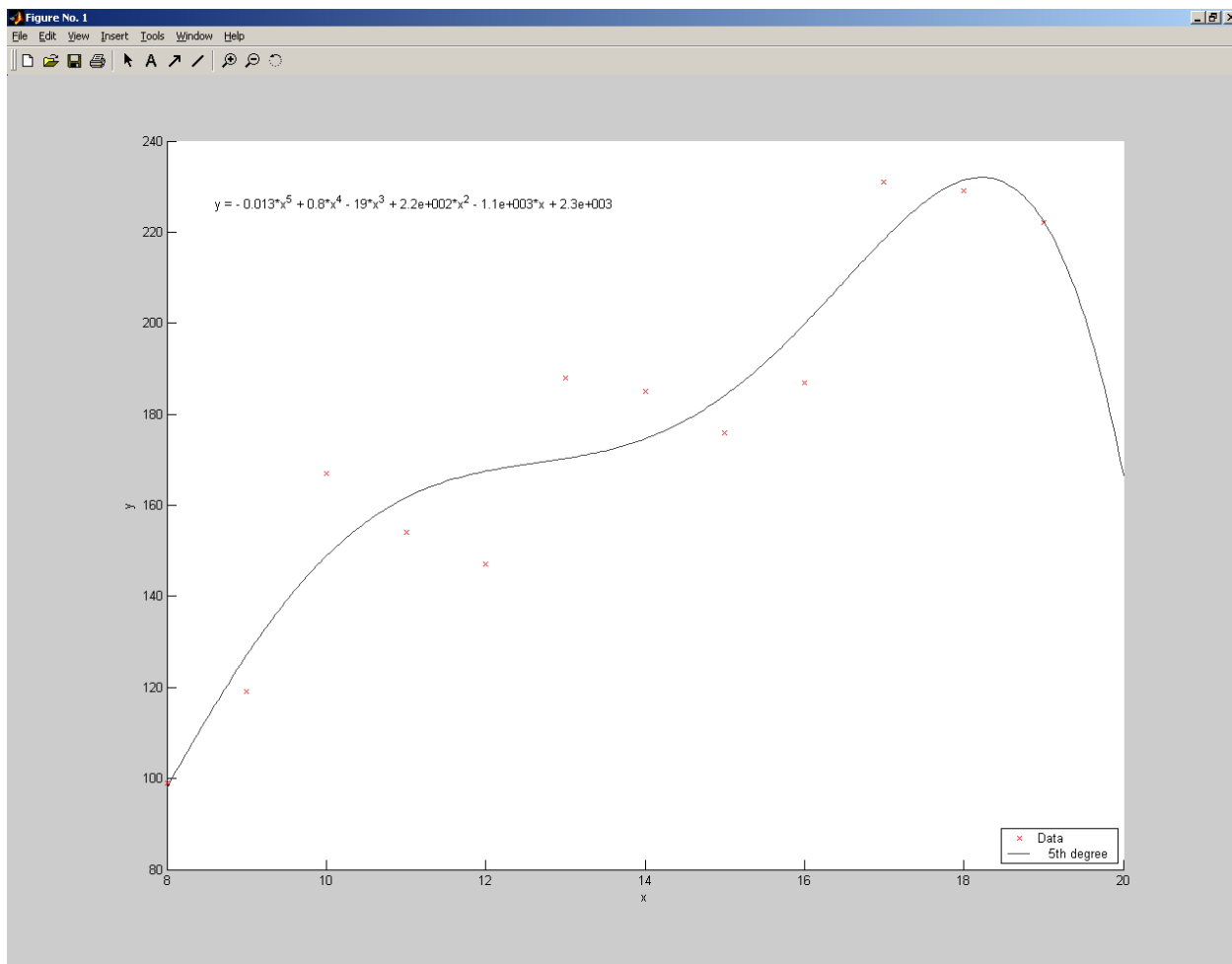


Рисунок В.1 – Графік функції зміни інтенсивності у часі для поліному 5-го ступеня

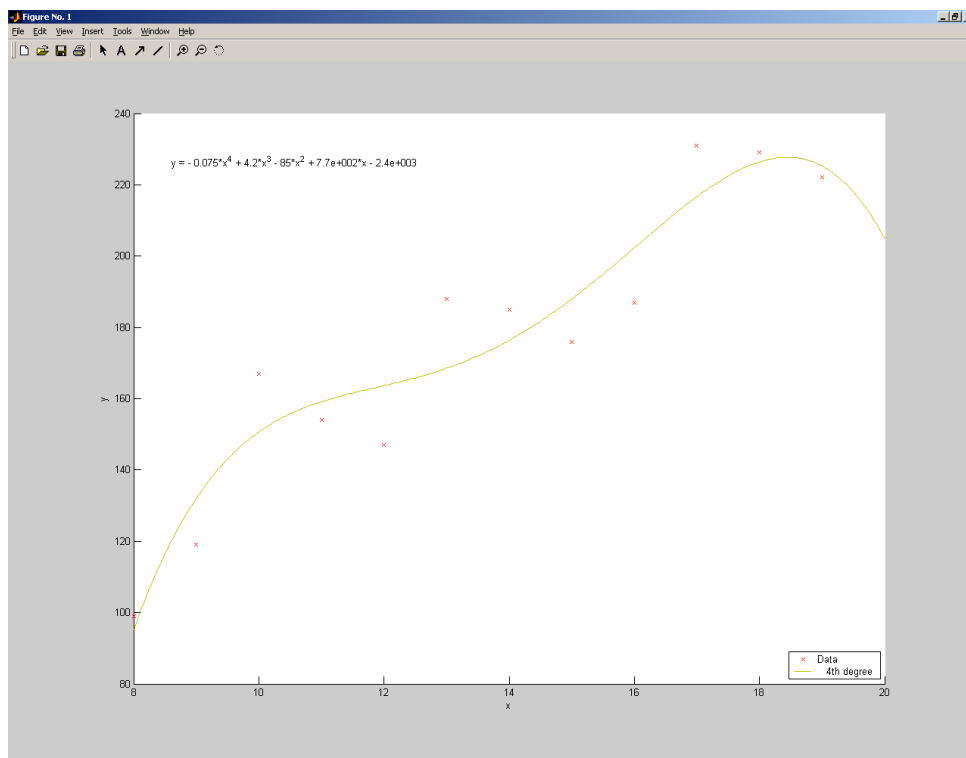


Рисунок В.2 – Графік функції зміни інтенсивності у часі для поліному 4-го ступеня

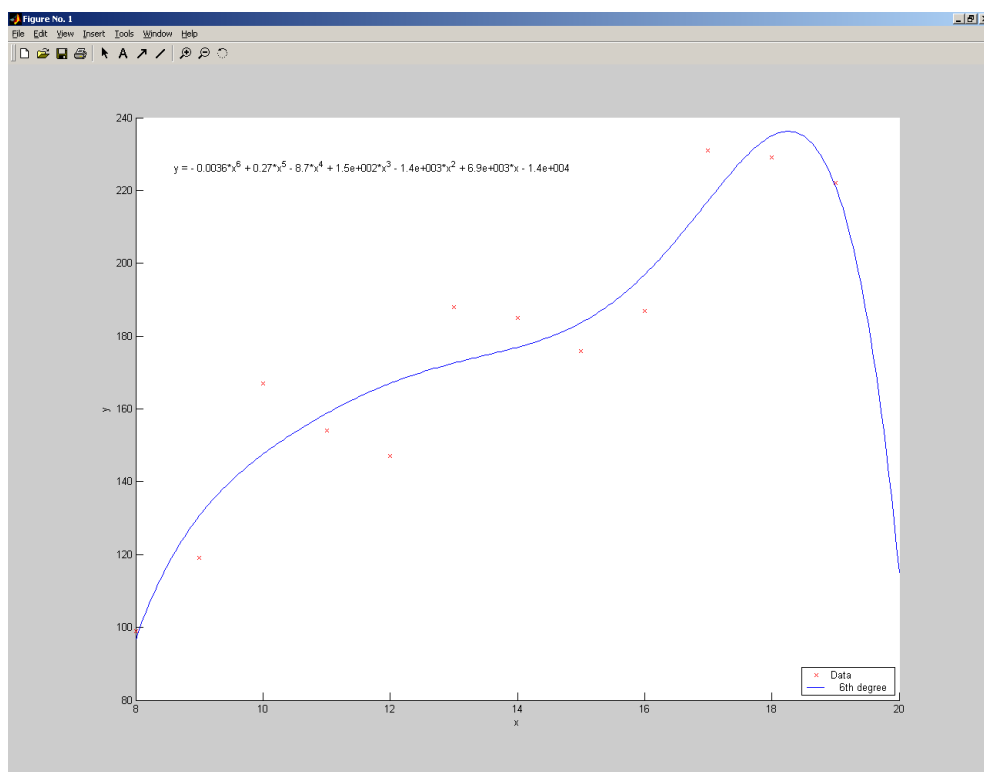


Рисунок В.3 – Графік функції зміни інтенсивності у часі для поліному 6-го ступеня

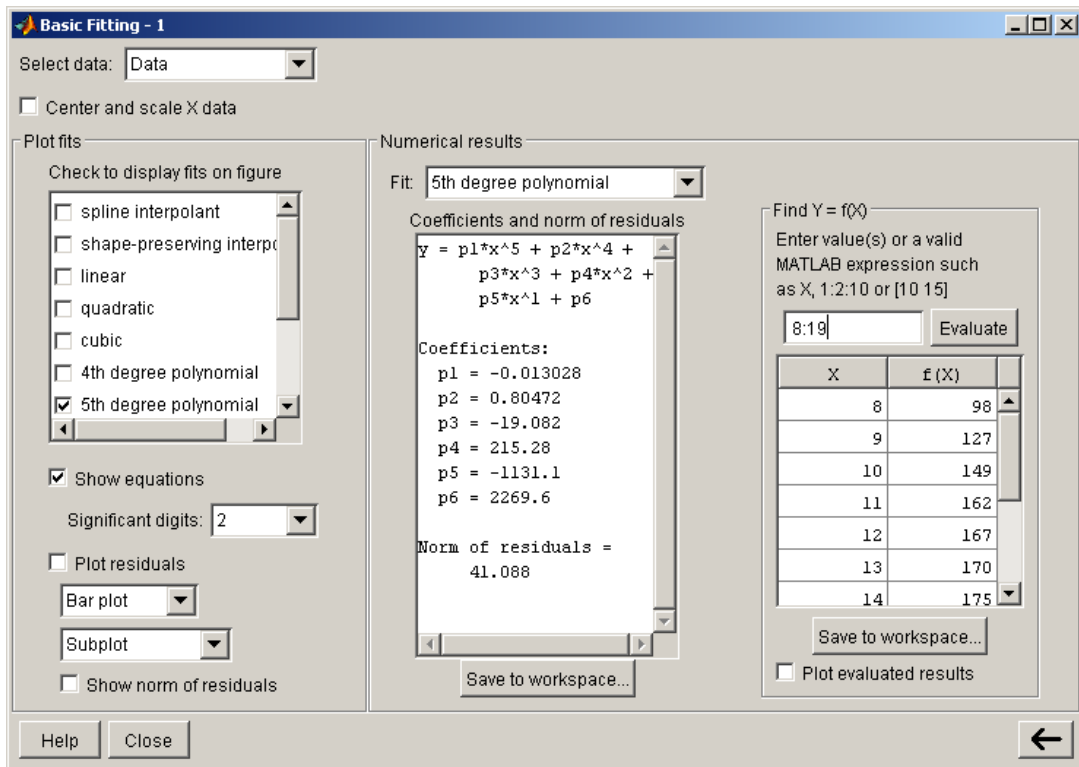


Рисунок В.4 – Коефіцієнти функції для поліному 5-го ступеня (частина 1)

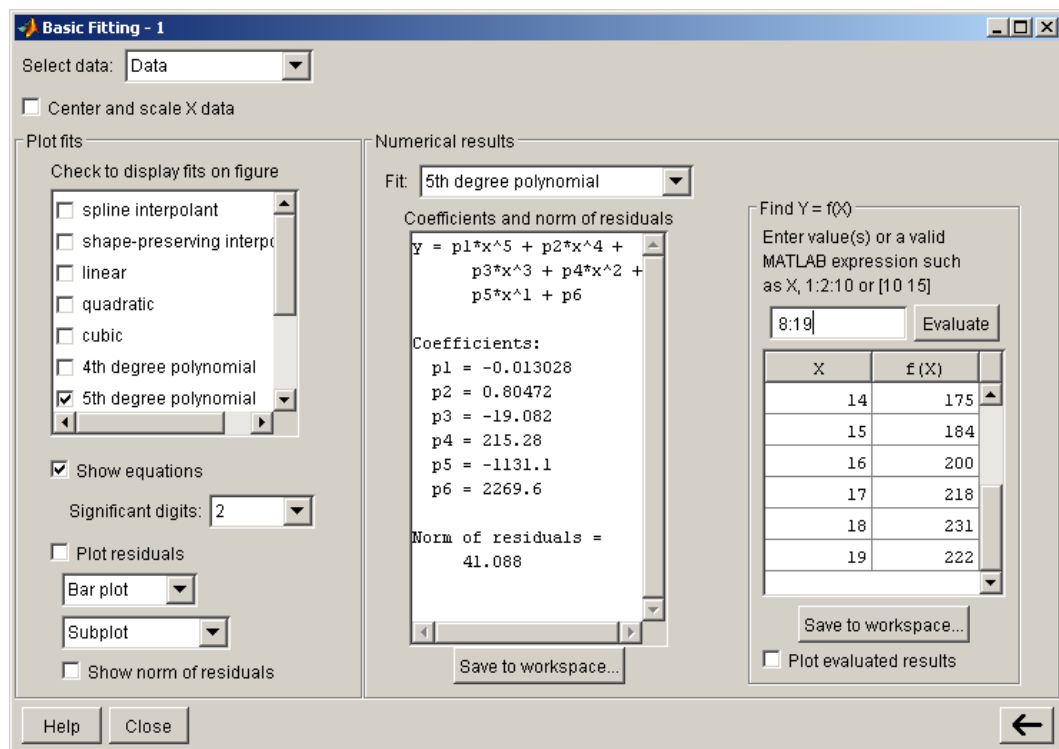


Рисунок В.5 – Коефіцієнти функції для поліному 5-го ступеня (частина 2)

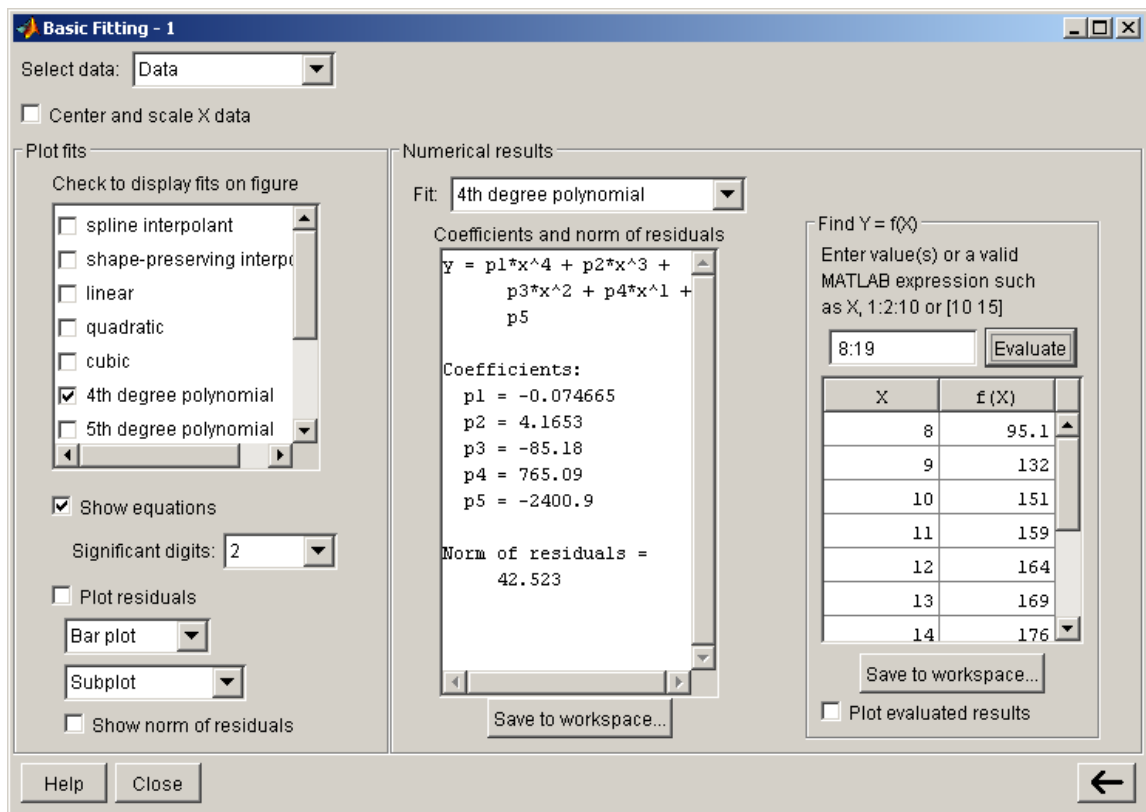


Рисунок В.6 – Коефіцієнти функції для поліному 4-го ступеня (частина 1)

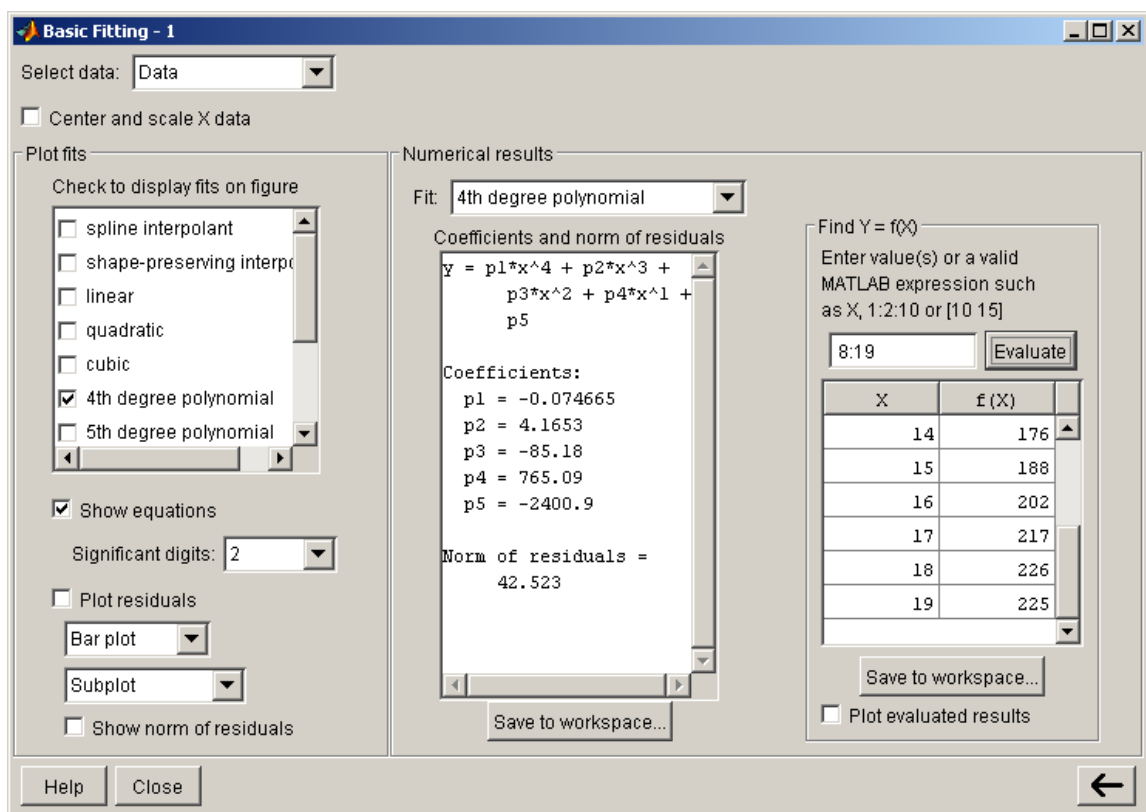


Рисунок В.7 – Коефіцієнти функції для поліному 4-го ступеня (частина 2)

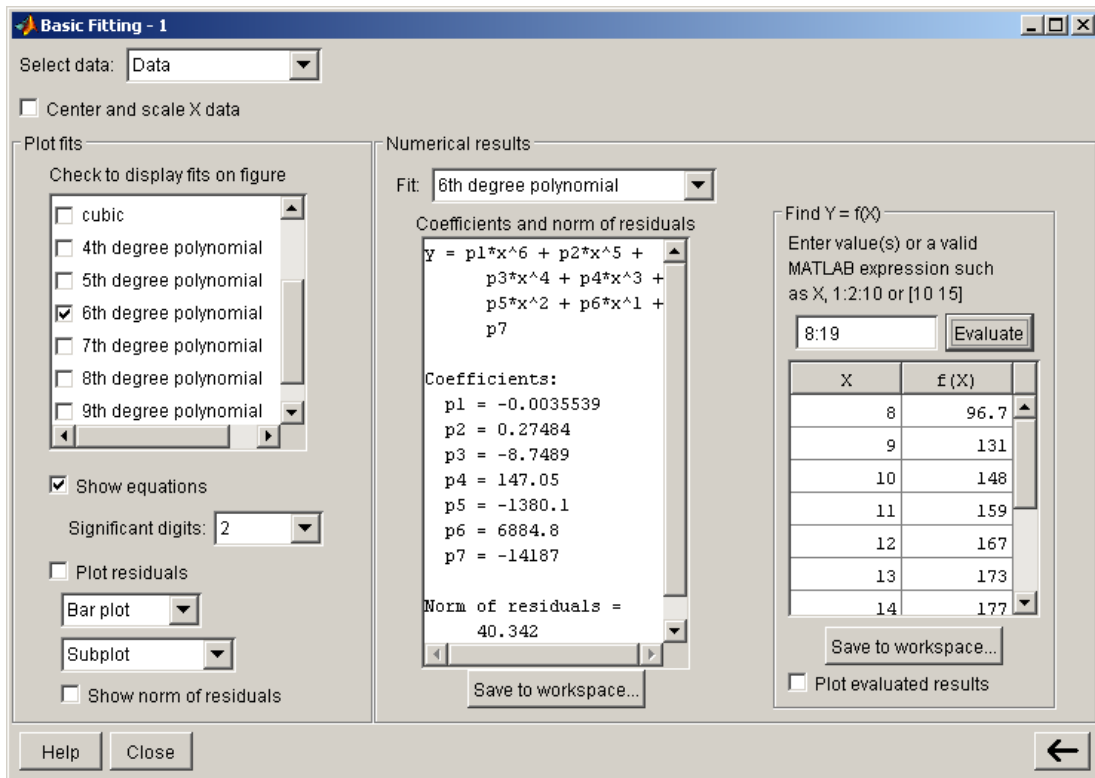


Рисунок В.8 – Коefіцієнти функції для поліному 6-го ступеня (частина 1)

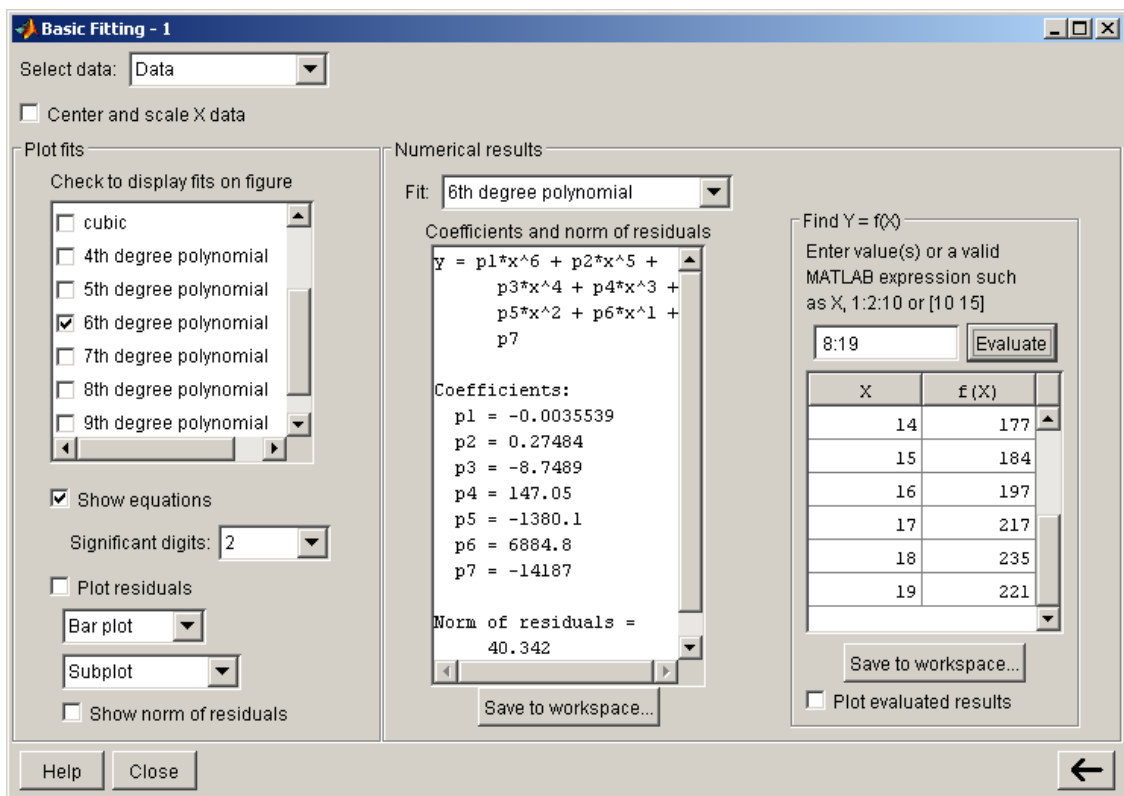


Рисунок В.9 – Коefіцієнти функції для поліному 6-го ступеня (частина 2)

Надалі це дало змогу дискретизувати значення безупинної функції полінома і визначити значення інтенсивності транспортного потоку у визначену годину доби. Для отриманих моделей розраховано середню помилку апроксимації, за розрахованими значеннями середньої помилки апроксимації до 10% для технічних систем маємо результати, які дають змогу зробити висновок, що моделі адекватні і можуть практично використовуватися. Але доцільно використовувати модель з найменшим значенням середньої помилки апроксимації, тобто поліном функції зміни інтенсивності транспортного потоку у часі шостого ступеня.

ДОДАТОК Г  
АЛГОРИТМ ПОШУКУ МІНІМУМУ ЦІЛЬОВОЇ ФУНКЦІЇ У ЗАДАЧІ З  
ОБМЕЖЕННЯМИ ПАРАМЕТРІВ

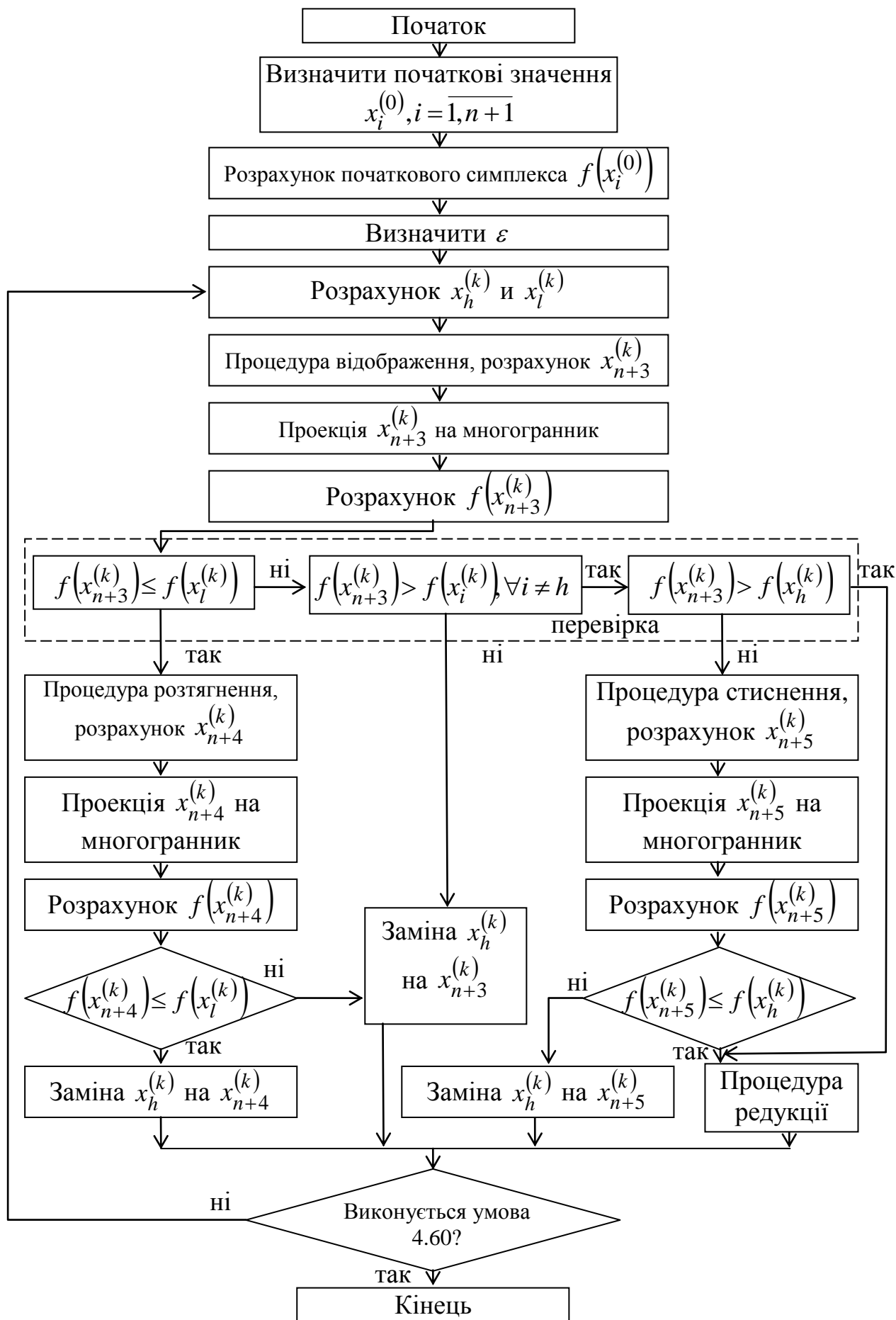


Рисунок Г.1 – Алгоритм оптимізації



ДОДАТОК Д  
АЛГОРИТМ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ПОВЕДІНКИ АТЗ У  
ТРАНСПОРТНОМУ ПОТОЦІ

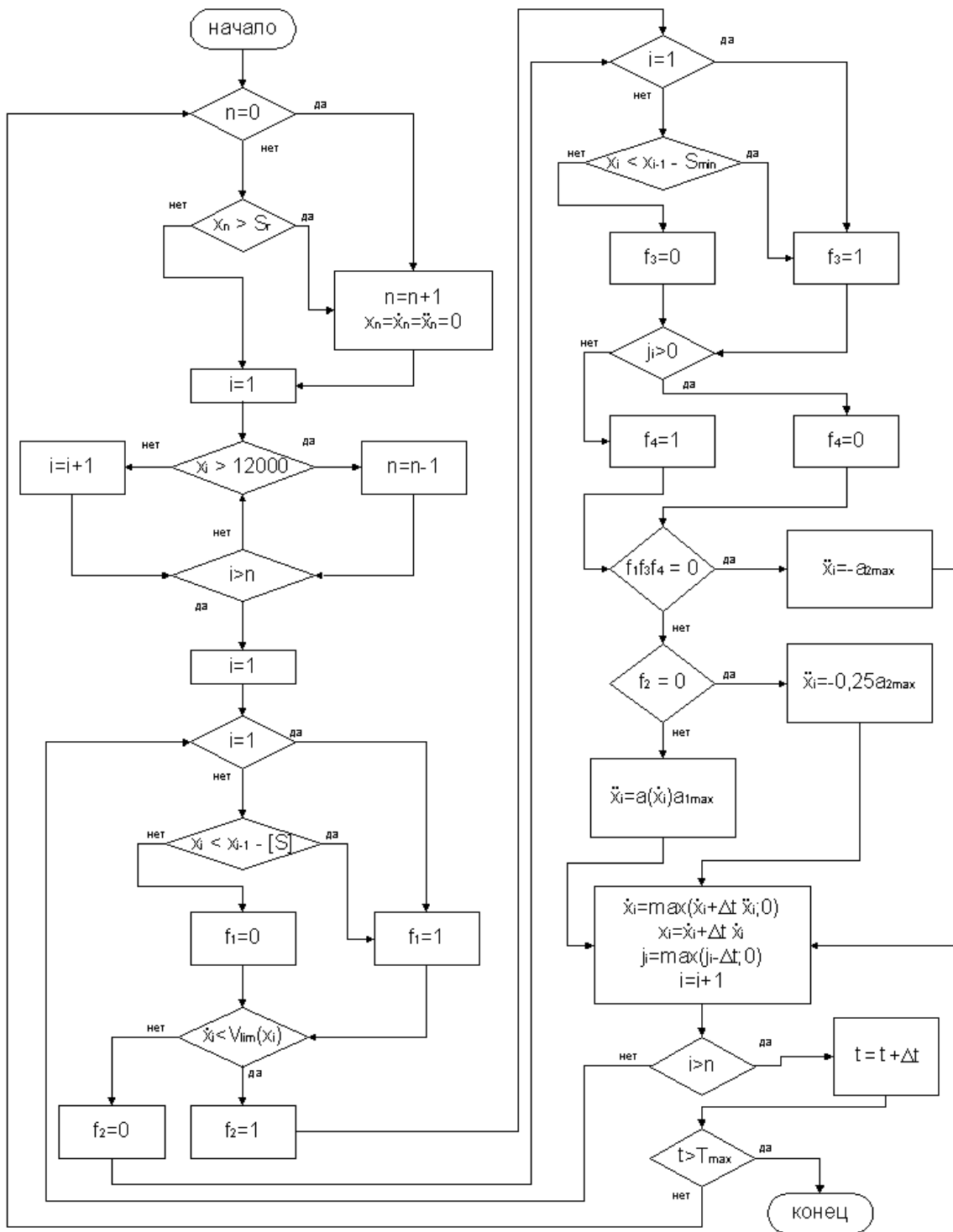


Рисунок Д.1 – Алгоритм імітаційної моделі руху АТЗ

ДОДАТОК Е  
ПРИКЛАД ОПИСУ ПЕРЕГОНІВ ТА ПЕРЕХРЕСТЬ ІЗ УРАХУВАННЯМ  
ВВЕДЕНОЇ ПОРЯДКОВОЇ НУМЕРАЦІЇ ПЕРЕГОНІВ

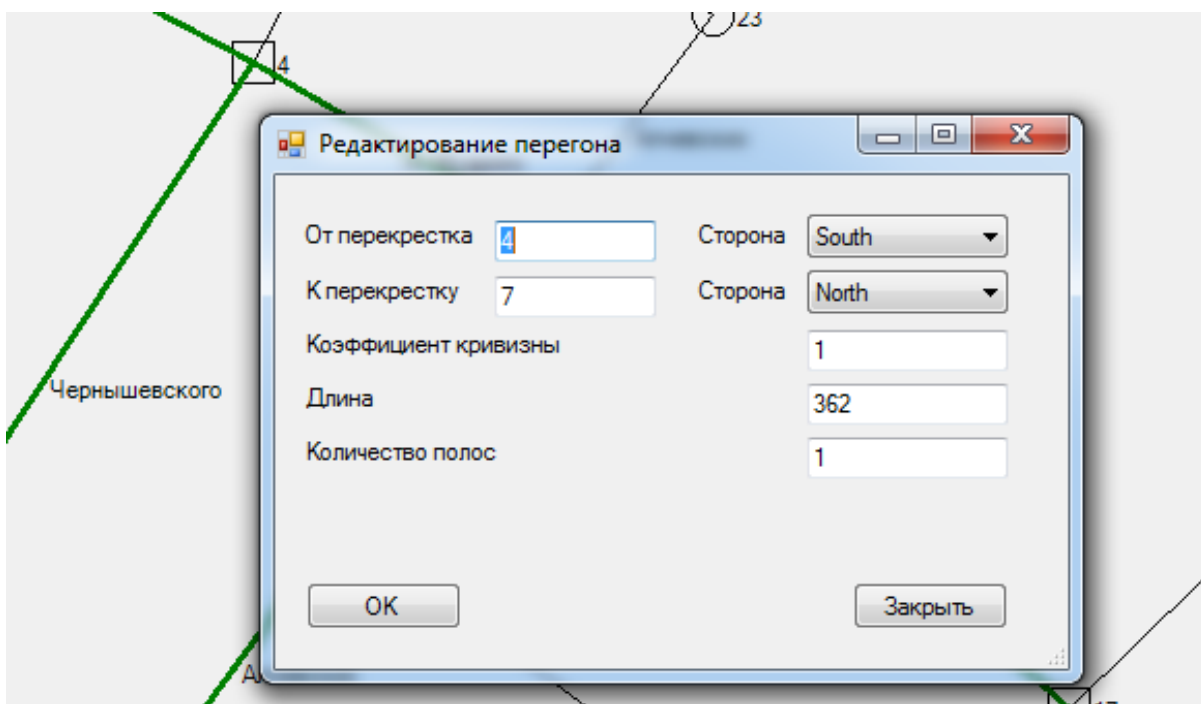


Рисунок Е.1 – Интерфейс введения даних «Редагування перегону»

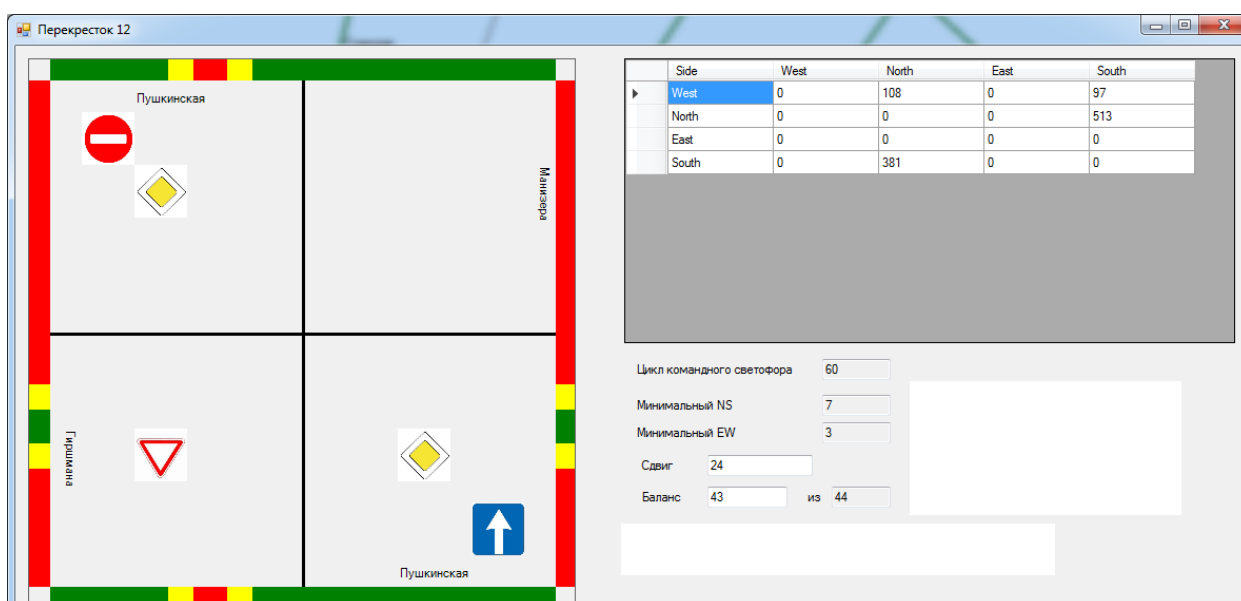


Рисунок Е.2 – Интерфейс введения даних «Перехрестя»

ДОДАТОК Ж  
РЕЗУЛЬТАТИ НАТУРНИХ ВИМІРЮВАНЬ ІНТЕНСИВНОСТЕЙ НА  
ОСНОВНИХ ПЕРЕХРЕСТЯХ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ В РАНКОВИЙ ЧАС,  
В ЧАС «ПІК»

Дата обстеження: 15.10.2019, вівторок, 08:00 – 09:00

1. Перехрестя вул. Мироносицька – вул. Свободи



Інтенсивність, авт/год:

4-3	12
4-2	9
4-1	14
1-2	44
1-3	138
1-4	54
3-2	105
3-1	273
3-4	45
2-1	38
2-3	20
2-4	184

2. Перехрестя вул. Алчевських – вул. Свободи (вул. Артема – вул. Іванова)



Інтенсивність, авт/год:

4-3	28
4-2	305
4-1	120
1-2	102
1-3	129
3-2	99
3-1	278

3. Перехрестя вул. Чернишевського – вул. Свободи



Інтенсивність, авт/год:

2-3	81
2-4	231
2-1	78
1-4	31
1-3	150
3-4	56
3-1	329

## 4. Перехрестя вул. Сумська – вул. Я. Мудрого



Інтенсивність, авт/год:

2-3	240
2-1	423
1-2	393
1-3	212
3-2	183
3-1	116

## 5. Перехрестя вул. Мירוносицька – вул. Я. Мудрого



Інтенсивність, авт/год:

4-3	30
4-2	23
4-1	13
1-2	46
1-3	331
1-4	74
3-2	102
3-1	278
3-4	63
2-1	16
2-3	60
2-4	167

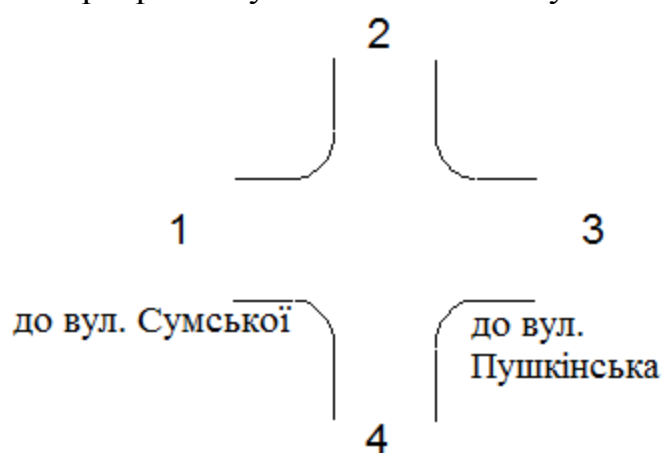
## 6. Перехрестя вул. Чернишевського – вул. Я. Мудрого



Інтенсивність, авт/год:

1-3	313
1-4	79
3-1	485
3-4	56
2-1	69
2-3	151
2-4	264

## 7. Перехрестя вул. Алчевських – вул. Я. Мудрого



Інтенсивність, авт/год:

4-3	62
4-2	352
4-1	95
1-2	68
1-3	383
3-2	167
3-1	473

## 8. Перехрестя вул. Алчевських – Пушкінський в'їзд



Інтенсивність, авт/год:

1-2	498
1-3	21



ДОДАТОК И  
РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ПАРАМЕТРІВ ЦИКЛУ СВІТЛОФОРНОГО  
РЕГУЛЮВАННЯ

Мінімальний час тривалості дозволяючого сигналу в напрямку  $NS$  ( $T_{\min 24}$ ) и  $EW$  ( $T_{\min 13}$ ) визначено на підставі (6.1):

$$T_{\max} = \frac{1.5T_n + 5}{1 - y_{13} - y_{24}} \leq 120$$

$$T_{\min 13} = (T_{\min} - 2T_n) \frac{y_{13}}{y_{13} + y_{24}}$$

$$T_{\min 24} = (T_{\min} - 2T_n) \frac{y_{24}}{y_{13} + y_{24}},$$

$$T_{II} = 3 \text{ с.}$$

Розрахунок фазових коефіцієнтів проведено за формулами:

$$y_i = \begin{cases} 0, r_i = 0 \\ \sum_{j=1}^4 N_{kij} \cdot \left( 1 + \frac{6}{L_{EWk} + L_{NSk}} \right) \cdot \frac{1}{1800}, r_i = 1 \\ \sum_{j=1}^4 N_{kij} \cdot \left( 1 + \frac{6}{L_{EWk} + L_{NSk}} \right) \cdot \frac{1}{3000}, r_i = 2 \end{cases}$$

Кількість смуг при вирішенні задачі прийнято рівною 1, оскільки в центральній частині міста права смуга завжди зайнята припаркованими транспортними засобами. Інтенсивності ТП на перехресті № 2 в різних напрямках обрано з табл. И.1.

Таблиця И.1 – Перехрестя №2 вул. Сумська – вул. Ярослава Мудрого

Side	West	North	East	South
West	0	0	0	0
North	0	0	240	423
East	0	183	0	116
South	0	393	212	0

Розрахунок параметрів світлофорного регулювання:

$$y_1 = 0$$

$$y_2 = (240 + 423) \cdot \left(1 + \frac{6}{28 + 28}\right) \cdot \frac{1}{1800} = 0,408$$

$$y_3 = (183 + 116) \cdot \left(1 + \frac{6}{28 + 28}\right) \cdot \frac{1}{1800} = 0,184$$

$$y_4 = (393 + 212) \cdot \left(1 + \frac{6}{28 + 28}\right) \cdot \frac{1}{1800} = 0,372$$

$$y_{13} = \max(y_1; y_3) = 0,184$$

$$y_{24} = \max(y_2; y_4) = 0,408$$

$$T_{\min} = \frac{1,5T_n + 5}{1 - y_{13} - y_{24}} = \frac{9,5}{1 - 0,184 - 0,408} = 23c$$

$$T_{\min 13} = (T_{\min} - 2T_n) \frac{y_{13}}{y_{13} + y_{24}} = 17 \frac{0,184}{0,184 + 0,408} = 5c$$

$$T_{\min 24} = (T_{\min} - 2T_n) \frac{y_{24}}{y_{13} + y_{24}} = T_{\min} - 2T_n - T_{\min 13} = 23 - 6 - 5 = 12c$$

Розрахуємо параметри світлофорного регулювання на наступному перехресті на підставі табл. И.2.

Таблиця И.2 – Перехрестя № 4: вул. Чернишевська – вул. Я. Мудрого

Side	West	North	East	South
West	0	0	313	79
North	69	0	151	264
East	485	0	0	56
South	0	0	0	0

$$y_1 = (313 + 79) \cdot \left(1 + \frac{6}{28 + 28}\right) \cdot \frac{1}{1800} = 0,241$$

$$y_2 = (69 + 151 + 264) \cdot \left(1 + \frac{6}{28 + 28}\right) \cdot \frac{1}{1800} = 0,298$$

$$y_3 = (485 + 56) \cdot \left(1 + \frac{6}{28 + 28}\right) \cdot \frac{1}{1800} = 0,333$$

$$y_4 = 0$$

$$y_{13} = \max(y_1; y_3) = 0,333$$

$$y_{24} = \max(y_2; y_4) = 0,298$$

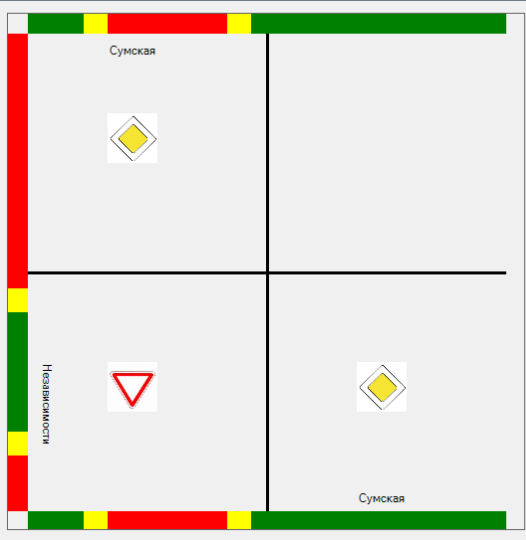
$$T_{\min} = \frac{1,5T_n + 5}{1 - y_{13} - y_{24}} = \frac{9,5}{1 - 0,333 - 0,298} = 26c$$

$$T_{\min 13} = (T_{\min} - 2T_n) \frac{y_{13}}{y_{13} + y_{24}} = 20 \frac{0,333}{0,333 + 0,298} = 10c$$

$$T_{\min 24} = (T_{\min} - 2T_n) \frac{y_{24}}{y_{13} + y_{24}} = T_{\min} - 2T_n - T_{\min 13} = 26 - 6 - 10 = 10c$$

ДОДАТОК К  
ВІКНА ІНТЕРФЕЙСУ ВВОДУ ДАНИХ ПЕРЕХРЕСТЬ КОНТУРУ

Перекресток 1



Side	West	North	East	South
West	0	52	0	119
North	0	0	0	471
East	0	0	0	0
South	74	532	0	0

Цикл командного светофора 60

Минимальный NS 9

Минимальный EW 2

Сдвиг 28

Баланс 30 из 43

---

Перекресток 2



Side	West	North	East	South
West	0	0	0	0
North	0	0	240	423
East	0	183	0	116
South	0	393	212	0

Цикл командного светофора 60

Минимальный NS 11

Минимальный EW 5

Сдвиг 0

Баланс 22 из 38

---

Перекресток 4



Side	West	North	East	South
West	0	0	313	79
North	69	0	151	264
East	485	0	0	56
South	0	0	0	0

Цикл командного светофора 60

Минимальный NS 9

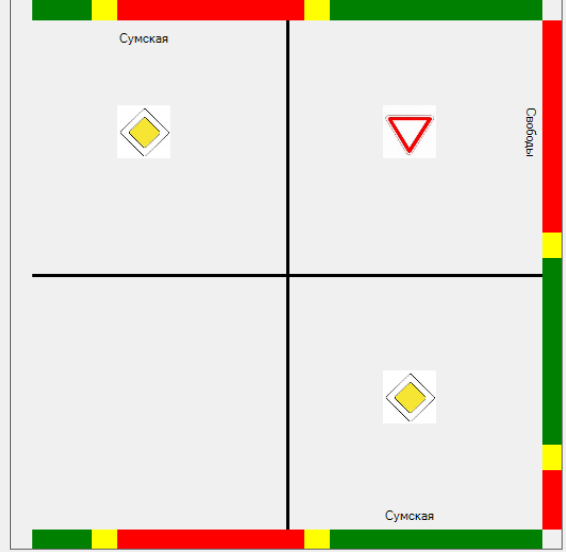
Минимальный EW 10

Сдвиг 41

Баланс 1 из 35

Рисунок К.1 – Интерфейс вводу данных для перекрестков № 1, № 2 та № 4

Перекресток 5



Side	West	North	East	South
West	0	0	0	0
North	0	0	260	340
East	0	154	0	180
South	0	400	227	0

Цикл командного светофора 60

Минимальный NS 11

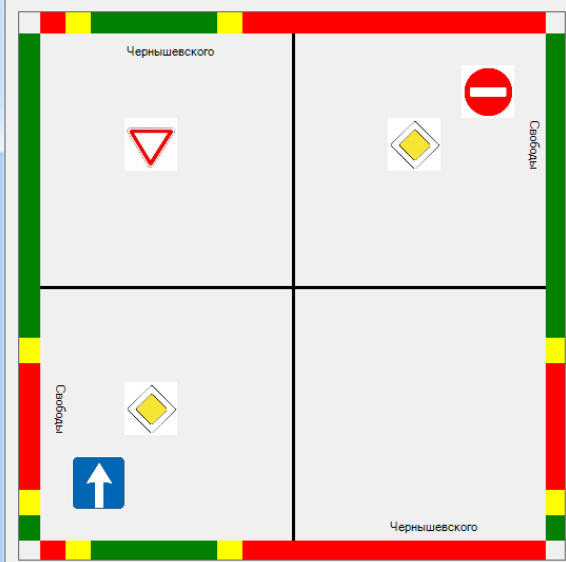
Минимальный EW 5

Сдвиг 35

Баланс 21 из 38

---

Перекресток 7



Side	West	North	East	South
West	0	0	150	31
North	78	0	81	231
East	329	0	0	56
South	0	0	0	0

Цикл командного светофора 60

Минимальный NS 6

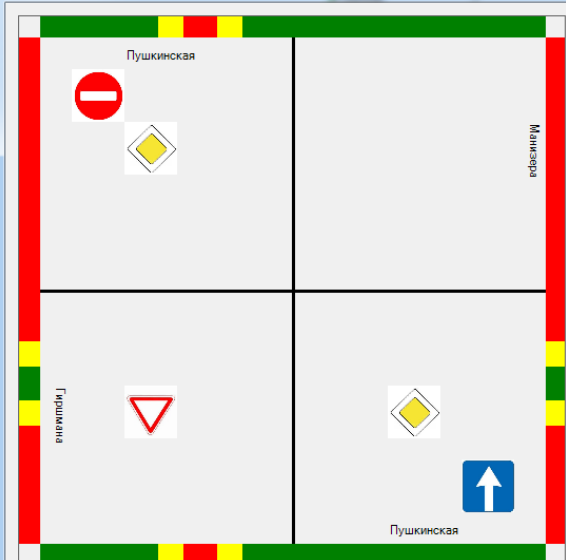
Минимальный EW 5

Сдвиг 6

Баланс 9 из 43

---

Перекресток 12



Side	West	North	East	South
West	0	108	0	97
North	0	0	0	513
East	0	0	0	0
South	0	381	0	0

Цикл командного светофора 60

Минимальный NS 7

Минимальный EW 3

Сдвиг 24

Баланс 43 из 44

Рисунок К.2 – Интерфейс ввода данных для перекресть № 5, №7 и №12

Перекресток 17

Side	West	North	East	South
West	0	75	0	375
North	0	0	0	112
East	28	0	0	47
South	541	137	0	0

Цикл командного светофора: 60

Минимальный NS: 15

Минимальный EW: 9

Сдвиг: 1

Баланс: 16 из 30

---

Перекресток 22

Side	West	North	East	South
West	0	68	383	0
North	0	0	0	0
East	473	167	0	0
South	95	352	62	0

Цикл командного светофора: 60

Минимальный NS: 11

Минимальный EW: 14

Сдвиг: 42

Баланс: 5 из 29

---

Перекресток 26

Side	West	North	East	South
West	0	0	0	0
North	0	0	0	452
East	0	0	0	216
South	0	589	0	0

Цикл командного светофора: 60

Минимальный NS: 8

Минимальный EW: 3

Сдвиг: 1

Баланс: 33 из 43

Рисунок К.3 – Интерфейс вводу данных для перекресть №17, №22 и № 26



Перекресток 27

Side	West	North	East	South
West	0	102	129	0
North	0	0	0	0
East	278	99	0	0
South	120	305	28	0

Цикл командного светофора

Минимальный NS

Минимальный EW

Сдвиг

Баланс  из

Рисунок К.4 – Интерфейс вводу даних для перехрестя №27

ДОДАТОК Л  
РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ПАРАМЕТРІВ КОНТУРНОГО УПРАВЛІННЯ  
ТА ДІАГРАМИ КООРДИНАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ УПРАВЛІННЯ ТП НА  
КОНТУРІ ВДМ

Таблиця Л.1 – Результати розрахунку параметрів контурного управління по вул. Сумська (напрямок на південь)

№ перехрестя	26	2	1	5
Відстань від попереднього	0	169	196	218
Відстань від першого	0	197	421	667
Зсув відповідно мережі	1	0	28	35
Приведений зсув	1	0	28	35
Зсув відносно першого	0	-1	27	34
Тривалість дозволяючого сигналу	43	34	39	32
Завершення дозволяючого сигналу	43	33	66	66
Час при 50 км/год, с	0	14,2	30,3	48,0
Ширина смуги пропуску, с		18,8	35,7	18,0

Таблиця Л.2 – Результати розрахунку параметрів контурного управління по вул. Ярослава Мудрого (напрямок на схід)

№ перехрестя	2	3	4	22	17
Відстань від попереднього	0	114	199	164	341
Відстань від першого	0	142	369	561	930
Зсув відповідно мережі	37	-	57	1	35
Приведений зсув	37	-	57	61	95
Зсув відносно першого	0	-	20	24	58
Тривалість дозволяючого сигналу	20	-	44	38	23
Завершення дозволяючого сигналу	20	-	64	62	81
Час при 50 км/год, с	0	10,2	26,6	40,4	67,0
Ширина смуги пропуску, с		-	37,4	21,6	14,0

Таблиця Л.3 – Результати розрахунку параметрів контурного управління по вул. Ярослава Мудрого (напрямок на захід)

№ перехрестя	17	22	4	3	2
Відстань від попереднього	0	341	164	199	114
Відстань від першого	0	369	561	788	930
Зсув відповідно мережі	35	1	57	-	37
Приведений зсув	35	61	57	-	97
Зсув відносно першого	0	26	22	-	62
Тривалість дозволяючого сигналу	23	38	44	-	20
Завершення дозволяючого сигналу	23	64	66	-	82
Час при 50 км/год, с	0	26,6	40,4	56,7	67,0
Ширина смуги пропуску, с		37,4	25,6	-	15,0

Таблиця Л.4 – Результати розрахунку параметрів контурного управління по вул. Пушкінська (напрямок на північ)

№ перехрестя	12	13	14	15	16	17
Відстань від попереднього	0	127	104	36	132	139
Відстань від першого	0	155	287	351	511	678
Зсув відповідно мережі	24	-	-	-	-	1
Приведений зсув	24	-	-	-	-	61
Зсув відносно першого	0	-	-	-	-	37
Тривалість дозволяючого сигналу	51	-	-	-	-	31
Завершення дозволяючого сигналу	51	-	-	-	-	68
Час при 50 км/год, с	0	11,2	20,7	25,3	36,8	48,8
Ширина смуги пропуску, с		-	-	-	-	19,2

Таблиця Л.5 – Результати розрахунку параметрів контурного управління по вул. Пушкінська (напрямок на південь)

№ перехрестя	17	16	15	14	13	12
Відстань від попереднього	0	139	132	36	104	127
Відстань від першого	0	167	327	391	523	678
Зсув відповідно мережі	1	-	-	-	-	24
Приведений зсув	1	-	-	-	-	24
Зсув відносно першого	0	-	-	-	-	23
Тривалість дозволяючого сигналу	31	-	-	-	-	51
Завершення дозволяючого сигналу	31	-	-	-	-	74
Час при 50 км/год, с	0	12,0	23,5	28,2	37,7	48,8
Ширина смуги пропуску, с		-	-	-	-	25,2

Таблиця Л.6 – Результати розрахунку параметрів контурного управління по вул. Свободи (напрямок на схід)

№ перехрестя	5	6	7	27
Відстань від попереднього	0	118	112	152
Відстань від першого	0	146	286	466
Зсув відповідно мережі	10	-	24	38
Приведений зсув	10	-	24	38
Зсув відносно першого	0	-	14	28
Тривалість дозволяючого сигналу	22	-	39	36
Завершення дозволяючого сигналу	22	-	53	64
Час при 50 км/год, с	0	10,5	20,6	33,6
Ширина смуги пропуску, с		-	32,4	30,4

Таблиця Л.7 – Результати розрахунку параметрів контурного управління по вул. Свободи (напрямок на захід)

№ перехрестя	27	7	6	5
Відстань від попереднього	0	152	112	118
Відстань від першого	0	180	320	466
Зсув відповідно мережі	38	24	-	10
Приведений зсув	38	24	-	70
Зсув відносно першого	0	-14	-	32
Тривалість дозволяючого сигналу	36	39	-	22
Завершення дозволяючого сигналу	36	25	-	54
Час при 50 км/год, с	0	13,0	23,0	33,6
Ширина смуги пропуску, с		12,0	-	20,4

Таблиця Л.8 – Результати розрахунку параметрів контурного управління по вул. Чернишевська (одностороння, напрямок на південь)

№ перехрестя	4	7
Відстань від попереднього	0	362
Відстань від першого	0	390
Зсув відповідно мережі	41	6
Приведений зсув	41	66
Зсув відносно першого	0	25
Тривалість дозволяючого сигналу	10	15
Завершення дозволяючого сигналу	10	40
Час при 50 км/год, с	0	28,1
Ширина смуги пропуску, с		11,9

Таблиця Л.9 – Результати розрахунку параметрів контурного управління по вул. Алчевських (одностороння, напрямок на північ)

№ перехрестя	27	21	22
Відстань від попереднього	0	166	172
Відстань від першого	0	194	394
Зсув відповідно мережі	17	-	42
Приведений зсув	17	-	42
Зсув відносно першого	0	-	25
Тривалість дозволяючого сигналу	18	-	16
Завершення дозволяючого сигналу	18	-	41
Час при 50 км/год, с	0		28,4
Ширина смуги пропуску, с		-	12,6

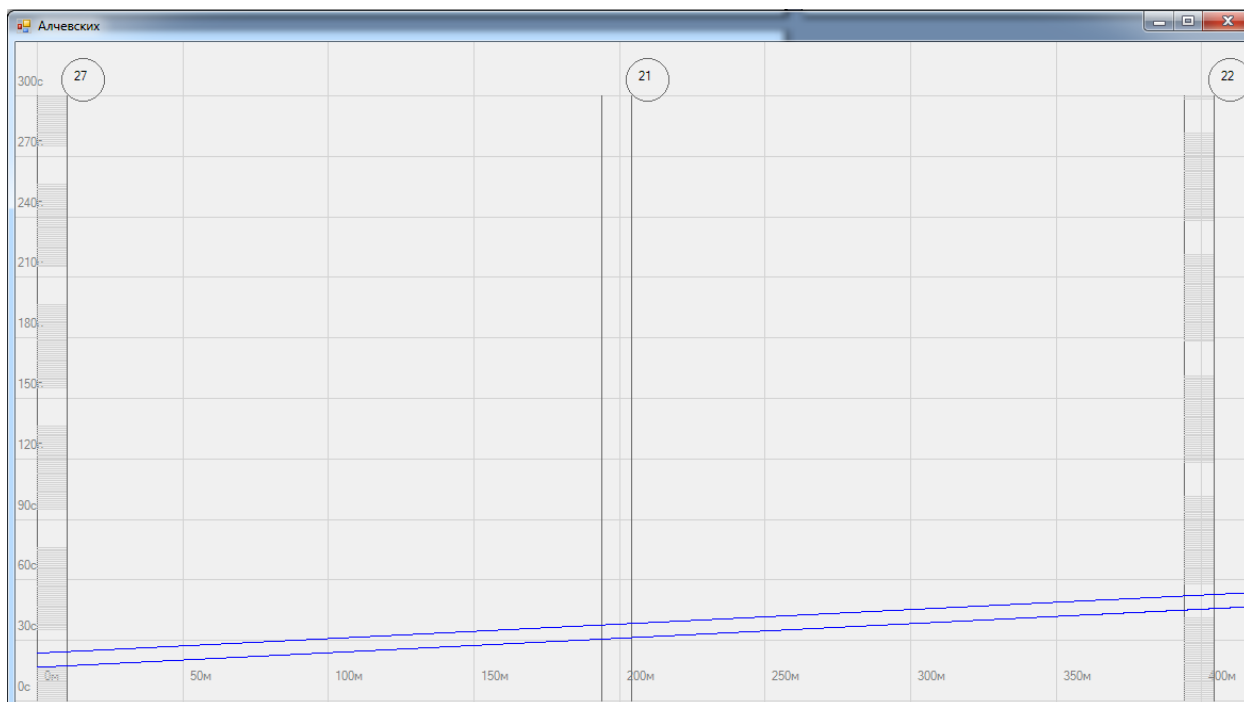


Рисунок Л.1 – Діаграма координації параметрів управління ТП  
по вул. Алчевських



Рисунок Л.2 – Діаграма координації параметрів управління ТП по  
вул. Чернышевська

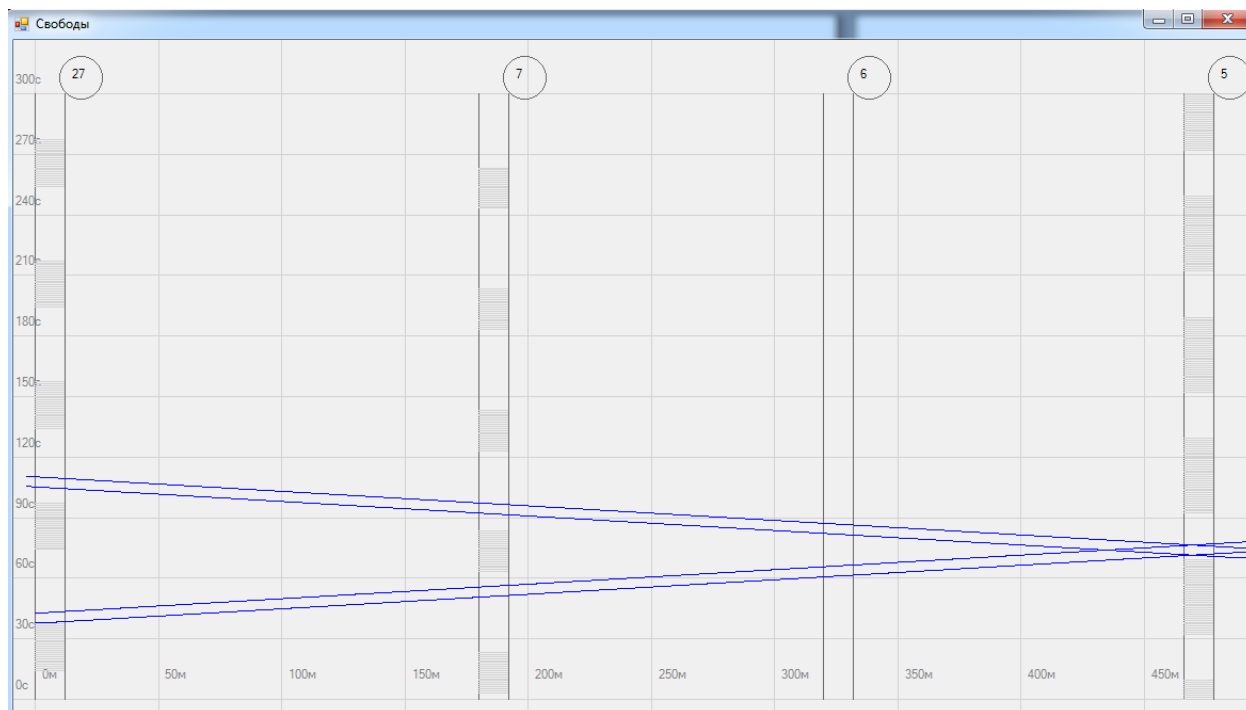


Рисунок Л.3 – Діаграма координації параметрів управління ТП по вул. Свободи

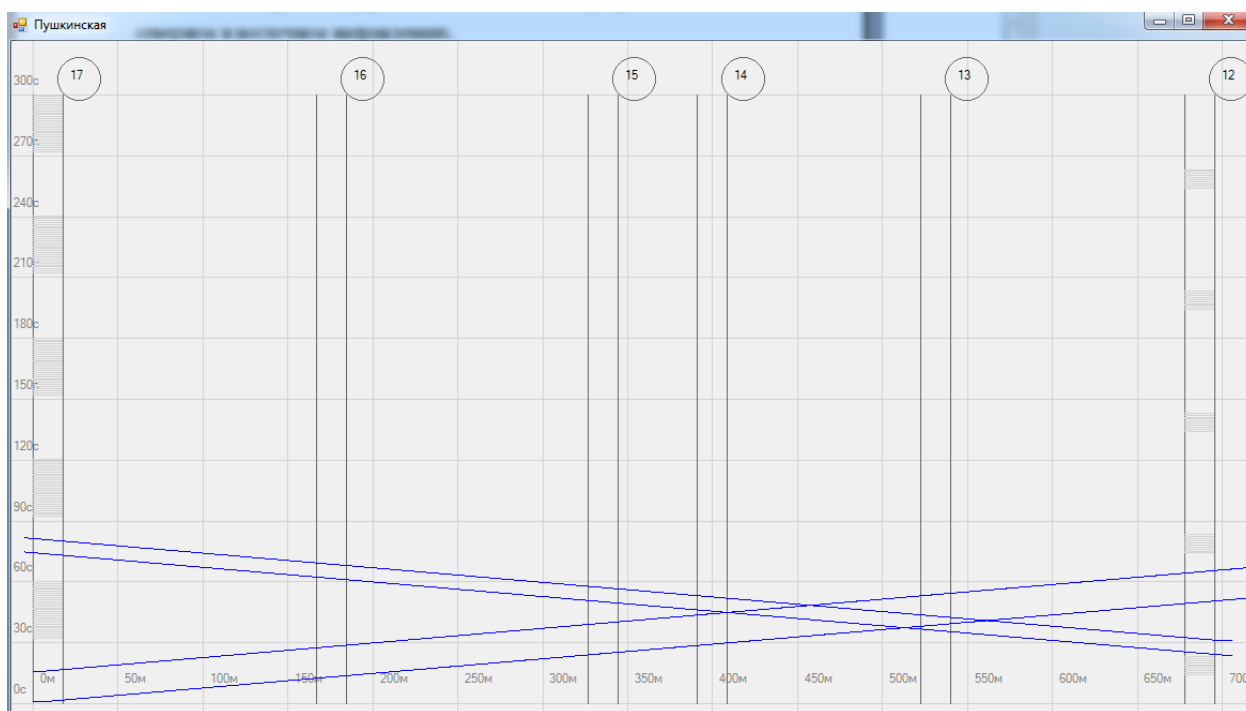


Рисунок Л.4 – Діаграма координації параметрів управління ТП  
по вул. Пушкінська

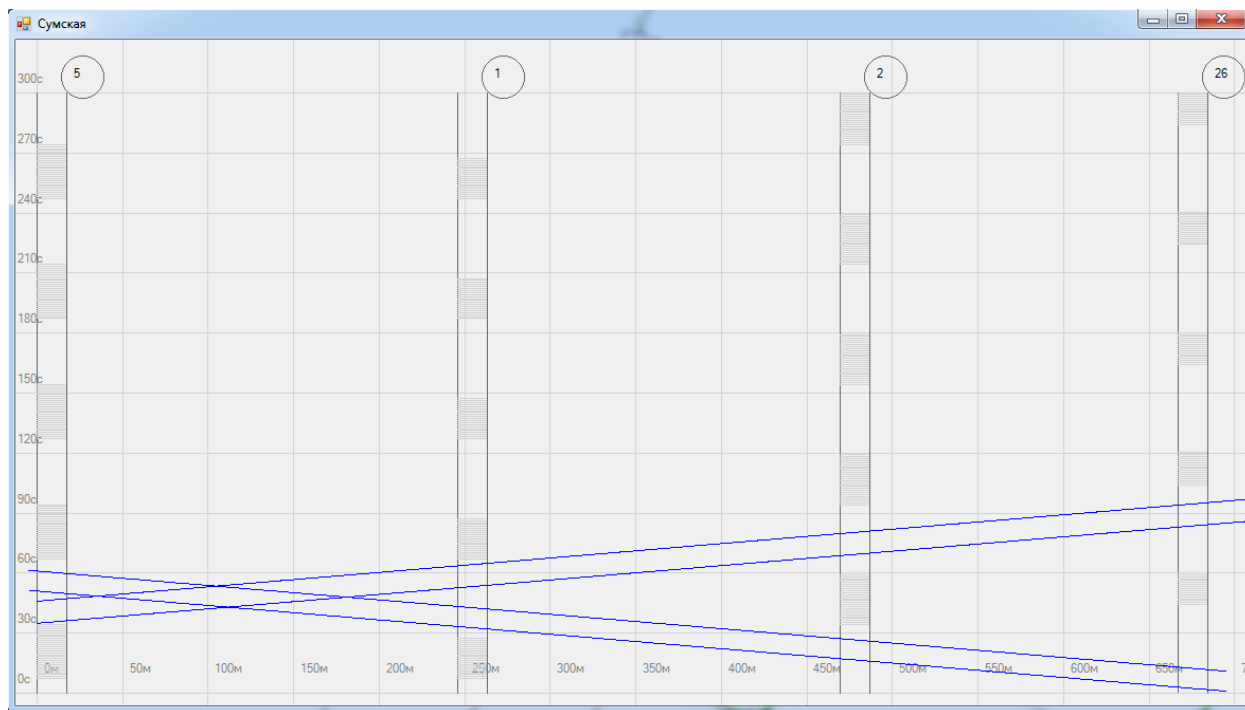


Рисунок Л.5 – Діаграма координації параметрів управління ТП  
по вул. Сумська



ДОДАТОК М  
СХЕМА ДОСЛІДЖУВАНОЇ ДІЛЯНКИ ПРОСП. НАУКИ ТА ВІКНА  
ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ЕКСПЕРИМЕНТУ



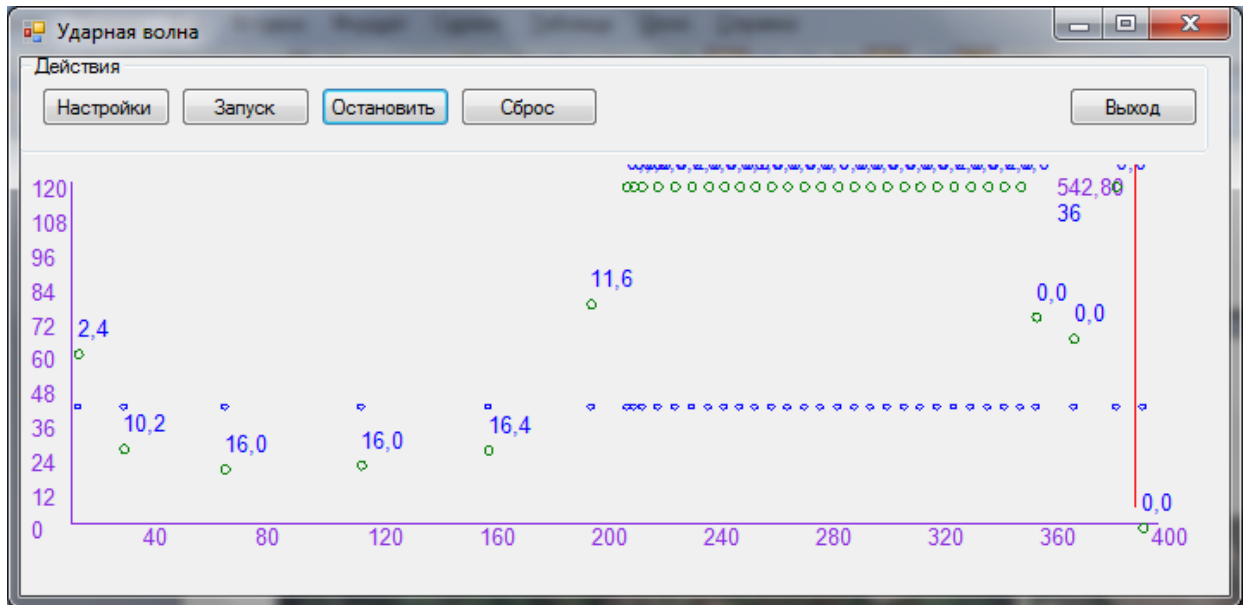


Рисунок М.2 – Перехід ТП у заторовий стан

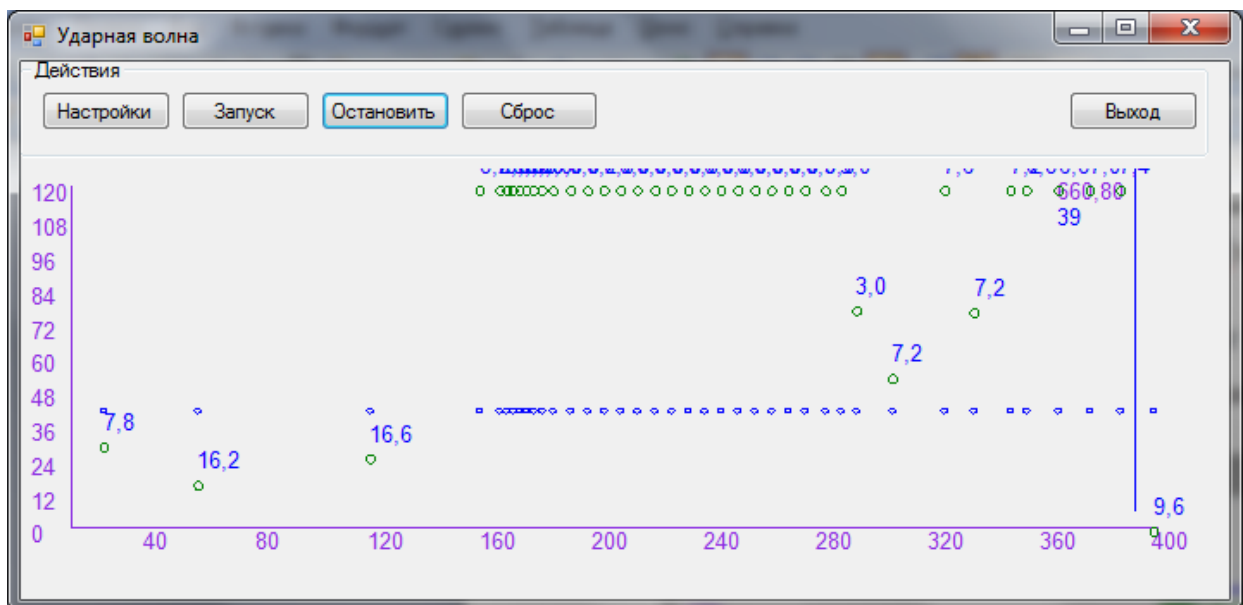


Рисунок М.3 – Формування ударної хвилі у транспортному потоці

ДОДАТОК Н  
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ



**У К Р А Ї Н А**  
**ХАРКІВСЬКА МІСЬКА РАДА**  
**ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ**  
**ВИКОНАВЧИЙ КОМІТЕТ**



**ДЕПАРТАМЕНТ ІНФРАСТРУКТУРИ**

майдан Конституції, 7, м. Харків, 61200 тел. +38 (057) 760-75-19, +38 (057) 760-75-24  
E-mail: DTS@citynet.kharkov.ua, сайт: www.city.kharkov.ua, код ЄДРПОУ 34468231

20.12.2019 № 4146/0/78-19

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор Департаменту  
інфраструктури Харківської  
міської ради

ДУЛЬФАН С.Б.



2019 р.

АКТ

про прийняття до впровадження результатів наукових досліджень  
докторанта Абрамової Л.С. на тему:

«Теоретичні основи розробки систем управління дорожнім рухом у містах з  
методологічних позицій системного підходу»

Комісія у складі:

Голова – к.т.н. – директор Департаменту інфраструктури Дульфан С.Б.

Члени – заступник директора Департаменту інфраструктури Куколь О.Г.;

- начальник Управління транспортної інфраструктури та організації

дорожнього руху Департаменту інфраструктури Туренко К.В.

Дійсним актом підтверджують, що Департаментом інфраструктури Харківської міської ради були прийняті до впровадження наступні результати наукових досліджень:

- методику визначення параметрів динамічного управління швидкістю руху транспортного потоку для підвищення працездатності вулично-дорожньої мережі міста;
- алгоритм визначення параметрів рівномірного руху транспортного потоку на контурі магістралей вулично-дорожньої мережі міста;
- методику калібровки перегонів загальної моделі транспортної мережі міста на рівні стратегічного управління дорожнім рухом у містах.

Голова комісії

С.Б. ДУЛЬФАН

Члени комісії

О.Г. КУКОЛЬ  
К.В. ТУРЕНКО

«Затверджую»

Завідувач сектору транспорту відділу  
транспорту, зв'язку та енергетики  
Краматорської міської ради

Сарнацький В.В.

МП



« 22 » січня 2020 р.

Акт

про прийняття до впровадження результатів наукових досліджень докторанта  
Абрамової Л.С. на тему: «Теоретичні основи розробки систем управління  
дорожнім рухом у містах з методологічних позицій системного підходу»

Комісія у складі:

голова – Сарнацький В.В.

члени – Гамаюн Є.К.

– Цвентух Ю.Є.

Дійсним актом підтверджують, що сектором транспорту відділу  
транспорту, зв'язку та енергетики Краматорської міської ради були прийняті  
до впровадження наступні результати наукових досліджень:

- Методика побудови геоінформаційної моделі транспортної мережі міста з  
урахуванням координат та параметрів транспортних вузлів та перегонів;
- Методика визначення параметрів управління дорожнім рухом на підході до  
складних транспортних вузлів для підвищення безпеки дорожнього руху.

Голова комісії

В.В. Сарнацький

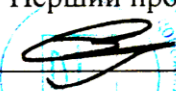
Члени комісії:


Гамаюн Є.К.

Цвентух Ю.Є.

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет транспортних систем  
Кафедра організації та безпеки дорожнього руху

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Перший проректор, проф.  
 С.Я. Ходирев  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_р.



**АКТ**

про впровадження результатів дисертаційної роботи Абрамової Л.С. «Теоретичні основи формування розподілених систем управління дорожнім рухом у містах», яка представлена на здобуття наукового ступеню доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.01 – «Транспортні системи»

Комісією в складі: завідувача кафедри організації та безпеки дорожнього руху д.т.н., проф. Наглюка І.С., заступника завідувача кафедри організації та безпеки дорожнього руху к.т.н., доц. Рябушенко О.В., доцента кафедри організації та безпеки дорожнього руху, к.т.н., доц. Семченко Н.О. складено акт в тому, що результати докторської дисертації Абрамової Людмили Сергіївни у вигляді методик визначення параметрів управління дорожнім рухом у містах впроваджено у навчальний процес кафедри організації та безпеки дорожнього руху при викладенні дисциплін «Методи наукових досліджень», «Автоматизовані системи управління дорожнім рухом», «Аудит безпеки дорожнього руху» Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, для студентів, які навчаються за спеціальністю 275.03 – «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)».

Зав. каф. ОіБДР, д.т.н.,  
проф.



Наглюк І.С.

Заст. зав.каф.,  
к.т.н., доц.



Рябушенко О.В.

к.т.н., доц.



Семченко Н.О.

ДОДАТОК П  
СВІДОЦТВА ПРО РЕЄСТРАЦІЮ АВТОРСЬКОГО ПРАВА



УКРАЇНА

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

**СВІДОЦТВО**

про реєстрацію авторського права на твір

№ 49009

Твір науково-практичного характеру "До питання вибору критеріїв ефективності організації дорожнього руху методами теорії корисності"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Абрамова Людмила Сергіївна, Капінус Сергій Васильович**


(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Абрамова Людмила Сергіївна, пр. Перемоги, 66-Д, кв. 165, м. Харків, 61204; Капінус Сергій Васильович, пр. Перемоги, 72, кв. 406, м. Харків, 61204; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Петровського, 25, м. Харків, 61002**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації **29.04.2013**

Голова Державної служби  
 інтелектуальної  
 власності України  
**М.В. Ковіня**



УКРАЇНА

  
 ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

**СВІДОЦТВО**  
про реєстрацію авторського права на твір

№ 49010

Твір науково-практичного характеру "Метод класифікації частних коефіцієнтів аварійності для автомобільних доріг різних технічних категорій"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Абрамова Людмила Сергіївна, Птиця Геннадій Григорович**  
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))


Авторські майнові права належать **Абрамова Людмила Сергіївна, пр. Перемоги, 66-Д, кв. 165, м. Харків, 61204; Птиця Геннадій Григорович, вул. Р.Ейдмана, 13-А, кв. 132, м. Харків, 61118; Харківський національний автомобільно-доріжний університет, вул. Петровського, 25, м. Харків, 61002**  
(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 29.04.2013



Голова Державної служби  
інтелектуальної  
власності України  
**М.В. Ковіня**

**УКРАЇНА**



**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА** **ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ**

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ**

**СВІДОЦТВО**  
про реєстрацію авторського права на твір

**№ 49011**

**Твір науково-практичного характеру "Моделі управління дорожнім  
движенням для АСУДД"**

(вид, назва службового твору)


**Автор(и) Абрамова Людмила Сергіївна**

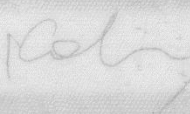
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

**Авторські майнові права належать Абрамова Людмила Сергіївна, пр. Перемоги, 66-  
Д, кв. 165, м. Харків, 61204; Харківський національний автомобільно-дорожній  
університет, вул. Петровського, 25, м. Харків, 61002**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)


**Дата реєстрації** 29.04.2013





**Голова Державної служби  
інтелектуальної  
власності України  
М.В. Ковіня**

**УКРАЇНА**



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

**СВІДОЦТВО**  
про реєстрацію авторського права на твір

№ 53587


**Твір науково-практичного характеру "ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В УПРАВЛІННІ ДОРОЖНІМ РУХОМ"**  
(вид, назва службового твору)

**Автор(и) Абрамова Людмила Сергіївна**  
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

**Авторські майнові права належать Абрамова Людмила Сергіївна, пр. Перемоги, 66-Д, кв. 165, м. Харків, 61204; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Петровського, 25, м. Харків, 61002**  
(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

10.02.2014

Дата реєстрації



**Голова Державної служби інтелектуальної власності України**  
**М.В. Ковіня**

*M. V. Kovinya*

**УКРАЇНА**



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

**СВІДОЦТВО**  
про реєстрацію авторського права на твір

№ 53862

Твір науково-практичного характеру "Монографія "Координированное управление дорожным движением на сегі магістралей города"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Абрамова Людмила Сергіївна, Чернобаєв Микола Семенович**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Абрамова Людмила Сергіївна, пр. Перемоги, 66-Д, кв. 165, м. Харків, 61204; Чернобаєв Микола Семенович, вул. Греківська, 5, кв. 122, м. Харків, 61000; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Петровського, 25, м. Харків, 61002**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

27.02.2014


Дата реєстрації



Голова Державної служби  
інтелектуальної  
власності України  
**М.В. Ковіня**



УКРАЇНА

  
 ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

**СВІДОЦТВО**  
про реєстрацію авторського права на твір

№ 63002

Твір науково-практичного характеру "Особенности аудита дорожньої безпеки"

(вид, назва службового твору)

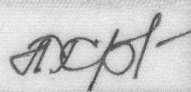
Автор(и) **Абрамова Людмила Сергіївна**


(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Абрамова Людмила Сергіївна, пр. Перемоги, 66-Д, кв. 165, м. Харків, 61204; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Петровського, 25, м. Харків, 61002**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації **17.12.2015**

Голова Державної служби  
 інтелектуальної  
 власності України  
  
**А.Г.Жарінова**



УКРАЇНА · UKRAINE · UKRAÏNA · UKRAÏNE · UKRAÏNA · UKRAÏNE · UKRAÏNA · UKRAÏNE · UKRAÏNA · UKRAÏNE · UKRAÏNA

**УКРАЇНА**



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

**СВІДОЦТВО**  
про реєстрацію авторського права на твір

№ 68955

Твір науково-практичного характеру "Прогнозування параметрів транспортних потоків при плануванні автомобільних доріг"  
(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Абрамова Людмила Сергіївна, Ширін Валерій Вікторович**  
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Абрамова Людмила Сергіївна, пр. Перемоги, 66-Д, кв. 165, м. Харків, 61204; Ширін Валерій Вікторович, вул. Червономіліцейська, 5, м. Покотилівка, Харківський район, Харківська область, 62458; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Петровського, 25, м. Харків, 61002**  
(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

06.12.2016

Дата реєстрації



  
Голова Державної служби інтелектуальної власності України  
**В.О. Голови А.А. Малин**





**УКРАЇНА**



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

**СВІДОЦТВО**  
про реєстрацію авторського права на твір

**№ 69151**

**Твір науково-практичного характеру "Системний аналіз систем управління дорожнім движением"**  
(вид, назва службового твору)

**Автор(и) Абрамова Людмила Сергіївна, Капінус Сергій Васильович**  
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Абрамова Людмила Сергіївна, пр. Перемоги, 66-Д, кв. 165, м. Харків, 61204; Капінус Сергій Васильович, пр. Перемоги, 72, кв. 400, м. Харків, 61204; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Я.Мудрого, 25, м. Харків, 61002**  
(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

13.12.2016

**Дата реєстрації**

 Голова Державної служби інтелектуальної власності України  
**В.о. Голови А.А. Малиш**



**УКРАЇНА**

УКРАЇНА • **ДЕРЖАВНА СЛУЖБА** • УКРАЇНА • **ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ** • УКРАЇНА  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

**СВІДОЦТВО**

про реєстрацію авторського права на твір

№ 69149

Твір науково-практичного характеру "Анализ методів определения показателів безпеки дорожнього руху"  
(вид; назва службового твору)

Автор(и) **Абрамова Людмила Сергіївна, Ширін Валерій Вікторович, Птиця Геннадій Григорович**  
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Абрамова Людмила Сергіївна, пр. Перемоги, 66 Д, кв. 165, м. Харків, 61204; Ширін Валерій Вікторович, вул. Червономілицейська, 5, м. Покотилівка, Харківський район, Харківська область, 62458; Птиця Геннадій Григорович, вул. Р.Фідемана, 13-А, кв. 132, м. Харків, 61118; Харківський національний автомобільно-дорожній університет вул. Я.Мудрого, 25, м. Харків, 61002**  
(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації **13.12.2016**

Голова Державної служби інтелектуальної власності України  
**В.о. Голови А.А. Малиш**



Державна служба інтелектуальної власності України  
 Ідентифікаційний код 37552556  
 М.П.

УКРАЇНА • UKRAINE • УКРАЇНА • UKRAINE • УКРАЇНА • UKRAINE • UKRAINE • UKRAЇНА • UKRAINE • UKRAЇНА

**УКРАЇНА**



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

**СВІДОЦТВО**  
про реєстрацію авторського права на твір

№ 70197

Твір науково-практичного характеру "Управління дорожнім рухом на залізничному переїзді з елементами теорії корисності"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) Абрамова Людмила Сергіївна, Капінус Сергій Васильович  
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать Абрамова Людмила Сергіївна, пр. Перемоги, 66-Д, кв. 165, м. Харків, 61204; Капінус Сергій Васильович, пр. Перемоги, 72, кв. 400, м. Харків, 61204; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Я.Мудрого, 25, м. Харків, 61002  
(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 31.01.2017

 Голова Державної служби інтелектуальної власності України  
В.о. Голови А.А. Малиш



УКРАЇНА



# СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 88932

Твір науково-практичного характеру "Визначення балансу між параметрами дорожнього руху"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Абрамова Людмила Сергіївна, Капінус Сергій Васильович**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Абрамова Людмила Сергіївна, пр. Перемоги, 66-Д, кв. 165, м. Харків, 61204; Капінус Сергій Васильович, пр. Перемоги, 72, кв. 400, м. Харків, 61204; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації

24.05.2019



Державний секретар Міністерства економічного розвитку і торгівлі України **О. Ю. Перевезенцев**

ДОДАТОК Р  
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО  
АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Абрамова Л.С., Кардаш І.П. Прогнозування інтенсивності транспортного потоку. *Вісник ХНАДУ*. 2003. № 22. С. 96-98.

2. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С. Моделирование параметров транспортных потоков. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2004. №6(12). С. 213-215.

3. Абрамова Л.С., Решетников Є.Б. Науково-технічне забезпечення автоматизованих систем управління дорожнім рухом. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2004. № 42. С. 79-83.

4. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С., Ширин В.В. Моделирование параметров транспортного потока. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2004. № 6(12). С. 213-215.

5. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С., Бугаев И.С. Алгоритм определения оптимальных параметров координированного управления транспортными потоками. *Вісник ХНАДУ*. 2004. № 25. С. 114-117.

6. Абрамова Л.С., Решетников Е.Б., Чернобаев Н.С., Ширин В.В. Анализ организации дорожного движения в центральной части города Харькова. *Вісник ХНАДУ*. 2005. №29. С. 116-122.

7. Абрамова Л.С., Чернобаев М.С. Элементы системного анализа при вивченні автомобільно-дорожньої системи міста. *Автомобільний транспорт*. 2006. №18. С. 67-71.

8. Абрамова Л.С., Чернобаев М.С. Аналіз методів прогнозування інтенсивності транспортного потоку. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2006. № 6. С.158-163.

9. Абрамова Л.С., Ширін В.В. Методи підвищення ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі міста. *Автомобільний транспорт*. 2006. №19. С. 51-55.

10. Абрамова Л.С., Ширін В.В. Моделирование и оптимизация транспортной сети. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2006. № 2/2 (20). С. 98-101.

11. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Імітаційна модель руху транспортних засобів при маневруванні. *Комунальне господарство міст*. 2006. Вип. 69. С. 221-228.

12. Абрамова Л.С., Чернобаев М.С. Щодо вирішення задачі оптимізації параметрів координованого управління транспортними потоками. *Вісник ХНАДУ*. 2007. № 37. С. 83-86.

13. Дербунович Л.В., Абрамова Л.С. Иерархические структуры систем управления дорожным движением. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2008. Вип. 31. С. 40-48.

14. Абрамова Л.С., Рогов А.В. Моделирование параметров транспортных потоков. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2008. №46. С.9-15.

15. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С. Программная среда координированного управления транспортными потоками. *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту*. 2008. № 1. С. 22-25.

16. Абрамова Л.С., Бугайов І.С., Горбатій П.О. Оптимізація параметрів локального управління на багатосмугових перехрестях у містах. *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту*. 2008. № 2. С. 28-34.

17. Дербунович Л.В., Абрамова Л.С., Ширін В.В. До питання оцінки ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2008. Вип. 56. С. 72-79.

18. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С. Имитационная модель управления транспортными потоками. *Вісник ХНАДУ*. 2009. № 47. С. 93-96.

19. Абрамова Л.С., Птиця Г.Г. Дослідження рівнів аварійності на автомобільних дорогах. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2006. № 3/2 (21). С. 17-20
20. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С. Постановка задачі адаптивного управління дорожнім движением. *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту*. 2009. № 1. С. 7-12.
21. Абрамова Л.С., Капинус С.В. Аналіз методів теорії прийняття рішень с позиції управління дорожнім движением. *Вісник ХНАДУ*. 2009. №47. С. 90-92.
22. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Моделирование заторових ситуацій по улично-дорожній мережі. *Автомобільний транспорт*. 2009. №25. С. 66-69.
23. Абрамова Л.С., Капинус С.В. К вопросу выбора критериев эффективности организации дорожного движения методами теории полезности. *Автомобільний транспорт*. 2009. №25. С. 62-65.
24. Абрамова Л.С., Капинус С.В. Аналіз функціонування автоматизованих систем управління дорожнім движением в мегаполісах. *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту*. 2009. № 1. С. 13-20.
25. Абрамова Л.С. Модели управления дорожнім движением для АСУДД. *Вісник ХНАДУ*. 2010. №50. С. 57-63.
26. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С. Обоснование выбора показателей эффективности контурного управления дорожнім движением. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2010. № 4/3. С. 58-61.
27. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Способ повышения пропускной способности регулируемых перекрестков. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2010. № 4/3. С. 62-65.
28. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Формалізація параметрів руху автотранспортних засобів при русі в щільному потоці. *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту*. 2011. № 3. С. 4-11.



29. Абрамова Л.С., Наглюк И.С., Капинус С.В. Анализ структуры систем поддержки принятия решений в АСУДД. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2012. №18. С. 45-51.

30. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Модельный эксперимент поведения транс-портного потока на улично-дорожной сети города в заторовом режиме движения. *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту*. 2012. №1. С. 47-55.

31. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С. Координированное управление дорожным движением на сети магистралей города. Монография. Харьков: издательство "Точка". 2012. 160 с.

32. Абрамова Л.С. Элементы теории штучного інтелекту в управлінні дорожнім рухом. *Вісник ХНАДУ*. 2013. Вип. 61-62. С. 32-36.

33. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. К вопросу надежности транспортных систем. *Вісник ХНАДУ*. 2009. №47. С. 139-142

34. V. Hahanov, W. Gharibi, L.S. Abramova, S. Chumachenko, E. Litvinova, A. Hahanova, V. Rustinov, V. Miz, A. Zhalilo, A. Ziarmand. Cyber physical system-smart cloud traffic control. *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS 2014)*. SEP 26-29, 2014. PP. 49-66. (WoS:000380470800069). (Scopus)

35. Абрамова Л.С. Особенности аудита дорожной безопасности. *Автомобільний транспорт*. 2015. Вип. 36. С. 161-165.

36. Абрамова Л.С., Наглюк И.С., Птица Г.Г. Аналіз методів визначення складу транспортного потоку. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2012. Вип. 17. С. 35-41.

37. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Прогнозування параметрів транспортних потоків при плануванні автомобільних доріг. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2015. № 5/3(25). С 47-51.

38. Абрамова Л.С. Спосіб динамічного управління автомобільним рухом на залізничному переїзді. *Автомобільний транспорт*. 2016. Вип. 38. С. 34-38.

39. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Дослідження показників безпеки руху на дорогах. *Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту*. 2009. №1. С.20-26
40. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Метод классификации частных коэффициентов аварийности для автомобильных дорог различных технических категорий. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2014. Вип. 44. С. 41-55.
41. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Выявление латентных факторов частных коэффициентов аварийности. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2012. № 5/4 (59). С. 32-37.
42. Абрамова Л.С., Наглюк І.С., Левченко О.С. Аналіз методів проведення камеральних та польових досліджень аудиту безпеки дорожнього руху. *Вісник ХНАДУ*. 2016. Вип. 75. С. 182-190.
43. Абрамова Л.С., Ширин В.В., Птица Г.Г. Анализ методов определения показателей безопасности дорожного движения. *Вісник ХНАДУ*. 2015. №69. С. 118-123
44. Нагорний Є.В., Абрамова Л.С. Концептуальний підхід до проектування систем управління дорожнім рухом. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2017. Вип. 12. С. 94-100.
45. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Визначення балансу між параметрами дорожнього руху. *Комунальне господарство міст*. 2018. Вип. 140. С. 91-97.
46. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Концепция управления безопасностью дорожного движения. Перспективные тренды развития науки: техника и технологии. В 2 книгах. К. 1. Глава 6.: кол. монографія. Одесса: Куприенко С.В., 2016. С. 169-190
47. Liudmyla Abramova, Yevhen Nahornyi, Henadii Ptytsia. Structure of transformation of the road motion parameters in the control system. *SHS Web of Conferences*. 2019. №67, 05001. NTI-UkrSURT 2019: DOI <https://doi.org/10.1051/shsconf/20196705001>. <https://www.shs-conferences.org/articles/shsconf/abs/2019/08/contents/contents.html> (WoS)

48. Abramova L. Model experiment of dynamic control implementation at the transport network in Kharkiv, Ukraine. *Theoretical and scientific foundations of engineering: collective monograph. International Science Group*. Boston: Primedia eLaunch. 2020. PP. 150-164. URL: <http://isg-konf.com>

*Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

49. Абрамова Л.С., Чернобаев М.С. Визначення оптимальних параметрів координованого управління. Сборник научных трудов. «*Научные исследования и их практическое применение*»: Международная научно-практическая конференция. Том I. Транспорт. Физика и математика. Одесса, 1-15 жовтня 2007, С. 42-44.

50. Абрамова Л.С., Тонконожко Г.А. Дослідження впливу показників видимості на безпеку дорожнього руху. «*Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях*»: праці науково-технічної конференції з міжнародною участю. ХНУ ім. В.Н. Каразіна. Харків, 18-21 травня 2010. С. 17-20.

51. Абрамова Л.С. Проектирование систем управления дорожным движением. «*Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях*»: праці науково-технічної конференції з міжнародною участю. ХНУ ім. В.Н.Каразіна. Харків, 18-21 травня 2010. С. 14-17.

52. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Имитационная модель поведения транспортного потока на улично-дорожной сети городов в условиях затора. «*Логістика промислових регіонів*»: IV Міжнародна науково-практична конференція. Донецьк, 23-25 квітня 2012 р. С. 171-172.

53. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Влияние параметров дорожных условий на безопасность дорожного движения. «*Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов*»: Материалы Межд. науч.-практ. конф., г. Минск 22-26 октября 2012 г., БНТУ. С. 68-70.

54. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Подход к усовершенствованию оценки уровня безопасности дорожного движения. «*Безпека дорожнього руху: правові*

*та організаційні аспекти»*: Матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Донецьк 15-16 листопада 2012 р., ДААТ. С. 168-172.

55. Абрамова Л.С. Напрямки розвитку сучасного управління дорожнім рухом. *«Проблеми підвищення рівня безпеки, комфорту та культури дорожнього руху»*: Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції, 16-17 квітня Харків: ХНАДУ. 2013. С.33-35.

56. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Классификация методов определения показателей безопасности. *«Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе»*: Материалы международной научно-практической конференции г. Пермь, 25 - 27 апреля 2013, том 2, С. 8 - 16.

57. Абрамова Л.С., Капинус С.В. Признаки эргатических систем в управлении дорожным движением. *«Інформаційні технології і мехатроніки»*: Всеукраїнська науково-практична конференція. 15 квітня 2014 р. Харків. С. 5-6.

58. Абрамова Л.С., Наглюк И.С. Концепция управления дорожным движением в городах. *VII российско-германская конференция по безопасности дорожного движения*. Санкт-Петербург, 6-7 июня 2014 г.

59. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Результаты редукции частных коэффициентов аварийности при определении уровня безопасности дорожного движения. *Академическая наука – проблемы и достижения*: Материалы IV международной научно-практической конференции. 7-8 июля 2014 г. Москва. CreateSpace 4900 LaCross Road, North Charleston, SC, USA 29406, 2014. С. 165-169.

60. Абрамова Л.С. Концепція управління безпекою дорожнього руху. *«Новітні технології в автомобілебудуванні та на транспорті»*: Наукові праці. Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 85-річчю заснування ХНАДУ, 85-річчю автомобільного факультету, а також з нагоди Дня автомобіліста та дорожника. 15-16 жовтня 2015 р. ХНАДУ. Харків, 2015. С. 61.

61. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Экспериментальная проверка экспресс-метода определения уровня безопасности дорожного движения. *«Транспорт,*

екологія – устойчивое развитие»: Матеріали науч.-технич. конф. с міжнародним участіем. г. Варна, Болгарія 10-12 травня 2016. С. 288-292.

62. Абрамова Л.С., Капинус С.В. Особенности системы управления дорож-ным движением. «Транспорт, экология – устойчивое развитие»: Матеріали науч. технич. конф. с міжнародним участіем. г. Варна, Болгарія. 10-12 травня 2016. С. 107-110.

63. Абрамова Л.С., Ширін В.В., Птиця Г.Г. Формування інноваційних рішень для системи управління безпекою дорожнього руху. *Автомобільний транспорт та інфраструктура*: I Міжнародна науково-практична конференція, 26-28 квітня 2018, Київ, Україна: тези конференції. С. 140-143.

64. L.S. Abramova. Substantiation of distribution of road traffic management of road traffic in the cities. «*Experience of the past, practice of the future*»: Proceedings of 48<sup>th</sup> International Scientific Conference. New York April 62019. 6-14.

65. Абрамова Л.С., Нагорний Є.В. Підхід до формування гібридного управління дорожнім рухом. «Сучасні інноваційні та інформаційні технології на транспорті»: Збірка матеріалів XI Міжнародної науково-практичної конференції. Херсонська державна морська академія, Херсон, 28-30 травня 2019, С. 28-31.

66. Абрамова Л.С. Особенности моделирования группового руху транспортних засобів у містах. «*Scientific achievements of modern society*»: Abstracts of the 1st International scientific and practical conference. September 11-13, 2019, Cognum Publishing House, Liverpool, United Kingdom. 2019. PP. 8-17.

67. Абрамова Л.С., Нагорний Є.В., Птиця Г.Г. Структура перетворення параметрів дорожнього руху у системі управління. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустриальні центри та корпоративна логістика*: 15-та науково-практична міжнародна конференція, м. Харків, Україна, 6-8 червня 2019 року: тези доповідей. Вісник економіки транспорту і промисловості. №66 (P2), УкрДУЗТ, Харків. 6-8 червня 2019. С. 61-63.

*Праці, що додатково відображають наукові результати дисертації:*

68. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С., Ширин В.В. Формализация задачи управления транспортными потоками на улично-дорожной сети крупных городов. *Прикладная радиоэлектроника*. 2009. Том 8, № 2. С. 188-192.

69. Абрамова Л.С., Бакуліч О.О. Автоматизовані системи управління дорожнім рухом: навч. посібник. Харків: ХНАДУ. 2014. 184 с.

70. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Побудова дерева рішень для управління дорожнім рухом на залізничному переїзді. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2016. Вип. 54 (спецвипуск). С. 33-34.

71. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Риск возникновения ДТП как фактор надежности транспортных систем. «Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов»: Материалы Межд. науч.-практ. конф., г. Минск 23-24 октября 2009 г., БНТУ.

72. Абрамова Л.С., Наглюк І.С., Ширін В.В., Птица Г.Г., Капінус С.В. Аудит безпеки дорожнього руху. Підручник. Харків: ХНАДУ. 2015. С. 281.

73. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Системный анализ систем управления дорожным движением. *Молодий вчений*. 2016. №7. С. 177-181.

74. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Управління дорожнім рухом на залізничному переїзді з елементами теорії корисності. *Економіка, управління та адміністрування (Вісник ЖДТУ)*. 2016. Вип. №2(77). С. 13-17.

75. Абрамова Л.С., Птица Г.Г. Влияние параметров дорожных условий на безопасность дорожного движения. М-во образования Республики Беларусь Белорусский национальный технический университет: сб. науч. тр., 2013. С. 29-36.

76. Абрамова Л.С., Чернобаев М.С. Постановка задачі оптимізації параметрів координованого управління. *Актуальні проблеми забезпечення безпеки дорожнього руху*: Науково-практичний семінар. ХНУВС, Харків, 18.04.2008 р. С. 5.

77. Абрамова Л.С., Птиця Г.Г., Ширін В.В. Довідковий словник термінів та визначень з організації та безпеки дорожнього руху: словник. Харків: ХНАДУ. 2017. 226 с.

78. Абрамова Л.С., Наглюк І.С., Ширін В.В., Птиця Г.Г., Капінус С.В., Левченко О.С., Харченко Т.В. Практикум з проведення аудиту безпеки дорожнього руху: Навчальний посібник. Харків: ХНАДУ. 2019. 140 с.

79. Абрамова Л.С. Моделі управління дорожнім рухом для АСУДР: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49011. Державна служба інтелектуальної власності. 29.04.13.

80. Абрамова Л.С., Птиця Г.Г. Метод классификации частных коэффициентов аварийности для автомобильных дорог различных технических категорий: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49010. Державна служба інтелектуальної власності. 29.04.13.

81. Абрамова Л.С., Капінус С.В. До питання вибору критеріїв ефективності організації дорожнього руху методами теорії корисності: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49009. Державна служба інтелектуальної власності. 29.04.13.

82. Абрамова Л.С., Чернобаев Н.С. Монографія. Координированное управление дорожным движением на сети магистралей города: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 53862. Державна служба інтелектуальної власності. 27.02.14.

83. Абрамова Л.С. Элементы теории искусственного интеллекта в управлении дорожным рухом: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 53587. Державна служба інтелектуальної власності. 10.02.14.

84. Абрамова Л.С. Особенности аудита дорожной безопасности: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 63002. Державна служба інтелектуальної власності. 13.10.15.

85. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Системный анализ систем управления дорожным движением: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 69151. Державна служба інтелектуальної власності. 13.12.16.

86. Абрамова Л.С. Спосіб динамічного управління автомобільним рухом на залізничному переїзді: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 69150. Державна служба інтелектуальної власності. 13.12.16.

87. Абрамова Л.С., Ширин В.В., Птица Г.Г. Аналіз методів определения показателів безпеки дорожнього руху: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 69149. Державна служба інтелектуальної власності. 13.12.16.

88. Абрамова Л.С., Ширин В.В. Прогнозування параметрів транспортних потоків при плануванні автомобільних доріг: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 68955. Державна служба інтелектуальної власності. 06.12.16.

89. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Управління дорожнім рухом на залізничному переїзді з елементами теорії корисності: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 70197. Державна служба інтелектуальної власності. 21.01.17.

90. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Визначення балансу між параметрами дорожнього руху: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 88932. Державна служба інтелектуальної власності. 24.05.19.

*Основні результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та отримали підтримку на:*

– наукових семінарах кафедри транспортних систем (до реструктуризації) та кафедри організації та безпеки дорожнього руху (м. Харків, ХНАДУ, 2002 – 2019 рр., очна форма участі);

– міжнародній науково-практичній конференції «Наукові дослідження та їх практичне застосування» (Одеса, 1-15 жовтня 2007, заочна форма участі);

– науково-технічній конференції із міжнародною участю Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна (Харків, 18-21 травня 2010, очна форма участі);



- IV Міжнародній науково-практичній конференції «Логістика промислових регіонів» (Донецьк, 23-25 квітня 2012, очна форма участі);
- Міжнародній науково-практичній конференції «Удосконалення організації дорожнього руху й перевезень пасажирів та вантажів» (Мінськ, Білорусія, 22-26 жовтня 2012, заочна форма участі);
- VII Міжнародній науково-практичній конференції «Безпека дорожнього руху: правові та організаційні аспекти» (Донецьк, 15-16 листопада 2012, очна форма участі);
- III Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми підвищення рівня безпеки, комфорту та культури дорожнього руху» (Харків, 16-17 квітня 2013, очна форма участі);
- Міжнародній науково-практичній конференції «Модернізація та наукові дослідження у транспортному комплексі» (Перм, РФ, 25 - 27 квітня 2013, заочна форма участі);
- Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інформаційні технології і мехатроніки» (Харків, 15 квітня 2014, очна форма участі);
- VII російсько-німецькій конференції з безпеки дорожнього руху (Санкт-Петербург, РФ, 6-7 юня 2014, заочна форма участі);
- IV міжнародній науково-практичній конференції «Академічна наука - проблеми й досягнення» (Москва, РФ, North Charleston, SC, USA, 7-8 юля 2014, заочна форма участі);
- Міжнародній науково-практичній конференції «Новітні технології в автомобілебудуванні та на транспорті» (Харків, 15-16 жовтня 2015, очна форма участі);
- науково-технічній конференції із міжнародною участю «Транспорт, екологія – сталий розвиток» (Варна, Болгарія, 10-12 травня 2016, заочна форма участі);
- I Міжнародній науково-практичній конференції «Автомобільний транспорт та інфраструктура» (Київ, 26-28 квітня 2018, очна форма участі);
- 48th International Scientific Conference «Experience of the past, practice of

the future» (New York, USA, April 6, 2019, заочна форма участі);

– XI Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інноваційні та інформаційні технології на транспорті» (Херсон, 28-30 травня 2019, заочна форма участі);

– 1st International scientific and practical conference «Scientific achievements of modern society» (Liverpool, UK, September 11-13, 2019, заочна форма участі);

– XV науково-практичній міжнародній конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика» (Харків, 6-8 червня 2019, очна форма участі).

Дисертаційна робота в повному обсязі доповідалась на науковому семінарі кафедр ХНАДУ: транспортних технологій, транспортних систем і логістики, організації і безпеки дорожнього руху (м. Харків, 25.06.2020 р.).