

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

**АБРАМОВА ЛЮДМИЛА СЕРГІЇВНА**



УДК 656.073

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

Спеціальність 05.22.01 – транспортні системи

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті Міністерства освіти і науки України, м. Харків

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Нагорний Євген Васильович**,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри транспортних технологій

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Поліщук Володимир Петрович**, Національний транспортний університет, завідувач кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху

доктор технічних наук, професор  
**Шраменко Наталя Юріївна**, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, професор кафедри транспортних технологій і логістики

доктор технічних наук, професор  
**Алексієв Володимир Олегович**,  
Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, професор кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій

**Захист відбудеться** «11» листопада 2020 р. о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.02 при Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за адресою: вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002.

Автореферат розісланий «09» жовтня 2020 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради



О.П. Смирнов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** 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'єкт дослідження:** розподілене управління дорожнім рухом.

**Предмет дослідження:** 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 за теорією клітинних автоматів як однакових клітин, однаково поєднаних між собою;

– 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 калібрування 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.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи складає 418 сторінок, робота містить 103 рисунки та 12 таблиць. Додатки розміщені на 73 сторінках. Перелік використаних літературних джерел складається із 244 найменувань на 25 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і завдання, визначено об'єкт та предмет дослідження; надано опис основних методів дослідження; наведено зв'язок із науковими програмами, планами, темами; викладено основні положення наукової новизни та практичної цінності; надано інформацію про апробацію та публікацію результатів дисертації.

**У першому розділі** розглянуті основні напрямки розвитку сучасних систем та технологій управління ДР у містах, а також системного уявлення комплексу «водій – автомобіль – дорога – середовище» (В-А-Д-С). Наведено результати аналізу структурних та функціональних особливостей систем управління ДР, що впливають на методологію визначення характеристик ДР при зміні режимів руху у міських умовах.

Встановлено, що згідно функціям АСУДР відомо п'ять поколінь. Існуючі в даний час в Україні АСУДР здебільшого відносяться до систем 1-го та 2-го по-

колій, у яких не враховується реальна транспортна ситуація на дорогах. Внаслідок цього вони практично не здійснюють істотного впливу на рух ТП, пропускну спроможність та безпеку ДР. АСУДР за своєю структурою та складом елементів для реалізації функцій управління розподіляються на децентралізовані, централізовані та ієрархічні системи, але усі типи структури мають певні недоліки та обмеження при функціонуванні. Визначено, що ієрархічна структура є розвиненою в порівнянні з іншими. В результаті аналізу виявлено, що у світовій практиці найбільш поширені такі технології управління ТП: 1) технологія управління за фіксованими планами (координоване управління); 2) технологія мережевого адаптивного управління; 3) технологія ситуаційного управління. Результати проведеного аналізу свідчать, що зазначені структури та технології управління реалізовані у відомих системах UTOPIA, SCOOT, SCATS, BALANCE, MOTION, ITACA та ROSE.

Проблеми вивчення системи В-А-Д-С обумовлені не тільки розміром і складністю структури, а й обсягом інформації у підсистемах. Виявлено, що основою методології оцінки характеристик ДР при зміні режимів руху у містах є мікро- та макромодельовання ТП, основою якого є фундаментальна діаграма ТП. Але фундаментальна діаграма застосовується лише при однорідному складі ТП та нормальному стані дорожнього покриття і зовнішнього середовища. Емпіричні дослідження показали, що теоретична фундаментальна діаграма не описує складної поведінки щільного транспортного потоку, в якому пов'язані складні неоднорідні просторово-часові залежності.

У сучасній теорії ТП на підставі фундаментальної діаграми ТП сформовані дві основні групи макромоделей: гідродинамічні і кінетичні моделі ТП. Мікро-модельовання ТП засновано на дослідженні взаємопросторового положення транспортних засобів у потоці. Але у результаті аналізу не було виявлено методу модельовання руху АТЗ у щільному потоці за умови недотримання дистанції безпеки, що безпосередньо впливає на зниження пропускну спроможності ВДМ міст та потребує дослідження.

Встановлено, що при рішенні проблеми організації ДР та управлінні ТП у міжнародній практиці застосовуються ІСУ як перспективний напрямок наукових досліджень, бо вони надають опис складних технічних і людино-технічних (ергачичних) СУ, що функціонують в умовах нестаціонарності, розподіленості параметрів, відсутності контролю зовнішніх впливів та мінливості цілей.

**У другому розділі** проведено систематизацію застосування методів теорії управління – робастного, адаптивного та інтелектуального управління на етапі прийняття рішень при формуванні рівнів СУДР, розроблено ромбовидну архітектуру ієрархічної системи управління ДР та принципові схеми для кожного рівня управління – локального, тактичного та стратегічного.

Виявлено, що інтегрована ІСУ являє собою модифікацію й розвиток СУДР, що реалізує технологію ситуаційного управління ТП на ВДМ міст, та визначено відмінності між інтелектуальними та інформаційними технологіями.

Розроблено концепцію формування розподілених СУ з метою підвищення пропускну спроможності ВДМ у містах при забезпеченні необхідного рівня безпеки ДР, яка містить основні положення системного підходу до розробки



структури СУДР, методів управління ДР, способів визначення ефективності ДР для різних рівнів систем управління – від локального до стратегічного:

1) система управління дорожнім рухом повинна мати ієрархічну структуру із частковою децентралізацією управління;

2) структура СУДР повинна мати коректно сформовані рівні управління із відповідним математичним описом та технічним забезпеченням;

3) рівень прийняття рішень має бути відокремлений від центру управління із пріоритетом до інших рівнів;

4) методика проектування повинна враховувати показники ефективності ДР для всіх режимів функціонування системи управління (від локального до системного);

5) процес проектування має враховувати ступінь невизначеності параметрів ДР;

6) 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) розподіл методів автоматичного регулювання (САР) та автоматичного управління (САУ) ДР має проводитися шляхом декомпозиції та агрегування;

8) СУДР повинна бути адаптованою до змін параметрів ТП у режимі реального часу.

Для реалізації розробленої концепції та відповідно до ITS підходу, розроблено ромбовидну форму архітектури СУ, яка 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, що перебувають під управлінням двох керуючих центрів, а саме – інформаційного ( $4^{\text{інф}}$ ) та технологічного ( $4^{\text{T}}$ ), що пов'язані між собою (рис. 1).

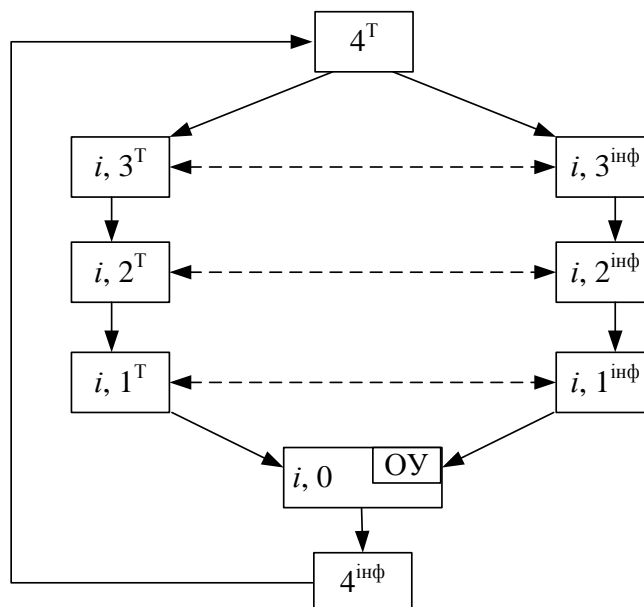


Рисунок 1 – Структура ієрархічної СУДР із двома центрами

Опис ланки структури із номером  $i = 1, m_j$  на  $j$ -му ієрархічному рівні ( $j = 0, n$ ) надається у вигляді

$$S_{ij} : U_{ij} \times Y_{ij} \times H_{ij} \rightarrow X_{ij} \quad , \quad (1)$$

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 збурюючих впливів на даній ланці;  $X_{ij} = \{x_{ij}\}$  – множина вихідних сигналів ланки  $i$  на нижчий рівень.

Для самої верхньої ланки відображення має вигляд

$$S_{ij} : Y_{m,4} \times H_{m,4} \rightarrow X_4 \quad . \quad (2)$$

Для об'єкта управління (ОУ) система відображень формується у вигляді:

$$S_{m,0} : X_{i,1} \times H_{i,0} \rightarrow X_0 \quad . \quad (3)$$

В СУДР враховано два типи збурюючих впливів – зовнішні та внутрішні, тому наявність двох вершин є підґрунтям для розподілення функцій управління – керуючих та прийняття рішень, які застосовують відповідно технологічні та інформаційні складові системи управління. Тоді для кожної ланки у структурі надано опис двома пов'язаними між собою частинами: перша для формування керуючих впливів з урахуванням зовнішніх збурень,  $H_{ij}^3$ , а друга впливає на оцінку існуючого стану ДР або показників його ефективності,  $H_{ij}^B$ :

– для технічних пристроїв

$$S_{ij}^T : U_{ij}^T \times Y_{ij}^T \times H_{ij}^3 \rightarrow X_{ij} \quad (4)$$

– для інформаційних складових системи

$$S_{ij}^{\text{інф}} : U_{ij}^{\text{інф}} \times H_{ij}^B \rightarrow X_{ij} \quad (5)$$

Ефективність переходу до ромбовидної структури має переваги при управлінні дорожнім рухом та дозволяє: 1) розділити керуючі й інформаційні канали системи на всіх рівнях ієрархії; 2) виділити в системі локальні динамічні контури управління; 3) розглянути типові завдання статистичних розрахунків на кожному рівні; 4) створити за рахунок розподілу функцій за рівнями «задовільний» математичний опис окремих ланок і системи в цілому.

Запропоновано розглядати послідовно чотири рівні управління: локального регулювання (рівень системи автоматичного регулювання (САР)), тактичної оптимізації (рівень системи автоматичного управління (САУ)), координації параметрів оптимізації та оперативного управління й прийняття рішень, зв'язаних між собою відповідно за принципами замкнутого контуру управління.

Структурні елементи САР належать до класу SISO-систем (Single Input Single Output) із зосередженими постійними параметрами та реалізують робастний принцип дії системи до зміни її вхідних параметрів локального рівня, на якому вплив середовища відбувається в умовах невизначеності параметрів ТП та неузгодженості параметрів управління. Рівень САУ являє собою МІМО-

систему (Multiple Input Multiple Output), у якій властивість адаптації досягається шляхом формування математичної моделі об'єкту управління для визначення керуючого впливу на нього, це доводить принципову відмінність адаптивного управління від робастного. 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. 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 формування варіантів рішення та вибору найбільш ефективного.

Дієвий засіб для забезпечення ефективної роботи СУДР – це використання «швидких моделей» на нижчих рівнях ієрархії та об'єкті управління із застосуванням елементів ІСУ (формування баз моделей управління, баз даних) для оперативного рівня управління. Такий підхід обумовлює вимоги до проектування гібридної СУДР на підставі структурного та функціонального опису розподілення методів та алгоритмів управління ДР, які надають більш вагомий результат, ніж екстраполяція концепцій існуючих систем. Для кожного рівня управління розроблено структурні схеми та запропоновано принципову схему гібридної СУДР на підставі застосування робастного адаптивного регулятора з інтелектом для поєднання двох типів управління – регулювання та адаптації (рис. 2), що забезпечує оптимальне досягнення мети управління та формування принципу дії системи автоматичного цілевказання на стратегічному рівні управління.

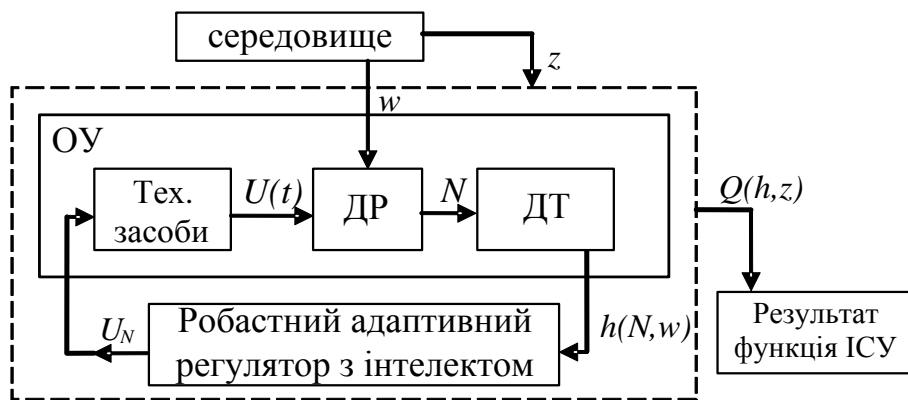


Рисунок 2 – Принципова схема ІСУ дорожнім рухом

Вихідними параметрами ДР є інтенсивність ( $N$ ), швидкість, склад транспортного потоку, що формуються під впливом середовища – обурюючий вплив навколишнього середовища  $w(t)$  та змінні умови руху ТП ( $z$ ). Тоді на вхід робастного адаптивного регулятора надходять вхідні дані з ознаками невизначеності –  $h(N, w)$ . Регулятор формує керуючий вплив  $U_N \rightarrow \text{орт}$  на ОУ для досягнення мети управління, що впливає на результат функціонування ДР, а саме на функцію  $Q(h, z)$ , яка повинна враховувати невизначеність вхідних параметрів, змінних режимів руху ТП та випадкових збурень.

Ефективність роботи СУДР залежить від організації участі ОПР у процесі

прийняття остаточного рішення в слабо-структурованих завданнях. Встановлено, що зазначену форму роботи з великими обсягами суперечливої інформації необхідно реалізувати шляхом створення систем підтримки прийняття рішень (СППР). У результаті аналізу сформовано класифікацію СППР за основними ознаками: по взаємодії із користувачем; по способу підтримки рішень та по сфері застосування; та проведено систематизацію математичного апарату СППР. На підставі проведеного аналізу задач ОПР у СУДР відокремлено властивості структури формування СППР:

1) необхідність доступу ОПР до інформації щодо опису транспортних ситуацій на ВДМ, до створених фахівцями моделей транспортних ситуацій із альтернативними шляхами їх вирішення по вибору керуючих дій ОПР у вигляді заходів ОДР за обраними критеріями;

2) для проведення параметрично-експертного вибору ОПР повинна мати правила вибору зміни параметрів управління ДР та формування керуючого впливу у разі виникнення складних умов руху транспорту на ВДМ, що призводить до зміни режимів руху ТП на елементах ВДМ.

Розроблену структуру СППР для СУДР наведено на рис. 3.

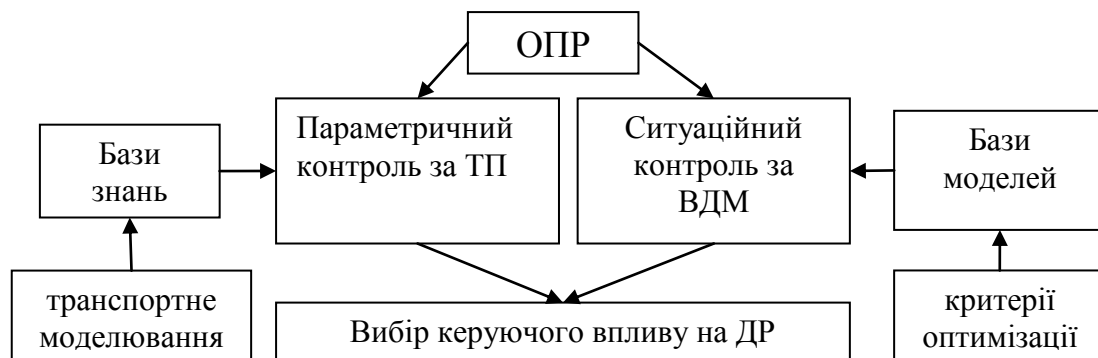


Рисунок 3 – Структурно-функціональна схема СППР

Суттєвою особливістю, що відрізняє СППР від інших інформаційних систем є безпосереднє її використання на всіх стадіях процесу прийняття рішень, що полягає у визначенні проблеми; наявності необхідної для прийняття рішення інформації; формуванні та оцінці альтернативних рішень; виборі найбільш обґрунтованого рішення і поточного контролю. Такий підхід обумовлює наявність інтелектуальної складової в управлінні ДР та формує ознаки гібридної системи управління ДР.

У відповідності до теорії штучного інтелекту, а також з метою розробки програмного забезпечення СУДР запропоновано застосування та розроблено структури інтелектуальних агентів як елементів гібридної СУДР, де функції агентів відображені у вигляді абстрактного математичного опису в межах наведеної архітектури: *агент = архітектура + програма*. Розроблено моделі чотирьох типів рефлексних агентів для розглянутих технологій управління ДР.

Відомий підхід до побудови схеми ВДМ у вигляді графу, що розповсюджений у процесі вирішення транспортних задач, наочно відображає зв'язки у транспортній мережі, але схематично виконаний граф транспортної мережі без координатної орієнтації елементів реальної ВДМ міста не відповідає ознакам

математичної моделі та впливає на проблему визначення параметрів ДР. Розроблено геоінформаційну модель ВДМ (ГІМ) у вигляді комп'ютерної імітаційної моделі за допомогою програмного середовища Delphi 7.0 та глобальної системи позиціонування GPS. Основу розробленої комп'ютерної моделі складають моделі перехрестя та перегону, де матриця розподілу інтенсивності на перехресті має вигляд

$$N_k = \begin{bmatrix} N_{k11} & N_{k12} & N_{k13} & N_{k14} \\ N_{k21} & N_{k22} & N_{k23} & N_{k24} \\ N_{k31} & N_{k32} & N_{k33} & N_{k34} \\ N_{k41} & N_{k42} & N_{k43} & N_{k44} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

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

Опис перегонів, пов'язаних з даними перехрестями, має вигляд

$$r_i(k) = \left. \begin{array}{l} \exists [(C_{r_1} = k) \wedge (E_{r_1} = i) \vee (C_{r_2} = k) \wedge (E_{r_2} = i)] \Rightarrow r \\ 0 \end{array} \right\}, r=1..m, \quad (7)$$

де  $r_1, \dots, r_4$  – номери в'їздів і виїздів, що відповідають індексам примикання перегонів до перехрестя,  $r=1, \dots, m$ ;  $C_{r_1}, C_{r_2}$  – номери перехресть, між якими є перегін. Саме номер перегону в напрямку  $i$  для перехрестя  $k$  відповідає або входним або вихідним потокам цього напрямку. Фрагмент розробленої моделі для частини ВДМ м. Харків наведено на рис. 4.

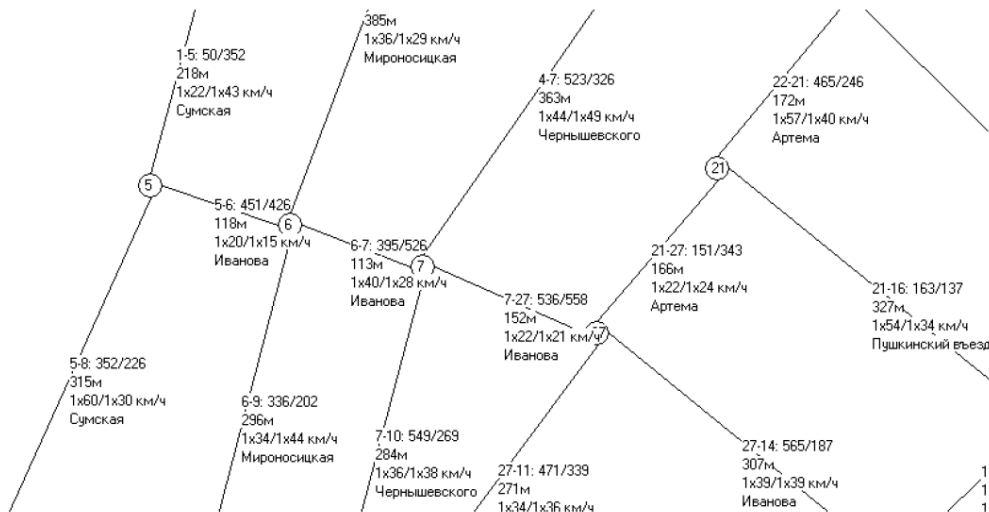


Рисунок 4 – Модель частини транспортної мережі м. Харків

Але для рівня прийняття рішень необхідна додаткова інформація зміни параметрів ТП в залежності від дорожніх умов у поточному часі. Для цього вирішено задачу калібрування ГІМ міста. Для позначення кожної дуги ГІМ було обрано універсальну модель параметрів ТП, яка містить параметри фундаментальної діаграми (ФД) ТП для перегонів ВДМ. Але теоретична ФД не дозволяє

вирішувати практичні задачі управління ДР у містах, бо трифазна теорія ТП не може бути зіставлена із результатами емпіричних даних та наслідків їх взаємодії у реальних умовах руху. Тому було проведено модифікацію форми ФД із наступних припущень: аналітична залежність ФД не є безперервною і має складну структуру з двох гілок, і як наслідок цього – форма ФД може мати декілька форм уявлення.

Результати аналізу математичного забезпечення відомих систем управління свідчать, що існуючі моделі щільного потоку розділено на два класи:

1) моделі типу LWR, в яких перехід до щільного ТП виникає не в результаті нестійкого стану, а за рахунок існування точки, в якій досягається максимум інтенсивності на ФД;

2) моделі типу «General Motors» (ДМ), в яких перехід до щільного потоку пов'язаний з невизначеністю модельних рішень близько критичної щільності ТП. Порівняльний аналіз моделей довів, що моделі LWR-типу не дозволяють дослідити зміну параметрів щільного потоку (права сторона діаграми). Доведено доцільність застосування моделей ДМ-класу, що надають можливість визначити параметри руху ТП при підвищеній щільності з урахуванням невизначеності його параметрів, але за умови зміни підходу до побудови ФД ТП.

При модифікації форми ФД основними параметрами побудови ФД було обрано швидкість вільного руху ( $V$ ), максимальну щільність ТП ( $q_{\max}$ ), критичну щільність ТП ( $q_{\text{кр}}$ ) та максимальну інтенсивність ( $N_{\max}$ ). Рух ТП у вільному режимі, коли швидкість та інтенсивність прагнуть до максимуму, визначається т.  $B$ , отже ліву частину діаграми можна описати рівнянням для модифікації форми ФД ТП у трикутну (рис. 5).

$$V = \frac{N_{\max}}{q_{\text{кр}}} . \quad (8)$$

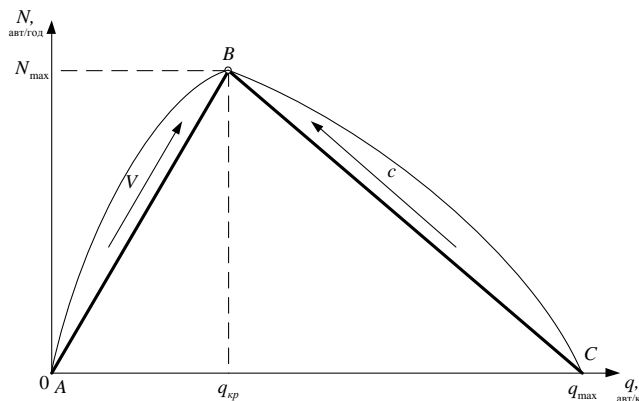


Рисунок 5 – Ідентифікація фундаментальної діаграми ТП

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

$$c = \frac{N_{\max}}{(q_{\max} - q_{\text{кр}})} , \quad (9)$$

де  $c$  – швидкість ударної хвилі, м/с;  $q_{\max}$  – максимальна щільність ТП, авт/км.

Отже, визначення координат точки переходу правої частини діаграми в ліву частину, було отримано шляхом формалізації лівої та правої частини діаграми

$$V \cdot q_{\text{кр}} = c \cdot (q_{\max} - q_{\text{кр}}) . \quad (10)$$

Побудова діаграм ТП для кожного перегону ВДМ реалізує калібрування елементів ГІМ відповідно до категорії вулиць міста з метою отримання оцінки стану ДР при фактичних умовах руху шляхом поєднання нормативних та емпіричних параметрів ТП. Порівняння поточної інтенсивності та визначеної за діаграмою ТП на ГІМ надає ОПР необхідну інформацію для прийняття рішень та реалізації параметричного контролю.

Методика визначення параметрів побудови фундаментальної діаграми для практичного застосування була розроблена та надала адекватні результати при тестуванні на перегонах ВДМ м. Харків.

У **третьому розділі** формалізовано методи управління за технологією багаторівневого управління ДР, структуру адаптивного та випереджаючого управління (ВУ) ДР, визначено основи взаємозв'язку параметрів в транспортному процесі на рівнях управління ДР з оцінкою ефективності функціонування СУДР у містах.

З метою виявлення умов зміни теоретичної пропускної спроможності до фактичної розроблено принципову схему управління системою «ДУ-ТП» (рис. 6), яка відображає взаємозв'язки параметрів існуючих рівнів управління у процесі дорожнього руху.

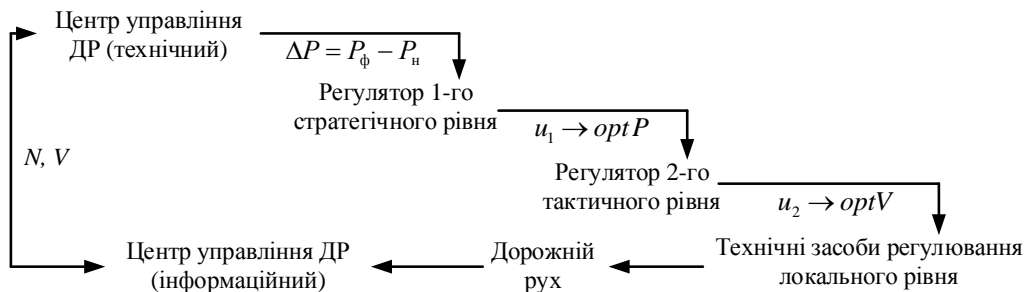


Рисунок 6 – Принципова схема управління системою ДУ-ТП

При заданому попиті 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 в регуляторі 1, як величину неузгодженості, яка впливає на процес дорожнього руху в цілому, коли поточна пропускна спроможність відрізняється від її нормативного значення

$$\Delta P = P_{\phi} - P_n . \quad (11)$$

Для забезпечення попиту на користування автомобільною дорогою сформовано керуючі впливи:  $u_1$  – для апарату обслуговування і  $u_2$  – безпосередньо для ТП. Керуючий вплив  $u_1$  визначено як величину розбіжності

нормативних параметрів ТП і фактичних, що змінюються у часі ( $t$ )

$$u_1(t) = \int_0^t f [P_\phi(t), P_n(0)] dt . \quad (12)$$

Визначення керуючих впливів  $u_2$  на ТП наведено залежністю

$$u_2(t) = \int_0^t f [V_\phi(t), P_\phi(t), V_p(t)] dt . \quad (13)$$

Розроблена стратегія управління ДР у містах передбачає розв'язання сформованих задач:

- визначення ефективності функціонування транспортної мережі міста;
- утримання необхідного рівня безпеки дорожнього руху, що існує як необхідна вимога у процесі управління ДР;
- надійність транспортної мережі: відмовою ВДМ вважаємо втрату властивості здійснювати головну функцію – забезпечення сталого руху транспорту за маршрутами;
- забезпечення екологічної безпеки навколишнього середовища.

Надалі було визначено шляхи розв'язання означених задач. У дійсний час для оцінки ефективності функціонування транспортних мереж використовується низка критеріїв, але наведені критерії дозволяють отримати лише часткову оцінку функціонування об'єкта.

Розроблено процедуру оцінки ефективності ВДМ за параметром дорожньо-транспортних витрат  $E_T$ , яка є узагальненою, бо надає оцінку ефективності ділянок всій мережі за рахунок основних параметрів ТП і ВДМ

$$E_T = \left( \frac{D_S}{M_S} + S_T \right) \cdot M_T \rightarrow \min , \quad (14)$$

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 перегонам.

За обраним критерієм  $E_T$  проведено оцінку стану організації ДР частини м. Харків, що обмежена вул. Пушкінською, вул. Сумською, площею 1-го Травня, вул. Весніна, вул. Короленка. Виявлено перегони з найбільшими дорожньо-транспортними витратами, які належать до магістральних вулиць Пушкінської та Сумської, мають ознаки ускладненого режиму руху із зниженою пропускною спроможністю. За отриманим результатом підтверджено доцільність застосування розробленого методу визначення ефективності ДР на стратегічному рівні.

Доведено, що принципи реалізації розподіленого управління ДР полягають у розробці методів адаптивного управління для урахування нерівномірності параметрів ТП, формування випереджаючого управління (ВУ) на підставі



визначення прогнозу зміни параметрів у часі, та розробці заходів управління для підвищення надійності ВДМ.

Для розробки заходів адаптивного управління на тактичному рівні із урахуванням нерівномірності та стохастичності параметрів ТП було формалізовано задачу адаптивного управління із урахуванням наявності двох класів адаптивних систем – систем, що само організуються, та систем, що самостійно налаштовуються.

Розроблено алгоритм адаптивного управління, що має дворівневу структуру: контур адаптації та узагальнюючий об'єкт, який містить всю незмінну частину системи управління: об'єкт управління (ДР) та технічні засоби регулювання. Формалізовано задачу адаптивного управління, вхідні  $X$ , вихідні  $Y$  та керуючий вплив  $U$  описуються наступним чином

$$x(t) = F_1(N, V, K_c, l, T_{cp}); \quad (15)$$

$$Y(t) = F_2(P, T_{ц}, V); \quad (16)$$

$$U(t) = F_3(T_{ц}, V), \quad (17)$$

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.

Вектор невідомих параметрів  $\bar{G}$  містить параметри світлофорного циклу, що входять у математичний опис об'єкта управління і відповідають оптимальному налаштуванню світлофорного регулювання

$$\bar{G} = (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5), \quad (18)$$

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,  $q_4$  – ефективність світлофорного циклу,  $q_5$  – наявність перешкод.

Таким чином, доцільно синтезувати алгоритм управління, що використовує вимірювані або обчислювані значення кожного  $q \in G$  для досягнення заданої цільової функції. Наданий опис задачі управління в умовах невизначеності, що вирішується поетапно: 1) ідентифікація вектора  $\bar{G}$ , 2) визначення алгоритму управління, що відповідає якості функціонування СУДР одним з розроблених методів; 3) формування цільової функції з урахуванням  $\bar{G}$ .

Нерівномірність параметрів ОУ передбачає наявність прогнозування параметрів, тому управління за прогнозом параметрів ОУ належить до ВУ – одного з типів управління ДР. Особливістю ВУ є той факт, що ВУ формується на базі інтелектуального комплексу технічних та програмних заходів. Проведено формалізацію ВУ. Відповідно до етапів процесу ВУ перший етап формується на

поточних параметрах інтенсивності ТП ( $x(k)$ ) із урахуванням обурюючих ( $d(k)$ ) та керуючих ( $u(k)$ ) впливів на ТП відповідно до залежності

$$N(k+1) = f(x(k), u(k), d(k)) \quad , \quad (19)$$

де  $N$  – інтенсивність ТП в момент часу  $k+1$ ;  $k$  – момент часу.

На другому етапі виконується оцінка ефективності на підставі цільової функції, що була визначена раніше із урахуванням прогнозних параметрів стану ТП ( $x^*(k)$ ) та параметрів управління

$$Q(t) = f(x^*(k), u(k)) \quad . \quad (20)$$

Метою процедури оптимізації 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 ( $l$ ):

$$\begin{aligned} Q(t) &\rightarrow opt \\ \text{при } u^*(k) &= [u(k), u(k+1), \dots, u(k+l)] \quad . \end{aligned} \quad (21)$$

Надалі необхідно отримати набір керуючих впливів для системи управління ДР. Відповідно до першого етапу ВУ досліджено методи прогнозування параметрів ТП.

Для розв'язання задачі прогнозування зміни інтенсивності ТП обрано метод апроксимації часового ряду у вигляді ступінчастого графіку функцій  $N(t)$ , що дозволяє одержувати опис прогнозної моделі інтенсивності ТП по значеннях у вузлових точках безперервною залежністю, та може бути застосований у комп'ютерному моделюванні ТП. Графік апроксимуючої функції може не проходити через вузлові точки, але наближати їх з деяким середньоквадратичним відхиленням. Для підвищення точності апроксимації прогнозу  $N(t)$  застосовано поліноми високих ступенів наступного вигляду

$$N(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n \quad , \quad (22)$$

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  $A$

$$\text{Norm}(A, p) = \left( \sum |A|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad \text{при } 1 \leq p \leq \infty \quad . \quad (23)$$

Задача пошуку найкращої поліноміальної моделі для прогнозування фактично є оптимізаційною: визначити ступінь апроксимуючого полінома за умовою не перевищення заданого значення помилки моделювання

$$\begin{aligned} n &\rightarrow \max \\ \text{при } \text{Norm}(\vec{e}, 2) &\leq \text{Norm}_0 \quad , \end{aligned} \quad (24)$$

де  $\text{Norm}_0$  – мінімальне значення помилки моделювання.

Проведено прогнозування  $N(t)$  у середовищі комп'ютерної математики MatLab. На підставі методів програмування у MatLab розроблено програмне забезпечення для автоматизованого процесу обробки вихідних даних і опису їх змін в часі. Комп'ютерне моделювання зміни інтенсивності ТП проведено на ділянці ВДМ м. Харків. У результаті моделювання отримані регресійні моделі зміни інтенсивності 4-го, 5-го та 6-го порядку із відповідним значенням критерію середньоквадратичного відхилення:  $\hat{\epsilon} = 6,9463$ ,  $\hat{\epsilon} = 6,7576$ ,  $\hat{\epsilon} = 6,6205$ ; зроблено висновок, що доцільним є використання функції зміни інтенсивності ТП у часі у вигляді поліному шостого ступеня.

Але на використання регресійної поліноміальної моделі існують певні обмеження. По-перше, всі крапки даних складно зв'язати однією поліноміальною залежністю. По-друге, загальна поліноміальна модель зайве громіздка для алгоритмів управління ТП. Для усунення цих недоліків застосовано метод інтервального моделювання. Розподілення функції на інтервали здійснено, виходячи з динаміки поведінки ТП на перегоні в залежності від горизонту прогнозу.

Алгоритм розрахунку згладжених значень у будь-якій  $i$ -й крапці ряду заснований на трьох величинах: значенні, що спостерігається,  $N_i$  у даній крапці ряду, розрахованому згладженому значенні для попередньої крапки ряду  $N_{i-1}$  і деякому заздалегідь заданому коефіцієнті згладжування  $W$ , постійному по всьому ряду. Для всіх крапок прогнозу діє правило обчислень

$$N_i^* = W \cdot N_i + (1 - W) \cdot N_{i-1}. \quad (25)$$

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. При високих значеннях  $W$  враховуються миттєві поточні спостереження інтенсивності, а при низьких значеннях згладжена величина визначається більш минулою тенденцією зміни інтенсивності, ніж поточним її значенням. Доведено, що метод комп'ютерного прогнозування доцільно застосовувати для добового прогнозу, а інтервального моделювання – на більш довгі періоди, а саме - на тиждень, місяць або сезон.

Задача надійності ВДМ пов'язана із втратою властивості виконувати головну функцію – забезпечення сталого режиму руху транспорту за маршрутами пересування. Тому виникнення заторового режиму на мережі міста збільшує час проїзду та впливає на показники транспортного процесу загалом. Для підвищення рівня надійності ВДМ було досліджено закономірності зміни параметрів ТП у часі із урахуванням наявності перешкод або впливу технічних засобів регулювання у міських умовах руху. Такий підхід до моделювання формує засоби ситуаційного управління ДР.

У процесі моделювання динаміки руху ТП у містах головною задачею є визначення впливу заторових ситуацій на працездатність ВДМ, які є наслідком

формування «ударних хвиль» (УХ). У процесі реалізації адаптивного алгоритму управління досліджено детерміновані моделі для визначення причин виникнення УХ, що змінюють стан ТП зі стаціонарного до імовірнісного та належать до макро- та мікромоделей. При аналізі безперервних моделей виявлено протиріччя, що швидкість ТП  $V(x, t)$  у точці  $x$  та у часі  $t$  є функцією щільності  $q(x, t)$ . Тоді

$$V(x, t) = V(q(x, t)), \quad (26)$$

де  $V(q(x, t))$  – швидкість руху потоку при щільності  $q(x, t)$ .

Вочевидь, що швидкість руху потоку у звичайних умовах наближається до  $V(q)$ . Але цей висновок не відповідає ситуації на транспортній мережі в процесі формування УХ, де швидкість ТП дорівнює 0, а щільність приймає максимальне значення. Враховуючи безперервність параметрів ТП, їх взаємозв'язок у конкретному перерізі  $x$  перегону ВДМ адекватно виражений відомою залежністю

$$V(x) = V_{\max} - k \cdot q(x), \quad (27)$$

де  $V_{\max}$  – максимальна дозволена швидкість руху на даній ділянці ВДМ, м/с;  $k$  – коефіцієнт, що характеризує зміну швидкості руху на ділянці при зміні рівня завантаження дороги рухом.

Шляхом диференціювання (27) визначено щільність ТП в перерізі перегону за залежністю

$$q(x) = q_{\max} \cdot e^{-\rho \cdot 10^{-7} \cdot (x - S)^2}, \quad (28)$$

де  $q_{\max}$  – максимальна щільність ТП, що відповідає пропускній спроможності ділянки ВДМ, авт./км;  $S$  – довжина ділянки ВДМ, м;  $\rho$  – коефіцієнт, що визначається граничними значеннями щільності ТП на ділянці ВДМ.

Після алгебраїчних перетворень та диференціювання отримано

$$\frac{dq}{dx} = -2 \cdot q_{\max} \cdot \rho \cdot 10^{-7} \cdot (x - S) \cdot e^{-\rho \cdot 10^{-7} \cdot (x - S)^2}. \quad (29)$$

Таким чином, отримана модель надає опис локальної щільності ТП. Для визначення характеру зміни локальної щільності ТП від довжини перегону прийнято граничні значення щільності ТП:  $q_{\min} = 5$  авт./км;  $q_{\max} = 100$  авт./км.

Графік зміни локальної щільності ТП на ділянці ВДМ довжиною 1500 м (максимальна довжина перегону за нормативними документами), наприкінці якої встановлено світлофорний пристрій, відповідно до (29), має вигляд (рис. 7).

Для побудови графіку застосовані нормовані значення функції  $[-0,1; 0,1]$ , а найбільше зростання локальної щільності спостерігається не на виході ділянки, а на відстані до місця установки світлофора ( $\approx 500$  м). Це дозволяє стверджувати, що черга АТЗ буде накопичуватися максимально швидко не наприкінці перегону, а на відстані від нього.

Ймовірно, це і є місце на перегоні, де щільність потоку вже починає зростати, а швидкість ще не знижена. Наприкінці ділянки ВДМ локальна щільність

в певний момент часу має від'ємне значення тому, що черга АТЗ певний час роз'їжджається та щільність ТП знижується.

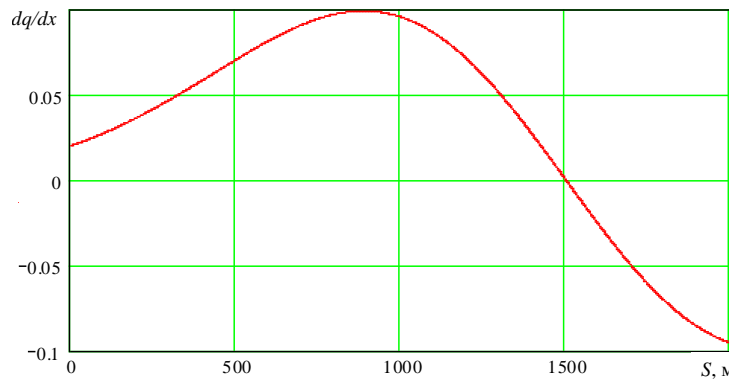


Рисунок 7 – Графік зміни локальної щільності по ділянці ВДМ

Отримана залежність надає опис процесу утворення УХ, дія якої спрямована назустріч ТП та відрізняється від існуючих моделей щільності. Таким чином, зроблено висновок, що впливати на параметри ТП необхідно на початку перегону до місця формування УХ, щоб призупинити її виникнення – такий спосіб належить до об'єктно-орієнтованої технології управління ДР у містах.

**У четвертому розділі** проведено формалізацію процесу контурного управління ТП на підставі визначених аналітичних залежностей групового руху ТП та оптимізації параметрів рівномірного руху ТП на ділянках ВДМ.

Для організації рівномірного руху ТП досліджено взаємодію груп АТЗ, які є основою руху на перегонах магістралей із урахуванням параметрів циклу регулювання на перехресті, часового інтервалу між групами АТЗ, їх часової довжини та середньої швидкості ТП. Це впливає на довжину перегону для забезпечення сталого руху ТП. Зв'язок інтенсивності на вході ( $N_1$ ) і на виході перегону ( $N'_1$ ) на підставі відомої умови, що час руху по перегону розподіляється за нормальним законом, визначено у вигляді

$$N_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} N'_1(t-\tau) \cdot e^{-\frac{(\tau-\bar{\tau})^2}{2\sigma}} dt, \quad (30)$$

де  $\bar{\tau}$  – середній час проїзду перегону довжиною  $l$  із дисперсією  $\delta$ , с;  $\tau$  – реальний часу проїзду, с.

Розглянуто зміну значень  $N_1(t)$  на інтервалі  $g \leq t \leq T$ , тому як в момент  $g$  починається рух з конфліктуєчого напрямку на перехресті та формується сумарна інтенсивність  $N_1(t) + N_2(t)$ . Припущено, 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 (30) виглядає як

$$N_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{t-P_i(0)}^t N_i e^{-\frac{(\tau-\bar{\tau})^2}{2\sigma}} dt, \quad g < t \leq P_i(0). \quad (31)$$

Інтервали між групами АТЗ ( $\Delta t_{ij}$ ) при русі по перегону визначено на підставі співвідношень:

$$\Delta t_{1,2} = g - P_1(0), \quad \Delta t_{2,1} = T - g - P_2(0). \quad (32)$$

У результаті перетворень отримано обмеження довжини перегону, що не буде впливати на розпад груп АТЗ, у вигляді нерівності

$$l \geq \max \left\{ 120 \cdot V \cdot \ln \frac{G}{P_1(0)}, 120 \cdot V \cdot \ln \frac{T - G}{P_2(0)} \right\} \quad (33)$$

де  $G$  – тривалість зеленої фази циклу;  $V$  – середня швидкість потоку;  $T$  – період циклу регулювання.

За проведеними розрахунками довжина перегону варіюється в інтервалі 170 м- 1200 м замість 250 м-1000 м за існуючими нормативними документами.

У роботі запропоновано рішення організації рівномірного руху ТП на контурі магістралей міста, що базується на збільшенні ефективного часу  $T$ , а саме – на моделюванні надмірного часу циклу на перехрестях магістралі та обмеженості ширини стрічки часу. Отримані результати вирішення оптимізаційної задачі мінімізації надмірного часу циклу світлофорного регулювання надали підставу для розробки контурного управління на мережі магістралей ВДМ.

З метою формалізації процесу контурного управління ТП сформовано багатомірний вектор, компонентами якого є параметри ТП і параметрів ВДМ у вигляді

$$x = f(N_{ij}, V, B_{\text{пч}}, t), \quad (34)$$

де  $B_{\text{пч}}$  – ширина проїзної частини магістралі (перехрестя і перегону), м.

У загальному вигляді затримку АТЗ на перехрестях магістралі ( $\mu$ ) визначено функціоналом, що залежить від початкових характеристик умов руху ( $x$ ) і керуючих впливів системи світлофорних об'єктів на магістралі ( $R$ )

$$\mu = \sum_{i=1}^h y^i(x, R) \rightarrow \min_{x, R \in \Omega}, \quad (35)$$

де  $h$  – кількість регульованих перехресть магістралі;  $y^i$  – функція, що визначає затримку транспортних засобів на  $i$ -му перехресті магістралі;  $\Omega$  – площина допустимих значень параметрів оптимізації.

Граничні умови, що визначають  $\Omega$ , поширюються на функції, які характеризують параметри ТП, умови руху та цикл світлофорного регулювання, які застосовані при вирішенні задачі оптимізації при двохсторонній обмеженості параметрів

$$\Omega: \bar{R}^+ \leq \bar{R} \leq \bar{R}^{++}. \quad (36)$$

Розмірність даної задачі складає  $h \times l$ , де  $h$  – кількість регульованих перехресть магістралі,  $l$  – кількість перегонів магістралі.

Для визначення параметрів контурного управління запропоновано програмне забезпечення, яке складається із наступних етапів: побудови геоінформа-

ційної моделі контуру ВДМ; визначення параметрів  $T$  з перерозподілом надмірного часу по напрямках; визначення мінімальної часової затримки на перехрестях; вирішення задачі оптимізації параметрів світлофорного регулювання; визначення швидкості руху ТП на перегонах контуру.

З метою отримання параметрів світлофорного регулювання рівномірного руху на мережі вирішено завдання оптимізації з обмеженнями. Цільова функція визначена як сума квадратів відхилень розрахункової швидкості на перегоні від нормативного значення швидкості або від швидкості руху на суміжному перегоні.

Тоді область обмеження параметрів оптимізації визначає допустимий інтервал зміни параметрів в натуральній множині значень кожного з параметрів, а критерій оптимізації має вигляд

$$\sum_{j=1}^m (D_j - F_j)^2 \rightarrow 0; \quad (37)$$

$$D_j = \begin{pmatrix} a_1 \cdot V_{C_H-C_K}^j \\ a_2 \cdot V_{C_K-C_H}^j \\ a_3 \cdot V_{C_H-C_K}^j \\ a_3 \cdot V_{C_K-C_H}^j \end{pmatrix}, F_j = \begin{pmatrix} a_1 \cdot V_{b,C_H-C_K}^j \\ a_2 \cdot V_{b,C_K-C_H}^j \\ a_3 \cdot V_{C_H-C_K}^{j-1} \\ a_3 \cdot V_{C_K-C_H}^{j-1} \end{pmatrix} \quad (38)$$

де  $V_{C_K-C_H}^j$  – швидкість у напрямку  $C_K-C_H$  на  $j$ -му перегоні,  $j = 1, \dots, m$ ;  $a_1$  – ознака наявності умови вирівнювання розрахункової швидкості в напрямку  $C_H-C_K$ .

Обґрунтовано та доведено доцільність вибору методу Нелдера-Міда для розв'язання формалізованої задачі умовної оптимізації керуючих параметрів контурного управління: балансу часу та зсуву фаз світлофорного регулювання при визначенні транспортної затримки у алгоритмі управління. Переваги методу полягають у тому, що він не вимагає диференційованості цільової функції, а використовує тільки значення функціоналу у вершині многогранника.

Обраний метод 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. Послідовність етапів проведення оптимізації у розробленому комп'ютерному забезпеченні наведено на рис. 8).



Рисунок 8 – Етапи проведення оптимізації у комп'ютерному забезпеченні

Оцінку ефективності контурного управління ДР проведено за частковими показниками ефективності: часові затримки АТЗ, обсяги викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище, витрати палива. Вибір показників ефективності залежить від мети управління, а саме від необхідності забезпечення рівномірного руху ТП на магістралях та підвищення екологічної безпеки міста.

У роботі проведено порівняльний аналіз означених показників ефективності при локальному управлінні на мережі магістралей та при контурному управлінні ДР із застосуванням програмного середовища PTV VISSIM.

У **п'ятому розділі** сформовано принципи динамічного управління ДР у містах, проведено мікромодельовання руху АТЗ в умовах підвищеної щільності, розроблено алгоритм визначення параметрів динамічного управління дорожнім рухом на ділянках ВДМ.

Основним завданням управління ДР на тактичному рівні СУДР є підвищення пропускної спроможності для досягнення мети стратегічного рівня управління, що сприяє оптимізації часу поїздки по всій транспортній мережі та підвищує її працездатність. Проведено дослідження параметрів умов руху АТЗ у ТП із визначенням аналітичних залежностей взаємодії параметрів макро- та мікро моделювання на підставі формалізації впливу перешкод, що формують складні умови руху у щільному потоці, та переваг управляючої дії наприкінці сформованого потоку у порівнянні із відомими керуючими впливами на його початок.

Для зменшення оптимального рівня навантаження транспортної мережі та запобігання переходу ТП у заторовий стан обрано спосіб динамічного управління ДР – спосіб, за яким проводиться зміна режимів руху на її окремих елементах.

Досліджено можливість керування швидкістю руху для його застосування у динамічному управлінні методами моделювання ДР. Для визначення швидкості підходу ТП до складної ділянки обрано математичну залежність (39), яка належить до макромоделей руху ТП та має у своєму складі параметр управління ( $u$ ), що надає спосіб оцінки впливу зміни швидкісного режиму на перегонах ВДМ на інші параметри ТП:

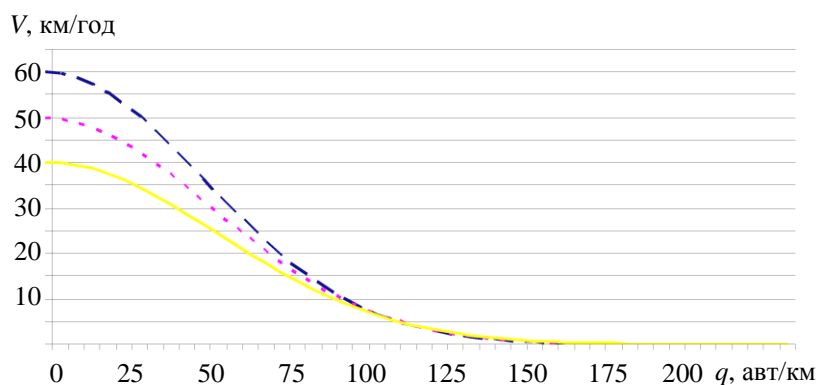
$$V(q, u) = V_{\max} \cdot u \cdot e^{-\left(\frac{q}{q_{\max}}\right)^2 \cdot \frac{u+1}{4}} \quad (39)$$

При моделюванні прийняті наступні умови: значення максимальної щільності ТП  $q_{\max} = 50$  авт./км, а швидкість вільного руху  $V_{\max} = 60$  км/год. Рівні керуючого сигналу  $u = 1,0; 0,83; 0,67$  відповідають швидкостям руху  $V_{\max} = 60$  км/год;  $V_{\max} = 50$  км/год;  $V_{\max} = 40$  км/год. Тоді на підставі (39) визначено аналітичну залежність інтенсивності ТП у вигляді

$$N(q, u) = q \cdot V_{cs} \cdot u \cdot e^{-\left(\frac{q}{q_c}\right)^2 \cdot \frac{u+1}{4}} \quad (40)$$

Графіки зміни швидкості та інтенсивності ТП від щільності при різних рівнях керуючого сигналу наведено на рис. 9 та рис. 10.

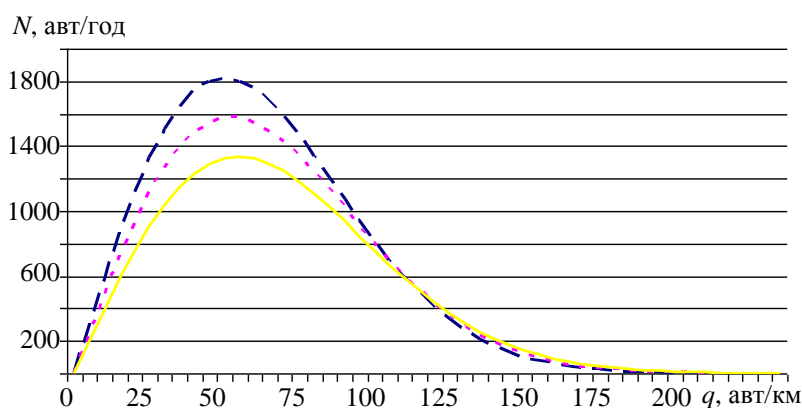




Криві відповідають наступним значенням управляючого сигналу:

— — —  $u = 1,0$ ; — — —  $u = 0,83$ ; — — —  $u = 0,67$ .

Рисунок 9 – Графік зміни швидкості руху від щільності потоку при різних рівнях управляючого сигналу  $u$



Криві відповідають наступним значенням управляючого сигналу:

— — —  $u = 1,0$ ; — — —  $u = 0,83$ ; — — —  $u = 0,67$ .

Рисунок 10 – Графік зміни інтенсивності ТП від щільності при різних рівнях управляючого сигналу  $u$

Отриманий результат доводить, що управляти інтенсивністю ТП засобом зміни швидкісного режиму руху необхідно до місця визначення критичної щільності, коли керуючий вплив ще має значення. Отримані моделі належать до типу безперервних макромоделей ТП, але для практичного застосування в СУДР при визначенні 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.

Основними параметрами мікромоделювання є дистанція безпеки ( $d$ ) між АТЗ у ТП та швидкість руху окремих АТЗ у потоці ( $V_{АТЗ}$ ), що впливає на дистанцію безпеки між транспортними засобами:

$$V_{АТЗ} = f(a, d), \quad (41)$$

де  $a$  – прискорення (уповільнення) АТЗ,  $\text{м/с}^2$ .

Визначено дистанцію безпеки як довжину гальмівного шляху автомобілю на

підставі мінімальної швидкості руху (13,9 км/год) та його прискорення із урахуванням технічних характеристик АТЗ. Тоді швидкість АТЗ в потоці визначено як

$$V_{AT3}(t) = 2,78 + \int_0^t a(x) dx, \quad (42)$$

де 2,78 – мінімально допустима швидкість руху, м/с (нижче 10 км/год водії приймають рішення про обстановку).

Розроблено мікромодель руху АТЗ у вигляді математичної моделі  $A$ , що являє собою динамічний масив однакових об'єктів транспортних засобів. Розмір даного масиву непостійний і може змінюватися в процесі моделювання від 0 до 4000. Розроблено імітаційну модель для реалізації матриці  $A$ , де опис кожного елементу масиву надано змінними: прискоренням ( $\dot{x}_n$ ), швидкістю ( $\ddot{x}_n$ ), поточною координатою АТЗ ( $x_n$ ) та лічильником часу імпульсу ( $j_n$ ):

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_n \\ \dot{x}_1 & \dot{x}_2 & \dot{x}_3 & \dots & \dot{x}_n \\ \ddot{x}_1 & \ddot{x}_2 & \ddot{x}_3 & \dots & \ddot{x}_n \\ j_1 & j_2 & j_3 & \dots & j_n \end{bmatrix}. \quad (43)$$

На кожному кроці інтегрування виконуються наступні дії:

$$1. \quad n = 0 \vee x_n > S_\Gamma \rightarrow \begin{cases} n = n + 1 \\ x_n = \dot{x}_n = \ddot{x}_n = 0 \end{cases}. \quad (44)$$

Варіювання зони генератора  $S_\Gamma$  дозволяє регулювати щільність ТП при моделюванні.

$$2. \quad \forall n : x_n > 12000 \rightarrow n = n - 1. \quad (45)$$

З математичної моделі виключаються всі автомобілі, координати яких більше 12000 (задана довжина ділянки ВДМ дорівнює 12 км).

$$3. \quad \forall n \rightarrow \begin{cases} (x_{n-1} - x_n > [d]) \wedge [\dot{x}_n < V_{\text{lim}}(x_n)] \rightarrow \ddot{x}_n = a(\dot{x}_n) \cdot a_{1\text{max}} \\ \dot{x}_n > V_{\text{lim}}(x_n) \rightarrow \ddot{x}_n = -0,25 \cdot a_{2\text{max}} \\ (x_{n-1} - x_n \leq [d]) \vee (x_{n-1} - x_n \leq d_{\text{min}}) \vee (j_n > 0) \rightarrow \ddot{x}_n = -a_{2\text{max}} \end{cases}, \quad (46)$$

де  $a_{1\text{max}}$  – максимальне уповільнення автомобіля, що їде попереду, м/с<sup>2</sup>;  $a_{2\text{max}}$  – максимальне уповільнення автомобіля, що їде позаду.

На цьому етапі моделювання проводиться урахування часу реакції водія, яке виконується наступним чином: якщо умови дозволяють підвищити швидкість (перша дія етапу 3), автомобіль отримує позитивне прискорення в залежності від власної швидкості; якщо поточна швидкість АТЗ вище безпечної, то застосовується штатне гальмування (друга дія етапу 3); у безпосередній близькості від попереднього АТЗ або в разі наявності перешкоди виконується повна зупинка АТЗ або гальмування (третя дія етапу 3).

$$4. \quad \forall n \rightarrow \begin{cases} \dot{x}_n = \dot{x}_n + \Delta t \cdot \ddot{x}_n \\ \dot{x}_n < 0 \rightarrow \dot{x}_n = 0 \\ x_n = x_n + \Delta t \cdot \dot{x}_n \\ j_n = j_n - \Delta t \\ j_n < 0 \rightarrow j_n = 0 \end{cases} . \quad (47)$$

З кроком інтегрування  $\Delta t$  визначається нова швидкість і координата транспортного засобу, а також зменшується лічильник часу імпульсу. На підставі запропонованої мікромоделі руху АТЗ розроблено імітаційну модель та програмне забезпечення опису поведінки АТЗ у ТП із утворенням УХ в інтегрованому середовищі розробки додатків Delphi 7.0.

До основних етапів імітаційного моделювання процесу утворення УХ належать: 1) моделювання руху АТЗ; 2) визначення параметрів світлофорного регулювання; 3) визначення параметрів ТП; 4) визначення параметрів руху АТЗ в потоці; 5) визначення положення АТЗ на ділянці ВДМ; 6) визначення швидкості руху АТЗ.

Дослідження процесу утворення УХ проведено на умовному перегоні ВДМ, за наявності світлофорного пристрою на відстані 1500 м від початку перегону та при граничних значеннях щільності ТП:  $q_{\min} = 5$  авт/км;  $q_{\max} = 100$  авт/км (рис. 11).

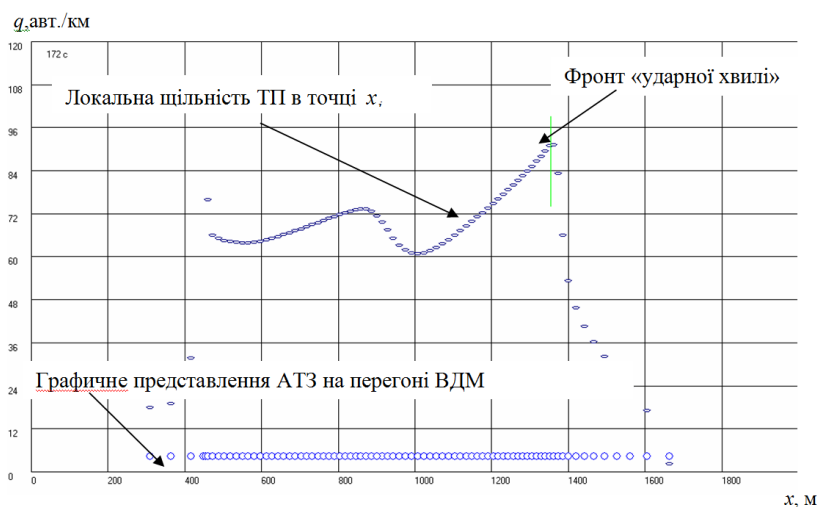


Рисунок 11 – Результати моделювання ударної хвилі ( $n = 80$  авт.,  $t = 172$  с)

Аналіз отриманих результатів поетапного моделювання руху щільного ТП на перегоні ВДМ дозволив зробити наступні висновки:

- за 50 с (172-202 с) фронт УХ переміщується на 230 м (з  $x = 1350$  м на  $x = 1120$  м), що відповідає швидкості поширення УХ  $4,6$  м/с =  $16,7$  км/год;
- УХ за фронтом поширюється повільніше, ніж перед ним.

При моделюванні руху із збільшенням інтенсивності ТП ( $N = 120$  авт/год), перші 200 м від світлофору УХ проходить зі швидкістю  $7,5$  м/с, наступні –  $8,3$  м/с. Таким чином, швидкість розповсюдження УХ знаходиться у зворотній залежності від щільності ТП і в прямій залежності від швидкості руху ТП. Тому

для попередження заторового стану ТП керуючий вплив динамічного управління необхідно спрямувати в кінець УХ.

Загальну схему імітаційного моделювання параметрів ТП для визначення параметрів динамічного управління наведено на рис. 12.

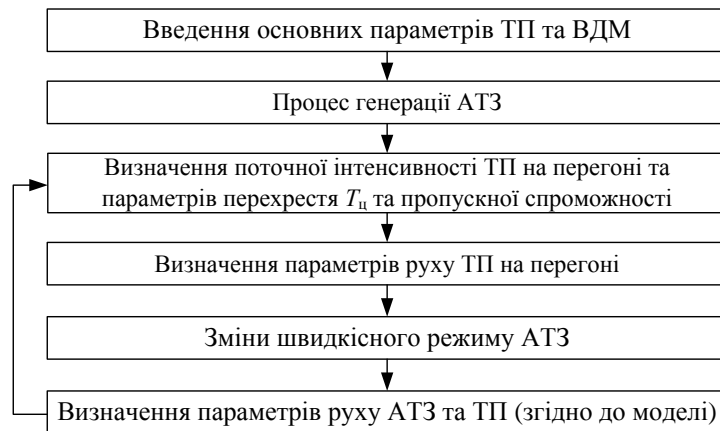


Рисунок 12 – Етапи імітаційного моделювання управління швидкістю ТП

На підставі наведеного опису блоків загальної схеми моделювання виділено робочі параметри імітаційної моделі: 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 (координати світлофорів, параметри циклу світлофорного регулювання у даному напрямку).

Вихідними параметрами імітаційної моделі є: 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 (місце установки дорожніх знаків регулювання); розрахункова швидкість руху ТП за наявності обмежень.

Визначені за даною методикою параметри руху ТП формують керуючі параметри динамічного управління ДР на перегонах ВДМ; методику доведено до практичного застосування.

**У шостому розділі** наведені результати модельних експериментів на ділянках ВДМ м. Харків, що підтвердили доцільність застосування динамічного та контурного управління ДР у містах.

Для управління ДР на стратегічному рівні СУДР розроблено спеціальне програмне забезпечення для моделювання параметрів системного управління на контурі магістралей м. Харків. Отримані параметри системного світлофорного регулювання на перехрестях контуру ВДМ та визначено швидкість руху, що забезпечує безупинний проїзд ТП по контуру.

У програмному середовищі будується ГІМ об'єкту дослідження. Контур ВДМ утворено вулицями: вул. Сумська (5, 1, 2, 26), вул. Я. Мудрого (26, 4, 22, 17), вул. Алчевських (27, 21, 22), вул. Чернишевського (7, 4), вул. Свободи (27, 7, 6, 5), вул. Пушкінська (17, 16, 15, 14, 13, 12). У дужках вказані відповідні примикання другорядних напрямків руху, ГІМ виділеного контуру ВДМ м. Харків наведено на рис. 13.

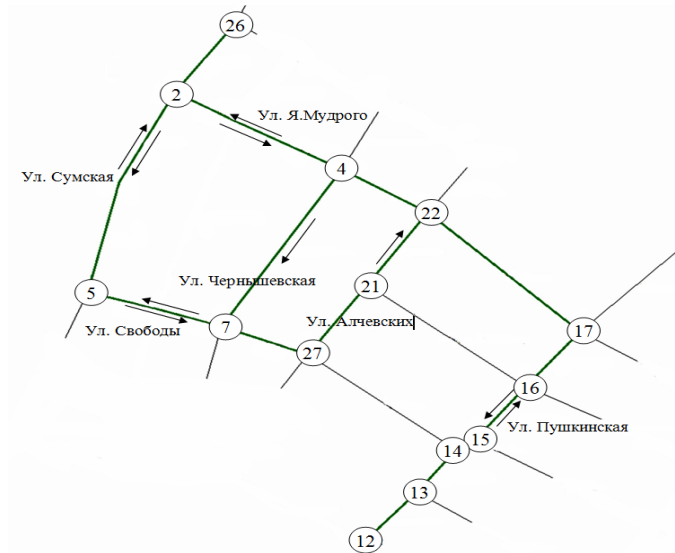


Рисунок 13 – ГІМ контура ВДМ м. Харків

Програмне забезпечення містить підсистеми для опису перехресть і перегонів, скріншоти робочих вікон програми наведено на рис. 14 та рис. 15.

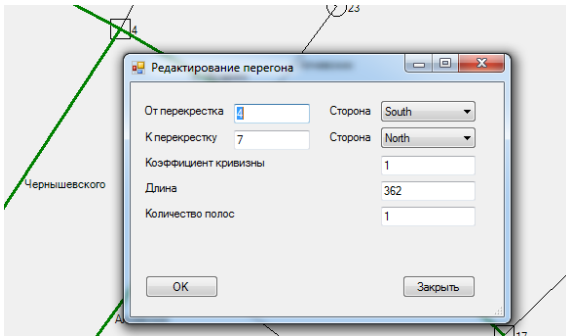


Рисунок 14 – Інтерфейс введення даних «Редагування перегону»



Рисунок 15 – Інтерфейс введення даних «Перехрестя»

Результатом узгодження параметрів циклів світлофорного регулювання на перехрестях із встановленою швидкістю руху (50 км/год) і мінімізацією затримки є діаграма координації по вул. Я. Мудрого (рис. 16).

Аналогічно були побудовані діаграми координації по всіх магістралях обраного контуру ВДМ.

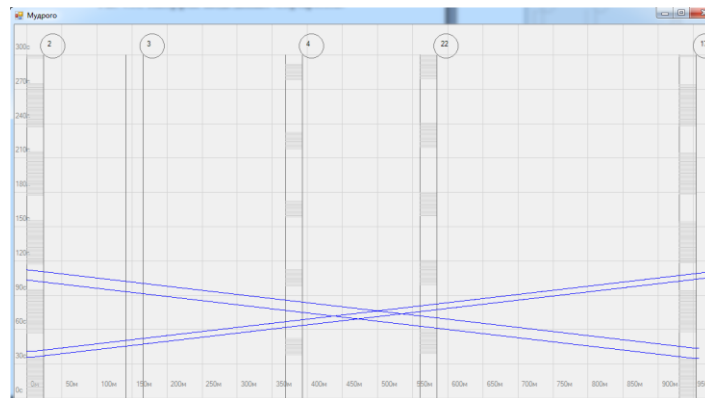


Рисунок 16 – Діаграма координації параметрів управління ТП по вул. Я. Мудрого

Визначення ефективності організації рівномірного руху по контуру ВДМ м. Харків проведено у програмному середовищі PTV VISSIM. Результати порівняльного аналізу даних імітаційного моделювання при локальному та контурному управлінні свідчать про зменшення часових затримок руху АТЗ (за період моделювання) на 13%, викидів забруднюючих речовин у повітря – на 15%, витрат палива – на 15%. 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.

Об'єктом експериментальних досліджень динамічного управління ДР обрано перегін ВДМ м. Харків – частина просп. Науки, на ділянці від перетину з вул. Отакара Яроша до перетину з вул. Мінською. Збільшення інтенсивності ТП при постійному циклі регулювання призводить до накопичення АТЗ у стоп-лінії та утворюється черга АТЗ. В кожний наступний цикл регулювання довжина черги збільшується (рис. 17), що викликає утворення УХ.



Рисунок 17 – Формування УХ у ТП

На рис. 18 наведено результат моделювання руху без затору на перегоні при реалізації динамічного управління.

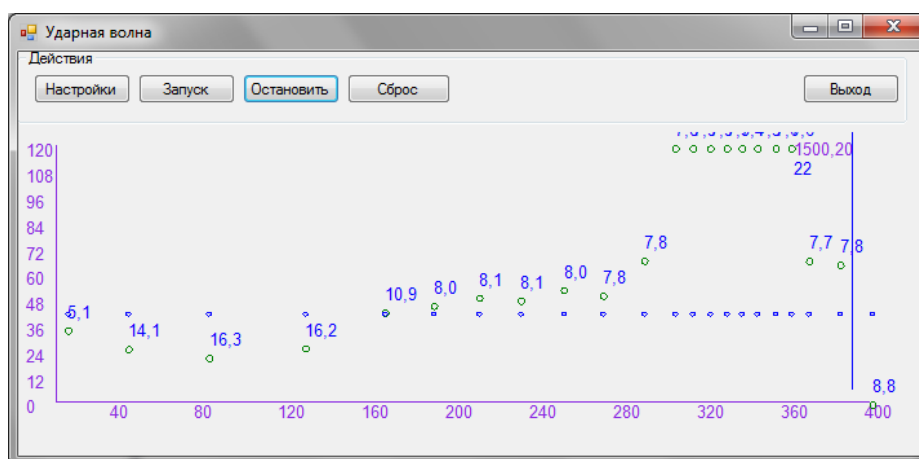


Рисунок 18 – Процес руху ТП без затору

Шляхом порівняльного аналізу значень часу проїзду по ділянці, отриманих за допомогою натурних досліджень на реальній ВДМ та визначених за запропонованою моделлю, підтверджено адекватність розробленої імітаційної моделі

руху АТЗ у потоці (середнє відносне відхилення значень часу проїзду по досліджуваній ділянці ВДМ не перевищує 5 %).

Обґрунтовано зниження швидкості руху по перегону до 10 км/год. Отриманий результат впровадження динамічного управління ТП підтверджує, що внаслідок зниження швидкості на ділянці ВДМ перехід ТП в заторовий стан не відбувається, час пересування транспорту скорочується, що безпосередньо впливає на ефективність функціонування перегону ВДМ.

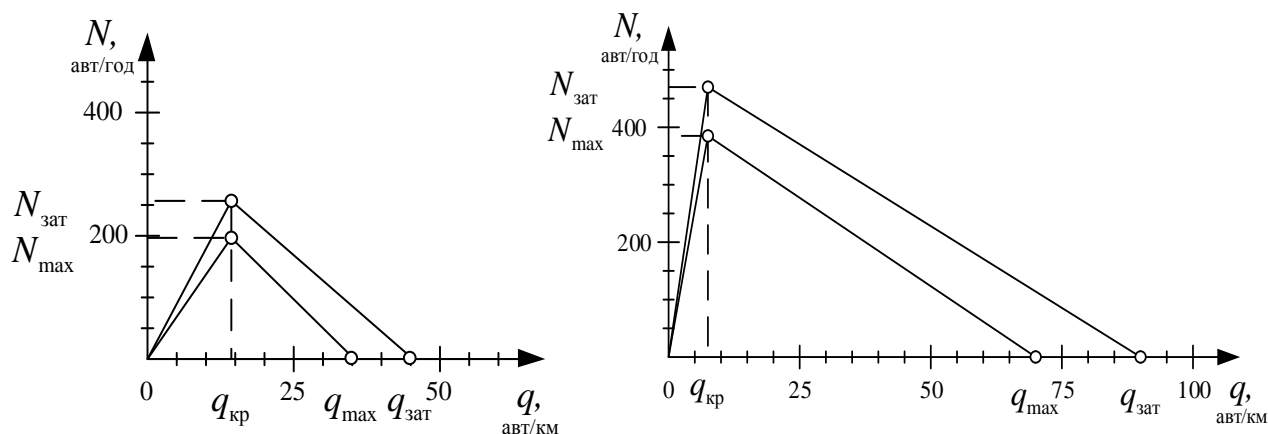
Під час проведення експерименту було досліджено природу формування УХ та довжину їх розповсюдження по перегонах просп. Науки, які впливають на формування заторів та зменшення пропускної спроможності ВДМ. Доведено, що в результаті впровадження динамічного управління ДР шляхом усунення заторових ситуацій час проїзду експериментальної ділянки зменшується у середньому на 22 % за чотири години дослідження (години «пік»).

З метою формування баз моделей взаємодії основних параметрів ТП для рівня прийняття рішень в СУДР побудовано вибіркові моделі калібрування перегонів частини ВДМ м. Харків. Схему об'єкту дослідження наведено на рис. 13, а визначені параметри для побудови діаграм ТП вибірково для вул. Я. Мудрого представлено у табл. 1 (параметри для інших перегонів та діаграми ТП обраного контуру наведені у роботі).

Таблиця 1 – Визначені параметри для побудови діаграми ТП по перегону ГІМ

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. Я.Мудрого	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 двох діаграм ТП для вул. Я. Мудрого побудовано для різних умов рух – для однієї та для двох смуг (рис. 19 а,б).



а) для однієї смуги руху

б) для двох смуг руху

Рисунок 19 – Діаграма ТП для ділянки вул. Я. Мудрого

Отриманий результат за діаграмою ТП (рис. 17 а) свідчить про наявність заторового режиму руху ( $N_p \gg N_{\text{зат}}$ ) на ділянці. Реальна транспортна ситуація

підтверджує модельний експеримент. Діаграма руху ТП (рис. 17 б) на двох смугах перегону доводить, що  $N_{\max} < N_p < N_{\text{зат}}$ . Саме такий діапазон зміни інтенсивності ТП необхідно утримувати ОПР засобами управління для попередження заторового стану ВДМ. Існуючі умови руху обумовлюють розбіжності у визначенні параметрів моделей для різних станів ділянки дослідження, що підтверджує адекватність розроблених діаграм ТП.

## 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 магістралях 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 вибіркові 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 визначен-

ні параметрів моделей для різних станів ділянки дослідження, що підтверджує адекватність розроблених діаграм ТП.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ 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 «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., 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 «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., 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 «ХПІ»*. 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 І.С., Капинус С.В. Анализ структуры систем поддержки принятия решений в АСУДД. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 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

дорожнім 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. Nahanov, W. Gharibi, L.S. Abramova, S. Chumachenko, E. Litvinova, A. Nahanova, 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 «ХПІ»*. 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., Птиця 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., Птиця 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., Птиця 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., Птиця 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 Nahorni, 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., 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, 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 редукиции частных коэффициентов

аварійності 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., Птиця 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., Птиця 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. 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, 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., Капинус 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., 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 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., 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. 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 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. 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., Капинус 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., Капинус С.В. Визначення балансу між параметрами дорожнього руху: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 88932. Державна служба інтелектуальної власності. 24.05.19.

## АНОТАЦІЯ

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.01 – транспортні системи. – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2020.

Дисертація присвячена вирішенню проблеми підвищення ефективності дорожнього руху із забезпеченням пропускнуєї спроможності вулично-дорожньої мережі міста шляхом реалізації безперервного та безпечного транспортного процесу на підставі системного підходу до розробки теоретичних основ управління дорожнім рухом. Запропоновано концептуальний підхід до формування гібридних систем управління із розподіленням функцій управління за рівнями ієрархії. Синтезовано ромбовидну структуру системи управління, методи контурного та динамічного управління із урахуванням умов невизначеності параметрів та багатокритеріальності об'єкту управління. Розроблено стратегію проектування систем управління, що заснована на формалізації методів управління для стратегічного, тактичного, локального та рівня прийняття рішень із урахуванням взаємозв'язку моделей транспортного потоку на рівнях управління та визначенням кількісної оцінки ефективності управління. Проведено модельні експерименти визначення параметрів контурного та динамічного управління на вулично-дорожній мережі м. Харків за допомогою розроблених імітаційних моделей, адекватність яких підтверджено.



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

## АННОТАЦІЯ

**Абрамова Л.С.** Теоретические основы формирования распределенных систем управления дорожным движением в городах. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.01 – транспортные системы. – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2020.

В диссертационной работе представлено решение научной проблемы повышения эффективности дорожного движения путем развития и совершенствования систем управления на базе разработанных теоретических основ формирования уровней управления согласно методам теории автоматического управления – робастного, адаптивного и интеллектуального управления на уровне принятых решений. Разработаны теоретические основы структурного синтеза и алгоритмов управления дорожным движением, соответственно уровням управления от локального до уровня принятия решений при разделении информационных и технологических параметров объекта в условиях неопределенности состояния объекта управления и его многокритериальности. Предложена принципиальная схема гибридной системы управления с применением робастного адаптивного регулятора и структура интеллектуальных агентов для разработки специального программного обеспечения систем управления.

Впервые разработаны модели взаимодействия параметров транспортного потока в городском режиме движения при образовании «ударных волн» аналитическими и имитационными методами моделирования, что позволяет определить не только скорость распространения, но и место их образования. На основе полученных результатов разработана методология определения параметров динамического управления скоростью транспортного потока для повышения пропускной способности загруженных участков магистрали, что позволяет уменьшить время проезда по перегону без препятствий - постоянных (регулируемые пересечения) и случайных (транспортные заторы). Разработан алгоритм имитационного моделирования движения автомобиля в плотном потоке с учетом ускорения, скорости движения, расстояния до препятствия и реакции водителя при вождении в плотном потоке.

Разработана концепция равномерного движения транспортного потока на контуре магистралей улично-дорожной сети. Получены аналитические зависимости параметров движения групп автотранспортных средств с учетом параметров цикла светофорного регулирования, временного интервала между группами и временной длины групп. Такой подход позволил увеличить эффективное время разрешающих фаз для проезда по контуру улично-дорожной сети путем оптимизации избыточного времени цикла. Для определения управляющих параметров контурного управления предложен алгоритм имитационного моде-

лирования с решением оптимизационной задачи методом Нелдера-Мида. Разработано программное обеспечение «Контур». Предложена геоинформационная модель улично-дорожной сети города с определением географических координат перекрестков и перегонов, для калибровки которых получены транспортные модели определения оптимальной интенсивности движения на основании модификации фундаментальной диаграммы транспортного потока.

В результате модельного эксперимента на улично-дорожной сети г. Харьков на основании расчета параметров системного светофорного регулирования на перекрестках контура сети и равномерной скорости движения 50 км/ч получено уменьшение временных задержек движения транспорта на 13 %, расхода топлива на 15 %, а также уменьшение выбросов загрязняющих веществ на 15 %. Для определения эффективности динамического управления движением проведен модельный эксперимент на просп. Науки, г. Харьков. В результате устранения заторовых ситуаций время проезда экспериментального участка уменьшается в среднем на 22 % за четыре часа исследования.

**Ключевые слова:** система управления, дорожное движение, структура управления, уровни управления, алгоритмы управления, распределенное управление, имитационные модели, микро- и макромоделли, модельный эксперимент.

## ABSTRACT

**Abramova L.** Theoretical bases of distributed traffic control systems formation in cities. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for obtaining a scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.22.01 – transport systems. – Kharkiv National Automobile and Highway University, Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kharkiv, 2020.

The thesis is dedicated to the problem of traffic efficiency increasing solution with maintenance of city road network capacity by implementation of continuous and safe transport process on the basis of the systematic approach to development of traffic management theoretical bases. A conceptual approach to the formation of hybrid control systems with the distribution of control functions by hierarchy levels is proposed. The diamond-shaped structure and algorithms of parametric and situational control in the conditions of parameters uncertainty and multicriteria of the control object are synthesized. A strategy for management systems designing is developed, based on the formalization of management methods for strategic, tactical, local and decision-making levels, taking into account the relationship of transport flow models at management levels and quantifying management effectiveness. Model experiments are performed to obtain the parameters of contour and dynamic control at the road network in Kharkiv, Ukraine with the help of developed simulation models, the adequacy of which is confirmed.

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