

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»

На правах рукопису

ЗУБАЧИК РОМАН МИХАЙЛОВИЧ

УДК 656.13.053

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРІОРИТЕТНОГО РУХУ ДЛЯ
МАРШРУТНИХ АВТОБУСІВ НА ВУЛИЧНО-ДОРОЖНІЙ МЕРЕЖІ МІСТА

05.22.01 – транспортні системи

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Науковий керівник
Вікович Ігор Андрійович
доктор технічних наук, професор

Львів – 2015

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 Аналіз методів забезпечення пріоритетного руху на влучно-дорожній мережі міста та шляхи вдосконалення на ній роботи маршрутних автобусів	12
1.1 Визначення функцій спеціальних смуг та їх видів.....	12
1.2 Визначення існуючих методів забезпечення пріоритету на регульованих перехрестях	18
1.3 Особливості впровадження системи швидких автобусних перевезень на вулично-дорожній мережі міста	29
1.4 Висновки до розділу	33
РОЗДІЛ 2 Визначення та обґрунтування критеріїв впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць	34
2.1 Визначення існуючих критеріїв впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць	34
2.2 Визначення та обґрунтування мінімального обсягу пасажиропотоку для впровадження спеціальних смуг	38
2.3 Визначення стану транспортних потоків на непріоритетних смугах	48
2.4 Висновки до розділу	54
РОЗДІЛ 3 Розроблення методу забезпечення просторово-часового пріоритету на регульованих перехрестях.....	55
3.1 Обґрунтування методу «спеціальна смуга у зоні перехрестя» та визначення його типів	55
3.2 Визначення геометричних параметрів спеціальної смуги, яка впроваджується у зоні перехрестя	60
3.2.1 Визначення оптимальної довжини спеціальної смуги на підході до ізолюваного перехрестя	66

3.2.2 Визначення оптимальної довжини спеціальної смуги на підході до координованого перехрестя	82
3.3 Визначення межі області ефективного застосування методу «спеціальна смуга у зоні перехрестя»	105
3.4 Висновки до розділу	116
РОЗДІЛ 4 Експериментальні дослідження щодо впровадження спеціальних смуг для маршрутних автобусів та їх практична реалізація	119
4.1 Розробка транспортної моделі міста у середовищі VISUM	119
4.2 Дослідження ефективності запропонованих критеріїв впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць у реальних умовах	134
4.3 Дослідження ефективності застосування методу «спеціальна смуга у зоні перехрестя» на реальному перехресті.....	142
4.4 Висновки до розділу	149
ВИСНОВКИ.....	150
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	152
Додаток А Розрахункові формули для визначення максимальної довжини черги транспортних засобів	163
Додаток Б Інтерфейс імітаційної моделі для визначення черги на ізольованому перехресті	167
Додаток В Загальні характеристики моделі пропозиції міста Львова.....	168
Додаток Г Анкета для опитування	169
Додаток Д Результати опитування щодо транспортної рухомості населення міста Львова.....	173
Додаток Е Місця проведення натурних досліджень на вуличній мережі міста...	178
Додаток Ж Блок-схема сукупності адаптивних алгоритмів керування	179
Додаток К Акти впровадження результатів дослідження.....	185

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВДМ – вулично-дорожня мережа

АСКДР – автоматизована система керування дорожнього руху

ДР – дорожній рух

ТЗ – транспортний засіб

ТП – транспортний потік

ДУ – дорожні умови

ОДР – організація дорожнього руху

ГТ – громадський транспорт

ІТ – індивідуальний транспорт

МА – маршрутний автобус

ВСТУП

Внаслідок політичних і соціально-економічних змін впродовж двох останніх десятиліть у країнах східної Європи, в тому числі і в Україні, істотно змінились транспортні потреби населення та їх суть. Це насамперед проявилось у швидкому зростанні кількості індивідуальних транспортних засобів у великих і значних містах, що, своєю чергою, породило низку транспортних проблем, зокрема таких як перевантаження вулиць дорожнім рухом, збільшення витрат часу на поїздки та кількості вимушених зупинок, зростання аварійних ситуацій і дорожньо-транспортних подій, виникнення заторів, хімічного та шумового забруднення довкілля тощо.

Аналізуючи ситуацію, що склалася за останні роки, можна стверджувати, що збільшення кількості транспортних засобів (ТЗ) в Україні буде продовжуватись, не зважаючи на зменшення чисельності населення. Для ефективного функціонування індивідуальних ТЗ у містах необхідно, щоб між їх кількістю та вулично-дорожньою мережею (ВДМ) не існувало диспропорції. ВДМ міст зазвичай відстають від розвитку рухомого складу, в результаті чого функціонують у перевантаженому стані, про що свідчать регулярні затори. З огляду на це, зниження завантаження ВДМ рухом є сьогодні однією з найгостріших проблем для міст України і стала найактуальнішою як у транспортній, так і в соціально-економічній сферах.

Проблему такого характеру вирішують шляхом реконструкції цих мереж, або раціональним її використанням, що реалізується за допомогою автоматизованих систем керування дорожнім рухом (АСКДР) та інших технічних засобів організації дорожнього руху (ОДР). Однак не завжди у міських умовах можна ефективно реалізувати ці підходи. Перший через функціональні характеристики вуличної мережі, значні капіталовкладення та затрати часу, другий – не завжди дає потрібні результати, оскільки не змінює проблему кардинально, а лише її оптимізує.

Тому останнім часом, зокрема у країнах східної Європи, значного поширення набув третій підхід, який полягає в ефективній організації громадського пасажирського транспорту, що в підсумку дозволяє скоротити обсяги користування індивідуальними автомобілями, які складають домінуючу частку в існуючих транспортних потоках і цим самим знизити завантаження вуличних мереж.

Як показує досвід багатьох міст Європи та інших континентів, в яких проблема прогресу автомобілізації виникла набагато раніше, впливання коштів у будівництво нових доріг і вулиць та їх розширення призвело до ще більших перевантажень вуличних мереж, заторів та втрат часу на переміщення. Збільшення кількості автомобілів одночасно посилює або навіть загострює багато інших проблем, зокрема організацію паркування ТЗ, зростання кількості аварійних ситуацій і дорожньо-транспортних подій, забруднення довкілля тощо. Ці проблеми, зокрема забруднення довкілля, зумовлюють переїзд мешканців міст, на їх околиці, що веде до розширення меж міста, збільшення відстані і тривалості поїздок, а також їх кількості. В результаті населення перетворюється з суспільства мультимодального (у якому споживачі мають безліч альтернатив для здійснення поїздок або переміщень) на залежне від індивідуальних транспортних засобів. Як наслідок, такі міста перебувають у замкнутому колі, де збільшення кількості доріг призводить до збільшення кількості ТЗ.

Незважаючи на очевидність усіх цих проблем у недалекому майбутньому багато міст країн, що розвиваються повторюють або впритул підходять до тих самих помилок. У той же час є випадки, коли міста «перестрибують» або «пропускають» еру домінування індивідуальних ТЗ, а відповідно і її наслідки. Такий розвиток міст був досягнутий завдяки підвищенню якості роботи громадського транспорту та створення умов для немоторизованих видів транспорту. Його реалізація потребує набагато менших фінансових ресурсів, які, як правило, є обмеженими у містах, що розвиваються.

Сьогодні у містах України, серед усіх видів міського громадського транспорту, існує гостра необхідність у розвитку саме міських маршрутних

автобусів, оскільки вони є основними та найпоширенішими видами маршрутного пасажирського транспорту міського населення.

Для підвищення якості перевезення і транспортного обслуговування пасажирів цим видом транспорту на ВДМ, потрібно покращувати його конкурентоздатність шляхом надання переваги у русі по відношенню до інших учасників руху. Така перевага реалізується за допомогою застосування методів забезпечення пріоритетного руху, до яких насамперед відносяться впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць та забезпечення пріоритету на перехрестях.

Впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць ВДМ залежить від багатьох чинників, однак умови їх впровадження, сьогодні, визначаються загальними і недостатньо точними рекомендаціями, тоді як щодо самої доцільності впровадження спеціальних смуг фактично відсутні адекватні і чіткі критерії.

Забезпечення пріоритету на регульованих перехрестях є одним із основних завдань при організації пріоритетного руху автобусів на ВДМ міста, оскільки саме на них виникають найбільші їх затримки. До умов, в яких складно забезпечити пріоритетний проїзд, особливо просторово-часовий, відносять регульовані перехрестя, підходи яких мають не більше двох смуг руху в одному напрямку.

Наразі в містах України впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць для автобусів та застосування методів, що забезпечують їм пріоритет на регульованих перехрестях, перебувають на початковому етапі. Тому для поширення їхнього застосування є потреба у їх вивченні, дослідженні та вдосконаленні.

Зазначене вище і визначає **актуальність теми** дисертаційної роботи та дозволяє сформулювати тему як: Вдосконалення методів забезпечення пріоритетного руху для маршрутних автобусів на вулично-дорожній мережі міста.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано в рамках наукового напрямку кафедри транспортних технологій та науково-дослідної роботи «Оптимізація параметрів вулично-дорожньої мережі і

пішохідно-транспортних потоків та організації автомобільних перевезень» (номер державної реєстрації 0113U001348), відповідно до Транспортної стратегії України на період до 2020 року (схваленої розпорядженням КМУ від 20.10.2010 року № 2174-р) та Концепції державної цільової програми підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2016 року (схваленої Постановою КМУ від 25.03.2013 № 294).

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є вдосконалення методів забезпечення пріоритетного руху на вулично-дорожній мережі міста для маршрутних автобусів шляхом визначення та обґрунтування критеріїв впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць і розробка методу, що забезпечує їм просторово-часовий пріоритет на регульованих перехрестях.

Для досягнення мети у роботі визначені такі основні завдання дослідження:

1. Провести аналіз методів забезпечення пріоритетного руху для маршрутних автобусів на вулично-дорожній мережі міста.
2. Визначити та обґрунтувати критерії впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць.
3. Розробити метод, що забезпечує просторово-часовий пріоритет на регульованих перехрестях, встановити межі області його ефективного застосування і дослідити особливості функціонування на реальному перехресті.
4. Визначити оптимальну довжину спеціальної смуги на підході до ізольованого та координованого регульованого перехрестя на основі імітаційної моделі максимальної довжини черги транспортних засобів.
5. Розробити транспорту модель міста у середовищі VISUM і з її використанням оцінити доцільність впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць за визначеними критеріями.

Об'єктом дослідження є дорожній рух на перегонах вулиць і регульованих перехрестях вулично-дорожньої мережі міста.

Предметом дослідження є вдосконалення методів забезпечення пріоритетного руху для маршрутних автобусів на перегонах вулиць і регульованих перехрестях вулично-дорожньої мережі міста.

Методи дослідження. Методи теорії ймовірності, математичної статистики та випадкових процесів, імітаційного моделювання і мова програмування Objective-C використовуються для визначення оптимальної довжини спеціальної смуги на підході до ізольованого та координованого регульованого перехрестя на основі значень максимальної довжини черги транспортних засобів. Середовище VISSIM використовується для встановлення межі області ефективного застосування методу «спеціальна смуга у зоні перехрестя» і для дослідження ефективності його функціонування на реальному перехресті, а програмне середовище VISUM – для створення транспортної моделі міста і встановлення з її використанням обсягів пасажиропотоків, значень коефіцієнта заповнення ТЗ пасажирами, прогнозів зміни інтенсивності руху на неперіоритетних смугах та шляхової швидкості автобуса за відсутності і наявності спеціальних смуг на перегонах вулиць.

Наукова новизна отриманих результатів:

- обґрунтовано, що основний показник як критерій впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць є не інтенсивність руху автобусів, а мінімальний обсяг пасажиропотоку, для визначення якого запропоновано емпіричну формулу, що враховує особливості дорожньо-транспортних умов на перегонах;
- розроблено метод «спеціальна смуга у зоні перехрестя», впровадження якого дає змогу зменшити затримки автобусів на регульованих перехрестях, особливо, якщо підходи до них мають не більше двох смуг руху в одному напрямку;
- отримав подальший розвиток підхід щодо створення імітаційної моделі для визначення максимальної довжини черги ТЗ на підході до ізольованого регульованого перехрестя, яка відрізняється від існуючих використанням закону Гіпер-Ерланга для розподілу часових інтервалів між ТЗ, які надходять до перехрестя, що дає змогу підвищити адекватність результатів моделі;
- вперше отримано аналітичний опис процесу формування черги на суміжному у напрямку координації регульованому перехресті та запропоновано

алгоритм для розрахунку максимальних їх значень за допомогою імітаційного моделювання.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблено методику щодо застосування спеціальних смуг на перегонах вулиць, яка включає запропоновані критерії впровадження, з використанням яких можна об'єктивно оцінити доцільність їх функціонування. Розроблено імітаційні моделі для визначення максимальної довжини черги ТЗ на підході до ізольованого і координованого перехрестя, які можуть використовуватися як для визначення оптимальної довжини спеціальної смуги на підході до перехрестя, так і для аналізу роботи регульованих перехресть за показником максимальної довжини черги. Розроблено транспортну модель міста у VISUM, з використанням якої можна виконувати техніко-економічний аналіз ефективності заходів транспортної інфраструктури.

Результати дисертаційного дослідження використані в Управлінні транспорту та зв'язку Львівської міської ради під час оцінювання доцільності впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць та забезпечення пріоритету на регульованих перехрестях і у Львівському комунальному підприємстві «Львівавтодор» при техніко-економічному аналізі заходів транспортної інфраструктури, що виконуються у середовищі VISUM з використанням розробленої транспортної моделі міста Львова, а також у навчальному процесі в Національному університеті «Львівська політехніка» на кафедрі транспортних технологій для студентів спеціальності 7(8).07010104 «Організація і регулювання дорожнього руху».

Особистий внесок здобувача. Усі положення та результати дисертаційної роботи отримані автором особисто і наведені у роботах [6-13, 25, 26]. У спільних публікаціях автор визначив функції спеціальних смуг [6] та запропонував критерії їх впровадження на перегонах [7, 26], розробив метод «спеціальна смуга у зоні перехрестя» [9] та встановив межі області його ефективного застосування [12] і провів модельний експеримент щодо його ефективності [13], розробив моделі для визначення максимальної черги ТЗ на підході до ізольованого [10] та координованого [11] перехрестя, провів аналіз координованого керування

дорожнім рухом [25], описав методику для моделювання попиту на громадський транспорт у середовищі VISUM [8].

Апробація результатів дисертації. Особисті положення дисертації доповідалися на: III Міжнародній науково-практичній конференції «Логістика промислових регіонів» (06 – 09 квітня 2011 р., м. Донецьк, ДААТ); Міжнародній науково-практичній конференції «Забезпечення безпеки та комфорту дорожнього руху: проблеми та шляхи розв’язання» (17 – 18 травня 2011 р., м. Харків, ХНАДУ); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (24 – 26 жовтня 2011 р., м. Вінниця, ВНТУ); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Безпека дорожнього руху: правові та організаційні аспекти» (17 – 18 листопада 2011 р., м. Донецьк, ДААТ); III Міжнародній науково-практичній конференції «Проблема розвитку транспортних систем і логістики» (3 – 8 травня 2012 р., м. Євпаторія, СХУ ім. В. Даля); II Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених та студентів «Проблеми і перспективи розвитку автомобільної галузі» (18 – 19 вересня 2013 р., м. Донецьк, ДААТ); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (21 – 23 жовтня 2013 р., м. Вінниця, ВНТУ).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 19 наукових праць, з них 9 статей у фахових наукових виданнях України (2 – одноосібно), 2 статті у інших виданнях України, 1 статтю за кордоном та 7 тез доповідей (1 – одноосібно).

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРІОРИТЕТНОГО РУХУ НА ВУЛИЧНО-ДОРОЖНІЙ МЕРЕЖІ МІСТА ТА ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ НА НІЙ РОБОТИ МАРШРУТНИХ АВТОБУСІВ

1.1 Визначення функцій спеціальних смуг та їх видів

Для переважної більшості міст України громадський транспорту (ГТ) є однією з основних галузей життєзабезпечення. Від його роботи залежить господарський і соціальний стан у місті, а також він визначає ритм функціонування сфери виробництва і послуг [28]. Ефективність функціонування наземного ГТ міста залежить, з одного боку, від якості організації та експлуатації їх автотранспортними підприємствами, а з іншого – від раціональної організації дорожнього руху на ділянках вулично-дорожньої мережі (ВДМ), через які проходять ці маршрути.

Ці два напрямки є на сьогодні достатньо опрацьовані у технічній літературі, зокрема проблемі раціональної організації дорожнього руху в містах присвячені праці багатьох вітчизняних та зарубіжних учених: Врубеля Ю.А., Гаврилова А.А., Гаврилова Е.В., Дзюби О.П., Дрю Д., Єрсова В.І., Іносе Х., Клінковштейна Г.І., Кременця Ю.А., Левашева А.Г., Лобанова Є.М., Лобашова О.О., Печерського М.П., Поліщука В.П., Пржибила П., Світека М., Сільянова В.В., Хамади Т., Хомяка Я.В., Четверухіна Б.М., Шелкова Ю.Д., Шештокаса В.В., Schnabel W. та ін.

Важливо зазначити, що об'єктом досліджень згаданих учених здебільшого були транспортні потоки (ТП), з яких лише не відокремлювалися маршрутні ТЗ, хоча режим руху останніх, як відомо, відрізняється від руху легкових автомобілів. Цим і пояснюється те, що вдосконаленню існуючих методів щодо забезпечення пріоритетного руху на ВДМ міста та розробці нових – приділялося зовсім незначна увага.

Одним із основних методів забезпечення пріоритетного руху ТЗ на ВДМ міста є впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць. Суть цього методу

полягає у виділенні або відокремленні однієї чи декількох смуг руху, що з одного боку надає перевагу деяким видам ТЗ порівняно із іншими учасниками дорожнього руху, а з другого – формує однорідніші ТП на елементах ВДМ, що, своєю чергою, призводить до оптимізації швидкісних режимів. Крім того на водія ТЗ, який здійснює рух на спеціальній смузі, діє значно менше емоційне навантаження ніж у загальному потоці.

Проведений аналіз функцій спеціальних смуг у різних джерелах [1, 18, 34, 37, 38, 39, 45, 62, 67, 68, 69, 81] дав змогу встановити, що залежно від мети транспортних завдань та умов руху на ВМД, вони можуть застосовуватись для таких видів транспорту:

- наземний громадський транспорт (автобус, тролейбус, трамвай);
- спецавтомобілі;
- автомобілі вантажного транспорту;
- немоторизований транспорт (велосипедисти та пішохідний рух);
- спеціальні автобуси та автомобілі таксі.

Доцільно розглянути застосування спеціальних смуг для цих видів транспорту ширше і детальніше.

1) *Спеціальні смуги для ГТ.* Впровадження спеціальних смуг для наземного ГТ, широко застосовуються з метою забезпечення пріоритетних умов руху та зниження затримок, що виникають під час руху, особливо на вулицях з високою інтенсивністю [18, 38, 45, 68]. Скорочення затримок безпосередньо пов'язане з підвищенням його роботи, оскільки призводить до звільнення парку рухомого складу при заданій величині пасажиропотоку і зменшенні кількості обслуговуючого персоналу. Оптимізація тривалості руху – це основна пріоритетна умова, яка, своєю чергою, створює передумови для збільшення кількості пасажирів, які будуть використовувати ГТ замість легкових автомобілів. Крім оптимізації тривалості руху, впровадження спеціальних смуг формує гомогенність потоків на непріоритетних смугах, покращує умови посадки-висадки пасажирів та робить ГТ привабливим і комфортним [6].

Значна увага, яка сьогодні приділяється до створення пріоритетних умов руху для ГТ, пояснюється тим, що він утворює менше викидів на пасажиро-кілометр порівняно з користувачами індивідуальних ТЗ, тобто ГТ має ряд переваг, які коротко можна сформулювати трьома «Е» – економія, енергія та екологія [62, 67].

Зазвичай спеціальні смуги для ГТ займають крайні праві смуги руху вулиці та є особливо ефективними за непарної кількості смуг на проїзній частині. Як правило, при впровадженні спеціальних смуг вибір їх видів здійснюється за такими характеристиками [68]:

а) за відношенням до інших учасників руху:

- для руху в попутному напрямку;
- для руху у протилежному напрямку;
- для руху пріоритетних ТЗ в один ряд;
- для руху пріоритетних ТЗ у декілька рядів;

б) за часом:

- постійні;
- тимчасові;
- реверсивні;

в) за способом впровадження:

- виділені лініями, позначені буквами, кольором;
- відокремлені островками, бар'єрами, піднятою проїзною частиною;

г) за місцем розташування у плані вулиці чи дороги:

- вправо або вліво від проїзної частини;
- в середині проїзної частини;
- на відокремленому полотні;

д) за способом приєднання до вулично-дорожньої мережі:

- спеціальні вулиці;
- спеціальні смуги на вулицях та дорогах;
- спеціальні смуги тільки на перегонах вулиць;

е) за швидкісними режимами:

- швидкісний режим встановлений правилами дорожнього руху;
- рекомендований швидкісний режим;

є) за способом використання:

- для руху окремих видів наземного ГТ (наприклад, тільки для трамваїв або тільки для автобусів);
- для змішаного руху (наприклад, автобусів і тролейбусів);
- для руху ГТ та пішоходів або велосипедистів;
- для руху автомобілів, що повертають праворуч.

2) *Спеціальні смуги для спецавтомобілів.* Характерною особливістю роботи спецавтомобілів (ТЗ медичних, пожежних та аварійних служб тощо) є виконання невідкладних службових завдань, від тривалості яких, у багатьох випадках може залежати людське життя. Тому ця обставина вимагає максимально швидкого сполучення між двома точками на ВДМ та руху без зупинок. Зважаючи на те, що не завжди можливо забезпечити безперешкодний проїзд на елементах ВДМ, у країнах Європи та країнах інших континентів поширеним явищем є впровадження спеціальних смуг для спецавтомобілів [39, 45, 53, 73]. Крім того, спеціальні смуги для спецтранспорту є обов'язковими на таких спорудах, як шляхопроводи, естакади, тунелі, оскільки при перевантаженні їх ТП, характеристики цих споруд унеможливають швидкий та безперешкодний проїзд спецавтомобілів до визначеного місця.

3) *Спеціальні смуги для вантажного транспорту.* У міському середовищі організація вантажного транспорту зводиться до таких заходів [69]:

- направлення транзитних вантажних ТЗ на спеціально розроблені для них маршрути;
- обмеження доступу вантажних ТЗ у визначені зони міської території на певні магістралі або їх ділянки;
- обмеження використання усієї ширини проїзної частини вулиці вантажними ТЗ;
- проектування та будівництво спеціальних доріг для руху вантажного транспорту.

Наведені заходи можна узагальнити тим, що організація руху вантажних ТЗ базується на введенні обмежень аж до повної їх заборони. Застосування таких заходів пояснюється тим, що чим вища частка вантажних автомобілів у потоці, тим більше небезпечні є вулиці, характеризуються високим рівнем шуму та низьким рівнем зручності руху. Збільшення кількості вантажних ТЗ у потоці з 10 до 90 % викликає зниження пропускної здатності з 23 до 35 % [37, 69]. Однак при забороні руху вантажним ТЗ на будь-якій вулиці чи дорозі або її ділянці повинен бути забезпечений певною мірою рівноцінний альтернативний рух на інших вулицях. Тому повну заборону вантажного руху у місті можна вводити тільки для транзитних вантажних ТЗ, оскільки місцевий вантажний рух, як правило, має необхідність в обслуговуванні підприємств, торгових точок і населення.

На ВДМ міста можна виділити вулиці і дороги, на яких ТЗ вантажного транспорту домінують у потоці (промислові зони, комунально-складські території та зони зовнішнього транспорту міста тощо). Зрозуміло, що найефективнішим заходом для покращення їх транспортного обслуговування та зменшення кількості і тяжкості конфліктних ситуацій між ТЗ різних видів, є, звичайно, ізоляція інших учасників дорожнього руху (індивідуальний, громадський та немоторизований транспорт). Однак для цього потрібні кардинальні зміни у функціональних елементах транспортної системи міста, або перенесення пунктів генерації і тяжіння з цих територій.

Для покращення організації руху в таких умовах (коли вантажні ТЗ переважають у потоці або при неможливості повного їх обмеження) пропонується впроваджувати спеціальні смуги для вантажних ТЗ [69, 81]. Надання вантажним ТЗ пріоритету у русі на окремих смугах дає змогу підвищити пропускну здатність елементів ВДМ, впорядкувати ТЗ різні за якісним складом, зменшити кількість обгонів, що тим самим підвищує безпеку і комфорт руху в потоках загалом. Такі дії слід застосовувати на вулицях і дорогах за наявності трьох і більше смуг руху в одному напрямку.

4) *Спеціальні смуги для немоторизованого транспорту.* До немоторизованого транспорту, як відзначено, відносять пішохідні потоки та

велосипедний транспорт [5]. Спеціальні смуги для пішохідних потоків виділяються тимчасово на проїзній частині вулиці вздовж тротуарів у випадках, коли необхідно забезпечити нормальні умови руху при паралельному направленні пішоходів відносно руху ТЗ після завершення масових заходів або при масовому односторонньому колонному русі людей. Таке організаційне рішення дозволяє зменшити тривалість руху пішоходів, а найголовніше – підвищити їх безпеку переміщення.

Спеціальні смуги для велосипедного транспорту застосовуються у випадках вираженого одностороннього масового руху велосипедистів до місць призначень у певні періоди доби [81]. Також велосипедні потоки можуть функціонувати на спеціальних смугах у поєднанні з ГТ.

5) *Спеціальні смуги для спеціальних автобусів та автомобілів таксі.* Названі учасники транспортного процесу виконують пасажирські перевезення, але відрізняються від ГТ організацією своєї роботи, оскільки володіють невизначеністю з позиції переміщення між двома пунктами у місті. Це дає підставу відокремити їх в окрему групу.

Автомобілі таксі, які мають дещо вищий рівень пасажирського обслуговування, користуються правом руху на спеціальних смугах в окремих випадках. Приводом цього є потреби швидкого сполучення з вузлами зовнішнього транспорту у місті (аеропорт, залізничний вокзал, автовокзал, порт тощо) [81]. Така організація руху знижує витрати часу на транспортне сполучення та підвищує комфорт пасажирських перевезень.

Проведений аналіз свідчить про те, що область доцільного застосування методу, який ґрунтується на впровадженні спеціальних смуг, має значно ширші межі і дає змогу вирішувати різноманітні транспортні завдання.

Від впровадження спеціальних смуг на елементах ВДМ для будь-яких з вищезгаданих видів транспорту значення деяких показників якості організації дорожнього руху будуть характеризуватися такими змінами: табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Тенденції щодо зміни деяких показників ОДР від впровадження спеціальних смуг на ВДМ

Показники якості дорожнього руху	Умови руху	
	на спеціальних смугах	на неперіоритетних смугах
інтенсивність руху	збільшення	зменшення
швидкість сполучення	збільшення	—
регулярність руху	збільшення	—
гомогенність потоку	збільшення	збільшення
кількість ДТП	зменшення	зменшення
безпека дорожнього руху	підвищення	підвищення

1.2 Визначення існуючих методів забезпечення пріоритету на регульованих перехрестях

Одним із основних завдань організації пріоритетного руху маршрутних автобусів (МА) на ВДМ міста є його забезпечення на регульованих перехрестях, оскільки саме на них виникають найбільші їх затримки [40, 51] (інколи вони становлять 50 % від сумарної затримки автобуса на маршруті). Сьогодні як науковими дослідниками, так і спеціалістами практичної діяльності вважається, що для забезпечення пріоритетного руху на регульованих перехрестях існує багато методів та способів, які через тісний взаємозв'язок і взаємодоповнюваність, що існує між ними, складно об'єднати у чітку і незаперечну класифікацію. Аналіз цих методів у різних джерелах [1, 34, 38, 63, 53, 55, 68, 69, 81, 89, 97] дозволив визначити їх класифікацію (рис. 1.1), яка охоплює два типи регульованих перехресть з позиції керування на них: ізольовані перехрестя, і такі, що об'єднані системою координованого керування (координовані перехрестя). Для ізольованих перехресть усі методи поділено на три групи, зокрема ті, що забезпечують пріоритет у просторі, пріоритет у часі і просторово-часовий пріоритет. На дві групи (часовий і просторово-часовий

пріоритет) поділено методи, які забезпечують пріоритет на координованих перехрестях.

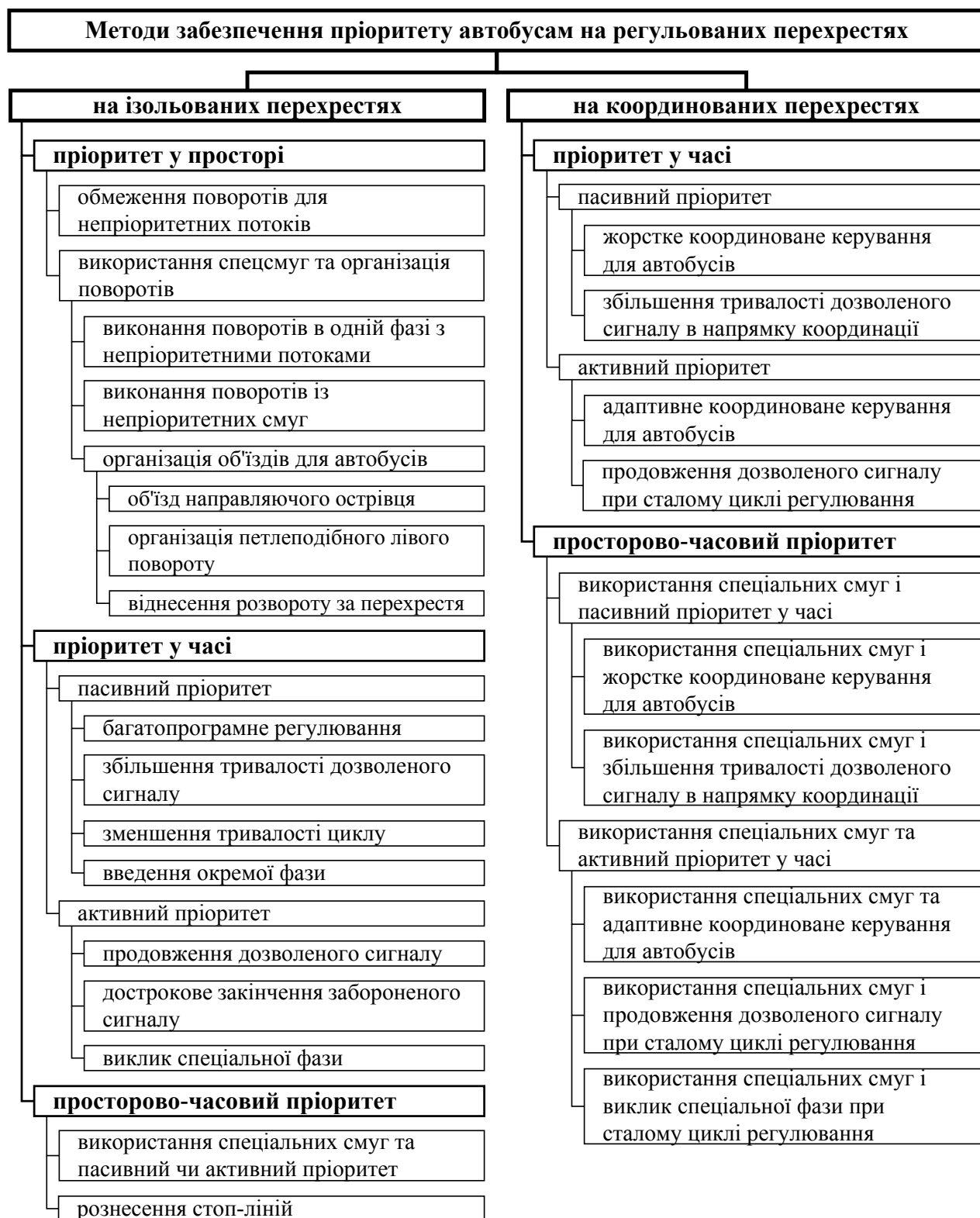


Рисунок 1.1 – Класифікація існуючих методів забезпечення пріоритету автобусам на регульованих перехрестях

Такий поділ на групи певним чином є умовним, оскільки реалізація методів, які забезпечують пріоритет у просторі, не може не відобразитися на зміні параметрів керування світлофорної сигналізації перехрестя, що є його часовим аспектом функціонування. Наприклад, обмеження поворотів на перехресті для непріоритетних потоків одночасно дозволяє або зменшити тривалість циклу, або збільшити тривалість дозволеного сигналу у напрямку руху МА, що є заходами, які забезпечують пріоритет у часі. Однак для визначення переваг і недоліків в існуючих методах, доцільно вдаватися до їх узагальнень та класифікації, хоча дещо умовної.

1) *Пріоритет на ізольованих перехрестях*. Методи, що забезпечують пріоритет у просторі на ізольованому перехресті можна поділити на два види. Методи першого виду базуються на обмеженні деяких поворотів для непріоритетних ТП, другого – на використанні спеціальних смуг та організації поворотів. Обмеження поворотів може здійснюватися до пересічення, заміною на розворот (відносять від перетину на перегін вулиці) і повною заборонаю маневрів (зазвичай ліворуч або праворуч). Це дає змогу скоротити кількість фаз світлофорного регулювання і тим самим або зменшити тривалості циклу, або збільшити тривалість дозволеного сигналу у напрямку руху МА.

Методи другого виду застосовують тоді, коли впровадженні спеціальні смуги на перегонах не перериваються на перехрестях [34, 69, 81]. При цьому залежно від умов на останніх, для організації поворотів існує ряд рішень, зокрема виконання поворотних маневрів зі спеціальної смуги в одній фазі з непріоритетними ТП і зі смуг для непріоритетних ТП, а також організація об'їздів для МА (об'їзд направляючого острівця, організація петлеподібного лівоповоротного маневру і віднесення розвороту за перехрестя).

Рішення про виконання маневрів МА зі спеціальної смуги в одній фазі з непріоритетними ТП є ефективне, коли їх роз'їзд, а також рух пішоходів здійснюється при оптимальній кількості фаз та з мінімальною кількістю конфліктних точок. Однак не завжди умови на перехресті дозволяють забезпечити повну сегрегацію і безконфліктне функціонування між цими учасниками руху без

збільшення тривалості циклу (через введення додаткових фаз регулювання). Тому таке рішення, зазвичай, застосовується для руху прямо в одному напрямку, або у поєднанні з тим, при якому окремі маневри МА виконуються з неперіоритетних смуг, в'їзд на які здійснюється після виходу зі спеціальних смуг при наближенні до перетину.

Виконання маневрів зі смуг для неперіоритетних ТП є, очевидно, найпростішим рішенням з точки зору його впровадження (не потребує навіть змін у параметрах керування світлофорної сигналізації). Доцільність застосування визначає інтенсивність правоповоротних неперіоритетних ТП (до 200 авт./год). Ускладнюється реалізація такого рішення, зокрема лівоповоротного (правоповоротного) маневру, коли спеціальна смуга займає крайню праву (ліву) смугу на проїзній частині. Щоб здійснити відповідний маневр, МА необхідно перетнути усі неперіоритетні смуги до перехрестя, і після нього, якщо спеціальна смуга займає попереднє положення. Завдання ще більше ускладнюється при роботі автобусів великого та особливо великого класу (більше 12 м) в насичених умовах руху.

Тому як перше рішення, а особливо друге – є заходами початкових етапів щодо забезпечення пріоритету на перехрестях. Основною їх перевагою є лише те, що вони не вимагають значних змін у режимі керування та переплануванні перехрестя [81].

Організація маневрів через здійснення об'їзду направляючого острівця, організація петлеподібного лівоповоротного маневру, а також віднесення розвороту за перехрестя застосовують у тих умовах, в яких існують труднощі щодо забезпечення повороту ліворуч для МА, або при економічній недоцільності виділення для них спеціальної фази у режимі світлофорного регулювання.

Недоліками застосування так званих «об'їздів» для МА є збільшення маневрів у зоні перехрестя (у випадку направляючого острівця і петлеподібного маневру), рух з низькими швидкостями на об'їзних ділянках, збільшення перепробігу (зокрема у випадку віднесеного розвороту), а також їх застосування

потребує значної площі у зоні перехрестя чи розвороту, що не завжди можливо на існуючій вуличній мережі.

Забезпечення пріоритету в часі може приймати одну із двох форм – пасивну, за якої використовуються жорсткі алгоритми керування світлофорної сигналізації, та активну, що проявляється через адаптивні алгоритми керування [53, 81, 82, 85, 89].

Пасивний пріоритет реалізується або через багатопрограмне світлофорне керування [38, 63, 69], або через корекцію циклу: збільшення тривалості дозволеного сигналу; зменшення тривалості циклу; введення окремої фази [81, 53, 46].

Багатопрограмне жорстке керування застосовують з метою адаптації параметрів керування світлофорної сигналізації до коливань добової інтенсивності руху. Це дозволяє зменшити затримки для усіх ТП, хоча їх рівень не є оптимальним [16, 36, 37, 49]. Також очевидно, що таке керування не забезпечує перевагу у русі МА по відношенню до інших учасників руху, а тому є початковим етапом на шляху забезпечення пріоритету на перехрестях.

Збільшення тривалості дозволеного сигналу в напрямку руху МА застосовують тоді, коли на конфліктуючих напрямках їх рух відсутній. Такі дії приводять до збільшення пропускну здатності цього напрямку, ймовірності проїзду на дозволений сигнал світлофора і швидкості усіх ТЗ. Основним недоліком цього способу є неефективний режим керування для конфліктуючих напрямків.

Зменшення тривалості циклу застосовують тоді, коли умови на перехресті дають можливість заборонити деякі маневри для непріоритетних ТП. Це дозволяє зменшити кількість фаз, що приводить до зменшення неефективної частини циклу (кількості і сумарної тривалості додаткових тактів). Завдяки цьому зменшується тривалість затримок як для непріоритетних потоків, так і для тих, яким у такий спосіб надають пріоритет. Цей спосіб ще часто застосовують у поєднанні з попереднім [81]: здійснюють заборону деяких маневрів для непріоритетних ТП і

збільшують тривалість дозволеного сигналу у напрямку руху МА на зменшену величину.

Введення окремої фази для МА при жорсткому режимі керування на перехресті переважно залежить від їх інтенсивності у певному напрямку (також від типу конфліктних точок та геометрії перехрестя). Чітких критеріїв щодо граничних її значень наразі не встановлено. Зазвичай приймають за аналогією з введенням додаткової секції (120 авт./год) [35, 36, 39], однак у випадку забезпечення пріоритету для автобусів ці значення є набагато меншими.

Зрозуміло, що недоліком введення додаткової фази є збільшення сумарної тривалості додаткових тактів, тому завжди вважається небажаною з точки зору оптимальності керування на перехресті.

Усі методи активного пріоритету реалізуються за допомогою детектування МА на під'їзді до перехрестя, після чого відбуваються відповідні модифікації режимів роботи світлофорної сигналізації. Це забезпечує їм проїзд перехрестя без зупинок або з мінімальними затримками, тобто абсолютний та умовний пріоритет [53, 63, 69, 81]. Умовний пріоритет можуть ієрархічно розділяти на різні рівні його забезпечення (наприклад, високий, середній і малий) [68]. Забезпечення абсолютного чи умовного пріоритету або його відсутність залежить від багатьох критеріїв. З огляду на це, абсолютний пріоритет можуть надавати усім видам наземного ГТ лише у певному напрямку, тільки автобусам, автобусам з найбільшою перевізною здатністю, тільки тим автобусам, що запізнюються порівняно з часом прибуття за розкладом, але не надається тим, які прибувають раніше [89, 90]. Також абсолютний і умовний пріоритети можуть змінюватися залежно від характеру прибуття МА до перехрестя – при одночасному прибутті двох автобусів один за одним, абсолютний пріоритет забезпечується лише першому [27].

Детектування одиниць пріоритетного транспорту може здійснюватися у контактний та безконтактний спосіб. Безконтактний – можливий як з використанням локальних систем, які базуються на радіозв'язку, так і центральних систем, що використовують GPS (точність виявлення до 10–20 м).

Контактний пріоритет проїзду здебільшого використовують тролейбуси і трамваї, безконтактний – автобуси. Хоча через істотні недоліки контактного способу [53], усе частіше віддають перевагу безконтактному способу, який базується на GPS для усіх згаданих транспортних засобів [46].

Найпоширенішим серед адаптивних алгоритмів, що забезпечують пріоритет, є алгоритм продовження дозволеного сигналу [82, 85]. Цей алгоритм реалізується в момент появи МА на підході до перехрестя у період завершення дії дозволеного сигналу. Унаслідок цього, його тривалість продовжується на визначений період часу і цим самим забезпечує проїзд перехрестя без затримок. За аналогією реалізації цей алгоритм ще називають алгоритмом «пошуку часового розриву у потоці» у напрямку руху МА [63, 69].

Для забезпечення пріоритету в момент прибуття МА до перехрестя у період дії забороненого сигналу, використовується алгоритм дострокового завершення забороненого сигналу [53, 81]. Особливо утруднюється реалізація цього алгоритму при наявності пішохідного руху у фазі, яку необхідно достроково завершити.

Недоліки цих алгоритмів найчастіше проявляються при значній інтенсивності непріоритетних ТП на підходах до перехрестя, оскільки виникають труднощі з ідентифікацією МА, особливо у випадку контактного способу детектування, внаслідок чого пріоритетність на перехресті порушується.

Найефективнішим алгоритмом, з позиції забезпечення абсолютного пріоритету, вважається алгоритм виклику спеціальної фази, поява якої можлива в будь-який момент циклу регулювання [34, 39, 53]. Для того, щоб при реалізації цього алгоритму на перехресті забезпечувалось ефективне керування світлофорною сигналізацією застосовуються технології «компенсації» [53]: після того як автобус отримав пріоритетний проїзд за допомогою спеціальної фази витрати часу непріоритетних ТП компенсуються шляхом продовження дозволеного сигналу в їх напрямках на довший період.

Недоліком цього алгоритму є те, що при значній інтенсивності прибуття МА до перехрестя забезпечення абсолютного пріоритету утворює

«скачкоподібний» режим керування для неперіоритетних ТП, від чого зростає величина їх затримок. Мало того, конфліктуючі напрямки можуть перебувати в умовах майже постійної дії забороненого сигналу. У зв'язку з цим, у [81] зазначено, що інтервал руху між автобусами не повинен бути меншим за 2,5 хв., хоча забезпечувати умовний пріоритет усе ж можливо [13]. Також абсолютний пріоритет для одних автобусів може створювати проблеми для інших.

Вищезгадані три адаптивні алгоритми, як правило, застосовуються у тих умовах, коли детектування автобусів відбувається на невеликій відстані від перехрестя (до 200 м). З іншої боку, у випадках лінійної, радіальної структури автобусного маршруту застосовують технології, при яких виявлення місцезнаходження автобуса здійснюється на значній відстані від перехрестя (наприклад, 3 хв. від перехрестя). В результаті цього виконується поступова адаптація параметрів керування світлофорної сигналізації для того, щоб ввімкнути дозволений сигнал у момент прибуття автобуса до перехрестя. Перевагою є менш раптовий вплив на світлофорне регулювання, що підвищує ефективність роботи перехрестя. Але у значній мірі залежить від точності прогнозу перебування автобуса в дорозі, що складніше реалізувати, коли автобус знаходиться далеко від перехрестя.

При значній інтенсивності прибуття МА до перехрестя зазвичай застосовують методи третьої групи, що забезпечують просторово-часовий пріоритет. Їх можна поділити на два види. Методи першого виду використовують спеціальні смуги та алгоритми пасивного або активного пріоритету. До методів другого виду віднесено метод рознесення стоп-ліній для неперіоритетних ТП та автобусів, який ще називають автобусні «шлюзи» [80, 97].

Переваги методів першого виду, зокрема використання спеціальних смуг та алгоритмів активного пріоритету, є очевидні: автобуси завжди мають вільний доступ до перехрестя (залежить лише від інтенсивності їх прибуття) і пропускаються через його площу в безконфліктний спосіб. У таких умовах абсолютний пріоритет за безконфліктного пропуску автобусів з неперіоритетними ТП в одній фазі може досягається за допомогою алгоритму продовження

дозволеного сигналу та дострокового завершення забороненого, а при конфліктному – за допомогою алгоритму виклику спеціальної фази. При використанні алгоритмів пасивного пріоритету можна забезпечити лише умовний пріоритет (проїзд перехрестя з мінімальними затримками), а ефективність роботи перехрестя підвищується тоді, коли МА пропускаються в одній фазі з непріоритетними ТП.

Якщо спеціальна смуга займає крайню ліву смугу на проїзній частині, то це ускладнює організацію правоповоротних маневрів і, навпаки, якщо виділена крайня права смуга, ускладнюється організація лівоповоротних маневрів, проте з використанням спеціальних фаз це можливо [81].

Суть методу рознесення стоп-ліній полягає у розміщенні двох стоп-ліній, одну з яких розміщують, безпосередньо біля перехрестя, а додаткову – на деякій відстані від перехрестя. Додаткова стоп-лінія вказує місце зупинки непріоритетних ТЗ. Їхній в'їзд у «шлюз» (простір між двома стоп-лініями) регулюється додатковим світлофором, який встановлюють перед додатковою стоп-лінією. В момент дії забороненого сигналу на додатковому світлофорі для МА, що використовують спеціальну смугу, відкривається доступ до шлюзу. До того ж вони можуть легко здійснювати поворотні маневри не залежно від розміщення спеціальної смуги на проїзній частині (крайня ліва або права смуга). Коли починає діяти дозволений сигнал, автобуси перші проїжджають перехрестя у визначеному напрямку.

Цей метод доцільно застосовувати на перехрестях, у зоні яких відсутні зупинні пункти і є ефективним тільки при двофазному керуванні [81].

Недоліком цього методу є ускладнення схеми організації руху на перехресті, і як наслідок, додаткові труднощі з організацією пішохідних потоків через перехрестя, а також збільшення витрат на впровадження і експлуатацію додаткових технічних засобів (додаткових світлофорів). Одночасно зростає величина затримок для непріоритетних ТП при збільшенні частоти руху МА.

Основним недоліком методів, що забезпечують просторово-часовий пріоритет полягає у тому, що їх реалізація зменшує кількість смуг на підході до

перехрестя для неперіоритетного транспорту. Це може призводити до зростання кількості автомобілів у черзі біля перехрестя та зниження пропускної здатності як перетину, так і вулиці загалом.

2) *Пріоритет на координованих перехрестях.* Як вже зазначалося, усі методи, що забезпечують пріоритет на координованих перехрестях поділено на дві основні групи: методи, що забезпечують пріоритет у часті; методи просторово-часового пріоритету. Своєю чергою, залежно від наявності зупинних пунктів на ділянці координації, усі методи обох груп також можна умовно поділити на дві групи. До першої групи належать методи, які використовуються або тільки при наявності зупинних пунктів, або тільки при їх відсутності. До другої ж групи відносяться методи, які можуть використовуватися як при наявності зупинок, так і при їх відсутності.

Якщо зупинні пункти відсутні на ділянці координації, то пріоритет у часі можна забезпечити за допомогою жорсткого або адаптивного координованого керування для МА. З використанням цих же алгоритмів і при наявності спеціальних смуг забезпечується просторово-часовий пріоритет. Як при жорсткому, так і при адаптивному координованому керуванні, швидкість координації намагаються узгоджувати для обох учасників руху (автобусів та неперіоритетних ТП).

За наявності зупинних пунктів на ділянці координації стає складно точно спрогнозувати прибуття автобусів до наступного перехрестя в попутному напрямку після здійснення ними зупинки. Тому застосовують методи, що забезпечують їм умовний пріоритет. У таких умовах пріоритет у часті можливо забезпечити за допомогою збільшення тривалості дозволеного сигналу в напрямку координації [69].

За допомогою адаптивного алгоритму продовження дозволеного сигналу, що виконується в умовах сталого циклу регулювання, можливо забезпечити пріоритет у часі як при наявності зупинок на ділянці координації, так і при їх відсутності. А при використанні спеціальних смуг – просторово-часовий пріоритет.

Недолік цього методу полягає у тому, що збільшення дозволеного сигналу завжди тягне за собою зменшення дозволеного сигналу на ту ж величину на конфліктних напрямках. Як наслідок, це зумовлює збільшення затримок неперіоритетних ТП на цих напрямках, тому він є ефективним за незначної інтенсивності МА.

Для забезпечення просторово-часового пріоритету при різних умовах на ділянці координації (наявності або відсутності зупинок) інколи ще використовують метод, що базується на використанні спеціальних смуг та виклику спеціальної фази, яка виконується у сталому циклі регулювання [80, 98].

Недоліком усіх розглянутих методів є те, що ускладнюється їх реалізація за потреби забезпечити пріоритет з усіх можливих напрямків на перехресті, зокрема абсолютний пріоритет.

Проведений аналіз методів забезпечення пріоритету дає змогу зробити висновок, що методи просторового і часового пріоритетності добре функціонують за незначної інтенсивності пріоритетних і неперіоритетних потоків. Просторово-часові методи можуть забезпечувати пріоритетні умови руху і за збільшення інтенсивності, особливо МА. Найкращих результатів, з точки зору забезпечення абсолютного пріоритету, можна досягти за допомогою методу, що ґрунтується на використанні спеціальних смуг та виклику спеціальної фази.

З іншого боку, буде помилковим один із методів, у якому одночасно найменше недоліків або найбільше переваг, приймати за оптимальний для усіх перехресть, оскільки на кожному з них є різні дорожньо-транспортні умови, що вимагають для цього окремого підходу. З цієї причини, для досягнення найкращого результату з позиції забезпечення пріоритету на перехрестях, доцільно впроваджувати поєднання кількох методів з різних груп, причому для МА слід забезпечувати пріоритетні умови руху як у просторі, так і у часі. Мало того, при застосуванні будь-якого із методів або симбіозу кількох методів, необхідно слідувати до мінімізації затримок для пріоритетних і неперіоритетних ТП та максимізації показників безпеки руху [50, 57], що можна виразити однією узагальненою системою:

$$\begin{cases} F(\overline{t_A}, \overline{t_{HII}}) \rightarrow \max \\ F(b_i) \rightarrow \min \end{cases} \quad \overline{t_A}, \overline{t_{HII}} \rightarrow \min \text{ та } b_i \rightarrow \max, \quad (1.1)$$

де $\overline{t_A}$ – середня затримка автобуса;

$\overline{t_{HII}}$ – середня затримка неперіоритетного ТЗ;

b_i – показники безпеки руху на перехресті.

Важливо зазначити, що впровадження методів, які забезпечують просторово-часовий пріоритет є особливо складним завданням на перехрестях, підходи яких мають не більше двох смуг руху в одному напрямку. Тому для таких умов є потреба розробити метод, який забезпечуватиме просторово-часовий пріоритет на перехрестях, що є особливо актуальним для вуличної мережі міста зі щільною забудовою.

1.3 Особливості впровадження системи швидких автобусних перевезень на вулично-дорожній мережі міста

Одним із прогресивних шляхів підвищення якості пасажирських перевезень автобусами і вдосконалення їх роботи на ВДМ міста є впровадження системи «швидких автобусних перевезень» (*Bus rapid transit*), яка сьогодні поширена у країнах Європи і Південної Америки [62, 81]. Термін «швидкі перевезення» не стосується швидкості автобуса, а характеризує швидкість транспортного обслуговування. Одночасне використання багатьох матеріальних об'єктів у транспортному обслуговуванні за таких перевезень дало підставу називати швидкі автобусні перевезення системою. Система «швидкі автобусні перевезення» (ШАП) інтегрує такі елементи як спеціальні смуги, технічні засоби, що забезпечують пріоритет на перехрестях, рухомий склад (автобуси великої та особливо великої місткості) і зупинні пункти.

Термін «ШАП» появився в результаті застосування системи автобусних перевезень у Північній Америці та Європі. Однак такі ж системи існують у різних

країнах світу під іншими назвами, а саме: автобусні системи високої перевізної здатності, високоякісні автобусні системи, метро-бус, наземне метро, система експрес автобуса та система автобусних шляхів тощо [81]. Хоча назва змінюється залежно від країни, проте основні ознаки спостерігаються в усіх випадках.

Системи «ШАП», як зазначено у [94, 95], визначається за такими сімома ознаками: 1) виділені або відокремлені спеціальні автобусні смуги; 2) зупинні пункти; 3) автобуси з низькою посадкою особливо великої місткості; 4) обслуговування (регулярність та інтервал руху); 5) інтегрована мережа маршрутів; 6) оплата за проїзд; 7) використання інтелектуальних транспортних систем, особливо на рівні регульованих перехресть.

Зупинні пункти, швидкість автобусів та їх перевізна здатність – є основними складовими, що відрізняють систему ШАП від традиційних автобусних перевезень. Ця система має набагато більше спільного з рейковим пасажирським транспортом, особливо в обслуговуванні пасажирів. До системи ШАП узято найкращі елементи з метро і рейкового транспорту (швидкісний трамвай). Насамперед це стосується зупинних пунктів, які здебільшого створюються у закритому приміщенні «за типом метро», на яких висадка і посадка пасажирів здійснюється з платформи, а оплата за проїзд відбувається перед посадкою в автобус.

Фактично система ШАП така ж зручна і ефективна, як швидкісний трамвай, однак для її реалізації та експлуатації потрібно значно менше витрат. Впровадження такої системи зазвичай коштує від 4 до 20 разів дешевше ніж швидкісний трамвай і від 10 до 100 раз – за метро [81], хоча за перевізною здатністю близька до них (рис.1.2). Крім цього її можна впровадити за досить короткий строк (1–3 роки після розробки проекту). Порівняння різних видів ГТ з точки зору вартості і тривалості їх впровадження наведено на рис. 1.3 [105].

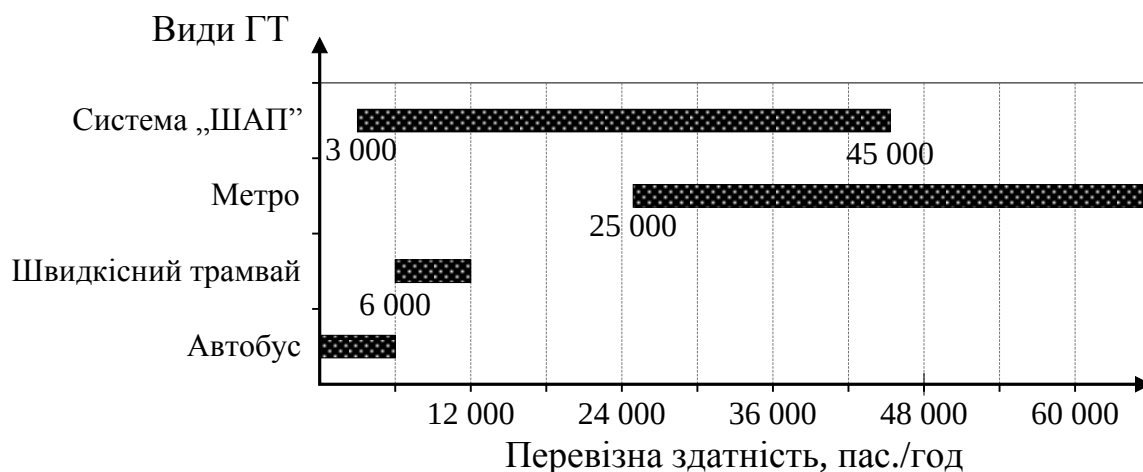


Рисунок 1.2 – Перевізна здатність різних видів ГТ



Рисунок 1.3 – Порівняння видів ГТ за вартістю і тривалістю впровадження

Системи ШАП є двох типів – «закрита» та «відкрита». Закрита система ШАП характеризується такими властивостями: відокремлені автобусні смуги або автобусні вулиці вздовж більшої частини маршруту; розташування спеціальних смуг посередині вулиці, а не біля тротуару; наявність зупинних пунктів у закритому приміщенні «за типом метро»; забезпечення здійснення оплати за проїзд перед посадкою в автобус; наявність єдиної та узгодженої мережі маршрутів системи ШАП; забезпечення абсолютного пріоритету на перехрестях.

Одним із найкращих на сьогодні прикладів функціонування повної системи ШАП є система TransMilenio у місті Боготі (Колумбія) [81, 86, 88]. Вона охоплює 84 км вулиць та 344 зупинок закритого типу. У перевезенні задіяні 841 автобус

особливо великої місткості з низькою посадкою, які обслуговують 1,5 млн. пас./добу, де максимальна перевізна здатність в одному напрямку, становить 45 тис. пас./год. Перелік міст світу, у яких функціонують системи ШАП та їх основні характеристики наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Функціонування системи ШАП та її показники у містах різних країн світу

Континент	Країна	Місто	Експлуатаційна швидкість, км/год	Перевізна здатність, пас./год
Європа	Великобританія	Единбург	17,0	14000
	Нідерланди	Амстердам	21,0	8500
	Німеччина	Ессен	23,0	18000
Азія	Індонезія	Джакарта	17,0	3200
Північна Америка	Канада	Оттава	22,0	20000
	США	Пітсбург	19,0	8000
	Мексика	Мехіко	19,0	8000
		Леон	18,0	3000
Південна Америка і Карибський регіон	Бразилія	Сан-Паулу	18,0	20000
		Курітіба	19,0	13000
	Колумбія	Перейра	20,0	6900
		Богота	26,0	45000
	Чилі	Сантьяго	18,0	22000
	Еквадор	Кіто	14,5	9000
		Гуаякіль	22,0	5000

Невід’ємним елементом системи ШАП, як вже зазначалося, є виділені або відокремлені спеціальні смуги для автобусів вздовж маршрутів їх руху. Враховуючи це можна зробити висновок, що наявні спеціальні автобусні смуги на ВДМ є основною для створення системи ШАП та її розвитку.

1.4 Висновки до розділу

1. Проведений аналіз показує, що підвищення якості транспортного обслуговування маршрутних автобусів на ВДМ міста досягається шляхом впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць та застосування методів, які забезпечують пріоритет на регульованих перехрестях. Усі ці заходи поєднують одним терміном – методи забезпечення пріоритетного руху.

2. Встановлено, що функції спеціальних смуг мають широке використання і впроваджуються для наземного ГТ (автобусів, тролейбусів, трамваїв), спецавтомобілів, вантажних ТЗ, велосипедистів та пішохідних потоків. Наразі найбільше спеціальні смуги впроваджуються для автобусів. Однак поширення їх впровадження на ВДМ гальмується відсутністю адекватних і чітких критеріїв.

3. Визначено, що методи, які забезпечують просторово-часовий пріоритет на перехрестях, є ефективними і при значних значеннях інтенсивності руху (особливо автобусів), а також вони найкраще забезпечують абсолютний пріоритет. Перехрестя, підходи яких мають не більше двох смуг руху в одному напрямку відносяться до умов, в яких складно реалізувати просторово-часові методи.

4. Встановлено, що комплексне застосування різних методів забезпечення пріоритетного руху на усій довжині автобусного маршруту реалізується при впровадженні системи «швидких автобусних перевезень» (ШАП), яка відрізняється від традиційних автобусних перевезень швидкістю обслуговування, перевізною здатністю (може досягати 45000 пас./год), а також використанням закритих зупинних пунктів («за типом метро»). Впровадження спеціальних смуг на перегонах і забезпечення пріоритету на регульованих перехрестях є основою для створення системи ШАП, що і визначає завдання, які вирішуються у дисертаційній роботі.

РОЗДІЛ 2

ВИЗНАЧЕННЯ ТА ОБГРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЇВ ВПРОВАДЖЕННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ СМУГ НА ПЕРЕГОНАХ ВУЛИЦЬ

2.1 Визначення існуючих критеріїв впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць

Загалом впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць можливо двома шляхами:

- постійним резервуванням однієї і більше існуючих смуг або усієї проїзної частини;
- реконструкцією вулиці чи дороги, з метою виділення або відокремлення спеціальних смуг.

В умовах постійного дефіциту інвестицій на реконструкцію міських вуличних мереж, 2-й підхід використовується вкрай рідко. Також він не завжди можливий через складні транспортно-планувальні характеристики ВДМ існуючих міст.

Перший підхід використовується значно частіше, однак умови його впровадження сьогодні визначаються загальними і недостатньо точними рекомендаціями, тобто відсутні адекватні та чіткі критерії для його впровадження.

Наприклад, в [1] зазначається, що прийняття рішення про впровадження спеціальних смуг визначають результати натурних експериментів, до яких входить підрахунок кількості перевезених пасажирів автобусами за одиницю часу до і після ведення пріоритетних умов.

Ефективність цього критерію є виправданою у разі застосування для усього маршруту або для певної його частини. Тому він є непридатним при використанні до однорідних ділянок маршруту (перегонів вулиць). Крім того, неефективність цього рішення проявляється через великі затрати на проведення натурних досліджень та неготовність водіїв до швидкої адаптації у змінах організації руху за подібних експериментів.

У [81] зазначається, що визначальним чинником при впровадженні спеціальних смуг на перегонах вулиць є мінімальна величина пасажиропотоку, яка становить 2000 пас./год. Однак у цих рекомендаціях немає аналітичного обґрунтування щодо оптимальності цього значення, а також цей критерій ніяким чином не враховує особливостей дорожньо-транспортних умов на перегонах вулиць ВДМ.

У [100], крім пасажиропотоку, в якості критерію використовують також такі показники як кількість смуг руху в одному напрямку, мінімальна інтенсивність руху автобусів та тип розташування спеціальної смуги у плані проїзної частини вулиці (тал. 2.1).

Таблиця 2.1 – Критерії впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць, що використовуються у Південній Кореї [100]

Тип розташування спеціальної смуги	Мінімальна інтенсивність автобусів, од./год	Мінімальний пасажиропотік, пас./год	Кількість смуг в одному напрямку
Крайня права смуга у попутному напрямку	60	1800	3
	100	3000	3–4
	150	4500	3–4
Крайня ліва смуга у попутному напрямку	150	4500	3–4
Крайня смуга у протилежному напрямку	100	3000	3
	150	4500	4

Такі ж критеріальні показники, за виключенням кількості смуг руху, використовуються при впровадженні спеціальних смуг у США [92]. Однак їх значення мають певні відмінності (табл. 2.2). Водночас використовується і верхнє обмеження на інтенсивність руху автобусів, яке становить 200 од./год.

У Великобританії [92] доцільність про впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць визначається за двома показниками: мінімальною

інтенсивністю руху автобусів, що становить 50 од./год, та мінімальною величиною пасажиропотоку – 2000 пас./год.

Таблиця 2.2 – Критерії впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць, що використовуються у США [92]

Тип розташування спеціальної смуги	Мін. інтенсивність автобусів, од./год	Мін. пасажиропотік, пас./год
Крайня права смуга у попутному напрямку	30–40	1200–1600
Крайня смуга у протилежному напрямку	40–60	1600–2400
Крайня ліва смуга у попутному напрямку	60–90	2400–3600

Наразі в Україні для впровадження спеціальних смуг використовуються критерії, що запропоновані у роботах [34, 39, 69, 55], за якими їх введення на перегонах вулиць рекомендується розглядати за наявності таких умов:

- інтенсивність маршрутних автобусів не менше 40 од./год, хоча у [34, 55] це обмеження становить – 50 од./год;
- інтенсивність неперіоритетних ТЗ з розрахунку на одну смугу руху не менше 400 авт./год;
- на перегоні вулиці є не менше 3-х смуг руху в одному напрямку;
- пропускна здатність перегону вулиці після виділення спеціальних смуг буде достатньою для пропуску інших ТЗ.

Основним недоліком критеріїв, що запропоновані в більшості з розглянутих джерел є використання показника інтенсивності руху автобусів. Цей показник виступає у ролі аргументу, що дає підставу на впровадження спеціальних смуг і продуктивність їх використання. Однак він є непридатний до використання для різних типів автобусів, які сьогодні функціонують на міському пасажирському транспорті. У табл. 2.3 наведено типи автобусів (найпоширеніші в містах

України) із значеннями перевізних здатностей відповідно до рекомендованої мінімальної інтенсивності руху автобусів на спеціальній смузі (40 автобусів/год).

Таблиця 2.3 – Перевізна здатність різних типів маршрутних автобусів

Тип автобуса		Загальна місткість автобуса, пас.	Перевізна здатність (при 40 автоб./год), пас./год
Клас автобуса	Марка		
Особливо малий	Еталон – БА3-2215	18	720
	Богдан – А-06921 (Е-2)	35	1400
Малий	Еталон – БА3 А079.14	40	1600
	Богдан – А-09201 (Е-1)	45	1800
Середній	Богдан – А-1443 (Е-1)	80	3200
Великий	ЛАЗ – А152D0 – (10 м)	89	3560
Особливо великий	ЛАЗ – А183D1 – (12 м)	100	4000
	ЛАЗ – А191F0 – (13 м)	110	4400
	Богдан – А-231 (Е-2)	160	6400
	ЛАЗ – А292 D1 (18,8 м)	182	7280

З табл. 2.3 видно, що використання цього показника як критерію може істотно зменшувати потенційну область застосування спеціальних смуг на перегонах вулиць (різниця у перевізній здатності становить більше 6 тис. пас./год). Тому при впровадженні спеціальних смуг необхідно використовувати не інтенсивність руху автобусів, а обсяги пасажиропотоку на них. А вже з пасажиропотоку визначати мінімальну інтенсивність автобусів різного типу [7].

На основі цього та за результатами проведеного аналізу можна сформулювати три принципові умови, за наявності яких впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць буде виправданим і називатимуться критерії впровадження:

- 1) критерій I: не менше 3-х смуг руху в одному напрямку ($m \geq 3$);
- 2) критерій II: мінімальний обсяг пасажиропотоку;

3) критерій III: стан ТП на неперіоритетних смугах після впровадження спеціальних.

Умова $m \geq 3$ (критерій I) є обов'язковою, оскільки за меншого значення режим і умови руху на k -й неперіоритетній смузі визначатимуть динамічні габарити ТЗ і мета дій його водія, що рухається попереду самостійно утвореної групи автомобілів. Хоча, як зазначається у [81], на практиці існують випадки, де для неперіоритетного потоку залишають одну смугу для руху з правом виїзду на спеціальну смугу при несприятливих обставинах. Однак таке рішення є прийнятним лише для невеликих за довжиною ділянок вулиць (не більше 200 м), а ефективність його функціонування залежить багато в чому від культури та поведінки водіїв конкретної країни. Отже, враховуючи цей факт для критерію I, приймаємо умову $m \geq 3$.

Зважаючи на це, кількість смуг руху в одному напрямку є першим і визначальним критерієм впровадження спеціальних смуг на перегонах. Критерій II – визначає саму доцільність введення спеціальних смуг, а критерій III – визначає ефективність їх функціонування на ВДМ міста.

Розбіжність між мінімальними значеннями пасажиропотоку, що пропонуються у вищенаведених джерелах становить 3300 пас./год. З цих причин виникає необхідність у дослідженні цього показника і встановленні мінімальних обсягів пасажиропотоків при різних дорожньо-транспортних умов на перегонах вулиць, за якими впровадження спеціальних смуг буде доцільним і виправданим.

2.2 Визначення та обґрунтування мінімального обсягу пасажиропотоку для впровадження спеціальних смуг

Для визначення мінімального обсягу пасажиропотоку необхідно розглядати умови, в яких спеціальні смуги вже функціонують, а здійснювати їх оцінку слід через призму відомої системи – «Дорожні умови – Транспортні потоки» («ДУ – ТП») [18, 47, 74]. Аналізуючи внутрішню організацію та функції цієї системи було виявлено, що процес взаємодії підсистеми «Транспортні потоки» з

результатом функціонування системи (перевезення пасажирів чи вантажів) можна описати поняттям «обслуговування». Зважаючи на те, що підсистема «ДУ» визначає поведінку і режим руху транспортних потоків, то опис взаємодії її з продукцією системи (перевезенням) доцільно виконувати теж як «обслуговування». Тоді можемо зробити припущення, що дорожні умови (дороги, вулиці, окремі ділянки вулиць чи доріг) – здійснюють *обслуговування* пасажирів, відповідно кожна смуга на проїзній частині вулиці чи дороги *обслуговує* певну кількість пасажирів. Підтвердженням про правильність цієї гіпотези є застосування показника «Перевізна здатність дороги» (пас./год, або т/год), який широко використовують для визначення транспортно-експлуатаційного стану вулиці чи дороги [60].

Після впровадження спеціальних смуг, у системі «ДУ – ТП» проявиться деяка варіативна властивість, тобто у ній відбудеться ряд змін, зокрема у її структурі, що в кінцевому результаті перетворить у іншу систему [19, 24]. Так у підсистемі «ДУ» можна виділити знову дві підсистеми з пріоритетними і непріоритетними дорожніми умовами, тобто пріоритетні (m_{II}) і непріоритетні (m_H) смуги руху. Аналогічні зміни відбудуться у підсистемі «ТП», де з'являються пріоритетні (M_{II}) та непріоритетні (M_H) потоки. Такі перетворення у системі «ДУ – ТП» зумовлені обмеженнями, які несуть собою впровадження спеціальних смуг у вуличне середовище (потік M_{II} не може використовувати для руху непріоритетні дорожні умови, і навпаки, потік M_H не може використовувати спеціальну смугу, за виключенням окремих випадків) та зміною мети функціонування системи (забезпечення комфорту водію [32] та ефективних пасажирських перевезень).

Трансформацію стану системи «ДУ – ТП» після впровадження спеціальних смуг можна зобразити у такий спосіб: рис. 2.1.

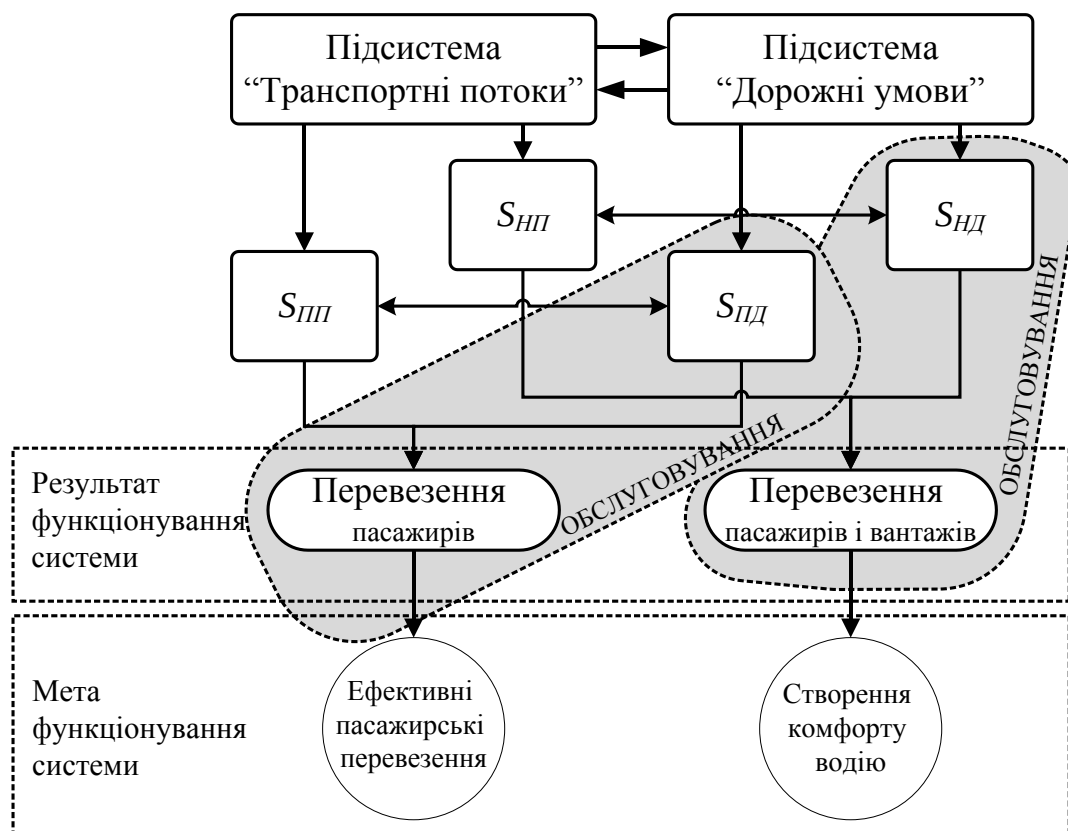


Рисунок 2.1 – Трансформація системи «ДУ – ТП» після впровадження спеціальних смуг: $S_{ПП}$, $S_{НП}$, $S_{ПД}$, $S_{НД}$ – відповідно підсистеми пріоритетних і непріоритетних ТП та пріоритетних і непріоритетних дорожніх умов

Використовуючи трансформаційні характеристики можна зазначити, що прирівнюючи величину кількості пасажирів, які обслуговуються підсистемою $S_{ПД}$ за одиницю часу, до кількості, що буде обслуговуватися підсистемою $S_{НД}$ за цей же період, дає можливість говорити про доцільність впровадження спеціальних смуг. Коротко цю доцільність можна виразити такою нерівністю:

$$S_{ПД} \geq S_{НД}, \quad (2.1)$$

де $S_{ПД}$, $S_{НД}$ – відповідно підсистеми пріоритетних і непріоритетних дорожніх умов.

Підсистеми $S_{ПД}$ і $S_{НД}$, у частині кількості смуг руху, можуть містити різну кількість. Тому виходячи із умови критерію I (не менше 2-х смуг руху m_H в одному напрямку) приймаємо, що одна пріоритетна смуга в одному напрямку повинна відповідати двом непріоритетним, навіть у випадку більшої кількості останніх.

Кількість пасажирів, що обслуговується підсистемою $S_{НД}$ залежатиме від її взаємодії з підсистемою $S_{НП}$, що є аналогічним до процесу взаємозв'язків у загальній системі «ДУ – ТП», яка по відношенню до $S_{НД}$ виступатиме як надсистема [19, 24].

Тому для визначення кількості пасажирів, що обслуговуватимуться підсистемою $S_{НД}$ слід звернутись до станів функціонування системи «ДУ – ТП», які визначаються характеристиками її підсистем. Підсистема «ТП», що є вирішальною у цій системі, характеризується інтенсивністю руху потоку, його щільністю і швидкістю. Збільшення інтенсивності та щільності приводить у визначених дорожніх умовах до того, що рух стає щільним і неекономічним. Як наслідок, система перестає функціонувати ефективно, тобто рух у ній буде супроводжуватися втратами часу та збільшенням дорожньо-транспортних витрат. Також очевидно, що верхньою межею таких погіршень у системі є утворення затору.

Отже, на усьому діапазоні можливого функціонування системи «ДУ – ТП» існує стан W , за якого забезпечується найефективніше виконання мети системи, тобто найефективніше перевезення пасажирів з позиції витрат часу, транспортних витрат і рівня безпеки руху.

Стан W системи «ДУ – ТП» визначає якісний стан транспортного потоку і відповідає оптимальному рівню завантаження дороги рухом. Для кількісного вираження останнього служить коефіцієнт завантаження руху (Z), який може приймати значення від 0 до 1 [60]. У [21, 47, 59, 60, 74, 77] зазначається, що оптимальний економічно-ефективний рівень завантаження, а відповідно поява стану W системи є тоді, коли величина Z набуває значення 0,5–0,7. Тоді для того,

щоб визначити кількість пасажирів, що обслуговується будь-якою смугою проїзної частини при стані W системи, необхідно скористатись однією із характеристик ТП – середнє заповнення автомобілів пасажирями або просто коефіцієнт заповнення [21].

Враховуючи вищевикладене, можемо стверджувати, що впровадження спеціальних смуг є тоді доцільним і виправданим, коли за визначений проміжок часу спеціальна смуга m_{II} обслуговуватиме таку ж кількість пасажирів, що й неперіоритетні смуги m_H при стані W функціонування системи. На основі цього математичну модель доцільності впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць можна записати у вигляді такої характеристики [7]:

$$O_{II_{jk}} \geq O_{H_{jk}} \quad \text{при } O_{H_{jk}} \in W, \quad (2.2)$$

де $O_{II_{jk}}$ – обсяг пасажиропотоку на смузі m_{II} j -го перегону у k -му напрямку, пас./год;

$O_{H_{jk}}$ – інтенсивність пасажирського руху на смугах m_H j -го перегону у k -му напрямку при стані W системи «ДУ – ТП», пас./год.

Визначити $O_{II_{jk}}$ можна двома способами:

- перший, і водночас є найнадійнішим, ґрунтується на розрахунку пасажирських кореспонденцій, у результаті чого встановлюються обсяг пасажиропотоків на кожний перегін мережі;
- другий є набагато простішим, але дає орієнтовні результати про інтенсивність пасажирського руху, при цьому $O_{II_{jk}}$ залежить від двох параметрів: годинної інтенсивності руху автобусів та показника, що характеризує заповнення його салону пасажирями (U). Зважаючи на те, що впродовж поїздки наповнення автобуса змінюється, то оцінювати його треба інтегрально за весь час поїздки на маршруті. Тому показник U приймаємо рівним загальній місткості визначеного автобуса. При цьому:

$$O_{\Pi_{jk}} = M_{\Pi_{jk}} \cdot U_{jk}, \quad (2.3)$$

де $M_{\Pi_{jk}}$ – інтенсивність пріоритетного потоку на j -му перегоні у k -му напрямку відповідно до пасажиропотоку на маршруті, авт./год;

U_{jk} – загальна місткість автобуса на j -му перегоні у k -му напрямку, пас.

Інтенсивність пасажирського руху на смугах m_H можна визначити за такою формулою:

$$O_{H_{jk}} = M_{H_{jk}}^W \cdot Y_{jk}, \quad (2.4)$$

де $M_{H_{jk}}^W$ – інтенсивність непріоритетного потоку на j -му перегоні у k -му напрямку, що відповідає стану W системи «ДУ – ТП», авт./год;

Y_{jk} – коефіцієнт заповнення автомобіля пасажирами на j -му перегоні у k -му напрямку (за даними [21, 34, 81] $Y = 1,1-2,5$).

У формулі (2.4) невідомим залишається величина $M_{H_{jk}}^W$, яку можна визначити за такою формулою:

$$M_{H_{jk}}^W = P_{H_{ijk}} \cdot Z_{on} \cdot \gamma_{jk}, \quad (2.5)$$

де $P_{H_{ijk}}$ – пропускна здатність i -ї смуги m_H j -го перегону у k -му напрямку, авт./год;

Z_{on} – оптимальний рівень завантаження вулиці рухом ($Z_{on} = 0,5-0,7$);

γ_{jk} – коефіцієнт багатосмуговості для j -го перегону у k -му напрямку, залежить від кількості пріоритетних і непріоритетних смуг руху у k -му напрямку: $m_{\Pi} = 1$ та $m_H \geq 2$, $\gamma = 1,9$; $m_{\Pi} = 2$ та $m_H \geq 4$, $\gamma = 3,5$.

Враховуючи те, що до уваги беруться ділянки багатосмугових вулиць чи доріг з 3-ма і більше смугами руху в одному напрямку, на яких, як відомо, рух

розподіляється нерівномірно, то оцінку пропускну здатності доцільно виконувати тої i -ї смуги, на якій спостерігається найвище її значення.

Використання характеристики (2.5) є дієвою для міських вулиць і доріг безперервного руху з перегонами вулиць значної довжини, суміжні перехрестя чи примикання яких знаходяться зазвичай у різних рівнях, тобто ділянки вуличної мережі, які за умовами руху та характером обслуговування ТП є подібними до заміських доріг. Застосування згаданої залежності до перегонів вулиць і доріг регульованого руху, призведе до помилок та необ'єктивних результатів. Це пояснюється тим, що у формулі (2.5) визначення інтенсивності неперіоритетного потоку при стані W системи «ДУ – ТП» залежить від коефіцієнта завантаження дороги рухом (Z), значення якого характеризує співвідношення інтенсивності ТП і конкретних дорожніх умов, проте не враховує впливу засобів керування руху (світлофорних об'єктів) на характер ТП.

Пропускна здатність однієї неперіоритетної смуги j -го перегону регульованого руху визначається суміжними його перехрестями, зокрема параметрами керування світлофорної сигналізації на них. Стан W системи «ДУ – ТП» у таких умовах існує тоді, коли рух ТЗ через стоп-лінію перехрестя здійснюється потоком насичення впродовж дозволеного сигналу. Фізичний зміст такого режиму – пропускна здатність напрямку [42, 56]. Для кількісного вираження у цих умовах станів системи «ДУ – ТП» використовується ступінь насичення X , а стан W системи існує тоді, коли величина X набуває значення 0,95 [97]. Враховуючи зазначене формула (2.5) для перегонів вулиць регульованого руху набуде такого вигляду:

$$M_{H_{jk}}^W = \sum_{i=1}^r P'_{H_{ijk}} \cdot X, \quad (2.6)$$

де $M_{H_{jk}}^{'W}$ – інтенсивність неперіоритетного потоку на j -му перегоні регульованого руху у k -му напрямку, що відповідає стану W системи «ДУ – ТП», авт./год;

$P_{H_{qjk}}'$ – пропускна здатність i -ї смуги руху m_H j -го перегону на підході до регульованого перехрестя у k -му напрямку, авт./год;

X_{on} – оптимальний ступінь насичення рухом на підході;

r – кількість смуг руху m_H у k -му напрямку (при $r > 2$ до уваги беруться пропускні здатності двох смуг з найбільшими значеннями).

Враховуючи (2.3), (2.4), (2.5) і (2.6) формула (2.2) набуде такого вигляду:

$$\text{для } j\text{-го перегону безперервного руху } M_{\Pi_{jk}} \cdot U_{jk} \geq P_{H_{ijk}} Z_{on} \cdot \gamma_{jk} \cdot Y_{jk}; \quad (2.7)$$

$$\text{для } j\text{-го перегону регульованого руху } M_{\Pi_{jk}} \cdot U_{jk} \geq \sum_{i=1}^r P_{H_{ijk}}' \cdot X_{on} \cdot Y_{jk}. \quad (2.8)$$

За допомогою формул (2.7) і (2.8) є можливим оцінити доцільність обслуговування пасажирів спеціальною смугою на усій довжині існуючого чи проектованого автобусного маршруту, з необхідною розбивкою його на однорідні ділянки, при цьому визначатиметься як:

$$\begin{aligned} O_{\Pi_1} &\geq O_{H_1} \\ O_{\Pi_1} &\geq O_{H_1} \\ &\vdots \\ O_{\Pi_n} &\geq O_{H_n}, \end{aligned} \quad (2.9)$$

де n – кількість однорідних ділянок (перегонів) на автобусному маршруті.

Характеристика (2.9) є своєрідним показником щодо доцільності функціонування спеціальних смуг на перегонах вулиць.

Є очевидним, що мінімальний обсяг пасажиропотоку можна визначити із формул (2.7) та (2.8), при цьому розрахунок значень, як бачимо, залежить від

пропускної здатності неперіоритетної смуги руху та коефіцієнта заповнення автомобіля. На основі цих показників та можливих інтервалів їх значень було визначено діапазон значень мінімального обсягу пасажиропотоку для перегонів вулиць безперервного і регульованого руху (рис. 2.2).

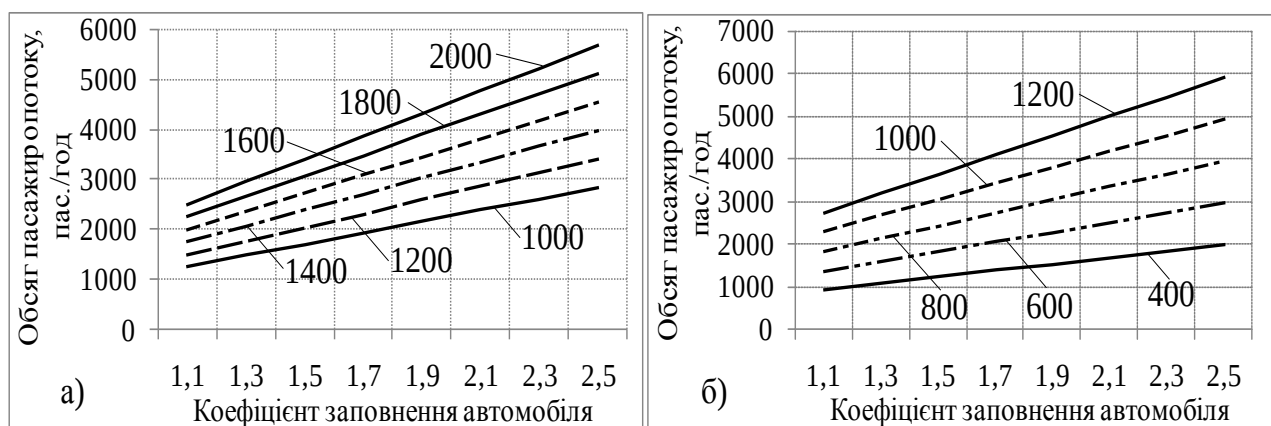


Рисунок 2.2 – Діапазон значень мінімального обсягу пасажиропотоку для перегонів вулиць безперервного (а) та регульованого (б) руху

З рис. 2.2 видно, що мінімальний обсяг пасажиропотоку має широкий діапазон значень і складає:

- для перегонів вулиці безперервного руху – від 1254 до 5700 пас./год;
- для перегонів вулиці регульованого руху – від 912 до 5928 пас./год.

Такий діапазон значень пояснюється наявністю на перегонах вулиць різноманітних дорожньо-транспортних умов, які виражаються у даному випадку через пропуску здатність смуги руху та коефіцієнт заповнення.

Широкий спектр значень пропускної здатності смуги руху пояснюється її випадковим характером, ступінь якої залежить від багатьох чинників (швидкості руху, складу транспортного потоку, дорожніх умов і т.д.). Тому для техніко-економічних розрахунків встановлено низку чітких значень. Наприклад, для перегонів вулиць безперервного руху – 1000 та 1200 авт./год на смугу руху, для регульованих – 700 і 800 авт./год [1, 18, 34].

Для коефіцієнта заповнення наразі встановлено інтервал можливих значень, оскільки цей показник, як і більшість характеристик ТП, є стохастичною

величиною і залежить загалом від транспортної рухомості населення конкретного міста [98]. Мало того, він практично не використовується у техніко-економічних обґрунтуваннях, тому для його визначення ще не розроблено достатньо ефективних методів. Сьогодні використовуються два підходи для визначення коефіцієнта заповнення. Перший – базується на натурних дослідженнях, де коефіцієнт заповнення визначається через безпосередній облік ТЗ і пасажирів у них на визначених елементах ВДМ [91, 101, 102]. Другий – на основі даних транспортної моделі міста, що створюється інструментами стратегічного транспортного моделювання [84]. Тому для орієнтовних практичних розрахунків часто використовується середнє значення із діапазону на рис. 2.2 ($Y = 1,80$).

Враховуючи вищенаведене, величина $O_{П_{jk}}$ для практичних розрахунків набуде таких значень: табл. 2.4 (значення округлені до десятих).

Таблиця 2.4 – Мінімальні значення обсягу пасажиропотоку для практичних розрахунків (пас./год)

Коефіцієнт заповнення, Y	Пропускна здатність смуги руху на перегоні вулиці, авт./год			
	безперервного руху		регульованого руху	
	1000	1200	700	800
1,8	2050	2460	2390	2740

Підсумовуючи важливо зазначити, що за допомогою запропонованої емпіричної формули (2.2) є можливість встановлювати доцільність впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць за значеннями мінімального обсягу пасажиропотоку, яка, своєю чергою, дає змогу враховувати особливості дорожньо-транспортних умов на елементах ВДМ.

2.3 Визначення стану транспортних потоків на неперіоритетних смугах

Як зазначається у [34, 55, 69] стан неперіоритетного ТП на смугах m_H після впровадження спеціальних смуг визначається нижніми та верхніми обмеженням на інтенсивність неперіоритетного потоку M_H і характеризується нерівністю:

$$400 \leq M_H < 800, \quad (2.10)$$

де M_H – інтенсивність неперіоритетного потоку на одну смугу руху, авт./год.

Нижнє обмеження на M_H пояснюють тим, що при $M_H < 400$ авт./год взаємодія МА та інших ТЗ є низькою і останні не порушують регулярність руху автобусів, не знижують їх експлуатаційних швидкостей, а також не зумовлюють утворення регулярних заторів на маршрутах їх руху. Як висновок, впровадження спеціальних смуг є малоефективним і в загальному – непотрібним.

Але ця умова містить низку недоліків, що в кінцевому зменшує потенційне впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць. Зокрема, показник інтенсивності руху, яким описується ця умова, є стохастичною величиною, що постійно змінюється в часі і просторі дорожнього середовища. У потоках можуть трапляються так звані «сплески» інтенсивності руху, за яких інтенсивність потоку за 15 хв., може досягати 60% годинної [36]. Мало того, нижнє обмеження на M_H в один піковий період може відповідати граничному значенню, тоді як в інший – не відповідати. Також ця гранична величина в різних дорожніх умовах відповідає різним рівням завантаження руху.

З огляду на це, стан ТП на смугах m_H після впровадження спеціальних смуг повинен визначатися не нижніми чи верхніми обмеженнями на інтенсивність, а рівнем завантаження смуг проїзної частини. Визначивши допустиму область завантаження руху на неперіоритетних смугах, дозволить обґрунтувати критичний

стан потоку на смугах m_H , за якого впровадження спеціальних смуг є недоцільним і неефективним (збитковим) [26].

Після введення спеціальних смуг на смугах m_H відбудуться зміни у структурі потоку, який стає одноріднішим за складом. Також змінюється величина M_H , яка може збільшуватись або зменшуватись, що відповідно призводить до внутрішніх перетворень у ТП та його якісного стану. Для того, щоб оцінити ці зміни потрібно звернутись до математичного опису станів ТП та його характеристик.

Стан транспортного потоку прийнято оцінювати за допомогою рівняння безперервності (основного рівняння транспортного потоку), яке зв'язує три ключові його характеристики: інтенсивність M , швидкість V , щільність H [18, 55, 56, 72, 74].

Для кількісного вираження станів потоку ТЗ у різних дорожніх умовах необхідно скористатися, коефіцієнтом завантаження дороги рухом Z запропонованим акад. В.В. Сільяновим. Ним же рекомендовано 4 рівні зручності руху А, Б, В, Г, кожний з яких характеризує відповідний рівень завантаження дороги рухом, умови комфортності поїздки та аварійність [57]. Однак дослідження щодо рівнів зручності проводились цим автором у період, коли рівень автомобілізації був нижче 100 автомобілів на 1000 мешканців і потік переважали вантажні автомобілі, становлячи 50–70 %. У сучасних умовах склад і чисельність ТП різко змінився, тому раціональніше використовувати градацію рівнів зручності, прийняту в американській практиці, яка розглядає 6 рівнів зручності («рівні обслуговування») [89].

Отож, для визначення допустимої області завантаження рухом на неперіоритетних смугах m_H після впровадження спеціальних смуг потрібно основну діаграму ТП зв'язати з рівнями обслуговування руху і перетворити їх у графічне співвідношення коефіцієнт завантаження Z – щільність руху для перегону вулиці, що розглядається у [23]. Також для кількісного відображення щільності руху, а саме – максимальної, яка відповідає умовам затору, слід скористатися рекомендаціями поданих у [104], де зазначається, що максимальна

щільність складає приблизно 140 авт./км на смугу (виходячи з того, що довжина транспортного засобу становить 7 м). Як результат, на рис. 2.3 наведена градація рівнів зручності руху відповідно до залежності: «коефіцієнт завантаження дороги рухом – щільність руху».

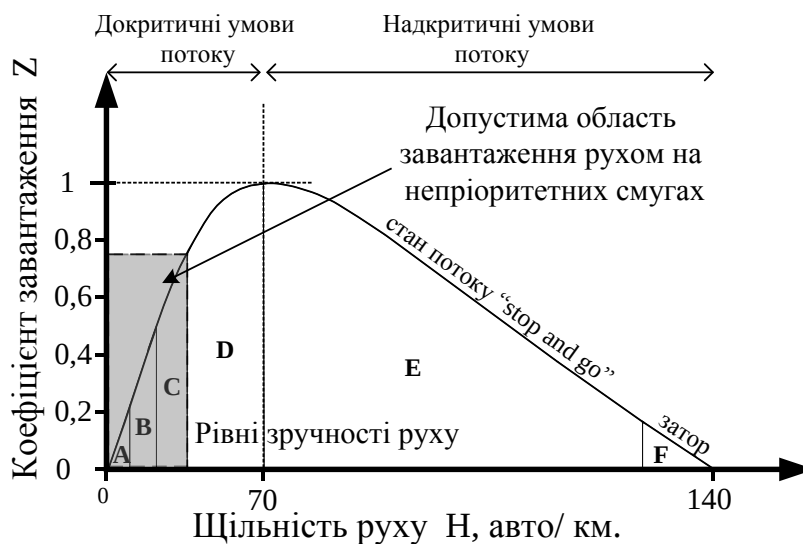


Рисунок 2.3 – Градація рівнів зручності руху відповідно до співвідношення між коефіцієнтом завантаження і щільністю руху

Аналізуючи вищенаведене співвідношення було встановлено, що верхнє обмеження на інтенсивність неперіоритетного потоку M_H відповідає верхній межі рівня зручності C ($Z = 0,75$), оскільки при $Z > 0,75$ розпочинаються незадовільні умови руху для потоку, тобто утворення затору [1, 21, 41]. Встановлення нижньої межі є непотрібним. Значить допустима область завантаження на неперіоритетних смугах відповідає практично усьому діапазону докритичних умов потоку [104] і знаходиться в інтервалі від 0 до 0,75 завантаження перегону вулиці рухом.

Процес оцінки потенційних умов за критерієм III або процес розрахунку рівня завантаження на смугах m_H можна сформулювати у вигляді такої послідовності: рис. 2.4.

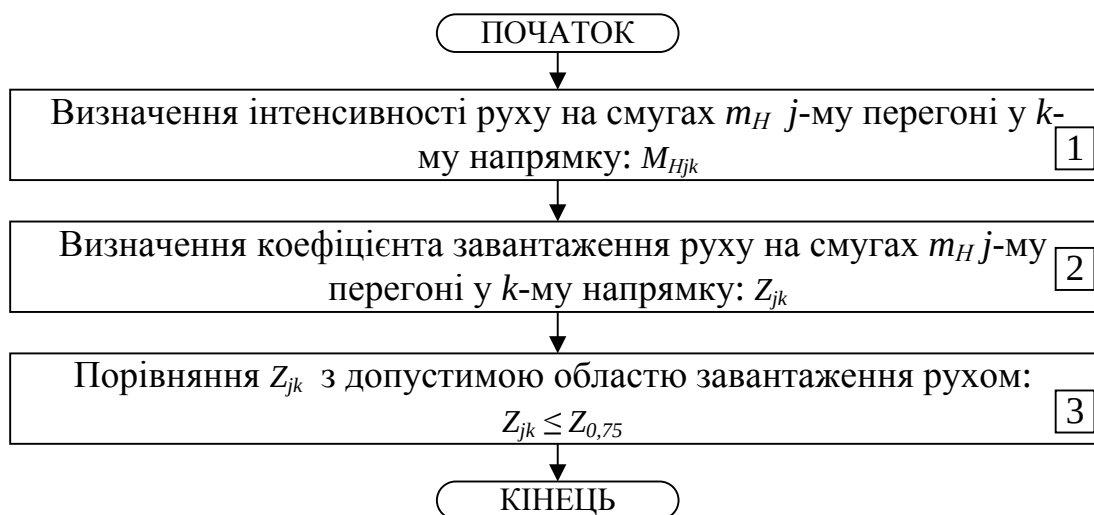


Рисунок 2.4 – Оцінка стану ТП на неперіоритетних смугах

Найважливішим етапом у цій послідовності є прогнозування зміни інтенсивності, а відповідно і рівня завантаження на смугах m_H після впровадження спеціальних смуг (див. рис. 2.4, етап 1). Завдання такого характеру найпростіше вирішити із використанням залежностей основної діаграми ТП, однак внаслідок чого можна отримати лише орієнтовні дані про зміну інтенсивності на неперіоритетних смугах (за допомогою основної діаграми можна розрахувати зміну інтенсивності, тоді як неможливо спрогнозувати розподіл руху ТП на ВДМ у випадку резервування спеціальних смуг на окремих її елементах, тобто неможливо спрогнозувати саму зміну).

Тому для точної оцінки зміни інтенсивності руху на смугах m_H необхідно використовувати ті методи і підходи, за допомогою яких можна визначити, як змінюються характеристики дорожнього руху при зміні параметрів ВДМ.

Для цього у транспортному плануванні використовується стратегічне транспортне моделювання, за допомогою якого створюються транспортні моделі міст. Транспортна модель міста це масив даних її транспортної системи і здійснюючі у ній транспортні процеси. Транспортна модель розробляється за допомогою інструментів стратегічного моделювання, яке в наш час інтенсивно використовується завдяки багатшому досвіду у цьому напрямку та сучасним

програмним забезпеченням. До найпоширеніших – відносять VISUM, TransCAD, TMODEL, EMME/2 та ін. [54, 71, 81].

За допомогою транспортної моделі та її даних можна встановлювати прогнози зміни транспортних і пасажирських потоків при зміні параметрів ВДМ і оцінювати їх як на локальному рівні, так і в масштабах цілого міста.

Наприклад, у середовищі VISUM прогноз зміни характеристик ТП встановлюється за результатами перерозподілу потоків, що виконується на основі змінених параметрів ВДМ, зокрема значеннях пропускної здатності її елементів, інтенсивності руху на них та функції CR, яка описує зв'язок між інтенсивністю руху і пропускною здатністю [104]. Використовуючи один із видів цієї функції, прогноз поведінки ТП і зміна їх інтенсивності визначається на основі такої формули [104]:

$$t_{z_j} = t_{0_j} \cdot \left(1 + a \cdot \left(\frac{M_j}{P_j} \right)^b \right), \quad (2.11)$$

де t_{z_j} – тривалість руху у завантажених рухом умовах на j -му елементі ВДМ;

t_{0_j} – тривалість руху у вільних умовах на j -му елементі ВДМ;

M_j – інтенсивність руху на j -му елементі ВДМ;

P_j – пропускна здатність на j -му елементі ВДМ;

a, b – параметри, що задає користувач ($a \in [0, 0; \infty)$, $b \in \{0, 0 \dots 10, 0\}$).

Оцінка потенційних дорожньо-транспортних умов на доцільність впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць за трьома критеріями, а також процес підбору типів і варіантів спеціальних смуг за різними характеристиками можна сформулювати у вигляді такого алгоритму: рис. 2.5.

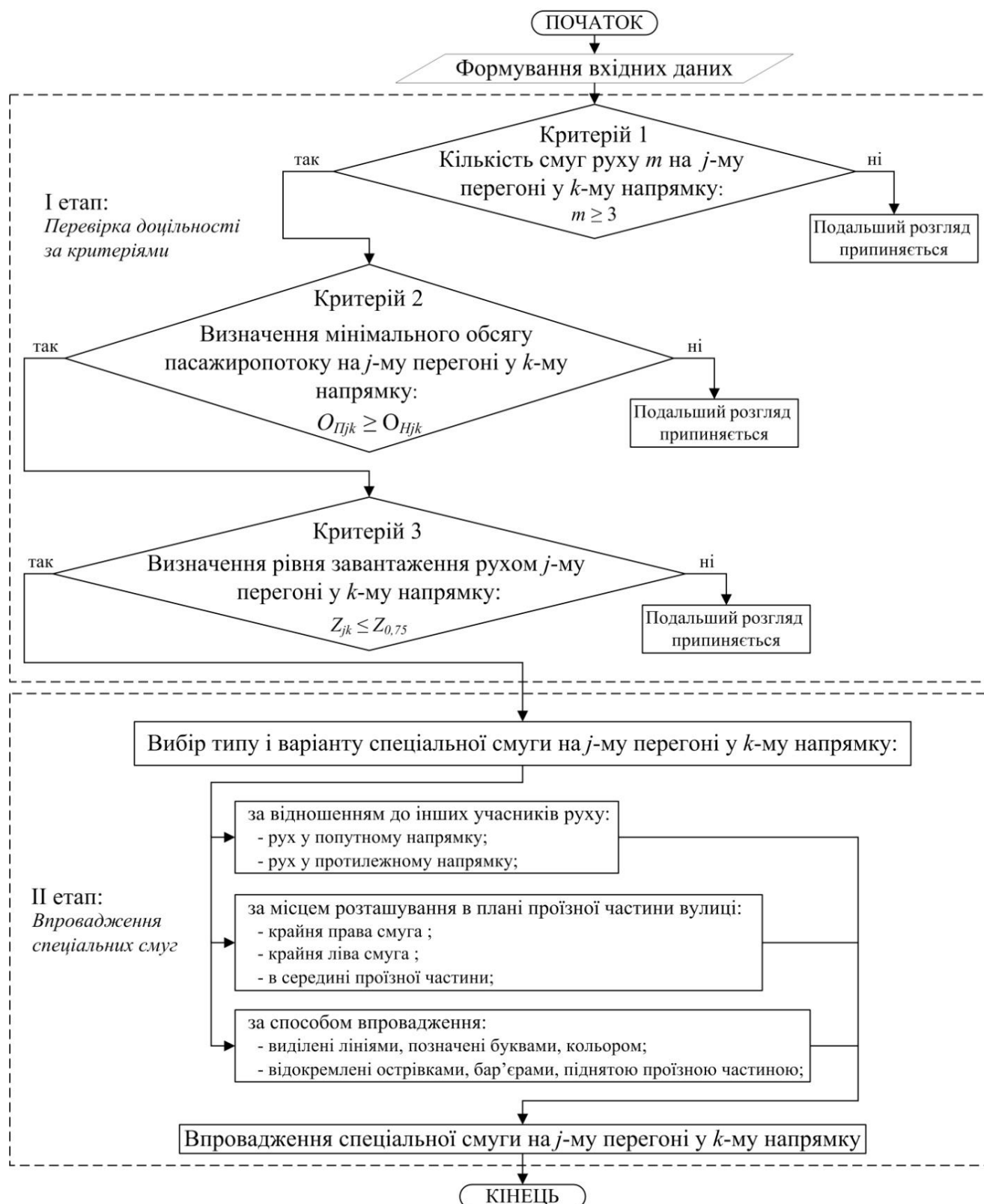


Рисунок 2.5 – Алгоритм впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць

2.4 Висновки до розділу

1. Доведено, що використання показника інтенсивності руху автобусів як критерію впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць є непридатним для різних типів автобусів, оскільки за одного і того ж мінімального значення різниця у перевізній здатності може досягати більше 6 тис. пас/год.

2. За результатами теоретичних досліджень встановлено, що доцільність впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць необхідно визначати за кількістю смуг руху в одному напрямку, мінімальним обсягом пасажиропотоку та показником, що характеризує стан потоку на неперіоритетних смугах. Причому в якості основного критерію необхідно використовувати мінімальний обсяг пасажиропотоку, а вже з нього визначати мінімально необхідну кількість автобусів певного типу.

3. Визначено діапазон значень мінімального обсягу пасажиропотоку (від 912–5928 пас./год) і запропоновано емпіричну формулу для його розрахунку залежно від дорожньо-транспортних умов на перегонах вулиць.

4. Доведено, що стан потоку на неперіоритетних смугах доцільно визначати рівнем завантаження руху, допустима область якого не перевищує 0,75 завантаження перегону вулиць, а основним етапом його розрахунку є встановлення прогнозу зміни інтенсивності руху на неперіоритетних смугах. Найточніші такі прогнози можна встановити за допомогою транспортної моделі міста та її даних, для створення якої використовуються інструменти стратегічного моделювання.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОГО ПРІОРИТЕТУ НА РЕГУЛЬОВАНИХ ПЕРЕХРЕСТЯХ

3.1 Обґрунтування методу «спеціальна смуга у зоні перехрестя» та визначення його типів

За результатами проведених досліджень у розділі 2 встановлено, що впровадження спеціальних смуг для МА на перегонах вулиць, при потребі не перериваючи на перехрестях, залежить від багатьох чинників і умови їх впровадження мають свої обмеження. З цих причин важливо, щоб їм у таких дорожніх умовах забезпечувався пріоритет насамперед на регульованих перехрестях, де, як відомо, виникають найбільші на ВДМ транспортні затримки. До регульованих перетинів, на яких складно забезпечити просторово-часовий пріоритет, невід'ємною складовою якого є використання спеціальних смуг, відносять перехрестя, підходи яких мають не більше двох смуг руху в одному напрямку. Щоб забезпечити такий пріоритет у цих умовах у [9, 30] запропоновано метод «спеціальна смуга у зоні перехрестя». Цей метод ґрунтується на створенні в певному напрямку додаткового поширення на підході до перехрестя і після нього, а також облаштування на цих поширеннях, включаючи ділянку на площі перетину між ними, спеціальної смуги для руху пріоритетного транспорту. Створення такого просторового «коридору» у зоні перехрестя забезпечує вільний доступ до стоп-лінії та домінуюче положення у просторі на проїзній частині, при цьому не зменшуючи кількість смуг на його підході для непріоритетного транспорту. За відсутності зупинних пунктів у зоні перехрестя або розташування їх перед ним, додаткові поширення слід впроваджувати лише на його підходах.

Пріоритетний проїзд площі перехрестя забезпечується за допомогою адаптивних алгоритмів керування світлофорною сигналізацією, зокрема через алгоритми продовження дозволеного та дострокового завершення забороненого

сигналу, а також викликом спеціальної фази (як правило, для реалізації абсолютного пріоритету).

За реалізацією цього методу у плані перехрестя, спеціальні смуги можна поділити на дві основні групи. До першої групи відносимо ті, які впроваджуються на перехрестях, де зупинні пункти відсутні або розташовані перед ним, а до другої – де зупинні пункти розташовані після перехрестя. Залежно від маневру зміни напрямку руху на перехресті, кожна група поділяється на типи. Окремі типи, за функціональним призначення, поділяються на два різновиди (тільки для автобусів або комбіноване використання з непріоритетними ТЗ, що повертають праворуч). Позначення спеціальних смуг у зоні перехрестя має три цифри. Перша вказує на групу, друга – тип, третя (за наявності) – різновид використання.

На основі цього структурного поділу, при цьому беручи до уваги Х-подібне пересічення, запропоновано два типи спеціальних смуг першої групи та чотири – другої (рис. 3.1 – пішохідні переходи умовно не показані) [9].

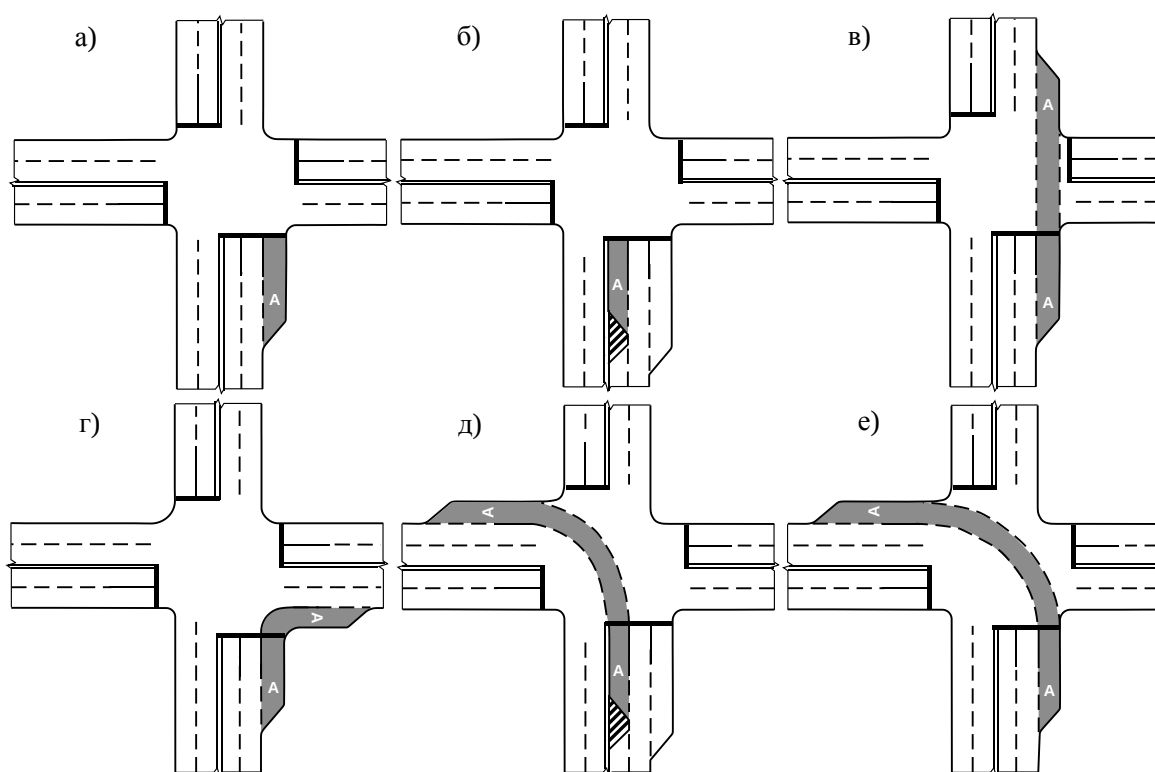


Рисунок 3.1 – Типи спеціальних смуг у зоні перехрестя першої та другої групи:

а – тип 1.1; б – 1.2; в – тип 2.1; г – 2.2; д – тип 2.3; е – 2.4

Спеціальні смуги типу 1.1 доцільно застосовувати для забезпечення пріоритетних умов руху в усіх трьох напрямках (прямо, праворуч і ліворуч) при розташуванні зупинок перед перехрестям, а для руху прямо і повороту праворуч – при їх відсутності. За таких же умов, для повороту ліворуч, доцільно застосовувати тип 1.2. Спеціальні смуги типу 2.1, забезпечують пріоритетні умови проїзду для руху прямо, тип 2.2 – для повороту праворуч, а тип 2.3 і 2.4 – для повороту ліворуч.

За відсутності пішохідних переходів на перехресті деколи спеціальні смуги другої групи доцільно впроваджувати на перехрестях, де зупинки відсутні або розташовані перед ним. Це дозволяє спростити реалізацію пріоритету в часі та забезпечити оптимальну роботу перехрестя.

Щоб забезпечити пріоритет з одного підходу в кількох напрямках (ліворуч, прямо і праворуч), спеціальні смуги другої групи, а саме типи 2.1, 2.2 і 2.4, можуть поєднуватися і впроваджуватися одночасно. Три різні комбінації можливі при впровадженні одночасно двох типів і одне поєднання – при впровадженні усіх трьох (рис. 3.2, а).

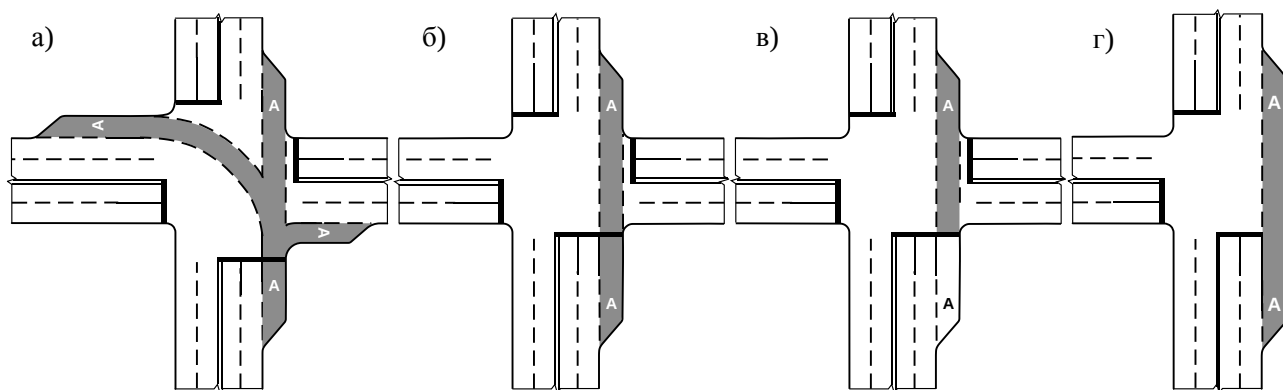


Рисунок 3.2 – Спеціальні смуги у зоні перехрестя:

а – одночасне впровадження типу 2.1, 2.2, 2.4; б – тип 2.1.1; в – тип 2.1.2; г – спеціальна смуга типу 2.1 у зоні Т-подібного перехрестя.

Зрозуміло, що поєднання різних типів спеціальних смуг можна вводити з усіх інших підходів. Однак при таких змінах ускладниться конфігурація зони перехрестя і його загальна схема організації руху. Також це буде знижувати

пропускну здатність пересічення для неперіоритетних ТП. Тому для таких випадків має діяти правило пріоритету щодо вибору маршрутів і спеціальні смуги впроваджувати в тих напрямках на перехресті, які забезпечуватимуть пріоритетний проїзд найнавантаженишим маршрутам з точки зору перевезення пасажирів.

Типи 1.1, 2.1 і 2.2 мають обидва різновиди використання, тобто якщо впроваджено спеціальні смуги типу 1.1.2, 2.1.2 та 2.2.2, то на спеціальну смугу можуть також в'їжджати ТЗ, що повертають праворуч. Як приклад, на рисунку 3.2, б та 3.2, в наведено обидва різновиди спеціальної смуги типу 2.1.

Застосування спеціальних смуг типу 2.2 або типу 1.1 тільки для повороту праворуч, потребує забезпечення пріоритету в часі (з використанням світлофорної сигналізації) лише при наявності інтенсивного пішохідного руху у прямому або перпендикулярному напрямках. За інших умов створений просторовий пріоритет дозволяє забезпечити вільний проїзд перехрестя.

Впровадження спеціальних смуг у межах зони Т-подібного перехрестя відзначаються відмінністю у застосуванні типу 2.1 (рис. 3.2, г), зокрема тим, що його доцільність є виправданою як за відсутності зупинок біля перехрестя, так і при розташуванні їх перед ним чи після нього.

Запропоновані спеціальні смуги обох груп інколи доцільно впроваджувати на перехрестях, підходи яких мають три і більше смуг руху в одному напрямку, при цьому реалізується це як через виділення (резервування) існуючих смуг руху, так і шляхом впровадження додаткових поширень на підході до перехрестя. Причиною цьому є умови, в яких не доцільно, згідно критеріїв, впроваджувати спеціальні смуги на перегонах вулиць, які не перериваються на перехрестях. Виходячи з цього, приклад застосування спеціальних смуг першої групи на підході до перехрестя з трьома смугами руху в одному напрямку, на створення яких вплинула робота [69], наведено на рис. 3.3.

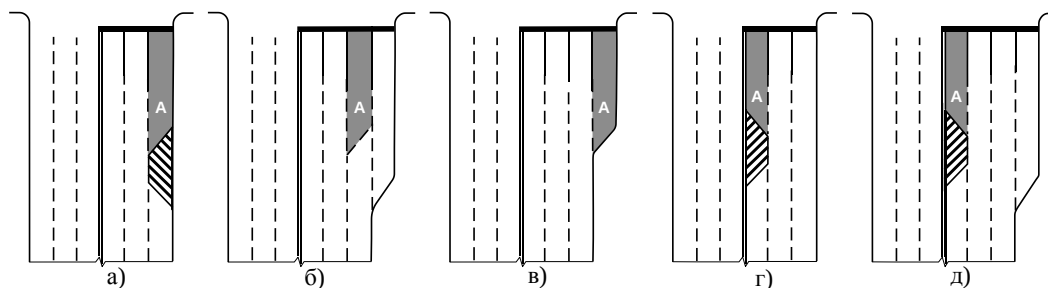


Рисунок 3.3 – Спеціальні смуга типу 1.1 і 1.2 у зоні перехрестя з трьома смугами на його підході: а, б, в – тип 1.1; г, д – тип 1.2

Тип 1.1, що наведений на рисунку 3.3 б, є окремим випадком, який доцільно впроваджувати для забезпечення пріоритету тільки у прямому напрямку за відсутності зупинок біля перехрестя.

Недоліком резервування смуг є зменшення кількості смуг для непріоритетних ТЗ та зміна схеми їх проїзду. Тоді як при впровадженні додаткових поширень – збільшується загальна ширина проїзної частини, що в умовах наявності пішохідних переходів, збільшує тривалість дозволеного сигналу для переходу пішоходів від чого зростає тривалість циклу.

Крім забезпечення пріоритету на ізольованих перехрестях, спеціальні смуги доцільно також впроваджувати на перетинах, які поєднані системою координованого керування. Особлива потреба у цьому з'являється тоді, коли зупинні пункти розташовані після двох суміжних перехресть, що об'єднані координованим керування, а ділянка координації, в яку вони входять, є з двома смугами руху в одному або обох напрямках. За таких умов, через неузгодженість часу руху автобусів між зупинками та дозволеним сигналом у напрямку координації, можуть виникати затримки на суміжному перехресті. Тобто забезпечити беззупинний рух автобусів між двома сусідніми зупинками, при цьому не порушуючи координованого режиму, є фактично неможливо. Тому для зменшення величини затримок автобусів як на живлячому, так і на суміжному перехрестях доцільно впроваджувати в їх зонах спеціальні смуги типу 2.1.

Таке рішення дозволить звести до мінімуму їх затримки (проїзд перетину як перший автомобіль черги) на перехрестях перед зупинкою в межах ділянки

координації, а також створює кращі передумови для забезпечення абсолютного проїзду, шляхом дострокового завершення дозволеного сигналу на другорядних напрямках або його продовження на головному.

Підсумовуючи важливо зазначити, що застосування методу «спеціальна смуга у зоні перехрестя» дає змогу забезпечити пріоритетні просторово-часові умови руху на регульованих перехрестях не зменшуючи кількість смуг для непріоритетних ТЗ. Для впровадження і використання на практиці цього методу, необхідно насамперед детально розглянути його геометричні параметри.

3.2 Визначення геометричних параметрів спеціальної смуги, що впроваджується у зоні перехрестя

Для визначення геометричних параметрів спеціальної смуги, яка впроваджується у зоні перехрестя слід розглянути один із типів, який узагальнює усі пропоновані. До такого можна віднести тип 2.1, за якого зупинний пункт розташований після перехрестя і пріоритетні умови руху забезпечуються у прямому напрямку.

Процес проходження автобусів спеціальною смугою можна розбити на такі етапи: *«вхід пріоритетного потоку на спеціальну смугу»* – *«рух пріоритетного потоку спеціальною смугою на підході до перехрестя»* – *«рух пріоритетного потоку спеціальною смугою на території перехрестя»* – *«рух пріоритетного потоку спеціальною смугою після виходу з перехрестя»* – *«вихід пріоритетного потоку із спеціальної смуги»*. Кожному етапу відповідає свій геометричний елемент спеціальної смуги (рис. 3.4).

Дослідження такої системи дозволяє розглядати одночасно усе транспортно-планувальне рішення та кожен елемент окремо. З огляду на це, розглянемо процес у системі диференційовано, по етапах, і визначимо можливу довжину кожного елемента.

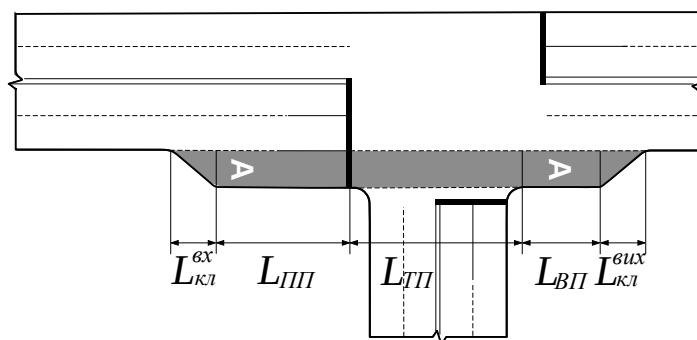


Рисунок 3.4 – Геометричні елементи спеціальної смуги у зоні перехрестя

«Вхід пріоритетного потоку на спеціальну смугу». Основну функцію, яку виконує геометричний елемент на цьому етапі, це забезпечення безпечного та плавного виконання маневру відхилення автобусів від загального потоку. Цю ділянку називають «клином» відгону $L_{кл}^{6x}$, довжина якої залежить від розрахункової швидкості і може визначатися за формулою [18]. В ущільнених умовах вуличного середовища, величину $L_{кл}^{6x}$ можна приймати як довжину такої ж ділянки на в'їзді до зупинки у «кишені», яка становить 20 м [22].

«Рух пріоритетного потоку спеціальною смугою на підході до перехрестя». На початку цього етапу, як і в попередньому, у певній мірі триває процес поділу потоку на пріоритетний та непріоритетний. Здійснення автобусом маневру відхилення відбувається на елементі клину відгону $L_{кл}^{6x}$, а завершується на ділянці підходу до перехрестя $L_{ПП}$. Тому останню умовно можна поділити на дві ділянки $l_{від}$ (ділянка на якій фіксується утворення одноріднішого потоку) та l_{nc} (ділянка підходу до стоп-лінії перехрестя).

Щоб завжди забезпечувався доступ автобусів до зони ділянки $l_{від}$, при цьому не порушувалась рівномірність їх швидкостей, необхідно ділянку l_{nc} запроектувати відповідної довжини. Очевидно, що для цього потрібно визначити максимальну довжину черги ТЗ на смузі, яка межуватиме з поширенням (спеціальною смугою) при режимі світлофорного регулювання, що відповідає піковим значенням інтенсивності руху на підході до перехрестя.

Максимальна кількість ТЗ у черзі, як відомо, утворюється в момент вмикання дозволеного сигналу. Однак важливо враховувати і ті автомобілі, що потрапляють у чергу впродовж дії дозволеного сигналу, тобто наскільки додатково видовжується черга з ТЗ впродовж циклу. Максимальна черга з автомобілів, що видовжилась на підході за цикл – це кількість ТЗ у черзі, що утворилась на початку дозволеного сигналу і кількість ТЗ, яка прибуває до перехрестя впродовж її роз'їзду до моменту рушення останнього автомобіля з черги, що сформувалась на початку дозволеного сигналу.

При нормальних (не перенасичених) умовах руху на підході (ступінь насичення $\leq 1,0$), черги, які утворилися на початку дозволеного сигналу повністю роз'їжджаються за ефективну тривалість дозволеного сигналу [65, 66]. Хоча, якщо на підході ступінь насичення перевищує 0,65, спостерігаються цикли, за які черги не повністю роз'їжджаються на дозволений сигнал. Інтенсивно це проявляється при ступені насичення більше 0,9 [53].

При перенасичених умовах руху (ступінь насичення $> 1,0$), тобто, коли на підході інтенсивність приїзду перевищує можливості від'їзду, утворені черги не роз'їжджаються за дозволений сигнал фактично завжди, причому може траплятися, що утворена черга за певний цикл роз'їдеться тільки впродовж декількох циклів. За таких умов максимальна довжина черги буде зростати за рахунок автомобілів, що залишилися в черзі із попередніх циклів. Відповідно, найбільша кількість ТЗ у черзі буде після n -го циклу періоду перевантаження. Оскільки якраз такі умови є потенційними умовами утворення затору, то для усунення його проявів необхідно слідувати до забезпечення нормального режиму керування на перехресті, при якому ступінь насичення не повинен перевищувати верхню межу 0,95 [87, 97].

Якщо зупинний пункт знаходиться перед перехрестям, то довжина ділянки l_{nc} також залежить від інтенсивності прибуття автобусів від величини, якої утворюватиметься відповідна довжина черги, а також тривалості зупинки на посадку висадку пасажирів. Проте цей чинник є визначальним при невеликих

значеннях довжини черги неперіоритетних ТЗ на суміжній з поширенням смугі та при значній інтенсивності маршрутних автобусів.

Враховуючи вищезазначене довжина елемента спеціальної смуги на підході до перехрестя L_{III} визначатиметься як:

$$L_{III} = l_{vid} + l_{nc}, \quad (3.1)$$

де l_{vid} – довжина ділянки, на якій завершується маневр відхилення (приймається рівною довжині статичного габариту автобуса);

l_{nc} – максимальна довжина черги неперіоритетних ТЗ на смугі, що межує зі спеціальною смугою, м.

«Рух пріоритетного потоку спеціальною смугою на території перехрестя». На цьому етапі геометричний елемент спеціальна смуга на території перехрестя L_{III} забезпечує просторовий пріоритет руху на самій площі перетину та вказує на оптимальну траєкторію руху при повороті праворуч чи ліворуч, або русі прямо (траєкторія для спеціальних смуг першої групи забезпечується за допомогою розмітки). Такі умови підвищуватимуть швидкість проїзду автобусів площі перехрестя і їх безпеку руху. Довжина елемента L_{III} , залежить від кількості смуг на підході до перехрестя з перпендикулярного напрямку та виду маневру.

«Рух пріоритетного потоку спеціальною смугою після виходу з перехрестя» та *«Вихід пріоритетного потоку із спеціальної смуги»*. З точки зору якісного опису процес руху за ці етапи, доцільно розглядати разом. Впродовж них відбувається вихід потоку з перехрестя, переміщення до зупинного пункту, гальмування та зупинка для висадки/посадки пасажирів, розгін, вихід із спеціальної смуги і виконання маневру злиття.

Довжину елемента, що відповідає першому етапові (елемент спеціальної смуги після виходу з перехрестя L_{BII}) умовно можна поділити на три ділянки. На першій ділянці завершується вихід автобусів з перехрестя та здійснюється рух до

зупинного пункту. Довжина цієї ділянки (підходу до зупинки l_{nz}) залежить від інтенсивності маршрутних автобусів і за даними [22] лежить у межах 5–20 м. Друга ділянка це посадкова площадка l_{nn} , довжина якої залежить від типу та кількості автобусів і може прийматися також згідно з [22]. На третій ділянці (l_{pz}) продовжується розгін автобуса після зупинки та розпочинається вливання у загальний потік. Впродовж другого етапу на елементі виходу потоку з спеціальної смуги $L_{кл}^{вих}$, виконання маневру злиття входить в основну та завершальну фазу, після чого автобуси рухаються у спільному потоці.

За геометричними характеристиками елементи $L_{ВП}$ і $L_{кл}^{вих}$ є подібними до перехідно-швидкісної смуги розгону, яку застосовують на виході із з'їзду розв'язок в одному і різних рівнях. Слідуючи цій аналогії ділянка l_{pz} є «швидкісним шлюзом» перехідно-швидкісної смуги [18], довжина якої залежить від інтенсивності потоку на головній вулиці та його складу. Однак у випадку, що розглядається довжина ділянки l_{pz} залежить не так від інтенсивності як від того чи момент виконання маневру злиття автобуса співпадає з переміщенням неперіоритетних ТЗ на смугах суміжно із зоною злиття. Це, своєю чергою, залежить від схеми пофазного роз'їзду на перехресті і розподілу інтенсивності за напрямками на підході.

Якщо на підході переважає інтенсивність потоку прямого напрямку і його проїзд за перехрестям співпадає з моментом вливання автобуса, то утворюється найскладніший випадок з точки зору виконання маневру злиття. Оскільки поява прийнятого інтервалу, для його виконання можлива лише після проїзду щільної динамічної групи ТЗ, що утворилася на виході з перехрестя. З другого боку, для того, щоб цей маневр забезпечувався у таких умовах, ділянка l_{pz} повинна бути значної довжини, і чим вона буде довшою, тим меншою буде різниця швидкостей між автобусом та неперіоритетним ТП, і тим безпечніше відбуватиметься їх злиття. Проте із збільшенням її довжини, зростають капіталовкладення для впровадження

і функціонування. Також на елементах ВДМ не завжди можливі значні розширення проїзної частини.

Тому довжина ділянки l_{pz} повинна визначатися з відстані для розгону. А ділянка виходу потоку із спеціальної смуги $L_{кл}^{вих}$ визначається аналогічно як і входу, тобто як довжина клину відгону на вході $L_{кл}^{вх}$. В ущільнених умовах вуличного середовища, величину $L_{кл}^{вих}$ можна приймати як довжину такої ж ділянки на виїзді від зупинки у “кишені”, яка становить 15 м [22].

Загальну довжину елементів спеціальної смуги у зоні перехрестя можна записати такою формулою:

$$L_C = L_{кл}^{вх} + L_{ПП} + L_{ТП} + L_{ВП} + L_{кл}^{вих}, \quad (3.2)$$

де L_C – довжина спеціальної смуги у зоні перехрестя;

$L_{кл}^{вх}$, $L_{кл}^{вих}$ – довжина клину відгону відповідно на вході спеціальної смуги і виході з неї;

$L_{ПП}$ – довжина елемента спеціальної смуги на підході до перехрестя;

$L_{ТП}$ – довжина елемента спеціальної смуги на території перехрестя;

$L_{ВП}$ – довжина елемента спеціальної смуги за перехрестям.

Результати теоретичних досліджень щодо геометричних параметрів спеціальної смуги засвідчують, що найважливішим елементом є довжина спеціальної смуги на підході до перехрестя, до визначення якої, а саме оптимальних її значень, слід перейти.

3.2.1 Визначення оптимальної довжини спеціальної смуги на підході до ізолюваного перехрестя

Як зазначалося вище, для визначення оптимальної довжини спеціальної смуги на підході до перехрестя, необхідно встановити максимальну кількість ТЗ у черзі на смузі, що межуватиме з нею. «Кількість автомобілів у черзі» та «довжина черги» (середня чи максимальна) – це показники якості функціонування регульованих перехресть, які, відповідно, вимірюються в автомобілях і метрах. Однак з метою стислого викладу матеріалу, у подальшому будемо використовувати здебільшого поняття «довжина черги», з одиницями виміру як в автомобілях, так і у метрах.

У спрощеному варіанті, максимальну довжину черги розраховують за формулою [81]:

$$Q_i = \frac{t_q \cdot N_i}{\left(1 - \frac{N_i}{M_{H_i}}\right) \cdot T}, \quad (3.3)$$

де Q_i – максимальна довжина черги на i -й смузі, авт.;

t_q – тривалість забороненого сигналу світлофора, с;

N_i – інтенсивність руху на i -й смузі, авт./год;

M_{H_i} – потік насичення на i -й смузі, авт./год;

T – тривалість періоду розрахунку, с.

Набагато точніші результати значень максимальної довжини черги ТЗ можна отримати за американськими нормами HCM 2000 [89] та німецькими HBS [87], розрахункові формули яких наведено у додатку А.

Для порівняння результатів розрахунків за HCM і HBS, розглянемо діапазон інтенсивності від 300 до 800 авт./год при однакових вхідних даних на деякому підході до ізолюваного перехрестя з однією смугою руху. Вхідний транспортний

потік на ньому є однорідний (100 % легкових автомобілів). Потік насичення становить 1800 авт./год. Залежно від інтенсивності руху тривалість дозволеного сигналу змінюється від 10 до 30 с з інтервалом 4 с. Умови руху на підході до перехрестя характеризуються трьома ступенями насичення: 0,65; 0,9; 1,0. При ступені насичення $X_i = 0,65$ тривалість циклу змінюється відповідно від 39 до 44, при $X_i = 0,9$ – від 54 до 61 і від 60 до 68 при $X_i = 1,0$. Тривалість періоду розрахунку складає – 3600 с (рис. 3.5).

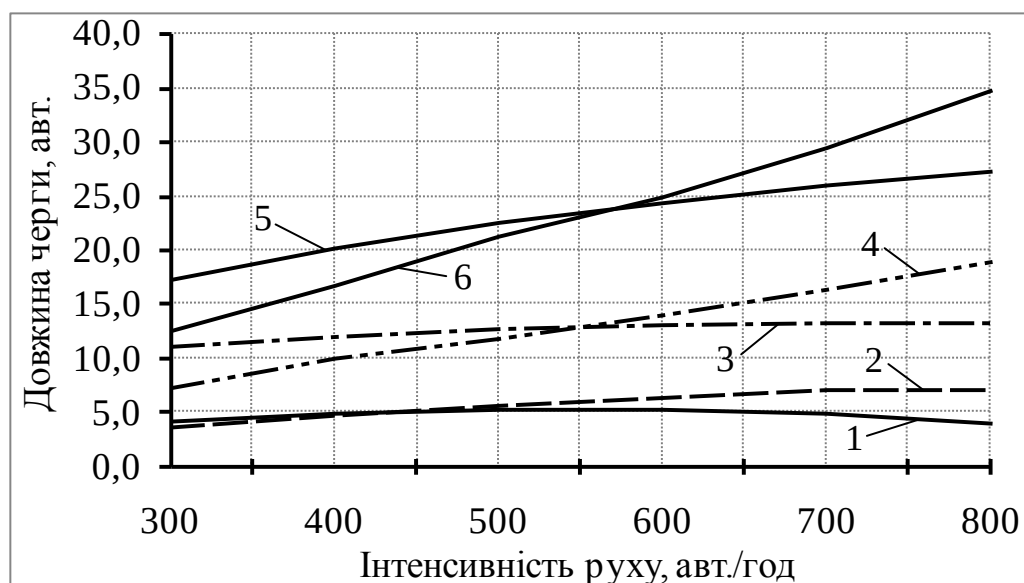


Рисунок 3.5 – Максимальна довжина черги ТЗ:

1; 3; 5 – за НСМ відповідно при $X_i = 0,65, 0,9, 1,0$; 2; 4; 6 – за НБС відповідно при $X_i = 0,65, 0,9, 1,0$

З рис. 3.5 видно, що є велика розбіжність між отриманими результатами, яка становить від 3 до 9 автомобілів відповідно при ступенях насичення 0,65 та 1,0. Але водночас значення довжини черги збігаються при інтенсивності 350–500 авт./год у випадку $X_i = 0,65$, і приблизно при 550 авт./год за інших двох ступенів насичення. Ці розбіжності в основному пояснюються тим, що в обох формулах випадковість прибуття ТЗ до перехрестя враховується за допомогою емпіричних коефіцієнтів, які отримані із заздалегідь заданих статистичних характеристик. У зв'язку з цим виникає необхідність у дослідженні цього показника і розробленні

методики для розрахунку максимальної довжини черги ТЗ, результати якої відповідали б її значенням у реальних умовах. При цьому важливо, щоб з її використанням можна було б визначати на скільки максимально збільшується в довжину черга ТЗ у плані підходу впродовж усього циклу. Оскільки саме ці значення черги в метрах визначають оптимальну довжину спеціальної смуги на підході до перехрестя.

Для розробки цієї методики доцільно використовувати методи імітаційного моделювання, які є поєднанням аналітичного розрахунку та натурального експерименту [32] і дають змогу точніше та детальніше описати закономірності функціонування досліджуваного об'єкта ніж аналітичні методи. Найскладнішим етапом імітаційного моделювання є створення моделі. Із складністю досліджуваного процесу зростають масштаби самої моделі. Тому при її розробці постановку завдання обмежимо лише визначенням максимальної довжини черги, яка утворюється на початку дозволеного сигналу та за увесь цикл (в автомобілях і метрах).

Імітаційна модель підходу(-ів) до ізолюваного перехрестя написана мовою програмування *Objective-C* у програмному середовищі *Xcode* (може використовуватися на iOS пристроях (iPhone, iPad)) [10].

Модель реалізована у такий спосіб, що при використанні користувач може легко змінювати вхідні дані, зокрема збільшувати кількість підходів до перехрестя (≤ 4) і вибирати потрібну кількість смуг руху на кожному з них (≤ 3), включаючи схему проїзду (див. додаток Б).

Вхідні дані в моделі можна поділити за такими категоріями:

- 1) тривалість періоду розрахунку, кількість імітацій;
- 2) кількість підходів до перехрестя та кількість смуг на кожному з них включаючи схему проїзду;
- 3) геометричні параметри підходу (ширина смуги руху, поздовжній ухил, радіус заокруглень для повороту праворуч і ліворуч);
- 4) параметри керування (тривалість циклу, дозволеного та жовтого сигналів);

5) умови руху (інтенсивність руху за період розрахунку, частка, що повертає праворуч, ліворуч та рухається прямо; частка по смугах; склад потоку (легкові, вантажні, автобуси) та розподіл їх за напрямками; наявність та інтенсивність пішохідного руху; закон розподілу часових інтервалів між ТЗ, що прибувають до перехрестя);

6) довжина в метрах динамічного габариту автомобіля в черзі при зупинці (легковий, вантажний, автобус), тривалість стартової затримки.

На рис. 3.6 наведено блок-схему алгоритму моделювання одного підходу до ізольованого перехрестя, яка обмежується однією смугою руху. При збільшенні кількості смуг – алгоритм збільшується на відповідну кількість блоків моделювання, які виконуються паралельно, а при розгляді більше одного підходу, алгоритм, від підходу до підходу, послідовно змінюється залежно від вхідних параметрів.

Весь алгоритм моделювання можна поділити на два етапи. На першому етапі визначається середній інтервал між автомобілями, що проїжджають перехрестя та момент прибуття першого автомобіля на його підході (поява наступного – визначається на другому етапі відразу після прибуття першого).

Середній інтервал між ТЗ при роз'їзді черги, визначається з потоку насичення, який є його оберненою величиною. Потік насичення розраховується за формулою [87]:

$$M_H = M_0 \cdot f_{SV} \cdot f_B \cdot f_R \cdot f_S \cdot f_F \cdot f_L \cdot f_{RT}, \quad (3.4)$$

де M_0 – ідеальний потік насичення (у моделі може змінюватися від 1800 до 2000 авт./год);

f_{SV} , f_B , f_R , f_S , f_L , f_{RT} – коефіцієнти, що враховують відповідно частку вантажного транспорту, ширину смуги руху, радіус повороту, поздовжній ухил, пішохідний рух, поворот ліворуч і праворуч.

Для цього період моделювання розбивається на мінімальні інтервали Δt [17, 59], який у моделі може набувати таких значень: 1,0 с; 0,1 с; 0,01 с; 0,001 с. Цей етап також включає визначення зміни світлофорних сигналів, моментів появи автомобілів на підході, визначення напрямку руху і тип ТЗ, проїзд перехрестя або формування черги, роз'їзд черги та визначення максимальної довжини черги (в автомобілях і метрах).

Визначення напрямку руху і типу транспортного засобу здійснюється випадково з використанням функції *arc4random*, що розподіляє їх рівномірно відповідно до вхідних значень.

Роз'їзд черги в моделі виконується після завершення забороненого сигналу та стартової затримки, величина якої змінюється залежно від типу першого автомобіля. Вплив пішохідного руху на транспортний потік, який при роз'їзді повертає праворуч чи ліворуч в одній фазі, виражається через відповідний коефіцієнт потоку насичення.

Максимальна кількість ТЗ у черзі визначається в момент завершення стартової затримки, що виникає на початку дозволеного сигналу (черга на початку дозволеного сигналу) та в момент рушання останнього автомобіля з черги, що утворилася на початку дозволеного сигналу або в момент завершення дозволеного сигналу (черга за цикл).

Результати, які видає модель є усереднена максимальна довжина черги ТЗ (в автомобілях і метрах) на початку дозволеного сигналу та впродовж циклу за k імітацій, а також максимальні їх значення.

Другий етап алгоритму починається із забороненого сигналу та повної відсутності ТЗ у черзі, хоча в реальних умовах вони можуть мати місце, зокрема у насичених умовах руху на підході. Тому для усунення цього недоліку, у вхідних параметрах моделі створена відповідна вкладка, за активації якої початок основного періоду моделювання розпочинається зі значенням черги, що визначається за період «розгону» моделі, який триває 15 хв., перед основним періодом. Значення черги вказуються ті, які залишилися після завершення дозволеного сигналу останнього циклу періоду «розгону». В результаті, це дає

змогу врахувати ті ТЗ, які можуть появитися в черзі на початку першого циклу основного періоду.

В алгоритмі є такі два спрощення: автомобілі, які прибувають до перехрестя зупиняються та розганяються миттєво; розподіл потоку за напрямками руху і складу потоку впродовж періоду розрахунку виконується за рівномірним розподілом, що не завжди відповідає реальному процесу.

Основною складовою обох етапів моделювання є моменти прибуття автомобілів до перехрестя, які виражаються у моделі через часові інтервали між автомобілями. Для їх моделювання, приймається, що часові інтервали між автомобілями є випадковою величиною ξ ($\xi = \xi(x)$), яка підпорядковується ймовірнісним законам розподілу [64]. У моделі часові інтервали розподіляються за складеним законом Гіпер-Ерланга [32, 48] та неперервним логнормальним законом [29, 59].

Розподіл Гіпер-Ерланга є лінійною комбінацією зміщеного експоненційного розподілу та розподілу Ерланга. Відповідно до цього розподілу ТП розділяють на дві групи – ТЗ, які вільно прибувають до перехрестя та автомобілі зі зв'язаним рухом [32, 48]. Щільність розподілу інтервалів між автомобілями задається виразом [32]:

$$f(x) = \beta \cdot \lambda_1 e^{-\lambda_1(x-\tau)} + (1-\beta) \cdot \frac{\lambda_2^a}{(a-1)!} x^{a-1} \cdot e^{-\lambda_2 x} \quad x \in (0; +\infty), \quad (3.5)$$

де a, λ_1, λ_2 – параметри закону розподілу; $a > 0$, $a \in \mathbf{Z}$; $\lambda_1 = \frac{1}{\bar{x}}$; $\lambda_2 = \frac{a}{\bar{x}}$;

$\bar{x}$ – середній часовий інтервал між ТЗ, с;

τ – мінімальний інтервал між ТЗ (згідно [48] лежить у межах 0,5–1,5 с), с;

β – частка автомобілів, які вільно прибувають до підходу перехрестя.

Застосування цього розподілу вимагає визначення величини β , тобто частки автомобілів, які під час руху не впливають один на одного і вільно прибувають до перехрестя. У [41, 44] вважається, що до них відносяться автомобілі, часовий

інтервал між якими є більшим за 8 с. З врахуванням цього було проведено модельний експеримент [10], в ході якого генерувалися випадкові часові інтервали між автомобілями, які прибувають до перехрестя за розподілом Ерланга [29, 59, 44], зі щільністю:

$$f(x) = \frac{\lambda_2^a}{(a-1)!} x^{a-1} \cdot e^{-\lambda_2 x} \quad x \in (0; +\infty). \quad (3.6)$$

При цьому розглядався діапазон інтенсивності від 50 до 1000 авт./год (з інтервалом 50 авт./год) при параметрах розподілу $a=2; a=3; a=4$. Для кожного значення інтенсивності та параметру розподілу проводилось по 1000 імітацій, фіксувалась кількість автомобілів, інтервал яких становив більше ніж 8 с (перед автомобілем та після нього), а також визначалася їх усереднена частка залежно від годинної інтенсивності руху. На основі цих результатів проведено регресійний аналіз, внаслідок чого отримано експоненційну залежність між β – часткою автомобілів, що вільно прибувають та інтенсивністю руху. При параметрі розподілу $a=2$ спостерігається найтісніший зв'язок між двома змінними, про що також свідчить високе значення коефіцієнта кореляції (0,9951). Рівняння регресії, що описує цю залежність закладено в модель і має такий вигляд:

$$\beta = 1,9610e^{-0,006N}, \quad (3.7)$$

де N – інтенсивність руху, авт./год (при $N \leq 112$ авт./год $\beta = 1,0$).

Щільність логнормального закону розподілу, задається формулою [29, 59]:

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad x \in (0; +\infty), \quad (3.8)$$

де μ, σ^2 – математичне сподівання та дисперсія, $\mu \in \mathbb{R}, \sigma > 0, \mu = \bar{x}$.

Для визначення середньоквадратичного відхилення σ використовуємо формулу [14, 58] (правило «чотирьох сигм»):

$$P\{\xi > \alpha\} = 0,5 - \Phi\left(\frac{\alpha - \mu}{\sigma}\right), \quad (3.9)$$

де α – мінімальний інтервал між автомобілями, с;

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad \text{– функція Лапласа;}$$

$P\{\xi > \alpha\} = 0,999968$ (приймається, що з такою ймовірністю випадкова величина ξ попадає на проміжок $(0,5; +\infty)$).

Для генерування в моделі випадних часових інтервалів за цими розподілами, неперервна випадкова величина η ($\eta = \eta(y)$), що розподілена з постійною щільністю на інтервалі $(0;1)$, піддається функціональному перетворенню $\xi = \varphi(\eta)$ [14]. Відповідно до цього, значення інтервалів x випадкової величини ξ визначаються через обернену функцію $F^{-1}(y)$ по відношенню до $F(x)$ за формулою [14]:

$$x = F^{-1}(y), \quad (3.10)$$

де $F^{-1}(y)$ – обернена функція до функції розподілу $F(x)$.

Обернена функція для розподілу Гіпер-Ерланга визначається на основі того, що закон Ерланга k -го порядку це сума незалежних випадкових величин, кожна з яких розподілена за показниковим законом [14]. Перетворюючи за формулою (3.10) функцію експоненційного розподілу та їх суму, отримаємо:

$$\begin{cases} x_i = -\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln(1 - y_i) + \tau & y \in (0;1) \\ x_i = -\frac{1}{\lambda_2} \cdot \sum_{i=1}^a (\ln(1 - y_i)) & y \in (0;1) \end{cases}. \quad (3.11)$$

Для визначення функції логнормального розподілу використовуємо не загальновідому у теорії ймовірності функцію Лапласа, а функцію помилок

$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$, яка є вбудованою у таких мовах як C++ та Objective-C. З її

використанням функція розподілу набуде виду [78]:

$$F(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} erf \left[\frac{\ln x - \mu}{\sqrt{2\sigma^2}} \right]. \quad (3.12)$$

На основі (3.10) формула (3.12) після простих перетворень матиме вигляд:

$$x_i = e^{\left(\mu + \sqrt{2\sigma^2} erf^{-1}(2y_i - 1) \right)} \quad y_i \in (0;1). \quad (3.13)$$

Якщо у формулі (3.13) використовувати значення σ , що отримані із формули (3.9), то загальна кількість ТЗ, які генерується за логнормальним розподілом не збігається (не є тотожною) із кількістю, яка задається у вхідних даних (зі зменшенням інтенсивності між ними спостерігається значна розбіжність). Тому для усунення цього недоліку (чого не спостерігається при розподілі Гіпер-Ерланга), було проведено статистичне моделювання, за яким встановлено залежності між параметрами розподілу (μ , σ) і годинною інтенсивністю руху, що задається в моделі у вхідних параметрах (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Залежності між параметри логнормального розподілу та інтенсивністю руху

Інтенсив- ність руху	Математичне сподівання		Середньоквадратичне відхилення	
	Рівняння регресії	Коефіцієнт кореляції	Рівняння регресії	Коефіцієнт кореляції
≤ 600	$\mu = 14,85e^{-0,002N}$	0,9801	$\sigma = 3,0338e^{-0,002N}$	0,9970
≤ 850			$\sigma = 1,9986e^{-0,001N}$	0,9690

Для перевірки результатів за розробленою моделлю розглядається той же діапазон інтенсивності руху (від 300 до 800), умови руху та дорожні умови, що й при аналізі формул з HCM і HBS. При цьому для порівняння результатів з тими, що відповідають їм у реальних умовах, додатково значення максимальної довжини черги ТЗ, визначаються у середовищі VISSIM, які приймаються за еталонні (VISSIM адекватно відтворює реальні умови) [103]. Щоб усереднити результати у VISSIM проведено 10 імітацій, і з отриманих значень у метрах визначається черга в автомобілях (відношення довжини черги в метрах до середньої довжини динамічного габариту автомобіля при зупинці в черзі).

Результати усередненої максимальної довжини черги ТЗ на початку дозволеного сигналу за 1000 імітацій, що отримані з моделі в Objective-C при ступенях насичення 0,65, 0,9 та 1,0 наведено на рис. 3.7 – 3.9. Поряд з цим наведено значення, які визначено за HCM та HBS, а також ті, що отримані з VISSIM.

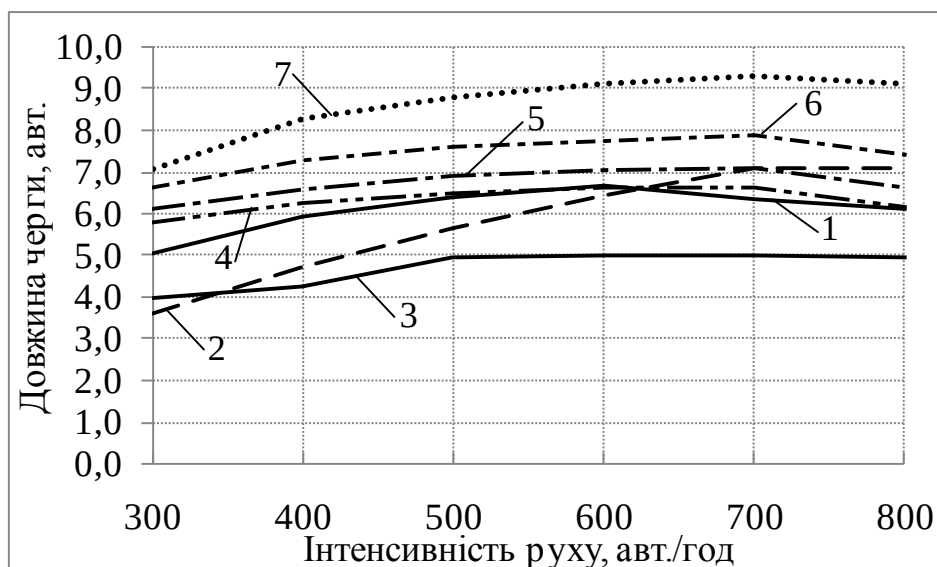


Рисунок 3.7 – Максимальна довжина черги ТЗ при ступені насичення $X_i = 0,65$:
 1 – за HBS; 2 – за HCM; 3 – за логнормальним розподілом; 4, 5, 6 – за розподілом
 Гіпер-Ерланга відповідно з параметрами $a = 2, a = 3, a = 4$; 7 – за VISSIM

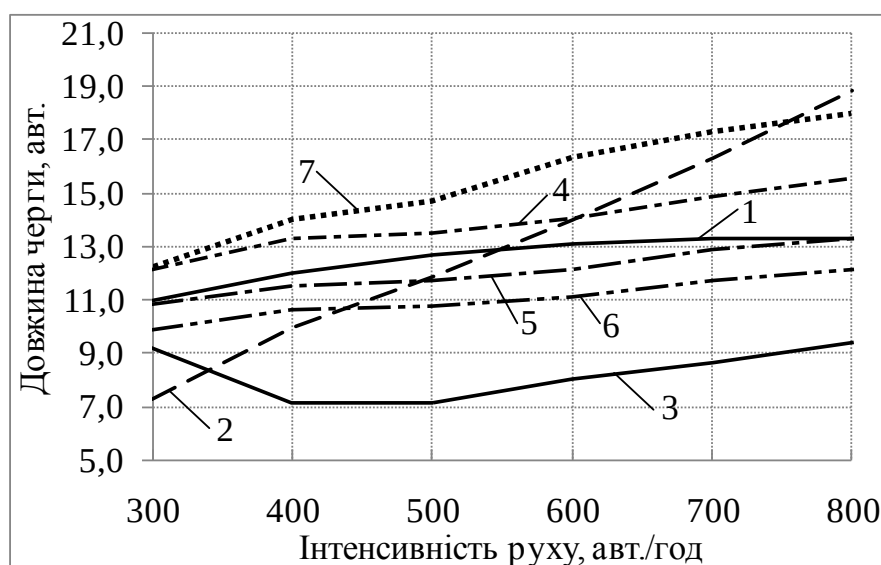


Рисунок 3.8 – Максимальна довжина черги ТЗ при ступені насичення $X_i = 0,9$:
 1 – за HBS; 2 – за HCM; 3 – за логнормальним розподілом; 4, 5, 6 – за розподілом
 Гіпер-Ерланга відповідно з параметрами $a = 2, a = 3, a = 4$; 7 – за VISSIM

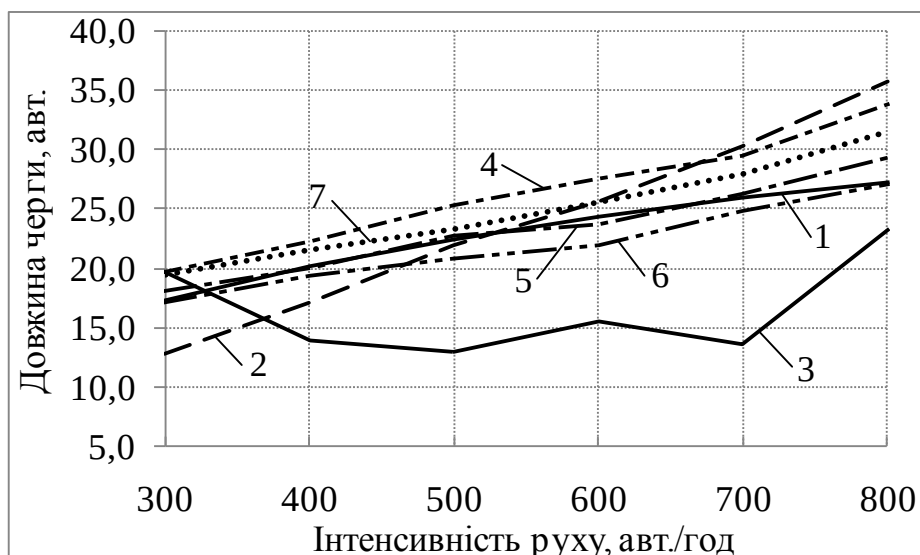


Рисунок 3.9 – Максимальна довжина черги ТЗ при ступені насичення $X_i = 1,0$:
 1 – за HBS; 2 – за HCM; 3 – за логнормальним розподілом; 4, 5, 6 – за розподілом
 Гіпер-Ерланга відповідно з параметрами $a = 2$, $a = 3$, $a = 4$; 7 – за VISSIM.

З наведених результатів видно, що значення, які отримані з VISSIM, є дуже близькими до тих, що визначаються за HBS, причому на усій довжині діапазону інтенсивності, що розглядається, збігається динаміка їх кривих (не спостерігається перетинів та значних розбіжностей). Але в усіх випадках значення за HBS є меншими за ті, що отримані з VISSIM. Це пояснюється тим, що у середовищі VISSIM чергу формують також ті ТЗ, швидкість яких є меншою за 5 км/год при підході до перехрестя.

З огляду на ці результати можна стверджувати, що значення максимальної довжини черги за HBS відповідають реальним даним набагато більше ніж за HCM. Тоді при ступені насичення 0,65 найбільше зі значеннями за HBS збігаються результати моделювання за розподілом Гіпер-Ерланга з параметром $a = 4$ та логнормальним розподілом (див. рис. 3.7), а при ступені насичення 0,9 та 1,0 – за розподілом Гіпер-Ерланга з параметром $a = 3$ (див. рис. 3.8 та 3.9).

При ступені насичення 0,9 та 1,0 результати за логнормальним розподілом суттєво відрізняються від тих, що відповідають їм у реальних умовах. Зумовлено це тим, що в процесі моделювання за цим розподілом збільшуються коливання значень загальної кількості ТЗ, які прибувають за період, хоча усереднена

кількість за k імітацій є близькою до значень, що задаються на вході. При моделюванні за розподілом Гіпер-Ерланга такого не спостерігається.

Зважаючи на відмінність в ефективності використання законів розподілу доцільно у моделі, в частині вибору розподілу інтервалів між ТЗ, що надходять до перехрестя, створити додаткову вкладку (режим «автоматично»), налаштування якої дозволяли б визначати максимальну довжину черги при різних ступенях насичення на підході. Порівнюючи результати максимальної довжини черги, що видає модель з даними за HBS при різних ступенях насичення, було встановлено межі застосування законів розподілу, які наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Межі застосування у моделі законів розподілу залежно від ступеня насичення

Ступінь насичення	Закон розподілу
$\leq 0,7$	Гіпер-Ерланга з параметром $a = 4$, Логнормальний
$\leq 0,84$	Гіпер-Ерланга з параметром $a = 2$
$\leq 1,0$	Гіпер-Ерланга з параметром $a = 3$

Як уже зазначалось, для визначення оптимальної довжини спеціальної смуги на підході до перехрестя, необхідно використовувати значення максимальної довжини черги, що утворюється впродовж циклу. Черга за «цикл» це черга, що утворюється на початку дозволеного сигналу і кількість ТЗ, яка прибуває до перехрестя впродовж її роз'їзду. Завершення відрізка часу, за який у моделі здійснюється підрахунок ТЗ, що прибувають до підходу впродовж дозволеного сигналу, є момент рушання останнього автомобіля з черги, що сформувалась на початку дозволеного сигналу (визначається як добуток $(n-1)$ -ї кількості автомобілів у черзі на початку дозволеного сигналу та середнього інтервалу проїзду стоп-лінії).

У табл. 3.3 наведено усереднені значення максимальної довжини черги, що утворюються на початку дозволеного сигналу і впродовж циклу при ступенях насичення 0,65, 0,9 та 1,0 з врахуванням результатів таблиці 3.2.

Таблиця 3.3 – Залежність між інтенсивністю руху та максимальною довжиною черги на початку дозволеного сигналу і впродовж циклу

Інтен- сив- ність руху	Трива- лість дозво- леного сигналу	Довжина черги за моделлю в Objective-C, авт.					
		логнормальний розподіл		розподіл Гіпер-Ерланга			
		ступінь насичення					
		0,65		0,9		1,0	
		на поч. зеленого	за цикл	на поч. зеленого	за цикл	на поч. зеленого	за цикл
300	10	4,00	5,00	10,82	11,79	18,20	20,64
400	14	4,30	6,19	11,48	13,30	20,17	23,32
500	18	4,98	6,97	11,71	14,60	22,78	27,66
600	22	5,00	7,94	12,13	16,33	23,82	29,76
700	26	5,00	8,71	12,89	18,59	26,41	33,46
800	30	4,99	9,24	13,30	20,84	29,42	39,22

Як видно з таблиці невідповідність між значеннями зростає із збільшенням на підході інтенсивності прибуття ТЗ, ступеня насичення і тривалості дозволеного сигналу. При $X_i = 0,65$ різниця між ними складає від 1 до 4 автомобілів, а при $X_i = 1,0$ – від 2 до 10. Для останніх умов руху зростання розбіжності між значеннями пояснюється тим, що при них, спостерігаються цикли за, які черга не повністю роз'їжджається за дозволений сигнал. Внаслідок цього, до черги, яка утворилася на початку дозволеного сигналу, додаються ТЗ, що прибувають впродовж повної тривалості дозволеного сигналу.

Важливо відзначити, що при ступені насичення 0,9 та 1,0 значення черги за «цикл» є близькими до тих, що отримані з VISSIM. Пояснюється це тим, що максимальна черга у VISSIM визначається в метрах і фіксується в момент максимального видовження черги з ТЗ у плані підходу, що відповідає алгоритму формування черги за «цикл» у моделі.

Враховуючи вищенаведене, з використанням розробленої моделі визначається максимальна довжина черги у метрах для однорідного складу потоку за прийнятої довжини автомобіля 6 м та ступенях насичення, які змінюються з 0,75 до 0,95 з кроком 0,1 (рис. 3.10). Останній відповідає верхній межі нормальних умов руху на підході до перехрестя [97]. Інші вхідні параметри є аналогічними як і при аналізі формул з HCM і HBS.

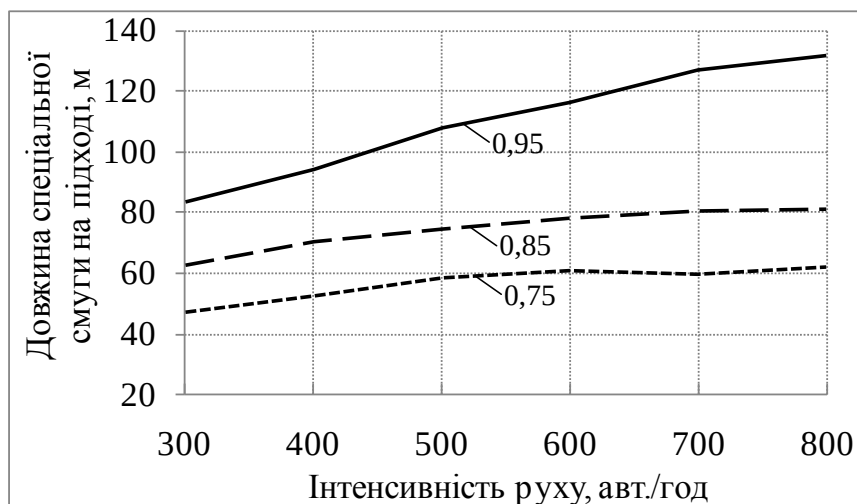


Рисунок 3.10 – Оптимальна довжина спеціальної смуги на підході до ізолюваного перехрестя (цифри на кривих – ступінь насичення)

Наведені результати на рис. 3.10 показують, що діапазон довжини спеціальної смуги на підході до ізолюваного перехрестя може коливатися від 47 до 135 м.

Підсумовуючи результати досліджень цього пункту слід зазначити, що для визначення максимальної довжини черги ТЗ на підході до ізолюваного перехрестя розроблено імітаційну модель, яка написана мовою Objective-C. З її використанням встановлено вплив закономірності процесу прибуття автомобілів до перехрестя на значення максимальної довжини черги. Якщо моменти прибуття автомобілів до перехрестя розподіляються в моделі за законом Гіпер-Ерланга з параметром $a = 3$, то значення черги за моделлю є аналогічними до тих, які визначаються за HBS і близькими до тих, що видає VISSIM. Водночас, за значеннями максимальної довжини черги ТЗ встановлено, що часові інтервали

між автомобілями, які прибувають до перехрестя відповідають реальним значенням, якщо розподіляються в моделі за цим законом. Залежно від ступеня насичення на підході визначено межі застосування законів розподілу (Гіпер-Ерланга та логнормального), за якими модель видає аналогічні значення максимальної довжини черги, як і за HBS.

Модель видає значення максимальної довжини черги ТЗ на початку дозволеного сигналу та за цикл регулювання (черга за «цикл»). Перші значення можуть використовуватися для оцінки ефективності керування світлофорною сигналізацією, а другі – для визначення довжини додаткового поширення на підході до перехрестя, яке застосовується з метою підвищення пропускної здатності перехрестя або для забезпечення пріоритету автобусам (метод «спеціальна смуга у зоні перехрестя»).

Час, за який модель видає результати залежить від мінімального інтервалу Δt (кроку моделювання), що обирається при введенні вхідних параметрів. При значеннях $\Delta t = 1,0, 0,1, 0,01, 0,001$ с та максимальній кількості імітацій (1000 імітацій) розрахунок відповідно триває – 4,7, 23,9, 219,2 с та понад 20 хв. Точність результатів після 0,1 с практично не підвищується, тому, з точки зору економії часу, в нормальних (не перенасичених) умовах руху на підході, зокрема при ступені насичення $\leq 0,65$ доцільно використовувати $\Delta t = 1,0$ с, а для насичених і перенасичених – $\Delta t = 0,1$ с.

3.2.2 Визначення оптимальної довжини спеціальної смуги на підході до координованого перехрестя

Як відзначалося раніше, для визначення оптимальної довжини спеціальної смуги на підході до координованого перехрестя, тобто на підході до суміжного перехрестя, яке об'єднане з іншим координованим керуванням необхідно визначити на ньому максимальну довжину черги, що утворюється вздовж головної вулиці на ділянці координації.

Для визначення максимальної довжини черги ТЗ на суміжному в напрямку координації регульованому перехресті (надалі суміжному перехресті) можна використовувати формулу Робертсона [106, 107], яка дозволяє встановлювати, скільки ТЗ проїде суміжне перехрестя без зупинки. Сьогодні ця формула здебільшого використовується в модифікованій формі [83], і з її використанням визначають затримки на суміжних перехрестях та оцінюють ефективність координованого керування загалом [106, 107]. Основний недолік формули Робертсона полягає у тому, що з її використанням можна визначити лише чергу, що утворюють ТЗ, які надходять з підходу головної вулиці (живлячого підходу), тоді як вона не враховує ті ТЗ, які в'їжджають на ділянку координації із другорядних вулиць. Мало того, черга визначається на основі значень кількості ТЗ, які проїхали суміжне перехрестя у попередньому циклі, що можливо тільки шляхом імітаційного моделювання.

На практиці значення довжини черги ТЗ як на координованих, так і на ізольованих перехрестях визначають здебільшого з використанням спеціалізованих програмних забезпечень (VISSIM, TransModeler тощо), які вирішують це завдання через прямий підрахунок. Якщо для визначення черги на ізольованому пересіченні, крім цього способу, існують ще інші аналітичні моделі, на основі яких можна проводити модельний експеримент (наприклад, модель прибуття ТЗ та роз'їзду черги [36, 49]), то для координованих – не існує фактично жодних аналітичних досліджень. З цих причин є потреба у проведенні детального аналітичного опису процесу формування черги на суміжному в напрямку координації перехресті та визначення максимального її значення. Це дозволяє сформулювати одне із основних завдань, що буде вирішуватися у цьому пункті – розробка аналітичної моделі для визначення максимальної довжини черги ТЗ на суміжному перехресті.

Ефективність координованого керування залежить від багатьох чинників [25, 33, 36, 39], тому для визначення максимальної довжини черги ТЗ, розглянемо сприятливі умови для його реалізації, зокрема: прямолінійна ділянка вулиці; головна вулиця характеризується інтенсивним рухом, де транзитність потоку

більше 80%; низька інтенсивність поворотних маневрів з магістралі і на неї; однаковий двофазний цикл на обох перехрестях та сталий часовий фазовий зсув між ними. До уваги беруться дорожні умови, що характеризуються двома смугами руху в обох напрямках (рис. 3.11, а).

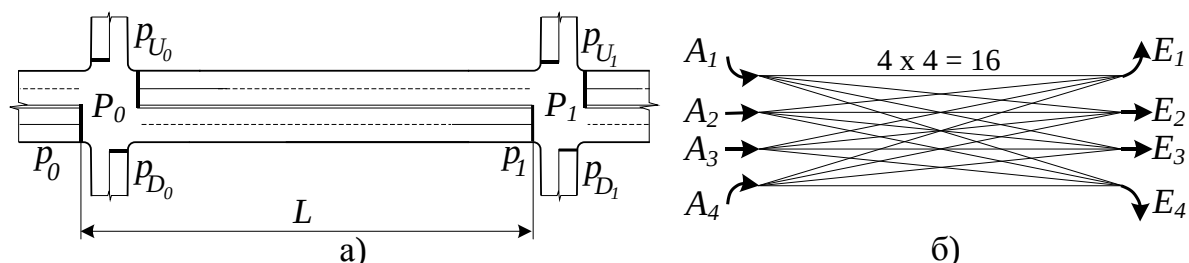


Рисунок 3.11 – Ділянка координації двох суміжних перехресть:

а – схема ділянки координації; б – можливі зв'язки між вхідними та вихідними потоками на ділянці координації

Функціонування ділянки координації двох суміжних перехресть, можна розглядати як деяку систему S , у якій відбувається спрощений Марковський процес з дискретними станами та дискретним часом [15, 64]. У системі можна виділити дві підмножини станів, зокрема початкові або стани джерела та поглинальні стани, які відповідно позначаємо W_1 та W_2 . За початкові стани приймаємо інтенсивності вхідних потоків на ділянку координації із живлячого перехрестя P_0 впродовж циклу. При розділенні потоків прямого напрямку за смугами руху та врахуванні поворотних потоків загалом утворюються чотири стани підмножини W_1 , тобто $W_1 = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$. За поглинальні стани, якими завершується процес у системі S , приймаємо інтенсивність вихідних потоків з ділянки координації на суміжному перехресті P_1 з аналогічним розподілом за смугами руху, а саме: $W_2 = \{E_1, E_2, E_3, E_4\}$.

Перехід системи із підмножини станів W_1 у W_2 відбувається за один крок, де кроком процесу є тривалість циклу, який виконується k разів ($k \in M$). Кожний стан A_i підмножини W_1 переходить до усіх станів підмножини W_2 , що утворює

загалом 16 зв'язків між двома підмножинами (рис. 3.11, б). Для спрощення розрахунків приймаємо, що зі стану A_2 система може перейти в усі крім E_3 , а зі стану A_3 – у A_2 . Дане спрощення полягає в тому, що автомобілі, які рухаються із живлячого підходу у прямому напрямку, не змінюють смуг руху в процесі переміщення до суміжного перехрестя, в результаті чого загалом утворюється 14 зв'язків. Підмножина станів W_1 задається вектором початкових умов $\bar{a} = (a_1, a_2, a_3, a_4)$, де a_i – це частка ТП від загальної кількості, що в'їжджає на ділянку координації впродовж циклу ($a_i \geq 0$ і $\sum_i a_i = 1$). Перехід підмножини станів W_1 у W_2 утворюють квадратну матрицю зі значеннями β_{ij} , які є частками інтенсивності вихідних потоків, що визначаються з інтенсивності вхідних потоків. З врахуванням спрощень зроблених вище (стан A_2 не переходить у стан E_3 , а стан A_3 – у A_2) матриця набуде вигляду:

$$\beta_{ij} = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} & \beta_{14} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & 0 & \beta_{24} \\ \beta_{31} & 0 & \beta_{33} & \beta_{34} \\ \beta_{41} & \beta_{42} & \beta_{43} & \beta_{44} \end{pmatrix}. \quad (3.14)$$

Сума значень β_{ij} перших двох стовпців матриці визначають частку потоку, що проїдуть суміжне перехрестя P_1 на крайній лівій смузі, а сума двох інших – на крайній правій смузі. Сумуючи значення β_{ij} у цих частинах за рядками (другий з третім і перший з четвертим) впливає, що максимальну довжину черги ТЗ на i -й смузі підходу p_1 утворюють ТЗ, що в'їжджають на ділянку координації L з живлячого підходу p_0 і другорядних підходів p_{U_0} та p_{D_0} . Аналітично це можна виразити такою формулою:

$$Q_{ik} = Q_{D_{ik}} + Q_{Ж_{ik}}, \quad (3.15)$$

де Q_{ik} – довжина черги ТЗ на i -й смузі перехрестя P_1 за k -й цикл;

$Q_{D_{ik}}$ – довжина черги на i -й смузі перехрестя P_1 з ТЗ, що надійшли із другорядних підходів p_{U_0} та p_{D_0} за k -й цикл регулювання;

$Q_{Ж_{ik}}$ – довжина черги на i -й смузі перехрестя P_1 з ТЗ, що надійшли із живлячого підходу p_0 за k -й цикл регулювання.

Потрапляння ТЗ з другорядних вулиць у чергу на суміжному перехресті, зумовлене принципами координованого керування, за якими їх в'їзд на ділянку L відбувається тоді, коли в напрямку координації триває заборонений сигнал. Однак чи усі ТЗ, що в'їхали на ділянку координації L , чи певна їх частина потраплять у чергу, залежить від параметрів керування між суміжними перехрестями, зокрема тривалості дозволених сигналів на обох перехрестях в напрямку координації та величини фазового зсуву.

Аналізуючи ці часові параметри, при цьому приймаючи, що ТЗ з другорядних вулиць рухаються з постійною швидкістю (швидкістю координації), виявляємо, що проїхати суміжне перехрестя (тобто не потрапити у чергу) можуть як автомобілі, які стартують на другорядних підходах (автомобілі «лідери»), так і ті, що їх проїжджають наприкінці дозволеного сигналу. Зважаючи на це, тривалість дозволеного сигналу на другорядних підходах доцільно умовно поділити на три відрізки часу – $t_{3_{\Delta 1}}$, $t_{3_{\Delta 2}}$ та $t_{3_{\Delta 3}}$, де за перший і третій ТЗ можуть проїхати суміжне перехрестя P_1 без зупинки, а за другий – обов'язково потраплять у чергу (рис. 3.12).

Відрізок часу $t_{3_{\Delta 1}}$, можна визначити за такою формулою:

$$t_{3_{\Delta 1}} = \begin{cases} (\mu'_c - \mu_{op}) - \theta_k & \text{при } t_{3_{\Delta 1}} > 0 \\ 0 & \text{при } t_{3_{\Delta 1}} \leq 0 \end{cases}, \quad (3.16)$$

де $t_{3_{\Delta 1}}$ – відрізок часу, що триває в період початку дозволеного сигналу на другорядних підходах;

μ'_c – момент завершення дозволеного сигналу на суміжному перехресті P_1 відносно початку циклу на живлячому перехресті P_0 ;

μ_{dp} – момент початку дозволеного сигналу на другорядних підходах відносно початку циклу на живлячому перехресті P_0 ;

θ_k – тривалість проїзду відстані L зі швидкістю координації.

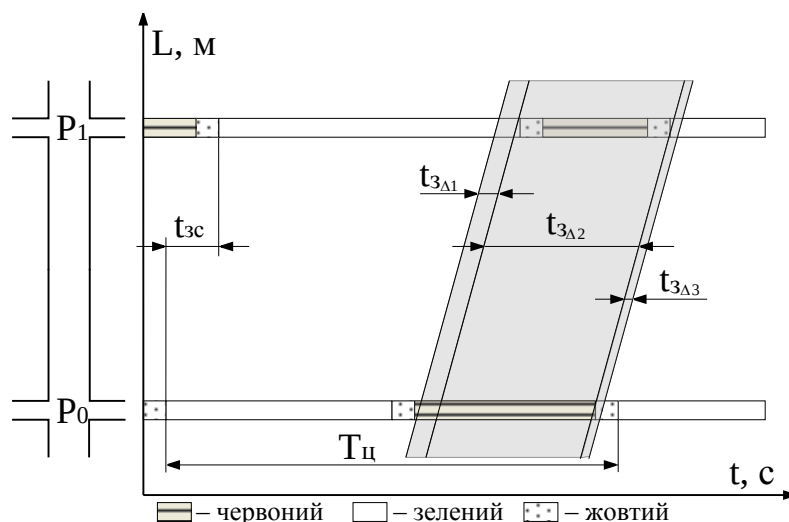


Рисунок 3.12 – Графічне тлумачення тривалості дозволеного сигналу на другорядних підходах: $t_{3\Delta1}$, $t_{3\Delta2}$, $t_{3\Delta3}$ – проміжки часу, за які ТЗ можуть проїхати перехрестя P_1 без зупинки ($t_{3\Delta1}$, $t_{3\Delta3}$) або потрапляють у чергу ($t_{3\Delta2}$); t_{3c} – часовий фазовий зсув; $T_{\text{ц}}$ – тривалість циклу

Однак навіть за виконання умови $t_{3\Delta1} > 0$ ТЗ з другорядних вулиць можуть бути зупинені через групу ТЗ, що рухається від живлячого підходу і відставання окремих з неї автомобілів. Тобто проїзд ТЗ з другорядних вулиць перехрестя P_1 за відрізок часу $t_{3\Delta1}$ залежить також від кількості ТЗ у групі та її складу на живлячому підході.

Відрізок часу $t_{3\Delta 3}$, можна визначити за такою формулою:

$$t_{3\Delta 3} = \begin{cases} (\mu'_{dp} + \theta_{\kappa}) - \mu_c & \text{при } t_{3\Delta 3} > 0 \\ 0 & \text{при } t_{3\Delta 3} \leq 0 \end{cases} \quad (3.17)$$

де $t_{3\Delta 3}$ – відрізок часу, що триває в період завершення дозволеного сигналу на другорядних підходах;

μ'_{dp} – момент завершення дозволеного сигналу на другорядних підходах відносно початку циклу на живлячому перехресті P_0 ;

μ_c – момент початку дозволеного сигналу на суміжному перехресті P_1 відносно початку циклу на живлячому перехресті P_0 .

З наведеного випливає, що величина Q_D визначається або інтенсивністю вихідного потоку за весь проміжок дозволеного сигналу t_3 , або за певну його частину, тобто за проміжок $t_{3\Delta 2}$. Залежність інтенсивності вихідного потоку від параметрів керування на обох перехрестях наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Залежність між інтенсивністю вихідного потоку на другорядних підходах та параметрами керування на суміжних перехрестях

Інтенсивність вихідного потоку	Параметри керування між перехрестями	
$N(t_3)$	$t_{3p0} \approx t_{3p1}$	$t_{3c} \approx \theta_{\kappa}$
$N(t_{3\Delta 2})$	$t_{3p0} \approx t_{3p1}$	$t_{3c} < \theta_{\kappa}$
	$t_{3p0} < t_{3p1}$	$t_{3c} \approx \theta_{\kappa}$
	$t_{3p0} < t_{3p1}$	$t_{3c} < \theta_{\kappa}$

де $N(t_3)$, $N(t_{3\Delta 2})$ – інтенсивність вихідного потоку на другорядних підходах як функція часу відповідно при аргументах t_3 та $t_{3\Delta 2}$;

$t_{3_{P_0}}$, $t_{3_{P_1}}$ – тривалість дозволеного сигналу в напрямку координації відповідно на живлячому перехресті P_0 та суміжному перехресті P_1 ;

t_{3c} – часовий фазовий зсув між перехрестями P_0 і P_1 .

Використання інтенсивності вихідного потоку для визначення Q_d є ефективним лише тоді, коли впродовж дозволеного сигналу постійно відбувається роз'їзд черги (рух потоком насичення), причому з окремої смуги в одному напрямку. Оскільки в реальних умовах роз'їзд ТЗ з однієї смуги може виконуватися у кількох напрямках і в потоці можуть появлятися часові розриви, зокрема після роз'їзду черги, то інтенсивність вихідного потоку слід виразити через інтенсивність прибуття впродовж циклу (N').

Щоб спростити вирішення цього завдання приймемо, що усі другорядні підходи на живлячому перехресті є ізольовані. Тоді для визначення інтенсивності прибуття можна прийняти гіпотезу про те, що ТЗ, які прибувають до одного підходу за деякий період T у загальному випадку є випадковим процесом $\xi(t)$, який можна виразити залежністю [15, 64]:

$$\xi(t, \omega) = (\xi_1(t, \omega), \xi_2(t, \omega), \dots, \xi_k(t, \omega)), \quad (3.18)$$

де $\xi_1(t, \omega), \xi_2(t, \omega), \dots, \xi_k(t, \omega)$ – координати вектора випадкового процесу.

Тоді кількість ТЗ, що прибуває за кожний цикл можна визначити із виразу:

$$N'(t, \omega) = \max \left\{ n : \sum_{i=1}^n \xi_i(t, \omega) < k \cdot t \right\} - \max \left\{ n : \sum_{i=1}^n \xi_i(t, \omega) < (k-1) \cdot t \right\} \quad \text{при } t \in T, \quad (3.19)$$

де $N'(t, \omega) = N'(t)$ – інтенсивність прибуття ТЗ впродовж циклу;

ω – елементарна подія, поява ТЗ за період t ;

$\xi(\omega)$ – випадкова величина, момент появи ТЗ на підході до перехрестя;

n – кількість ТЗ при фіксованому $t = t_0$;

$k = T/t$ – кількість січень випадкового процесу за період T .

Моменти появи ТЗ на підході або часові інтервали між ТЗ, що прибувають до перехрестя, як встановлено у попередньому пункті, доцільно описувати законом розподілу Гіпер-Ерланга, отримані значення за яким відповідають реальним даним.

З використанням формули (3.19) інтенсивність вихідного потоку, наприклад, для підходу p_{U_0} дорівнюватиме:

$$N_{U_0}(t_3) = \begin{cases} N'_{U_0}(t) & \text{при } t_3 > t_{pч} \\ N^{нас}_{U_0}(t) & \text{при } t_3 \leq t_{pч} \end{cases}, \quad (3.20)$$

$$N_{U_0}(t_{3\Delta 2}) = \begin{cases} N'_{U_0}(t) - (N'_{U_0}(t_{3\Delta 1}) + N'_{U_0}(t_{3\Delta 3})) & \text{при } t_3 > t_{pч} \\ N^{нас}_{U_0}(t) - (N^{нас}_{U_0}(t_{3\Delta 1}) + N^{нас}_{U_0}(t_{3\Delta 3})) & \text{при } t_3 \leq t_{pч} \end{cases}, \quad (3.21)$$

де $N_{U_0}(t_3)$, $N_{U_0}(t_{3\Delta 2})$ – інтенсивність лівоповоротного вихідного потоку на підході p_{U_0} відповідно за t_3 та $t_{3\Delta 2}$;

$N'_{U_0}(t)$ – інтенсивність прибуття лівоповоротного потоку до підходу p_{U_0} впродовж циклу;

$N^{нас}_{U_0}(t)$ – інтенсивність вихідного потоку, що здійснюється потоком насичення;

t_3 – тривалість дозволеного сигналу;

$t_{pч}$ – відрізок часу, який потрібний для роз'їзду черги.

Враховуючи вищенаведене та формули (3.19 – 3.21) Q_d для i -ї смуги суміжного перехрестя P_1 визначатиметься за такою формулою:

$$Q_{\mathcal{D}_{ik}} = \begin{cases} \int_{(k-1) \cdot T_u}^{k \cdot T_u} (\lambda_{U_0}(t) \cdot \beta_L + \lambda_{D_0}(t) \cdot \beta_R) dt & (k = \overline{1, M}) \\ \int_{(k-1) \cdot T_u}^{k \cdot T_u} (\lambda'_{U_0}(t) \cdot \beta_L + \lambda'_{D_0}(t) \cdot \beta_R) dt & (k = \overline{1, M}) \end{cases}, \quad (3.22)$$

де $Q_{\mathcal{D}_{ik}}$ – довжина черги на i -й смузі перехрестя P_1 з ТЗ, що надійшли із другорядних підходів p_{U_0} та p_{D_0} за k -й цикл, авт.;

$$\lambda_{U_0}(t) = \frac{N_{U_0}(t_3)}{T_u}, \quad \lambda'_{U_0}(t) = \frac{N_{U_0}(t_{3\Delta 2})}{T_u}, \quad \lambda_{D_0}(t) = \frac{N_{D_0}(t_3)}{T_u}, \quad \lambda'_{D_0}(t) = \frac{N_{D_0}(t_{3\Delta 2})}{T_u}$$

– відносна інтенсивність вихідного потоку відповідно на підходах p_{U_0} та p_{D_0} при t_3 та $t_{3\Delta 2}$;

T_u – тривалість циклу;

β_L і β_R – частки ТЗ, що надійшли з підходів p_{U_0} та p_{D_0} на i -ту смугу підходу p_1 ;

$$M = \frac{T}{T_u} - \text{кількість циклів за період дослідження } T.$$

Для визначення величини $Q_{\mathcal{D}_{ik}}$ на підході p_1 необхідно розглянути процес руху групи («пачки») ТЗ на ділянці координації, що сформувалася на підході p_0 впродовж забороненого сигналу. Після входу групи ТЗ на ділянку координації L , починається, як відомо, поступовий її розпад (зростає просторова та часова довжина), що зумовлено нерівномірністю руху окремих ТЗ, які сформували цю групу, різномірністю складу потоку та не дотримання деяких водіїв рекомендованої швидкості руху. На рис. 3.13 зображено процес деформації групи ТЗ [36, 49] та утворення черги на підході до суміжного перехрестя.

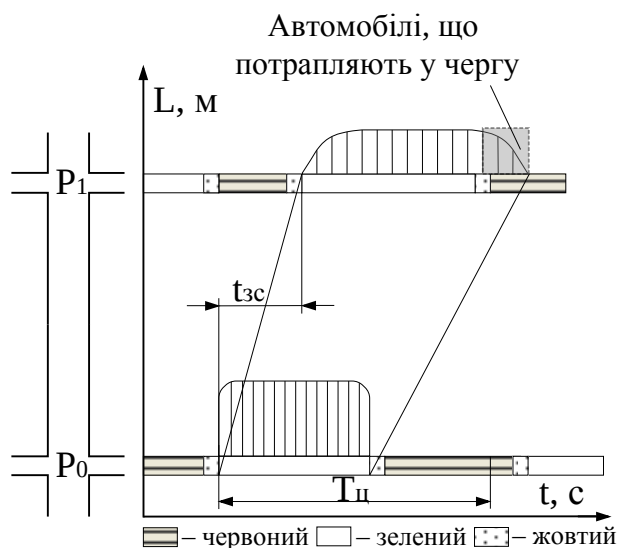


Рисунок 3.13 – Процес утворення черги на суміжному перехресті

З рисунка видно, що T_3 , які потрапляють у чергу є та частина часової довжини групи автомобілів, що спостерігається після моменту завершення дозволеного сигналу на суміжному перехресті, а їх кількість визначається з відношення цієї часової довжини до середнього інтервалу між T_3 у групі (припускається, що ці інтервали є однакової величини). Для визначення цього потрібно знати кількість T_3 , що формують групу за кожний цикл на живлячому підході p_0 та величину фазового зсуву між перехрестями P_0 і P_1 .

Кількість автомобілів групи, що формується за кожний цикл можна визначити за такою формулою:

$$N_{cp}(t) = N(t) - N_{vil}(t), \quad (3.23)$$

де $N_{cp}(t)$ – кількість автомобілів групи на живлячому підході p_0 ;

$N(t)$ – інтенсивність вихідного потоку на живлячому підході p_0 ;

$N_{vil}(t)$ – інтенсивність вихідного потоку на живлячому підході p_0 після роз'їзду черги (період вільного проїзду перехрестя [17]).

Для того, щоб визначити часову довжину групи на суміжному перехресті доцільно зробити припущення про те, що тривалість проїзду кожним автомобілем

групи ділянки L є випадковою величиною ζ ($\zeta = \zeta(\tau)$), яка розподіляється за нормальним законом [32]. У [83] для цього також використовується логнормальний розподіл, однак отримані значення за ним відрізняються від реальних, зокрема при незначній довжині ділянки L (не більше 500 м). З цих причин використовуємо лише нормальний розподіл, щільність якого задається виразом [14, 32, 64]:

$$f(\tau) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\tau-a)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.24)$$

де a – тривалість проїзду ділянки L зі швидкістю координації;

σ – середньоквадратичне відхилення значень τ відносно a ($\sigma > 0$).

Таке припущення має усі підстави, оскільки більшість водіїв приблизно дотримуються рекомендованої швидкості руху (швидкості координації).

З використанням формул (3.23) та (3.24) частину часової довжини, яка потрапляє на заборонений сигнал суміжного перехрестя P_1 можна визначити за такою формулою:

$$\tau_{cp} = \tau_p + \tau_{\max} - t_{zc} - t_{z_{p_1}}, \quad (3.25)$$

де τ_{cp} – часова довжина групи, що буде зупинена на перехресті P_1 ;

$\tau_{\max}$ – тривалість проїзду відстані L останнього автомобіля групи;

τ_p – тривалість роз'їзду групи на живлячому підході p_0 ;

t_{zc} – тривалість фазового зсуву;

$t_{z_{p_1}}$ – тривалість дозволено сигналу на підході p_1 .

Середній інтервал між ТЗ у групі на стоп-лінії перехрестя P_1 з урахуванням формул (3.23) та (3.24) можна визначити за формулою:

$$t_{zp} = \frac{\tau_p + (\tau_{\max} - \tau_{\min})}{N_{zp}(t)}, \quad (3.26)$$

де t_{zp} – середній інтервал між ТЗ у групі на стоп-лінії підходу p_1 ;

$\tau_{\min}$ – тривалість проїзду відстані L першого автомобіля групи.

Тоді з врахуванням формул (3.25) і (3.26) після простих перетворень величина $Q_{ж}$ для i -ї смуги підходу p_1 набуде такого вигляду:

$$Q_{ж_{ik}} = \begin{cases} \frac{(\tau_p + \tau_{\max} - t_{zc} - t_{z_{p_1}}) \cdot N_{zp}(t)}{\tau_p + (\tau_{\max} - \tau_{\min})} & \text{при } Q_{ж_i} > 0 \\ 0 & \text{при } Q_{ж_i} < 0 \end{cases} \quad (3.27)$$

$Q_{ж_{ik}}$ – довжина черги на i -й смузі перехрестя P_1 з ТЗ, що надійшли із живлячого підходу p_0 за k -й цикл регулювання, авт.

Аналітична модель не завжди детально може описати усі аспекти функціонування досліджуваного об'єкта. За допомогою розробленої аналітичної моделі, яка описана вище є неможливим точно відтворити процес утворення груп ТЗ на живлячому підході та їх деформацію на суміжному перехресті, а також реалізацію процесу виключення ТЗ з другорядних підходів, які не потрапляють у черги на суміжному перехресті у процесі їхнього утворення.

Для відтворення реального процесу на суміжному перехресті і визначення на ньому в напрямку координації максимальної довжини черги на основі аналітичної моделі було створено імітаційну модель ділянки координації, яка доповнює аналітичну у процесі проведення модельного експерименту і цим самим наближає її результати до реальних значень [11]. Ця імітаційна модель, а саме модель функціонування ділянки координації двох суміжних перехресть, написана мовою Objective-C у середовищі Xcode. Вхідними параметрами моделі є: тривалість періоду розрахунку T ; тип живлячого перехрестя (пересічення чи

примикання); довжина ділянки координації; інтенсивність руху відповідно на живлячому та другорядних підходах з розподілом по смугах руху, напрямках руху та складу потоку (легкові, вантажні, автобуси); частки ТЗ з другорядних підходів на смугах руху ділянки координації; тривалість циклу, фаз і тактів на обох перехрестях; швидкість координації.

Вихідними параметрами моделі є значення усередненої максимальної довжини черги ТЗ за k імітацій на суміжному в напрямку координації перехресті, яку утворюють ТЗ із живлячого підходу, другорядних підходів та сумарне їх значення.

Модель реалізована в такий спосіб, що при її застосуванні користувач може легко змінювати усі вхідні параметри, проте вона є придатною тільки для координованих ділянок вулиць з двома смугами руху в одному або в обох напрямках, де живлячий і другорядні підходи є ізольовані, і на обох суміжних перехрестях однакова тривалість циклу.

На рис. 3.14 наведено блок-схему алгоритму моделювання роботи ділянки координації, яка узагальнюється однією смугою на живлячому і другорядному підходах. При збільшенні кількості смуг на підході алгоритм збільшується на відповідну кількість блоків моделювання, які виконуються паралельно.

Весь алгоритм моделювання можна поділити на три етапи. На початковому етапі визначається середній інтервал між ТЗ, що проїжджають стоп-лінію на живлячому і другорядному підходах (аналогічно як у моделі на рис. 3.6) та момент прибуття першого ТЗ на цих підходах (поява наступного визначається на другому і третьому етапах). Моменти прибуття ТЗ до підходів визначаються в моделі через випадкові часові інтервали між ТЗ, які розподіляються за законом Гіпер-Ерanga, а реалізується це з використанням формули (3.11).

На другому етапі визначається часовий фазовий зсув між двома суміжними перехрестями з використанням відомої формули [17]:

$$t_{zc} = \frac{L}{V_k} - \eta, \quad (3.28)$$

де L – довжина ділянки координації;

V_k – швидкість координації;

η – проміжок часу для роз'їзду черги ТЗ на суміжному перехресті, що надійшли з другорядних підходів.

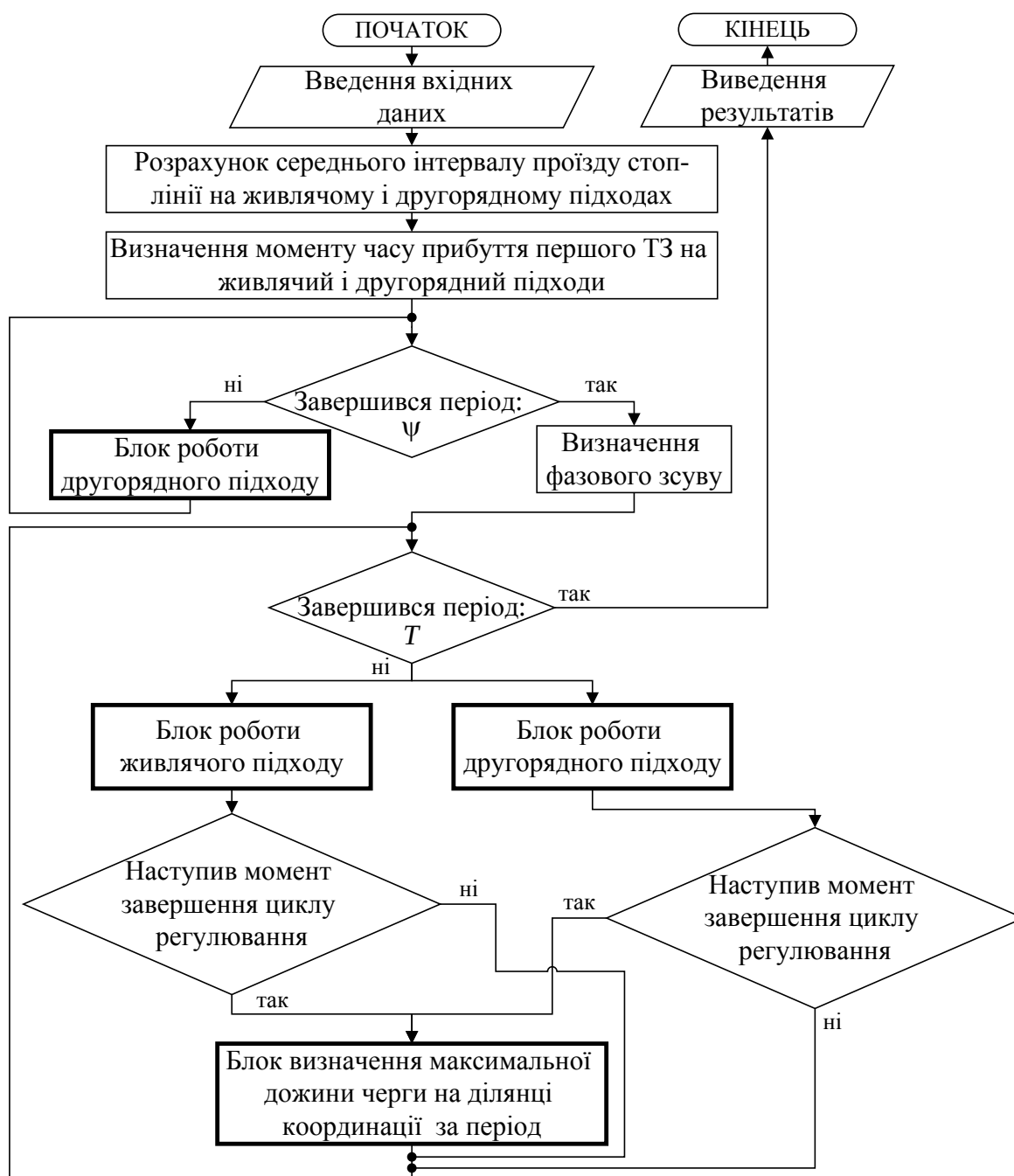


Рисунок 3.14 – Блок-схема алгоритму моделювання роботи ділянки координації

Для визначення η , яка є основною складовою формули (3.28), імітується процес роботи другорядних підходів впродовж періоду ψ ($\psi = 900$ с). Після завершення періоду ψ , встановлюється середня довжина черги на суміжному перехресті із ТЗ, що в'їжджають на ділянку координації з другорядних підходів. На основі цих результатів визначається відрізок часу, за який здійснюється їх роз'їзд, тобто величину η .

Для моделювання процесу роботи другорядних підходів використовується алгоритм, за яким період ψ розбивається на мінімальні інтервали Δt [17], який у моделі становить 0,1 с. З використанням цього ж алгоритму, впродовж періоду T ($T = 3600$ с), імітується процес функціонування ділянки координації, тобто виконується третій етап. Третій етап є найважливішою процедурою алгоритму і в його складі можна виділити блоки функціонування живлячого та другорядного підходів, а також блок розрахунку максимальної довжини черги ТЗ на суміжному перехресті за період T . Перших два блоки виконуються паралельно і включають такі кроки як визначення поточної зміни світлофорних сигналів, напрямку руху і тип ТЗ, визначення моментів появи ТЗ на підході, проїзд перехрестя або формування черги та роз'їзд черги. Ці кроки реалізуються за аналогічними підходами як у моделі на рис. 3.6.

На початку третього блоку, що вступає в дію на момент завершення циклу регулювання, за формулою (3.23) визначається кількість ТЗ у групі, що рухаються від живлячого підходу в напрямку координації, а за формулами (3.20 – 3.21) – інтенсивність вихідного потоку на другорядних підходах. Після цього визначається кількість ТЗ у черзі, що прибули від живлячого і другорядних підходів, а також сумарна їх кількість, що реалізується за формулами, відповідно, (3.27), (3.22) та (3.15).

Запропонована формула (3.27), побудована на основі часової довжини групи ТЗ, зокрема тривалості проїзду ділянки L першого та останнього автомобіля кожної групи. Відповідно до гіпотези, що прийнята в аналітичній моделі, тривалість проїзду кожним ТЗ групи ділянки координації розподіляється за

нормальним законом, функція якого, з використання функції помилок [78], має вигляд:

$$F(\tau) = y = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\tau - a}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right]. \quad (3.29)$$

У моделі цей закон розподілу реалізується за допомогою генерування випадкових чисел, що рівномірно розподілені в інтервалі (0; 1) та оберненої функції по відношенню до (3.29), яка після простих перетворень набуває такого вигляду:

$$\tau_i = a + \sqrt{2\sigma^2} \cdot \operatorname{erf}^{-1}(2y_i - 1) \quad y_i \in (0; 1), \quad (3.30)$$

де a – тривалість проїзду ділянки L зі швидкістю координації;

σ – середнє квадратичне відхилення тривалості проїзду ТЗ ділянки L .

Величину σ визначає дотримання кожного ТЗ групи рекомендованої швидкості при русі на ділянці координації, що, своєю чергою, залежить від багатьох чинників (дорожні умови, умови руху, стан водія і мета його поїздки тощо) [66]. Однак найбільший вплив на величину σ здійснюють довжина ділянки координації, кількість ТЗ у групі та її склад, а також частка поворотних маневрів із живлячого перехрестя.

Для дослідження параметра σ використовується програмне забезпечення VISSIM, в якому створено прямолінійну ділянку вулиці (довжиною 700 м) з двома смугами руху в одному напрямку та живлячим перехрестям на відстані 100 м від її початку (спрощена модель ділянки координації). Щоб виявити залежності величини σ від вищеназваних чинників, у моделі змінювалися вхідна інтенсивність транспортного потоку (з 456 до 2964), тривалість дозволеного сигналу у напрямку координації (з 8 до 40 з інтервалом 2 с), часта легкових автомобілів у потоці (від 100 до 80 % з інтервалом 5 %), частка потоку прямого

напрямку (від 100 до 70 % з інтервалом 10 %). Незмінними параметрами в моделі залишалися тривалість циклу 60 с та швидкість координації (50 км/год), яку реалізовано через встановлення для легкових і вантажних автомобілів бажаної швидкості 50 км/год.

Для того, щоб забезпечити на живлячому підході груповий рух та майже однакову кількість ТЗ у групі при заданій тривалості дозволеного сигналу, у моделі задавалася така інтенсивність вхідного ТП, за якої впродовж дозволеного сигналу здійснюється роз'їзд черги (ступінь насичення 0,95). При зменшенні частки потоку прямого напрямку загальна інтенсивність вхідного потоку збільшувалась на величину, що відповідає частці поворотних маневрів, в результаті інтенсивність прямого напрямку залишалася без змін.

Для визначення залежності σ від довжини ділянки координації, у моделі на відрізку вулиці було встановлено 5 вимірювальних пунктів через кожні 100 м, на яких фіксувалась тривалість проїзду кожного автомобіля групи, що рухався від стоп-лінії живлячого перехрестя. Одночасно в цих пунктах, а також у перерізі стоп-лінії фіксувалась загальна кількість ТЗ та кількість серед них вантажних, що проїхали впродовж циклу на кожній смузі (при однорідному потоці збір інформації про кількість вантажних не проводився).

Загалом у дослідженні було проведено 340 варіантів моделювань [11]. Щоб усереднити результати для кожного варіанту було проведено по 3 імітації, де тривалість однієї становила 10 хв. За результатами моделювання було визначено значення величини σ та встановлено їх залежності від довжини ділянки координації (рис. 3.15), кількості ТЗ у групі (рис. 3.16), складу групи та частки потоку прямого напрямку провівши для цього регресійний аналіз.

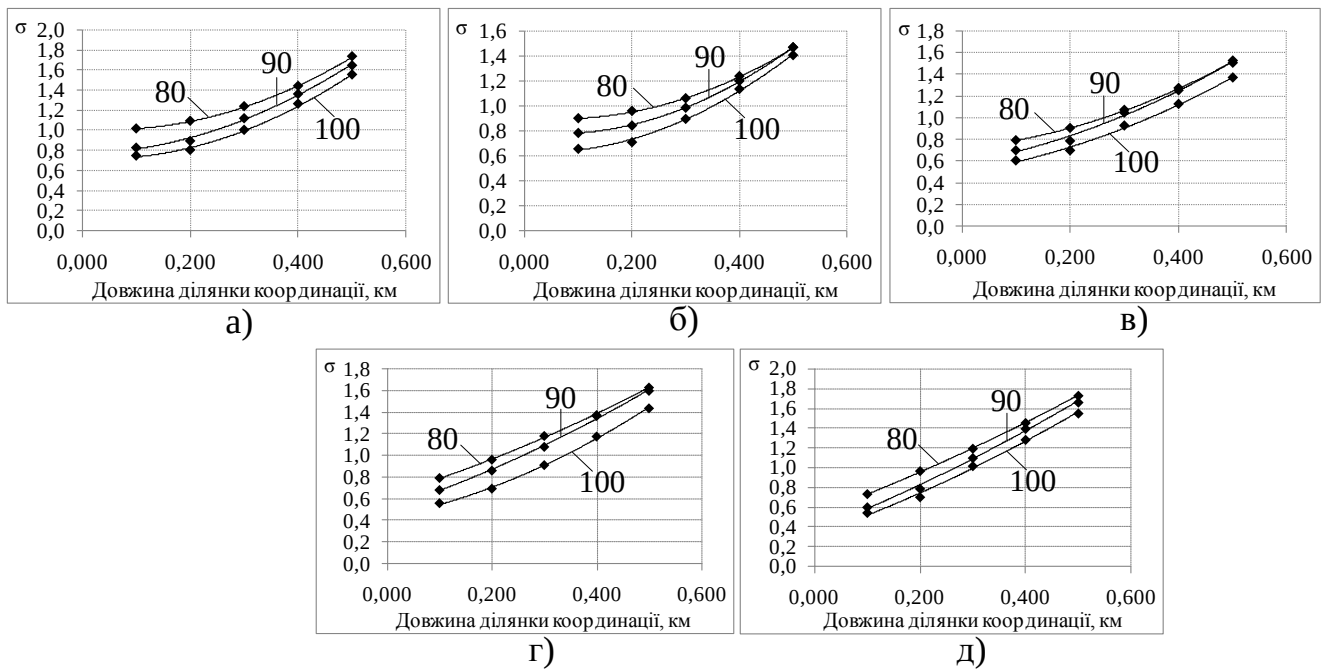


Рисунок 3.15 – Залежність σ від довжини ділянки координації (км), при частці потоку прямого напрямку 100%:

а, б, в, г, д – відповідно 4, 8, 12, 16 та 20 ТЗ у групі на одній смузі
(цифри на кривих – частка легкових автомобілів у потоці)

З рисунка 3.15 видно, що між середньоквадратичним відхиленням σ і довжиною ділянки координації L існує поліноміальна залежність другого степеня, хоча при збільшенні кількості ТЗ у групі (більше 15 ТЗ на одній смузі) вона наближається до лінійної (див. рис. 3.15, г, д). Між експериментальними даними і лініями регресії в усіх випадках є тісний зв'язок, про що свідчать високі значення коефіцієнта кореляції (0,9069–0,9958). Із збільшення довжини ділянки координації величина σ зростає і на відстані 500 м від стоп-лінії, порівняно із довжиною 100 м, збільшується майже у двічі. Також змінна σ має тенденцію до зростання при зменшенні частки легкових автомобілів у потоці та частки потоку прямого напрямку, але вид регресійних залежностей $\sigma(L)$ залишаються незмінними. Причому динаміка цих кривих зберігається і за різної кількості ТЗ у групі. Ці результати спростовують існуючі дослідження [52, 65] стосовно того, що $\sigma(L)$ має лінійну залежність.

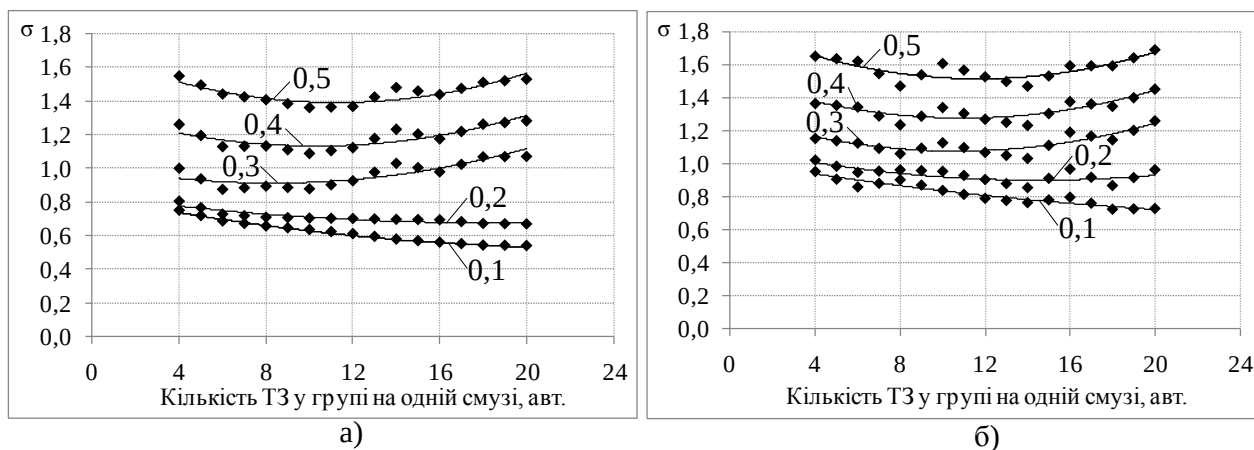


Рисунок 3.16 – Залежність σ від кількості ТЗ у групі при частці потоку прямого напрямку 100 %: а, б – відповідно 100 % та 80 % легкових ТЗ у потоці.
(цифри на кривих – довжина ділянки координації, км)

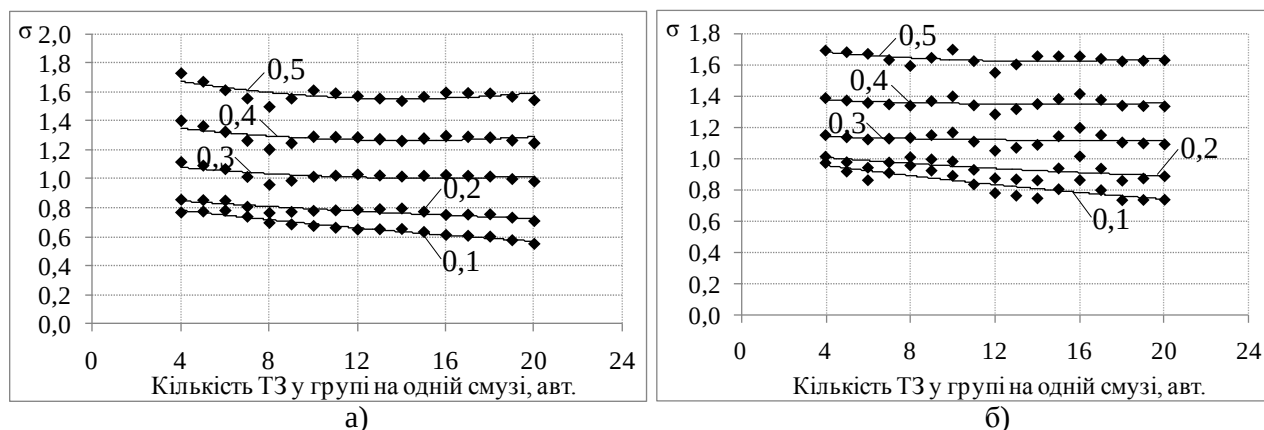


Рисунок 3.17 – Залежність σ від кількості ТЗ у групі при частці потоку прямого напрямку 80 %: а, б – відповідно 100 % та 80 % легкових ТЗ у потоці.
(цифри на кривих – довжина ділянки координації, км)

З рис. 3.16, 3.17 видно, що залежність величини σ від кількості ТЗ у групі N_{T3} є також нелінійною (поліноміальна регресія другого степеня), і спостерігається вона при різній довжині ділянки координації, складу потоку та частці потоку прямого напрямку. Залежність величини σ від частки легкових автомобілів у потоці γ та частки потоку прямого напрямку β_{ST} є лінійною і при їх зменшенні σ також зростає. З аналізу випливає, що найменші значення σ

спостерігаються при однорідному потоці та частці потоку прямого напрямку 100% ($\beta_{ST} = 1,0$), а найбільші – при найменших їх частках.

Оскільки розглянуті чинники, які впливають на величину σ мають широкий діапазон значень, зокрема довжина ділянки координатії L , то для отримання спільної залежності від чотирьох аргументів ($L, N_{zp}, \gamma, \beta_{ST}$) було проведено множинний регресійний аналіз. Причому, щоб визначити залежність σ не від частки легкових автомобілів у потоці γ , а від кількості вантажних у кожній групі N_g ($N_g = 0,1,2,\dots,m$), отримані результати з VISSIM були відповідно опрацьовані [11]. У результаті отримано рівняння регресії, з множинним коефіцієнтом кореляції 0,9819, значення якого вказує на тісний зв'язок між величиною σ та чинниками, що розглядалися. Це рівняння закладено в імітаційну модель Objective-C у такому вигляді:

$$\sigma = 0,9281 - 0,0256N_{zp} + 0,0009N_{zp}^2 + 0,6214L + 2,5695L^2 + 0,0332N_g - 0,2363\beta_{ST}, \quad (3.31)$$

де N_{zp} – кількість ТЗ у групі на одній смузі, авт.;

L – довжина ділянки координатії, км;

N_g – кількість вантажних автомобілів у групі, авт.;

β_{ST} – частка потоку прямого напрямку.

В імітаційній моделі є такі спрощення: ТЗ групи не змінюють смуг руху після входу на ділянку координатії; не враховуються ТЗ, що проїжджають живлячий підхід вільно, тобто не є автомобілями групи. Останнє спрощення не впливає на досягнення поставленої мети – визначення максимальної довжини черги. Це зумовлено тим, що максимальні значення черги на суміжному перехресті, що утворюють ТЗ із живлячого підходу виникають тоді, коли інтенсивність вихідного потоку на ньому відбувається потоком насичення впродовж дозволеного сигналу. Отож, якщо ступіть насичення фаз на живлячому

підході є незначним (дозволений сигнал є надлишковим), то зроблене спрощення проявляє себе пропорційно до величини надлишковості.

Для перевірки адекватності моделі Objective-C порівняємо її результати із значеннями моделі, яка додатково створена в середовищі VISSIM (модель ділянки координації). При цьому розглядаються окремо значення черги, що утворюють ТЗ із живлячого підходу та з усіх підходів (живлячого і другорядних), тобто загальна максимальна довжина черги ТЗ. В обидві моделі вводяться такі вхідні параметри, як тривалість дозволеного сигналу в напрямку координації на живлячому (20 та 32 с) і на суміжному перехрестях (24 та 36 с), довжина ділянки координації (300, 400, 500 м), фазовий зсув відповідно при цих значеннях довжини ділянки координації (18, 24, 30 с), інтенсивність вхідного потоку на живлячому підході (1140 та 1824 авт./год) та частка легкових ТЗ у потоці (100 та 80 %). Незмінними параметрами у двох моделях при різних випадках залишаються – швидкість координації (50 км/год), тривалість циклу (60 с), частка потоку прямого напрямку (100 %), інтенсивність вхідних потоків на другорядних підходах (100 авт./год) і ступінь насичення на живлячому підході, який є не меншим за 0,95. Результати, що отримані із моделі в Objective-C і VISSIM наведено у табл. 3.5. та 3.6.

Таблиця 3.5 – Довжина черги на суміжному перехресті з ТЗ, що надійшли із живлячого підходу, авт.

Імітаційна модель	Трив. дозвол. сигналу на живлячому підході	Довжина ділянки координації, м					
		300		400		500	
		Частка легкових автомобілів у потоці, %					
		100	80	100	80	100	80
VISSIM	20	1,00	1,36	2,31	2,03	3,15	2,40
	32	1,19	1,48	2,65	2,12	4,09	3,64
Objective-C	20	1,11	1,47	2,48	2,79	3,96	4,19
	32	1,35	1,77	2,83	3,05	4,85	5,08

Таблиця 3.6 – Максимальна довжина черги ТЗ на суміжному перехресті, авт.

Імітаційна модель	Трив. дозвол. сигналу на живлячому підході	Довжина ділянки координації, м					
		300		400		500	
		Частка легкових автомобілів у потоці, %					
		100	80	100	80	100	80
VISSIM	20	4,01	4,08	4,17	4,27	4,32	4,54
	32	4,10	4,26	4,41	4,56	4,63	4,75
Objective-C	20	4,09	4,12	4,73	4,97	5,34	5,56
	32	4,28	4,39	4,93	5,03	5,46	5,84

З результатів видно, що значення черг за моделлю в Objective-C як при однорідному, так і при різnorідному складі потоку є дуже близькими до тих, що отримані з VISSIM. Найбільші відхилення спостерігаються при зменшенні частки однорідного потоку та довжині ділянки координації 500 м.

За результатами табл. 3.5 можна зробити висновок про підтвердження правильності прийнятої гіпотези, що черга, яку утворюють автомобілі із живлячого підходу є прямо пропорційна часовій довжині групи, що потрапляє на заборонений сигнал суміжного перехрестя та обернено пропорційна середньому інтервалу між ТЗ у групі. Результати, які наведені у табл. 3.6 дають змогу стверджувати, що шляхом імітаційного моделювання на основі аналітичних досліджень можна отримувати фактично аналогічні значення максимальної довжини черги ТЗ на суміжному перехресті як і за допомогою VISSIM.

Підсумовуючи результати проведеного дослідження необхідно зазначити, що розроблена імітаційна модель адекватно відтворює реальний процес на суміжному перехресті, зокрема утворення груп ТЗ на живлячому підході, їх деформація на суміжному перехресті з використанням статистичної моделі σ , реалізація процесу виключення ТЗ з другорядних підходів, які не потрапляють у черги на суміжному перехресті в процесі їхнього утворення, а також визначення значень максимальної довжини черги ТЗ, які є аналогічними тим, що видає VISSIM (відхилення не перевищує 22 %).

Однією із основних складових, що зумовлює формування таких значень максимальної довжини черги ТЗ, є визначення середньоквадратичного відхилення тривалості проїзду ТЗ ділянки координації σ (статистична модель). Визначено, що на величину σ впливають довжина ділянки координації L , кількість автомобілів у групі N_{zp} , кількість вантажних автомобілів у групі N_{ϵ} і частка потоку прямого напрямку β_{ST} . Встановлено характер залежностей $\sigma(L)$, $\sigma(N_{zp})$, $\sigma(N_{\epsilon})$, $\sigma(\beta_{ST})$ та $\sigma(L, N_{zp}, N_{\epsilon}, \beta_{ST})$, при цьому визначено, що величина σ зростає при збільшенні L , N_{ϵ} , але при зменшенні β_{ST} .

Найважливішим результатом цих досліджень є отримання саме аналітичного опису процесу формування черг ТЗ на суміжному перехресті та розробка алгоритму для розрахунку максимальних їх значень шляхом імітаційного моделювання.

3.3 Визначення межі області ефективного застосування методу «спеціальна смуга у зоні перехрестя»

Для того, щоб пріоритет у часі забезпечувався на регульованому перехресті світлофорна сигналізація повинна функціонувати за відповідними алгоритмами керування [44]. Як зазначено у розділі 1 пріоритет у часі, що забезпечується на перехресті може бути двох видів – пасивний і активний, які відповідно реалізуються за допомогою жорстких і адаптивних алгоритмів. З усіх жорстких алгоритмів, які можуть доповнювати метод «спеціальна смуга у зоні перехрестя» в частині забезпечення пріоритету в часі, є введення окремої спеціальної фази для автобусів [18, 34, 39]. Тривалість цієї фази і доцільність її введення, залежить від середньої кількості автобусів, що прибуває до перехрестя за цикл. Тому є ефективною при значній їх інтенсивності і лише для спеціальних смуг другої групи, тобто коли зупинки розташовані за перехрестям. Серед адаптивних алгоритмів, які можуть доповнювати цей метод, є три алгоритми, які широко застосовуються на практиці, зокрема продовження дозволеного сигналу,

дострокове закінчення забороненого при появі автобуса на підході до перехрестя та виклик спеціальної фази [63, 69, 53].

Перші два алгоритми є придатними тільки для спеціальних смуг другої групи у разі, коли автобуси і неперіоритетні ТП можуть пропускатися через перехрестя у безконфліктних способів в одній фазі. Або, коли спеціальні смуги мають комбіноване використання з ТЗ, що повертають праворуч. Також в умовах, де крім спеціальної смуги, що впроваджена у зоні перехрестя, наявні ще три смуги в одному напрямку для неперіоритетних ТП, і є можливість здійснювати керування рухом за окремими напрямками.

Алгоритм керування, що ґрунтується на виклику спеціальної фази дозволяє забезпечити абсолютний і умовний пріоритет для усіх типів спеціальних смуг, які впроваджуються у зоні перехрестя.

На ізольованих перехрестях ці три адаптивні алгоритми можуть реалізовуватися як при змінній, такі і при сталій тривалості циклу, тоді як на координованих – лише при сталій тривалості циклу.

Ефективність функціонування спеціальної смуги у зоні перехрестя, де пріоритет у часі забезпечуватиметься через виклик спеціальної фази, залежить від умов руху на кожному підході та інтервалу руху між автобусами, що прибувають до перехрестя. Пояснюється це тим, що з використання цього алгоритму можна досягти найкращих результатів щодо забезпечення пріоритетного проїзду перехресть, проте одночасно це може створювати проблеми для інших учасників дорожнього руху [53].

Тому для того, щоб з'ясувати, при яких умовах руху на перехресті доцільно впроваджувати метод «спеціальна смуга у зоні перехрестя» і одночасно встановити область ефективного його застосування, у [12] було проведено оцінку ефективності алгоритму виклику спеціальної фази в комбінації із спеціальною смугою у зоні перехрестя, (тобто забезпечення просторово-часового пріоритету) при різних умовах руху та різних інтервалах між автобусами, що прибувають до перехрестя. Паралельно з цим при тому ж діапазоні умов руху на перехресті проводилась оцінка ефективності алгоритмів дострокового завершення

забороненого та продовження дозволеного сигналу в умовах відсутності спеціальної смуги у зоні перехрестя, тобто забезпечення пріоритету в часі.

Для дослідження і оцінювання ефективності цих алгоритмів за різних умов руху використовувалося середовище VISSIM, в якому було створено моделі двох окремих Х-подібних ізольованих регульованих пересічень з однією смугою руху на усіх підходах в обох напрямках. У зоні першого – впроваджена спеціальна смуга для автобусів типу 2.1. Її довжина на підході до стоп-лінії становить 150 м. Для спрощення масштабів дослідження прийнято, що на обох перехрестях відсутні лівоповоротні потоки.

Схеми геометричних параметрів перехресть з розподілом множини існуючих напрямків на сигнальні групи та розташування детекторів наведено на рис. 3.18, а та 3.19, а. Сигнальним групам для ТП присвоєно назви К1–К4; для пішохідних – F1–F4; для автобусів, що рухаються виділеною смугою – В1. Поєднання сигнальних груп у фази та послідовність їх чергування наведено на рис. 3.18, б та 3.19, б.

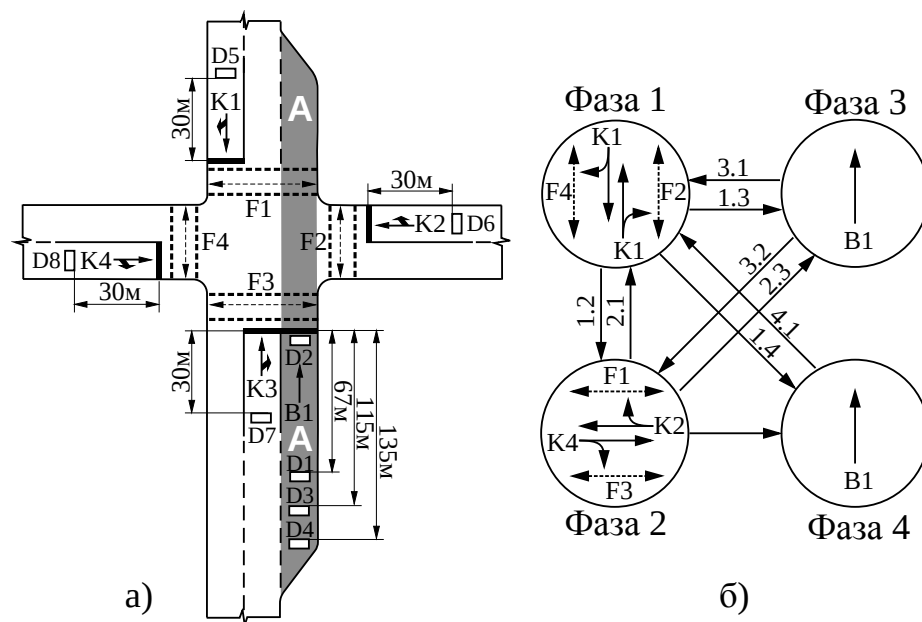


Рисунок 3.18 – Схема Х-подібного перехрестя із спеціальною смугою типу 2.1:

а – геометричні параметри, сигнальні групи та розташування детекторів; б – послідовність зміни фаз

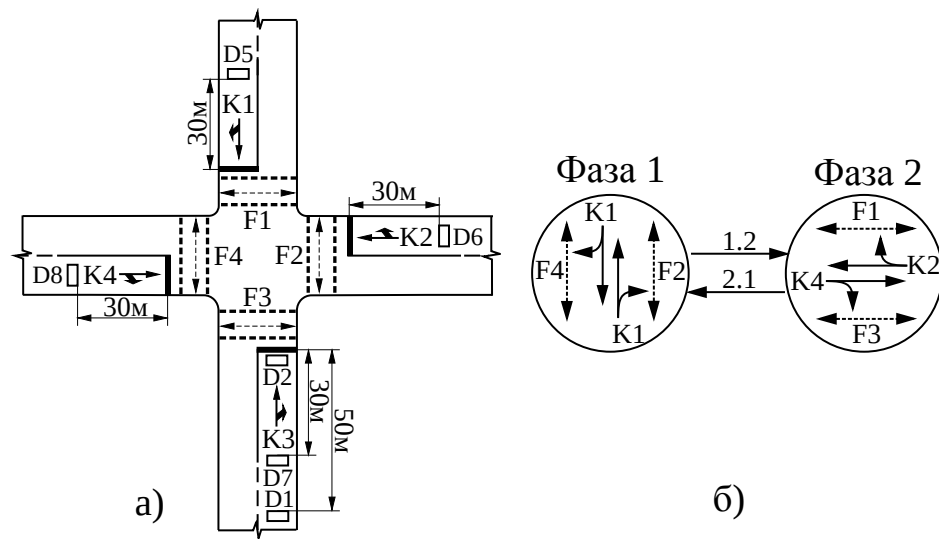


Рисунок 3.19 – Схема Х-подібного перехрестя без спеціальної смуги:
а – геометричні параметри, сигнальні групи та розташування детекторів; б –
послідовність зміни фаз

Правоповоротні транспортні потоки конфліктують з пішоходами, інтенсивність яких у кожній сигнальній групі не перевищує 50 піш./год.

У моделі прийнято, що бажана швидкість легкового і вантажного ТЗ становить 50 км/год, а автобуса – 40 км/год. Частка легкових автомобілів у потоці на усіх підходах (не враховуючи автобусів) становить 95 %, а частка потоку прямого напрямку – 85 %.

Для реалізації у VISSIM адаптивного керування світлофорною сигналізацією використовувався його додатковий модуль VAP. Моделювання роботи перехрестя з використанням цього модуля вимагає створення VAP-фалу, який описує логіку керування та PUA-фалу, в якому визначено сигнальні групи, їх поєднання у фази і тривалість перехідних інтервалів.

Файл-PUA для кожного алгоритму створювався у програмі WordPad, при цьому тривалість проміжних тактів в усіх випадках приймалась 3 с. Логіка керування алгоритмів розроблялася в окремому програмному модулі VisVAP у формі блок-схем, після чого перетворювалися у файли-VAP та обидва файли (PUA та VAP) імпортувалися у VISSIM.

Блок-схеми алгоритмів виклику спеціальної фази, дострокового завершення забороненого та продовження дозволеного сигналу наведені відповідно на рис. 3.20 – 3.21. Вони створені на основі таких умов [80, 97]:

а) часові умови керування:

- $T1 = 7$ с – мінімальна тривалість дозволеного сигналу фази 1 або 2;
- $T2 = 31$ с – максимальна тривалість дозволеного сигналу фази 1;
- $T3 = 9$ с – мінімальна тривалість дозволеного сигналу фази 2;
- $T4 = 17$ с – максимальна тривалість дозволеного сигналу фази 2;
- $T5 = 5$ с – мінімальна тривалість дозволеного сигналу фази 3 і 4;
- $T6 = 10$ с – максимальна тривалість дозволеного сигналу фази 3 і 4;

б) логічні умови керування:

- $W1, W2$ – відповідно детектор $D3$ і $D4$ зафіксували появу автобуса або завантаження детектора $D2$ від його появи є не менше 1 с;
- $L1$ – автобус був виявлений на детекторі $D1$;
- $F1$ – детектор $D1$ зафіксував появу автобуса;
- $G57$ – детектори $D5$ і $D7$ зафіксували часовий розрив 3 с у транспортному потоці сигнальних груп $K1$ та $K3$;
- $G68$ – детектори $D6$ та $D8$ зафіксували часовий розрив 3 с у транспортному потоці сигнальних груп $K2$ та $K4$;
- $NP1$ – на детекторі $D1$ не виявлено автобуса і завантаження детектора $D2$ від появи автобуса є менше 1 с;
- $NL2$ – на детекторі $D2$ не виявлено автобуса;
- $DL1$ – очищує пам'ять детектора $D1$;
- $DL34$ – очищує пам'ять детекторів $D3$ та $D4$;

в) інші умови керування:

- $PT := 0$ – перехід до фази 1;
- $PT := 1$ – перехід до фази 2;
- IS – виконує перехід до перехідних інтервалів (наприклад, $IS\ 1.2$ – виконується перехід з фази 1 у фазу 2).

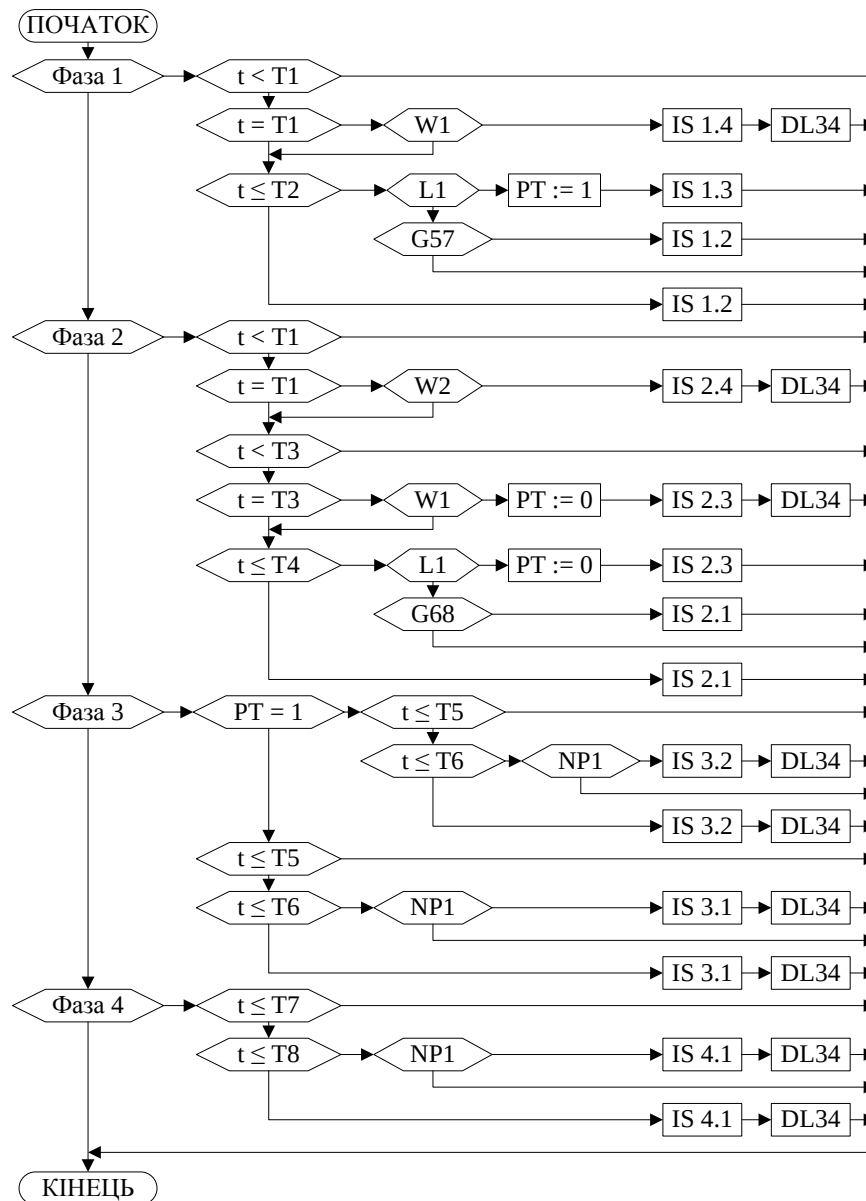


Рисунок 3.20 – Блок-схема алгоритму виклику спеціальної фази для автобуса

Для ефективного керування світлофорною сигналізацією на перехрестях усі три алгоритми, що забезпечують пріоритет одночасно поєднуються із алгоритмом пошуку часового розриву у ТП. Тоді як алгоритм виклику спеціальної фази, також ще поєднується із алгоритмом зміни чергування фаз. Реалізація комбінацій цих алгоритмів у логіці керування здійснюється в тому числі і за допомогою детекторів транспорту. Для виявлення появи автобуса на спеціальній смузі (див. рис. 3.20) використовуються детектори D1–D4, а для виявлення часового розриву у ТП на усіх підходах – детектори D5–D8. Аналогічна ситуація з детекторами, що використовуються у блок-схемах на рис. 3.21. Зокрема, щоб виявити часовий

розрив у потоці, використовують детектори D5–D8, а для виявлення появи автобуса – детектори D1 та D2.

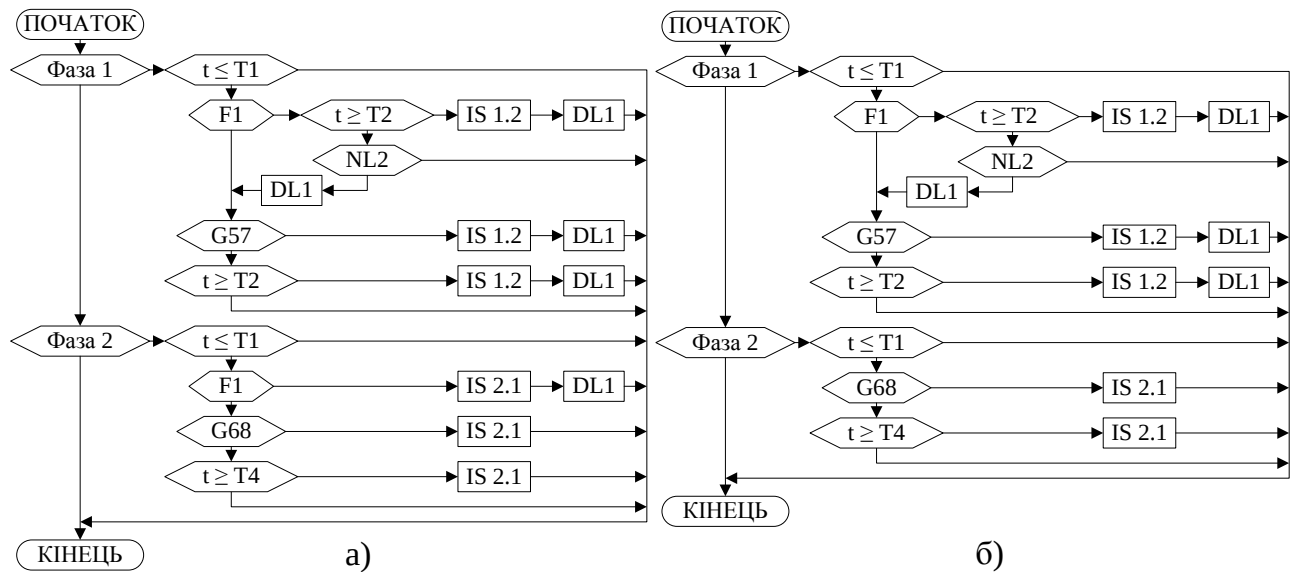


Рисунок 3.21 – Блок-схеми алгоритмів дострокового завершення забороненого (а) і продовження дозволеного сигналу (б)

У блок-схемі алгоритму виклику спеціальної фази використовується одна і та ж автобусна сигнальна група В1 у двох різних фазах (фаза 3 і 4). Це дає змогу забезпечити різну тривалість перехідних інтервалів між фазою, що викликається та іншою фазою (або навпаки). Своєю чергою, це дозволяє реалізувати абсолютний пріоритет проїзду автобусів через перехрестя.

Щоб встановити ефективність алгоритмів при різних умовах руху на перехресті, в моделі змінюється вхідна інтенсивність ТП відповідно до ступеня насичення X , який кількісно характеризує зміну умов руху [40, 16]. При ступені насичення X кожного підходу 0,65, 0,8, 0,95 та 1,10 вхідна інтенсивність ТП сигнальних груп К1 та К3 відповідно набуває значень 625, 770, 914 та 1058 авт./год, а сигнальних груп К2 і К4 – 343, 422, 501 та 580 авт./год. Паралельно з цим, у моделі змінюється інтервал руху між автобусами, що прибувають до перехрестя і набуває таких значень: 960, 480, 240, 120, 60, 30 с.

Як критерій, для кількісної оцінки ефективності алгоритмів, використовується показник середня затримка автобуса на підході та середня

затримка автомобіля на перехресті (визначається як середньозважене значення затримок усіх підходів) [40, 89].

Загалом у дослідженні було проведено 24 варіанти моделювань. Щоб усереднити результати, для кожного варіанту проводилось по 3 імітації, де тривалість однієї складала 1 год, причому початок фіксування результатів розпочинався з 400 с. За результатами моделювання було отримано значення середньої затримки автобусів та легкового ТЗ на підході, і розраховано – ТЗ на перехресті, а також встановлено їх залежності від інтервалу руху автобуса та ступеня насичення на підходах при різних алгоритмах, що забезпечують пріоритет (рис. 3.22 – 3.25).

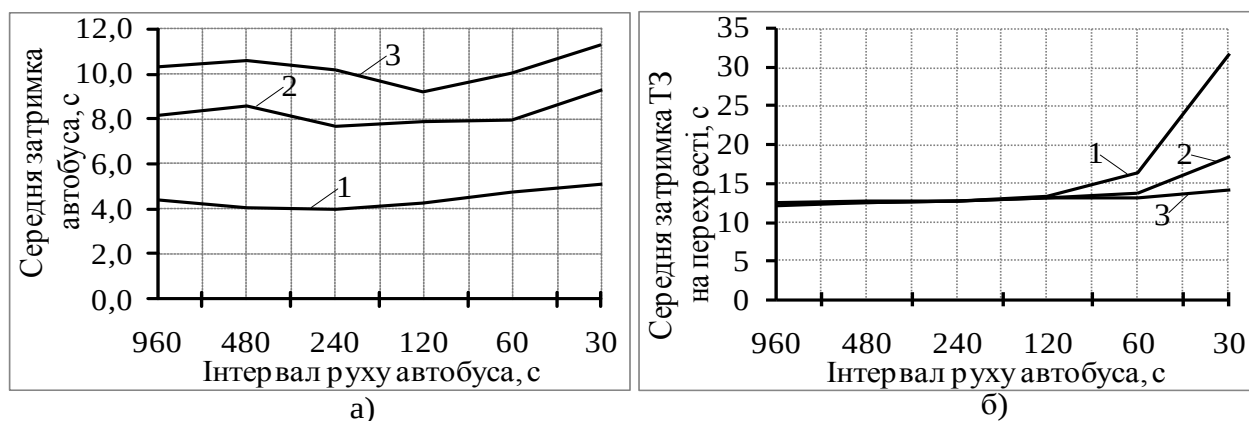


Рисунок 3.22 – Залежність середньої затримки від інтервалу руху автобуса при ступені насичення 0,65: а, б – відповідно затримка автобуса на підході та ТЗ на перехресті; 1, 2, 3 – відповідно алгоритм виклику спеціальної фази, дострокового завершення забороненого та продовження дозволеного сигналів

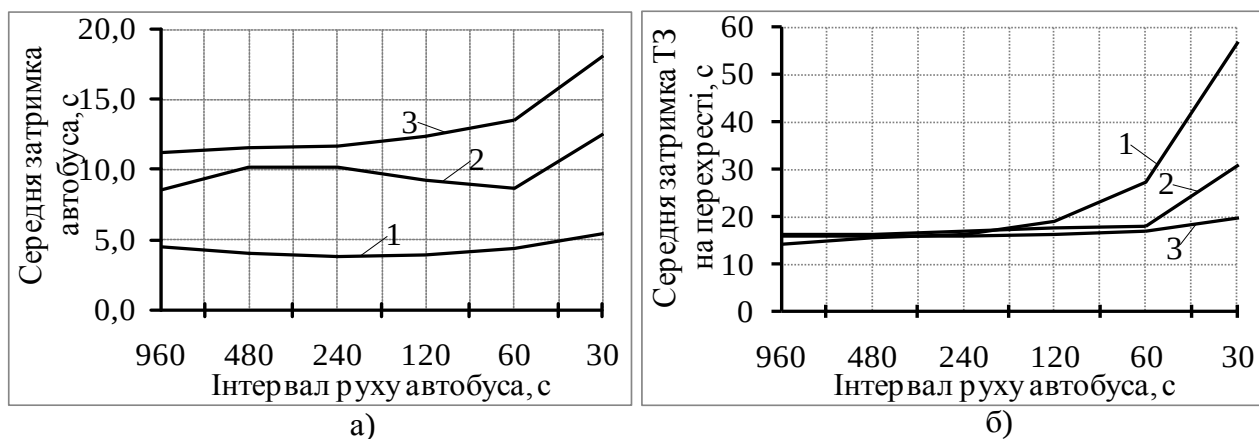


Рисунок 3.23 – Залежність середньої затримки від інтервалу руху автобуса при ступені насичення 0,8: а, б – відповідно затримка автобуса на підході та ТЗ на перехресті; 1, 2, 3 – відповідно алгоритм виклику спеціальної фази, дострокового завершення забороненого та продовження дозволеного сигналів

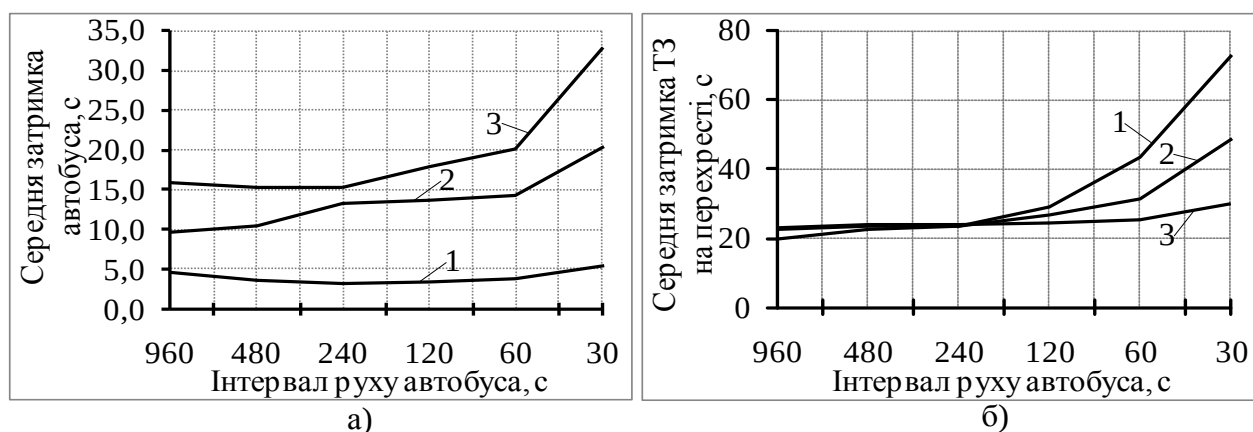


Рисунок 3.24 – Залежність середньої затримки від інтервалу руху автобуса при ступені насичення 0,95: а, б – відповідно затримка автобуса на підході та ТЗ на перехресті; 1, 2, 3 – відповідно алгоритм виклику спеціальної фази, дострокового завершення забороненого та продовження дозволеного сигналів

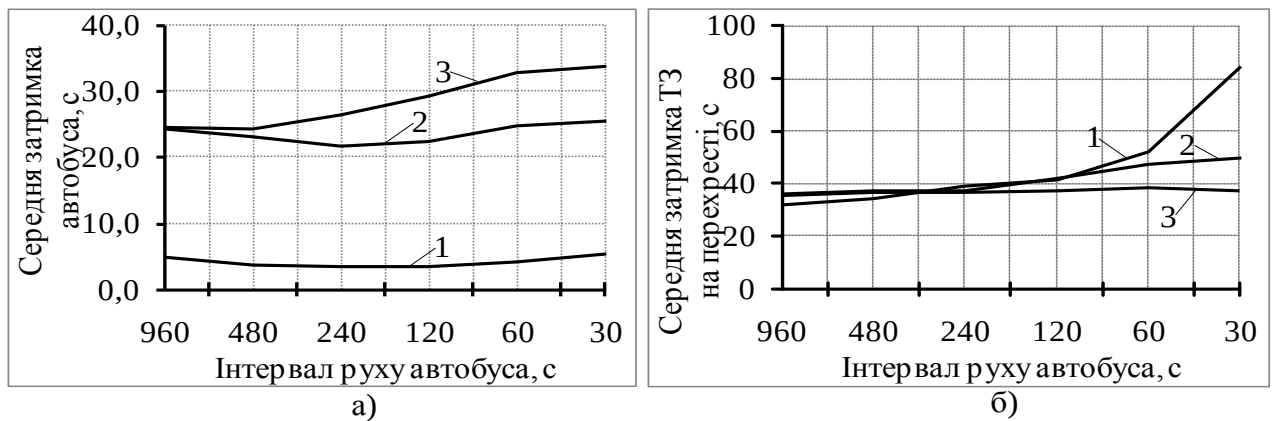


Рисунок 3.25 – Залежність середньої затримки від інтервалу руху автобуса при ступені насичення 1,10: а, б – відповідно затримка автобуса на підході та ТЗ на перехресті; 1, 2, 3 – відповідно алгоритм виклику спеціальної фази, дострокового завершення забороненого та продовження дозволеного сигналів

Як видно з рис. 3.22 – 3.25 значення середньої затримки автобуса за алгоритму виклику спеціальної фази в комбінації із спеціальною смугою у зоні перехрестя (просторово-часовий пріоритет), фактично не змінюються при різних умовах руху на перехресті та інтервалах руху між автобусами і лежать у межах 3,29–5,41 с. А значення затримок при алгоритмі дострокового завершення забороненого та алгоритмі продовження дозволеного сигналу, зростають із збільшенням насичення руху на перехресті (з 8,2 і 10,2 до 23,7 та 28,5 с відповідно при ступені насичення $X = 0,65$ та 1,10). Водночас, значення середньої затримки автобуса при алгоритмі продовження дозволеного сигналу є більшими ніж при алгоритмі дострокового завершення забороненого при усіх умовах руху на перехресті (розбіжність становить 2 та 5 с відповідно при $X = 0,65$ та 1,10). Хоча за перенасичених умов руху на перехресті (ступінь насичення 1,10) та при великих інтервалах руху (не менше 480 с) ці значення майже збігаються. Розбіжність значень середньої затримки автобуса при просторово-часовому пріоритеті і пріоритеті в часі становить від 4,8 до 21,9 с відповідно при ступенях насичення 0,65 та 1,10. Значення середньої затримки автомобіля на перехресті, зростають із збільшенням ступеня насичення X та зменшенні інтервалу руху між автобусами при усіх трьох алгоритмах. При цьому, якщо інтервал руху між

автобусами є більшим за 120 с, то значення затримок, при усіх трьох алгоритмах, фактично збігаються. Якщо ж інтервал є меншим за 120 с, то значення затримок відрізняються між собою і стрімко збільшуються із зменшенням інтервалу між автобусами. Найбільші значення затримок є при алгоритмі виклику спеціальної фази (31,47–83,99 с), а найменші – при алгоритмі продовження дозволеного сигналу (14,15–37,22). Така ситуація спостерігається при різних ступенях насичення на перехресті.

Для того, щоб з отриманих результатів, які наведені на рис. 3.21 визначити область ефективного застосування алгоритму виклику спеціальної фази в комбінації із спеціальною смугою у зоні перехрестя, що дає змогу забезпечувати просторово-часовий пріоритет, доцільно використовувати не значення середньої затримки ТЗ на перехресті, а величину затримок на кожному підході. Це дозволить детальніше врахувати ті умови руху, за яких величина затримки перевищує граничні межі. За граничне значення слід брати 80 с, яке рекомендується у [89]. Усереднюючи найбільші значення середньої затримки на двох другорядних підходах перехрестя, визначено та побудовано залежність середньої затримки ТЗ на підході від ступеня насичення на ньому та інтервалу руху між автобусами (рис. 3.26). Також з цими результатами наведено граничну межу значень середньої затримки у вигляді суцільної лінії.

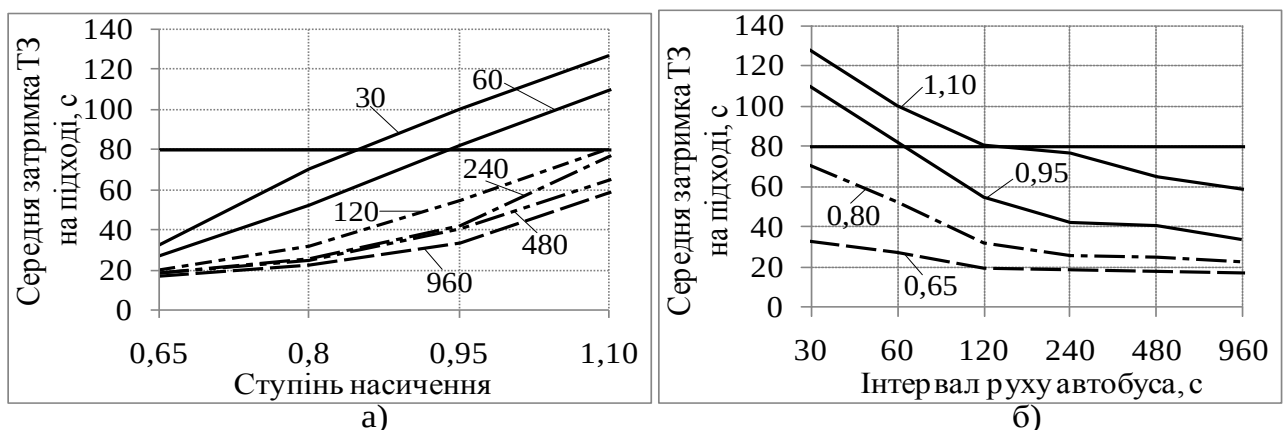


Рисунок 3.26 – Залежність значень середньої затримки ТЗ на підході від ступеня насичення (а) та інтервалу руху між автобусами (б) (цифри на кривих – відповідно інтервал руху і ступінь насичення)

З наведених результатів видно, що із збільшенням ступеня насичення на підході і зменшенням інтервалу руху між автобусами, що надходять до перехрестя зменшується область ефективного застосування методу «спеціальна смуга у зоні перехрестя», яка знаходиться під суцільною лінією на рис. 3.26.

Враховуючи ці результати і проводячи на основі них регресійний аналіз, встановлено межі області ефективного застосування методу «спеціальна смуга у зоні перехрестя» (рис. 3.27).

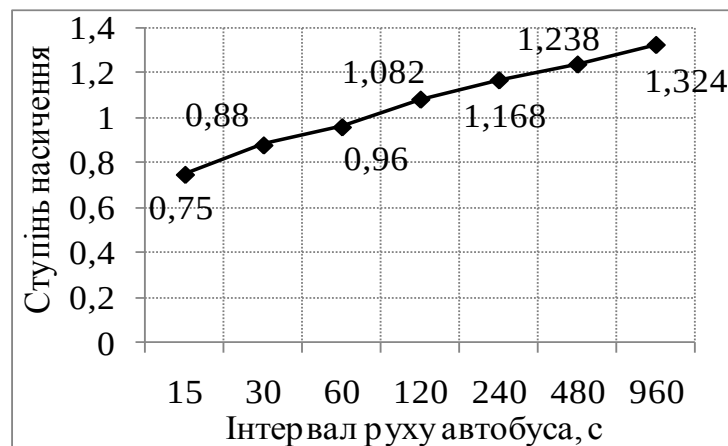


Рисунок 3.27 – Межі області ефективного застосування методу «спеціальна смуга у зоні перехрестя»

На основі цього рисунку можна зробити висновок, що при граничній межі нормальних умовах руху на кожному підході (ступінь насичення 0,95 [86, 96]) інтервал руху між автобусами повинен бути більшим за 57 с.

3.4 Висновки до розділу

1. Розроблено та формалізовано метод «спеціальна смуга у зоні перехрестя», який дає змогу забезпечити просторово-часовий пріоритет автобусам на регульованих перехрестях (здебільшого ізольованих), зокрема підходи яких мають не більше двох смуг руху в одному напрямку. Запропоновано шість основних типів таких спеціальних смуг і визначено від чого залежать їх геометричні параметри. Встановлено, що ключовим етапом впровадження цього

методу є визначення оптимальної довжини спеціальної смуги на підході до перехрестя.

2. Розроблено імітаційні моделі (мовою Objective-C) для визначення максимальної довжини черги ТЗ на підході до ізольованого та координованого регульованого перехрестя, за значеннями яких визначається оптимальна довжина спеціальної смуги на відповідному підході до перехрестя.

3. За імітаційною моделлю для ізольованих перехресть встановлено, що якщо моменти прибуття автомобілів до перехрестя розподіляються за законом Гіпер-Ерланга з параметром $a = 3$, то значення черги за моделлю є аналогічними до тих, що визначаються за німецькими нормами HBS (відхилення не перевищує 7,5 %) і близькими до значень, що видає VISSIM. Залежно від ступеня насичення на підході визначено межі застосування законів розподілу (логнормального та Гіпер-Ерланга), за якими модель видає аналогічні значення максимальної довжини черги як і за HBS.

4. Отримано аналітичні дослідження процесу утворення черги ТЗ на суміжному в напрямку координації перехресті і на їх основі розроблено імітаційну модель ділянки координації, яка добре відтворює реальний процес на суміжному перехресті і дає змогу визначати значення максимальної довжини черги ТЗ аналогічні тим, що видає VISSIM (відхилення не перевищує 22%). Адекватність цих результатів підтверджують достовірність прийнятої гіпотези, що черга, яку утворюють автомобілі із живлячого підходу, є прямо пропорційна до часової довжини групи, що потрапляє на заборонений сигнал суміжного перехрестя, та обернено пропорційна до середнього інтервалу між автомобілями у групі.

5. Визначено, що виклик спеціальної фази є основним алгоритмом, який доцільно використовувати для доповнення методу «спеціальна смуга у зоні перехрестя» в частині забезпечення пріоритетного проїзду площі перехрестя.

6. Встановлено межі області ефективного застосування методу «спеціальна смуга у зоні перехрестя», згідно якої при граничній межі нормальних умовах руху

на кожному підході (ступінь насичення не перевищує 0,95) інтервал руху між автобусами повинен бути більшим за 57 с.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ СМУГ ДЛЯ МАРШРУТНИХ АВТОБУСІВ ТА ЇХ ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ

4.1 Розробка транспортної моделі міста у середовищі VISUM

Для реалізації будь-якого заходу транспортної інфраструктури в місті (будівництво елементів ВДМ, впровадження методів ОДР, вдосконалення організації руху ГТ тощо) необхідні вхідні дані (здебільшого це значення інтенсивності транспортних, пасажирських і пішохідних потоків), на основі яких виконується техніко-економічний розрахунок, за результатами якого приймається рішення щодо їх доцільності та ефективності.

При техніко-економічному аналізі заходів, які за своїми масштабами є так званими методами «лінійного» та «мережевого» характеру [18, 34], важливим завданням є оцінка їх впливу на усю ВДМ. Тобто потрібно визначити як зміняться характеристики дорожнього руху при зміні параметрів ВДМ.

Як відзначено у розділі 2 для оцінки умов руху при впровадженні спеціальних смуг на перегонах вулиць, необхідно встановити прогноз зміни інтенсивності ТП на неперіоритетних смугах та їх розподіл по ВДМ.

Щоб вирішувати такі завдання останнім часом, особливо у транспортному плануванні, використовують інструменти стратегічного транспортного моделювання (макро рівень моделювань), за допомогою яких створюють транспортні моделі міст або регіонів (областей) [54, 70]. Транспортна модель – це масив даних про характеристики транспортної системи, наприклад, міста і здійснювані у ній транспортні процеси.

За допомогою транспортної моделі та її даних можна встановлювати прогнози зміни транспортних, пасажирських і пішохідних потоків при впровадженні тих чи інших заходів дорожньо-транспортної інфраструктури і оцінювати їх зміни як на локальному рівні, так і в масштабах цілої системи.

Для створення транспортної моделі міста чи регіону використовуються різні спеціалізовані програмні забезпечення, однак найпоширенішим у світовій практиці є середовище VISUM [4, 71, 104]. Основною його перевагою є те, що це середовище дає змогу інтегрувати усі види транспорту в одну модель, в результаті чого, при зміні параметрів одного з видів транспорту, можливо визначити взаємовплив на усі інші.

Транспортна модель у середовищі VISUM складається з двох основоположних моделей – моделі пропозиції (мережі) та моделі попиту. Хоча цей поділ виражений економічними поняттями, проте він добре узгоджується з класичним формулюванням транспортної системи міста та з характеристиками її основних елементів [3]. Модель пропозиції утворюють ВДМ з відповідним облаштуванням та мережі різних видів транспорту з їх специфічними особливостями. Модель попиту це дані про кількість поїздок або переміщень між найменшими одиницями простору у місті, якими є транспортні райони. Їх розміри, як правило, не перевищують довжину пішохідної досяжності [28]. Попит на транспорт (водії, пасажери та пішоходи) є визначальним у транспортній моделі, оскільки його кількість і просторово-часовий розподіл визначають потрібні зміни як на елементах ВДМ, так і в транспортній системі загалом. Аналогом важливості моделі попиту у транспортній системі можна вважати підсистему «Транспортні потоки» в системі «Дорожні умови – Транспортні потоки» [18]. З огляду на ці особливості, саме це середовище вибрано для створення транспортної моделі міста Львова, на ВДМ якого здійснюватиметься експериментальна перевірка ефективності теоретичних досліджень, що проведені в розділі 2.

Створення транспортної моделі міста в середовищі VISUM складається з 5 блоків і виконується у такій послідовності (рис. 4.1). Першим етапом цієї послідовності є формування вхідних даних, введення яких виконується по чергово, відповідно до блоку моделювання. До них належить дані про ВДМ, мережу ГТ, просторово-структурні дані, дані про транспортну «поведінку» та дані для калібрування моделі.



Рисунок 4.1 – Послідовність створення транспортної моделі міста в середовищі
VISUM

Розробка в середовищі VISUM моделі пропозиції (блок 1) розпочинається із створення видів транспортну. У моделі Львова, відповідно до функціональних характеристик транспортної системи міста, визначено такі види транспорту: індивідуальний транспорт (ІТ); громадський транспорт (ГТ), що складається з автобусів, тролейбусів, трамваїв; велосипедний транспорт; пішохідний рух; вантажний транспорт.

Після цього, на основі топологічної електронної карти, створюється ВДМ, елементи якої (перехрестя та перегони) подаються у вигляді вузлів та дуг. Розробка моделі ВДМ здійснювалась шляхом повного оновлення існуючих вузлів і дуг, створених у [61] та їх доповнення новими (до 43 % від загальної кількості). Вузли та дуги наповнювалися такими характеристиками: назва; кількість смуг руху; пропускна здатність; допустима швидкість руху різних видів транспорту; категорія вулиці чи дороги; тип перехрестя чи примикання (нерегульоване, регульоване, саморегульоване); схема організації дорожнього руху (двосторонній рух, односторонній рух, частково односторонній рух) тощо.

У третій частині цього блоку територія міста поділяється на транспортні райони (зонування території планування), і до кожного з них створюються примикання, які в такий спосіб приєднуються до ВДМ. У моделі Львова створено 530 транспортних районів, з яких 49 є на околицях міста та 14 кордонних районів.

На основі моделі ВДМ, розробляється модель мережі ГТ, яка формується з маршрутів руху, режимів їх роботи (розкладів руху) та зупинок. У моделі мережа ГТ складається з 10 трамвайних, 11 тролейбусних та 114 автобусних маршрутів (з них 53 міські, 51 приміські та 10 міжміські). Обсяги та кількісний склад елементів, що утворюють у VISUM модель мережі ГТ і модель пропозиції загалом, наведені у додатку В.

Для визначення попиту на транспорт існують два принципові підходи. Перший підхід ґрунтується на натурних дослідженнях руху потоків (транспортних та пасажирських) в елементах ВДМ, з яких визначають матриці кореспонденцій. Другий – здійснюється за допомогою різних математичних моделей. Хоча на практиці ці два підходи здебільшого поєднуються, де першим – доповнюють або калібрують ті результати, що отримуються математичним шляхом.

Для створення моделі попиту у VISUM (блок 2, див. рис. 4.1), використовується класична 4-х ступенева модель [28, 78, 95], згідно якої моделювання здійснюється у чотири етапи: рис. 4.2.

Моделювання попиту у VISUM виконується з використанням таких об'єктів: групи; діяльність, пари діяльності (або джерело-ціль переміщення); шар попиту [103]. Тому процедура моделювання, як видно з рис. 4.2, розпочинається із створення цих об'єктів попиту та присвоєння їм відповідних атрибутів (назва та кількість).

Об'єкт «групи» – служить для поділу населення на однорідні групи з подібною поведінкою. У моделі Львова населення поділено на такі однорідні групи: малі діти (до 7 років); школярі (7–17 р.); студенти (18–23 р.); працюючі (24–65); непрацюючі; пенсіонери (більше 65 р.).

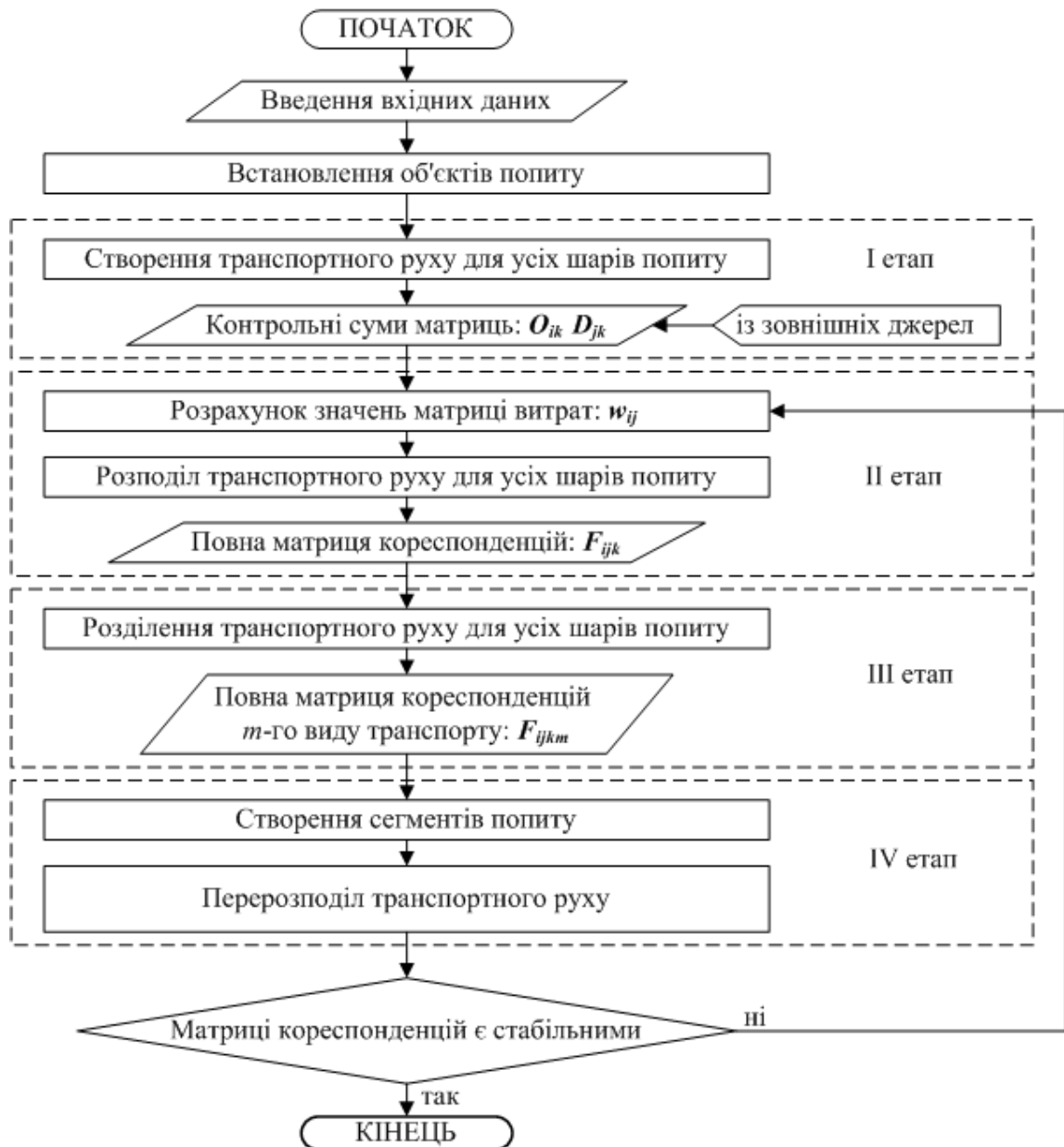


Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритму моделювання попиту на транспорт за чотирьохступеневою моделлю в середовищі VISUM

Об'єкти «діяльність» та «пара діяльності» ґрунтуються на тому, що кожне переміщення у просторі зумовлене людською діяльністю, яка має властивість змінюватися впродовж певного періоду часу. Найменша одиниця часу, за якою предметно можна оцінити характер цієї зміни є доба, оскільки учасники (однорідні групи населення), що здійснюють будь-яку діяльність за цей період, повертаються до вихідних положень і тим самим утворюють ланцюги переміщень, які мають велику ймовірність до повторень у наступні подібні періоди. Прикладом типового ланцюга переміщень або прикладом зміни людської

На основі цих 19 видів пар діяльності (джерело-ціль переміщень) та однорідних груп, на які поділено населення міста, утворюються шари попиту. «Шар попиту» – це основний об’єкт попиту, за допомогою якого здійснюється моделювання попиту у VISUM за 4-х ступеневою моделлю.

Виконання перших трьох етапів чотирьохступеневої моделі, зокрема першого – не можливе без вхідних даних, до яких відносять просторово-структурні дані та дані щодо транспортної «поведінки» мешканців міста (показники транспортної рухомості населення) [98].

У моделі використовуються такі просторово-структурні дані: населення з розподілом за віковими групами; кількість студентів, працюючих, безробітних; кількість робочих місць та місць у сфері послуг; кількість місць у навчальних закладах, в установах громадського харчування, закладах фізкультурно-спортивного профілю, медичних закладах та установах культури; торгові площі; загальна кількість зареєстрованих ТЗ у місті тощо. Усі ці дані автором було зібрано у профільних управліннях Львівської міської ради, а також у [2, 20], і визначені для кожного транспортного району.

Для визначення показників транспортної рухомості населення міста, було проведено опитування мешканців Львова і його околиць, в якому брало участь 1800 респондентів. З них 1500 пройшли опитування через он-лайн-анкети (<http://bit.ly/mobilityQuestionnaire>), а решта шляхом анкетування вручну (фрагмент анкети наведено у додатку Г). Об’єм вибірки визначався за кількістю населення в адміністративному районі з розподілом за віковими групами. Для опрацювання результатів опитування використовувалось програмне середовище IBM SPSS Statistics. У результаті чого для усіх 19 джерело-ціль переміщень визначено такі показники, як ступінь рухомості населення, тривалість поїздок-переміщень та час їх початку, частка різних видів транспорту, середнє заповнення автомобіля пасажирями (див. додаток Д).

Результати моделювання попиту за 4-х ступеневою моделлю на етапі створення транспортного руху (етап І, див. рис. 4.2) мають деякі недоліки, зокрема не враховується частка тих переміщень, які мають свої цілі за межами

області дослідження і тих котрі до неї в'їжджають, а також не виконується узгодження значень обсягу руху з i -го району-джерела та j -го району-цілі за їх відмінності.

Для усунення цих недоліків розрахунок контрольних сум матриці кореспонденцій для кожного шару попиту здійснювався за методикою запропонованою в [93] з використанням Microsoft Excel.

Згідно цієї методики розрахунок загального обсягу поїздок-переміщень, що утворюються в i -му районі-джерела (O) для k -го шару попиту залежить від ступеня рухомості (MR) основних груп населення (g), кількості людей (PG), а також від частки внутрішнього руху досліджуваної території (q) і визначається за формулою [93]:

$$O_{ik} = MR_{igk} \cdot PG_{igk} \cdot q_{ig}. \quad (4.1)$$

Загальна кількість поїздок-переміщень, що притягаються в j -й район-цілі (D) для k -го шару попиту розраховується у два етапи. Насамперед визначають загальний обсяг руху, що утворюється в усіх районах-джерела для k -го шару попиту ($V_k = \sum_a O_{ik}$) та потенціал структури j -го району-цілі, який залежить від ступеня утворення властивостей структури (PR), що характеризує середню кількість переміщень за добу на певну властивість структури (s), значень властивостей структури (SP), а також частки властивості структури, яка використовується внутрішнім рухом досліджуваної території (u). На другому етапі величина V розподіляється на j -й район-цілі пропорційно його потенціалу. Обидва етапи розрахунку виконуються за формулою [93]:

$$D_{jk} = \frac{\sum_s PR_{jsk} \cdot SP_{jsk} \cdot u_{jk}}{\sum_j \sum_s PR_{jsk} \cdot SP_{jsk} \cdot u_{jk}} \cdot V_k. \quad (4.2)$$

Під час розрахунку величин O і D за формулами (4.1) і (4.2) та їх сумі за усіма шарами попиту досить часто виникає нерівність між ними ($\sum O_1 \neq \sum D_1$), хоча така відповідність повинна забезпечуватися при розгляді доби, як одиниці досліджуваного періоду часу (вона є тим часовим періодом, за який здебільшого усі люди повертаються до вихідного положення руху). Тому узгодження контрольних сум сумарної матриці кореспонденцій, відповідно до цієї методики, реалізується за допомогою контрольних сум матриці пари діяльності «Інше – Інше» (повний опис застосування цієї методики на реальному прикладі викладено автором у роботі [8]).

Як результат, розраховані контрольні суми матриць для кожного шару попиту імпортується в середовище VISUM.

На другому етапі 4-х ступеневої моделі проводиться розрахунок розподілу транспортного руху, який здійснюється за принципом гравітації (*гравітаційна модель*), в результаті чого із контрольних сум матриці k -го шару попиту визначається повна матриця кореспонденцій. Для цього використовується формула [28, 75, 76, 93]:

$$v_{ijk} = \frac{O_{ik} \cdot D_{jk} \cdot f(w_{ij}) \cdot K_i}{\sum_{j=1}^A D_{jk} \cdot f(w_{ij}) \cdot K_j}, \quad (4.3)$$

де O_{ik} , D_{jk} – загальний обсяг поїздок-переміщень відповідно з i -го району-джерела та в j -й район-цілі для k -го шару попиту;

$f(w_{ij})$ – функція корисності (тяжіння);

w_{ij} – витрати на переміщення з i -го району-джерела в j -й район-цілі, що визначаються у формі матриць (матриці витрат);

A – кількість транспортних районів;

K – коефіцієнти балансування.

Основою формули (4.3) є функція корисності $f(w_{ij})$ та значення матриці витрат. Розрахунок матриці витрат здійснюється на початку етапу розподілу транспортного руху на основі даних моделі мережі. При цьому витрати на переміщення з i -го району-джерела у j -й район-цілі виражаються через тривалість руху. У моделі для усіх шарів попиту використовується функція корисності виду Logit [104]:

$$f(w_{ij}) = e^{(c \cdot w_{ij})}, \quad (4.4)$$

або BoxCox:

$$f(w_{ij}) = e^{\left(c \frac{w_{ij}^b - 1}{b} \right)}, \quad (4.5)$$

де b, c – параметри функції корисності.

Параметри функції корисності та їх вид для кожної пари діяльності визначаються на основі тривалості поїздок-переміщень, значення яких встановлені за результатами опитувань. Види та графіки функцій корисності наведено у табл. Д.1 та на рис. Д.4.

На третьому етапі чотирьохступеневої моделі проводиться розділення транспортного руху або вибір виду транспорту. Тобто повна матриця кореспонденцій k -го шару попиту розділяється між визначеними видами транспорту. Для реалізації цього використовується формула [75]:

$$F_{ijkm} = P_{ijkm} \cdot F_{ijk} = \frac{f(z \cdot w_{ijkm})}{\sum_n f(z \cdot w_{ijkn})} \cdot F_{ijk} = \frac{e^{\frac{c(z \cdot w_{ijkm}^b - 1)}{b}}}{\sum_n e^{\frac{c(z \cdot w_{ijkn}^b - 1)}{b}}} \cdot F_{ijk}, \quad (4.6)$$

де F_{ijk} , P_{ijk} – відповідно матриця кореспонденцій та ймовірність вибору m -го режиму при поїзді-переміщенні з i -го району-джерела у j -й район-цілі k -го шару попиту;

F_{ijk} – матриця кореспонденцій з i -го району-джерела у j -й район-цілі k -го шару попиту;

$f(w_{ijm})$ – функція корисності для m -го режиму (див. табл. Д.2 та рис. Д.5 – Д.8);

w_{ijm} – значення матриці витрат при виборі m -го режиму для переміщення з i -го району-джерела у j -й район-цілі;

z – коефіцієнт, що враховує частку m -го виду транспорту (див. рис. Д.1).

По завершенні третього етапу виконується сумування матриць усіх пар діяльності за видами транспорту, в результаті чого утворюється сумарна матриця кореспонденцій для ІТ, ГТ, велосипедів та пішохідного руху.

Після цього у VISUM, у частині моделювання попиту, створюються сегменти попиту. Сегмент попиту – це окремий об'єкт попиту, який встановлює зв'язок між попитом і моделлю мережі впродовж виконання процедури перерозподілу (4 етап 4-х ступеневої моделі). Для кожного виду транспорту в моделі створено сегмент попиту і кожному з них присвоюється відповідна матриця кореспонденцій.

На четвертому етапі 4-х ступеневої моделі виконується перерозподіл транспортного руху, тобто кореспонденції різних видів транспорту розподіляються на транспортну мережу (ВДМ та мережу ГТ).

У середовищі VISUM є багато процедур, які використовують для перерозподілу ІТ, хоча на практиці, найбільшого поширення набула «навчальна процедура», що запропонована Д. Лозе [104].

За цією процедурою в моделі розподіляється індивідуальний, велосипедний транспорт та пішохідний рух. Для громадського транспорту використовується процедура перерозподілу «за розкладом» [104].

Після завершення четвертого етапу, як видно з блок-схеми на рис. 4.2, процедура моделювання повертається до початку етапу II, на якому визначаються значення матриці витрат, однак уже в «навантаженій» мережі. Такий циклічний процес триває до тих пір, поки результат не буде задовольняти критерію відміни моделювання (як правило – стабільність матриць кореспонденцій). А реалізується це у VISUM за допомогою процедури «іти до операції».

Після завершення моделювання попиту для внутрішньої області дослідження необхідно врахувати кореспонденції, що утворюються на її границях (на в'їздах і виїздах із міста). Тобто створити модель попиту для кордонних районів (блок 3, див. рис. 4.1). Моделювання цього попиту здійснюється окремо для ІТ та ГТ.

Моделювання попиту на ІТ для кордонних районів реалізується за методикою, що запропонована Шиллером [76, 99], яка здійснюється у три етапи:

- розрахунок руху із кордонних районів у райони області дослідження;
- розрахунок руху в кордонні райони із районів області дослідження;
- розрахунок транзитного руху – руху між кордонними районами.

Розрахунок контрольних сум матриць для усіх цих трьох етапів визначаються із загальних обсягів поїздок, що утворюються на кордоні області моделювання, тобто із значень інтенсивності ТП на в'їздах і виїздах із міста, які, як правило, встановлюються за результатами натурних досліджень. Розрахунок повної матриці кореспонденцій для останнього етапу, реалізується аналогічно як і для внутрішнього руху області моделювання, тобто за формулою (4.3), а для перших двох етапів – за формулою [76, 99]:

$$v_{ij} = \frac{e^{-\beta \cdot A_{ij}} \cdot E_i}{\sum_k e^{-\beta \cdot A_{ij}} \cdot E_k} \cdot Z_j, \quad (4.7)$$

де β – параметр функції корисності;

A_{ij} – тривалість поїздки між i -м районом та j -м кордонним районом;

Z_j – обсяг поїздок, що виходять (або входять) з j -го кордонного району;

E_i – потенціал структури i -го району області дослідження (робочі місця, місця в навчальних закладах, торгові площі).

Загальний обсяг вхідних та вихідних поїздок з j -го кордонного району для моделі Львова встановлюється за результатами натурних досліджень, що були проведені в лютому – березні 2015 р.

Попит на ГТ для кордонних районів, що утворюється на границях області моделювання, включає також обсяги пасажирського руху, що в'їжджають у місто електропоїздами і формують об'єми генерації та притягання пасажирів на їх вокзалах і залізничних станціях.

Розрахунок контрольних сум матриць для попиту на ГТ, що утворюється на границях області моделювання визначається із обсягів пасажиропотоків приміських та міжміських маршрутів на в'їздах і виїздах із міста. Обсяги пасажиропотоків встановлюються за результатами натурних досліджень, що виконувалися за візуальним методом [28]. Повна матриця кореспонденцій визначається за формулою (4.7).

Розрахунок контрольних сум матриць для потоків, що в'їжджають у місто електропоїздами визначається із даних про обсяг використання пропускових здатностей вокзалів впродовж доби та даних про пасажирооборот на залізничних станціях. Розрахунок повної матриці кореспонденцій реалізується аналогічно як і для внутрішнього руху області моделювання (за формулою (4.3)).

Важливим етапом при побудові транспортної моделі міста є моделювання попиту на вантажний транспорт (блок 4, див. рис. 4.1). Модель попиту на вантажний транспорт для кордонних районів реалізується за аналогічним підходом як і для ГТ, а для внутрішньої області дослідження – на основі натурних даних про інтенсивності руху вантажного транспорту за методикою, що запропонована у [75] (модель готових потоків).

В якості даних використовуються значення інтенсивності руху вантажного транспорту на ключових перехрестях міста, які були визначені при натурних дослідженнях у 2012 – 2015 р, а також ті, що отримані з відеодетекторів у центрі

керування дорожнім рухом м. Львова (схема їх дислокації на ВДМ міста наведено в додатку Е).

Завершальним етапом розробки транспортної моделі (блок 5, див. рис. 4.1) є калібрування моделі та оцінка її адекватності. Основною метою калібрування є підвищення достовірності моделі попиту на транспорт, яка визначає адекватність транспортної моделі міста. Калібрування моделі попиту реалізується шляхом порівняння розрахованих значень (наприклад, інтенсивності транспортних і пасажирських потоків) із даними, що отримані в результаті натурних досліджень. У процесі калібрування необхідно досягти максимальної їх близькості.

Для калібрування попиту на ІТ використовуються значення інтенсивності транспортних потоків на ключових перехрестях міста, що були визначені при натурних дослідженнях у 2012 – 2015 р., а також ті, що отримані з відео детекторів. В процесі калібрування ІТ також перевіряються параметри CR-функції на основі порівняння натурних і розрахункових швидкостей транспортних потоків на перегонах ВДМ.

Для калібрування попиту на ГТ використовуються значення пасажиропотоків на маршрутах і перегонах (тобто, пасажиропотік на усіх маршрутах, що проїжджають через визначений перегін вулиці). При цьому обсяги пасажиропотоків на кожному маршруті встановлюються за табличним методом [28]. Щоб оцінити адекватність моделі попиту на ІТ та ГТ, а отже, і транспортної моделі міста загалом, використовуються такі статистичні критерії, як середня абсолютна і відносна помилка та коефіцієнт кореляції. Їх значення для моделі Львова наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Значення критеріїв якості транспортної моделі м. Львова

Критерії якості транспортної моделі	Індивідуальний транспорт	Громадський транспорт
середня абсолютна помилка	4878,4	4594,7
середня відносна помилка	32,1 %	29,1 %
коефіцієнт кореляції	0,8294	0,8693

Результатом створення транспортної моделі міста є встановлення різноманітної кількості даних та показників функціонування транспортної системи міста, які можна виводити у графічній і табличній формах в інтерфейсі програмного середовища. До них найперше належать дані про інтенсивність ТП на кожному елементі ВДМ, їх завантаженість, тривалість руху у «вільній» та «навантажений» мережі, показники маршрутної мережі громадського транспорту (експлуатаційна швидкість, тривалість руху між зупинками, кількість пасажирів, що виходять та заходять на зупинках для кожного маршруту і загалом) тощо. Основні результати транспортної моделі міста наведені в табл. 4.3 та на рис. 4.3.

Таблиця 4.3 – Загальні обсяги попиту на транспорт для моделі Львова

	Індивідуальний транспорт	Громадський транспорт	Велосипедний транспорт	Пішохідний рух
Кількість поїздок за добу	620513	1441028	59004	542937

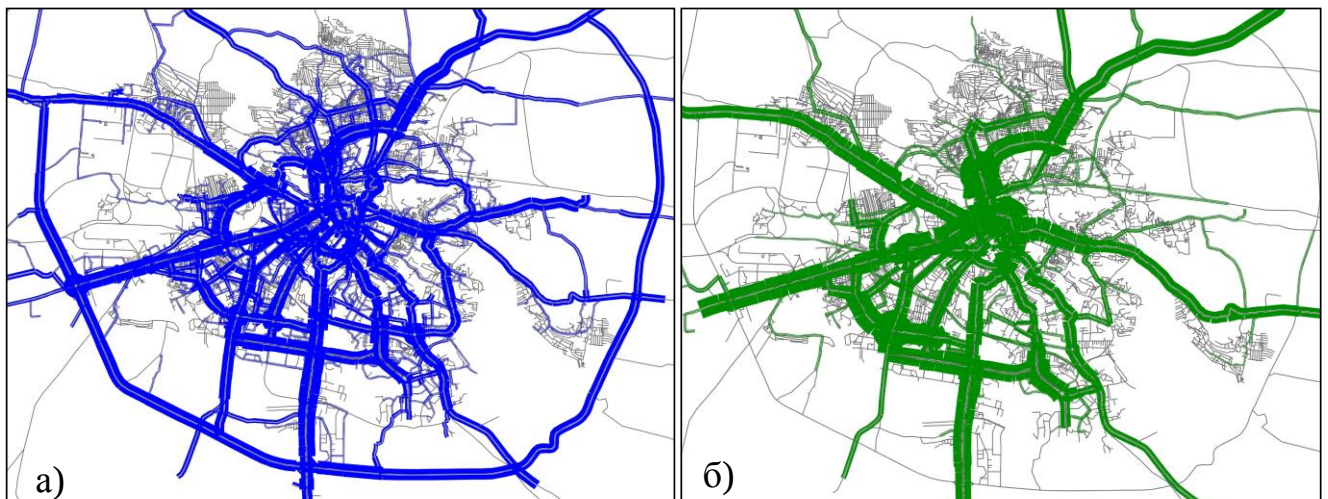


Рисунок 4.3 – Картограма інтенсивності транспортних (а) та пасажирських (б) потоків на ВДМ міста

4.2 Дослідження ефективності запропонованих критеріїв впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць у реальних умовах

Для перевірки ефективності критеріїв впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць, що запропоновані в розділі 2, було обрано частину радіальної, магістральної вулиці Стрийська у м. Львові (від перехрестя вулиць Стрийська-Сокільницька до Стрийська-Наукова-Хуторівка). Обрана ділянка розташована в південній частині міста, на якій організовано двосторонній рух. В обох напрямках є три смуги руху, які відділяються одні від одних розділювальною смугою. Вертикальне планування, в межах обраної частини, має горизонтальну площадку.

На цій ділянці, в різних її частинах, проходить 8–9 міських автобусних та до 3 тролейбусних маршрутів, а також 17 приміських і 43 міжміських автобусних маршрутів. Для кількісної і якісної оцінки рівня організації громадського транспорту (ГТ) на ВДМ було обрано автобусний маршрут № 3А, який курсує на усій визначеній ділянці. Цей маршрут сполучає центр міста з південною його околицею та рухається у прямому і зворотному напрямках, або складається з двох варіантів маршруту «до центру» та «від центру» (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Характеристики зупинних пунктів та перегонів між ними на обраній ділянці

Напрямок руху	Назва зупинного пункту	Скорочена назва	Назва перегону між зупинками	Довжина, м
до центру	вул. Сокільницька	А	-	-
	Автовокзал	Б	АБ	684
	вул. Максимовича М.	В	БВ	761
	вул. Гашека Я.	Г	ВГ	231
	вул. Скорини Ф.	Д	ГД	423
	Стрийська - Хуторівка	Е	ДЕ	496

Продовження таблиці 4.4

Напрямок руху	Назва зупинного пункту	Скорочена назва	Назва перегону між зупинками	Довжина, м
від центру	Стрийська-Наукова	К	-	-
	вул. Скорини Ф.	Л	КЛ	455
	вул. Гашека Я.	М	ЛМ	347
	вул. Максимовича М.	Н	МН	246
	Автовокзал	О	НО	475
	вул. Сокольницька	П	ОП	473

Відповідно до умови критерію I спеціальні смуги можна впроваджувати на усій обраній ділянці не перериваючи на перехрестях.

Перевірка доцільності впровадження спеціальних смуг за критерієм II виконується за формулою (2.2), за якою значення обсягів пасажиропотоків у ранковий пік, непіковий період та вечірній пік для кожного перегону вулиці, порівнюють з їх мінімальними значеннями [31].

Згідно формули (2.2) визначення мінімального обсягу пасажиропотоку вимагає розрахунку значень коефіцієнта заповнення. Їх визначення здійснюємо в середовищі VISUM у такий спосіб. Насамперед матриці кореспонденцій індивідуального транспорту усіх шарів попиту окремо перерозподіляються на модель ВДМ (етап IV див. рис. 4.2), кожній з яких відповідає значення коефіцієнта заповнення, що отримано з результатів опитування (див. додаток Д, рис. Д.3). Тоді значення коефіцієнта заповнення для j -го перегону ВДМ визначається як середньозважене з усіх коефіцієнтів заповнення різних шарів попиту. Результати розрахунків, що отримані за формулою (2.2) наведено на рис. 4.4 – 4.6.

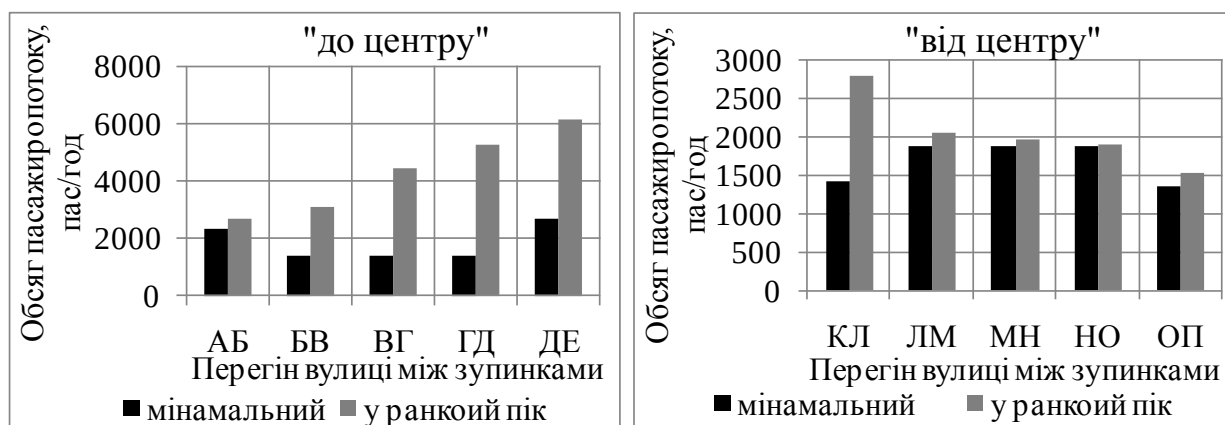


Рисунок 4.4 – Доцільність впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць за критерієм II у ранковий пік

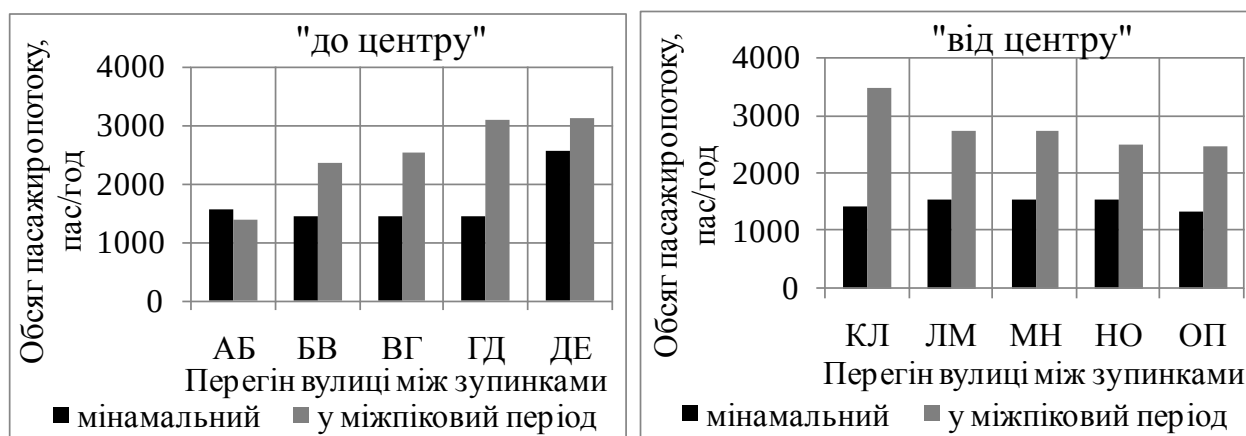


Рисунок 4.5 – Доцільність впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць за критерієм II у непіковий період

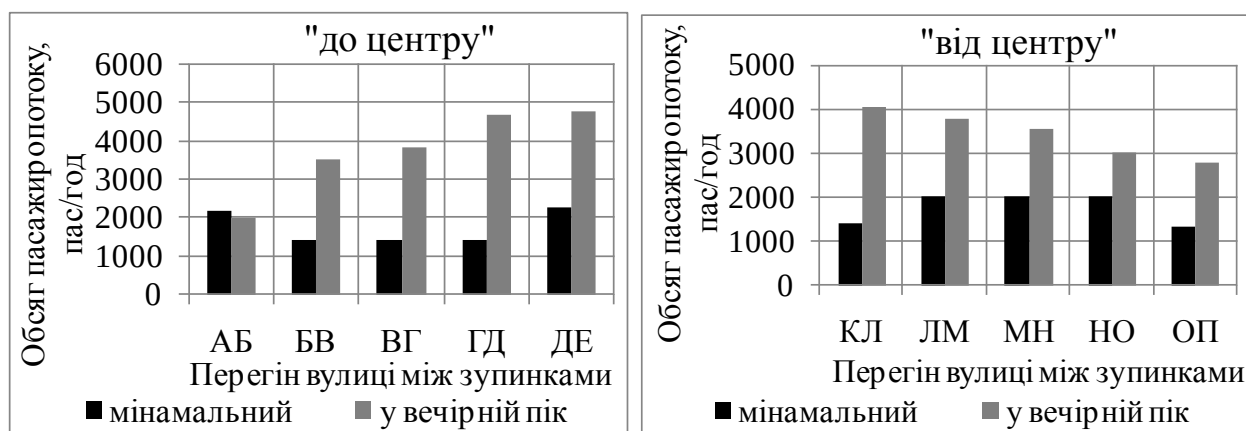


Рисунок 4.6 – Доцільність впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць за критерієм II у вечірній пік

З рисунків 4.4 – 4.6 чітко видно, що в напрямку до центру виділення спеціальних смуг є доцільним на усіх перегонах між зупинними пунктами в ранковий пік. У непіковий період та вечірній пік виключенням є перегін АБ. У зворотному напрямку впровадження спеціальних смуг доцільно на усіх перегонах між зупинками в усі вибрані періоди активної частини доби.

Перевірка доцільності виділення спеціальних смуг на перегонах вулиць за критерієм III здійснюється відповідно до запропонованої лінійної послідовності на рис. 2.4. Ключовим етапом цієї послідовності є визначення зміни інтенсивності руху і рівня завантаження на неперіоритетних смугах після впровадження на перегонах вулиць спеціальних смуг.

Встановлення прогнозу зміни інтенсивності та розподіл її значень на ВДМ здійснюється в середовищі VISUM з використанням даних транспортної моделі, що розроблена у підрозділі 4.1, а виконується це за алгоритмом моделювання, який включає три етапи. На першому етапі у VISUM створюються дві файл-версії (масиви даних про ВДМ та попит на транспорт), в одній з яких у моделі мережі змінюються параметри дуг на обраній ділянці ВДМ, зокрема кількість пріоритетних і неперіоритетних смуг та пропускна здатність. Пропускна здатність перегонів вулиць (дуг), що залишається для неперіоритетних потоків визначається із параметрів керування їх перехресть (вузлів). Впродовж другого етапу у VISUM виконується процедура перерозподілу (етап IV див. рис. 4.2), за якою матриця кореспонденцій індивідуального транспорту розподіляється на модель мережі, в якій відбулися зміни. На третьому етапі дві файл-версії, що містять розподіл потоків у моделі мережі, зі зміненими і незміненими параметрами, порівнюються з використанням закладного у VISUM процедури «відмінність мереж». Результати прогнозів зміни інтенсивності ТП у вибрані періоди дня на обраній ділянці ВДМ наведені в табл. 4.5, а розподіл транспортних потоків по мережі на рис. 4.7 (як приклад, обрано ранковий пік).

Таблиця 4.5 – Зменшення інтенсивності ТП на перегонах вулиці, авт./год

Активний період доби	Перегін вулиці між зупинками									
	АБ	БВ	ВГ	ГД	ДЕ	КЛ	ЛМ	МН	НО	ОП
ранковий пік	121	110	110	65	141	44	58	46	50	50
непіковий період	60	55	55	71	71	27	33	27	28	28
вечірній пік	106	96	96	124	124	63	83	67	71	70



Рисунок 4.7 – Розподіл ТП на ВДМ після впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиці (фрагмент): світло сірий, темно сірий – відповідно зменшення та збільшення інтенсивності ТП (авт./год)

Як видно з рис. 4.7, функціонування спеціальних смуг для ГТ на окремих елементах вуличної мережі призводить до того, що деякі водії ТЗ обирають інші шляхи для руху (вказано темно сірим на рис. 4.7), в результаті чого знижується інтенсивність руху ТП на неперіоритетних смугах (визначено у табл. 4.5). Це пов'язано з тим, що виділення пріоритетних смуг, фактично завжди, утворюють часткові обмеження на елементах мережі з позиції їх пропускнуої здатності для неперіоритетного потоку.

На основі прогнозних значень інтенсивності визначається рівень завантаження на неперіоритетних смугах і порівнюється з допустимою областю завантаження (рис. 4.8).

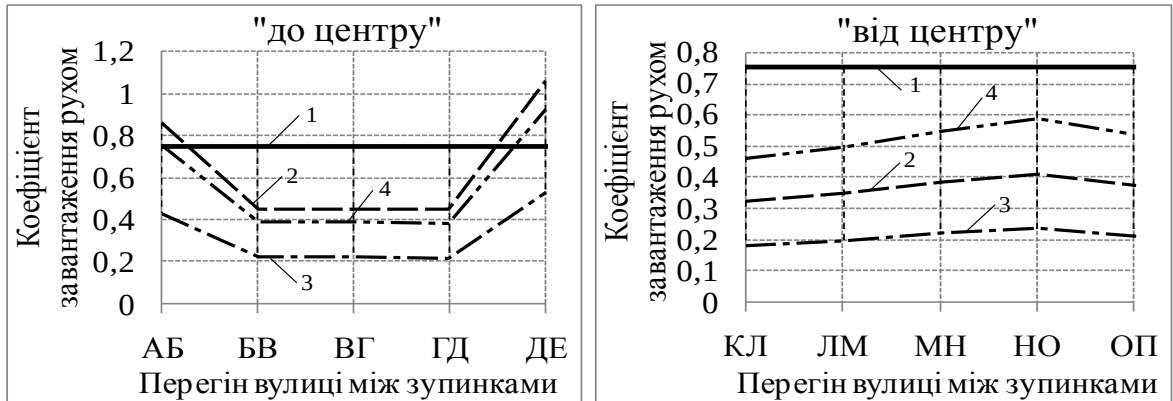


Рисунок 4.8 – Доцільність впровадження спеціальних смуг за критерієм III в напрямку «до центру» та «від центру»: 1 – верхня межа допустимої області завантаження на неперіоритетних смугах; 2 – ранковий пік, 3 – непіковий період; 4 – вечірній пік

З рис. 4.8 видно, що з позиції стану потоку на неперіоритетних смугах є недоцільним впровадження спеціальних смуг на перегоні між зупинними пунктами АБ у ранковий пік, а на ДЕ – у ранковий та вечірній піки.

Після перевірки доцільності впровадження спеціальних смуг на обраній ділянці вуличної мережі за трьома критеріями, слід також перевірити зміну експлуатаційної швидкості автобусного маршруту при їх функціонуванні.

Для розрахунку експлуатаційної швидкості автобуса використовується відома формула [34, 55], яка виражена в тому числі і через тривалість пришвидшення і сповільнення:

$$V_{E_i} = \frac{3,6 \cdot L_{\Pi_i}}{\frac{V_{III}}{7,2} \cdot \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{k} \right) + \frac{3,6 \cdot L_{\Pi_i}}{V_{III_i}} + d_3}, \quad (4.8)$$

де V_{E_j} – експлуатаційна швидкість на j -му перегоні між зупинними пунктами, км/год;

$V_{Ш_j}$ – шляхова швидкість на j -му перегоні між зупинними пунктами, км/год;

$L_{П_j}$ – довжина j -го перегону між зупинними пунктами, м;

d_3 – тривалість затримки на зупинці, с;

a – пришвидшення, м/с²;

k – сповільнення, м/с².

В [1] для величин a та k пропонуються такі значення: пришвидшення – 1,3; сповільнення – 1,3.

Шляхова швидкість на j -му перегоні між зупинними пунктами визначається в середовищі VISUM з використанням формули (2.11), яка дозволяє врахувати затримки на перегонах і перехрестях як при відсутності, так і наявності спеціальних смуг.

Для того, щоб значення, які визначаються за формулою (4.8) були максимально адекватними, необхідно при їх розрахунку використовувати значення затримок на зупинних пунктах, які отримані з натурних досліджень у роботі [31]. Результати значень експлуатаційної швидкості автобуса за наявності і відсутності спеціальних смуг наведено на рис. 4.9 – 4.11.

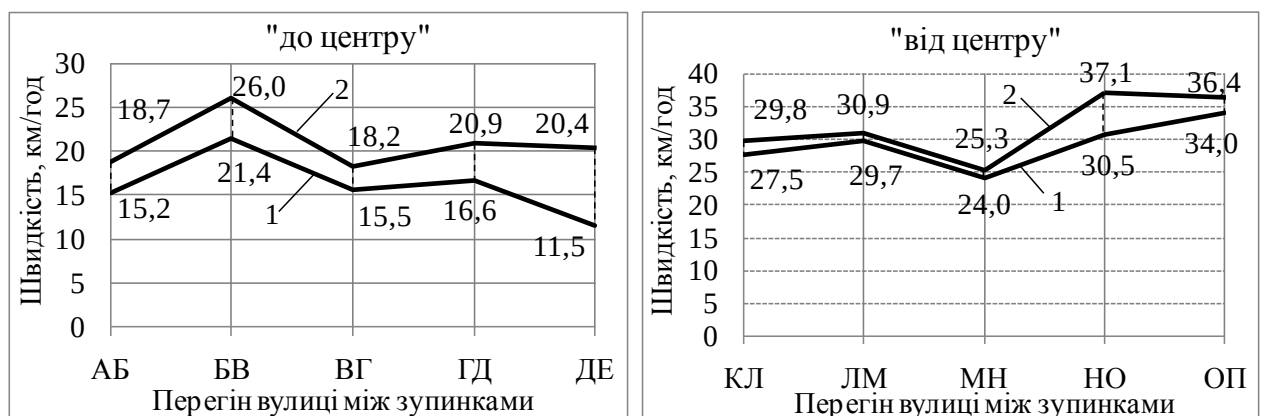


Рисунок 4.9 – Експлуатаційна швидкість автобуса в ранковий пік:

1 – відсутність спеціальних смуг; 2 – наявність спеціальних смуг

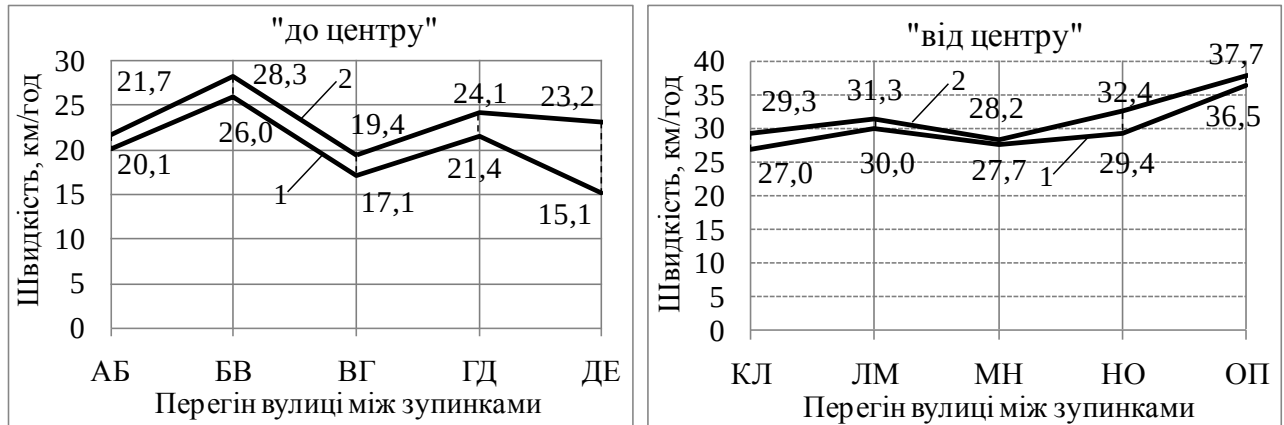


Рисунок 4.10 – Експлуатаційна швидкість автобуса в непіковий період:

1 – відсутність спеціальних смуг; 2 – наявність спеціальних смуг

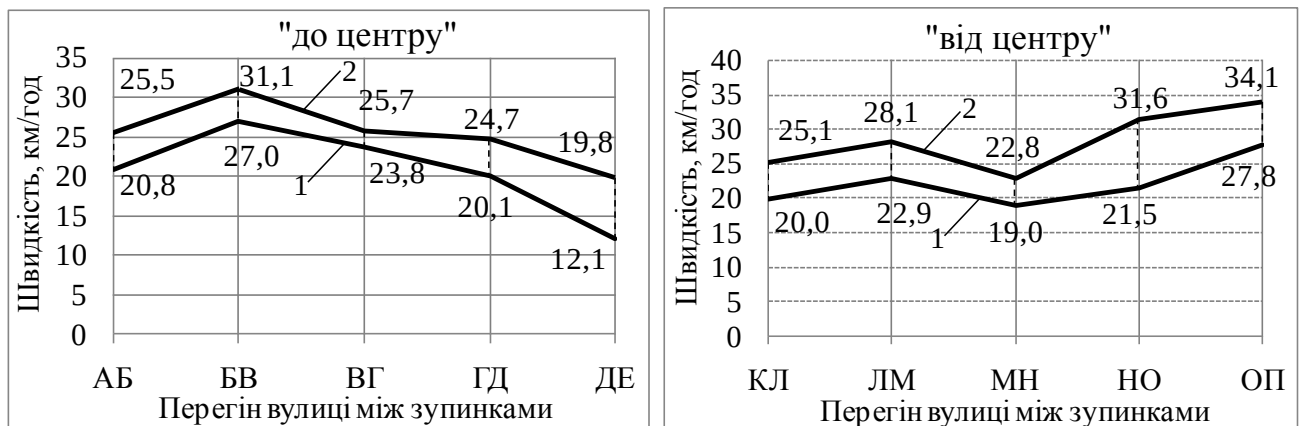


Рисунок 4.11 – Експлуатаційна швидкість автобуса у вечірній пік:

1 – відсутність спеціальних смуг; 2 – наявність спеціальних смуг

Як зазначається в [1], підвищення експлуатаційної швидкості руху ГТ на 1,6 км/год є ефективним рішенням щодо вдосконалення його роботи на вуличній мережі та виправдовують економічну доцільність впровадження заходів з надання їм пріоритету в русі. Відповідно до цієї умови, впровадження спеціальних смуг не підвищує ефективність роботи автобусного маршруту на перегонах між зупинними пунктами ЛМ і МН у ранковий та непіковий період, а також на ОП у непіковий період.

Доцільність функціонування спеціальних смуг у двох напрямках на визначеній ділянці ВДМ за трьома критеріями та значеннями зміни

експлуатаційної швидкості при їх впровадженні можна узагальнити у вигляді таблиці (табл. 4.6), де 1 та 0 вказують, відповідно, на позитивний та негативний результат.

Таблиця 4.6 – Доцільність впровадження спеціальних смуг

Типи обґрунтування	Активний період доби	Перегони між зупинними пунктами									
		до центру					від центру				
		АБ	БВ	ВГ	ГД	ДЕ	КЛ	ЛМ	МН	НО	ОП
Критерій І	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Критерій ІІ	ранковий пік	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	непід. період	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	вечірній пік	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Критерій ІІІ	ранковий пік	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	непід. період	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	вечірній пік	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
Експлуатаційна швидкість	ранковий пік	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
	непід. період	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
	вечірній пік	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Підсумовуючи результати важливо додати, що впровадження спеціальних смуг на обраній ділянці вулиці Стрийська, дає змогу зменшити на 23–25 % тривалість руху автобусів на маршруті порівняно без їх впровадження.

4.3 Дослідження ефективності застосування методу «спеціальна смуга у зоні перехрестя» на реальному перехресті

Для перевірки методу «спеціальна смуга у зоні перехрестя» в реальних умовах використовується ізолюване регульоване Х-подібне перехрестя вулиць Гетьмана Мазепи – Миколайчука (м. Львів). Перехрестя розташоване на околиці міста в північній його частині. На кожному підході є одна смуга руху в обох

напрямок. Ширина смуги руху на вулиці Гетьмана Мазепи становить 4,5 м, а на вулиці Миколайчука – 3,5 м. На одному підході вулиці Миколайчука є підйом з ухилом 20 ‰ (підхід II), а на іншому – спуск з ухилом 15 ‰ (підхід IV). Радіуси заокруглення на усіх підходах становлять 15 м.

Світлофорна сигналізація на перехресті працює в однопрограмному жорсткому режимі у дві фази з тривалістю циклу 60 с (рис. 4.12, а). У першій фазі здійснюють рух ТП, які рухаються вулицею Мазепи та пішоходи, що перетинають вулицю Миколайчука. У другій фазі навпаки: транспортні потоки, що виїжджають з вулиці Миколайчука в обох напрямках і пішохідні потоки, які перетинають вулицю Мазепи. Тривалість дозволеного сигналу в першій фазі становить 37 с; у другій – 17 с; тривалість проміжних тактів – 3 с.

На перехресті дозволені усі напрямки руху, через це пофазний роз'їзд транспортних засобів і рух пішоходів здійснюється за наявності конфліктів, серед яких 4 конфліктні точки перетину (лівоповоротні з прямими), 8 відхилення, 4 злиття, а також 4 конфліктні точки пересічення пішохідних і транспортних потоків при повороті останніх праворуч та 4 пересічення пішохідних і транспортних потоків при повороті останніх ліворуч [57].

Значення інтенсивності транспортних і пішохідних потоків у годину пік для кожного напрямку руху на перехресті наведено на рис. 4.12, б. При цьому частка легкових автомобілів у потоці (не враховуючи автобусів) становить 88, 96, 81 та 94 % відповідно на підходах I, II, III, та IV.

Через вулицю Мазепи на підході I проходять 8 автобусних та 1 тролейбусний маршрути, з яких 7 (в тому числі тролейбусний) у прямому напрямку і 2 повертають праворуч. Середній інтервал руху між рухомим складом, що курсує у прямому напрямку становить 165 с; повертає праворуч – 525 с. Через цю ж вулицю але у протилежному напрямку (підхід III) проходить 9 автобусних та 1 тролейбусний маршрути, з яких 6 (у тому числі тролейбусний) у прямому напрямку і 3 повертають ліворуч. Середній інтервал руху між тими, що рухаються у прямому напрямку становить 100 с; повертають ліворуч – 220 с.

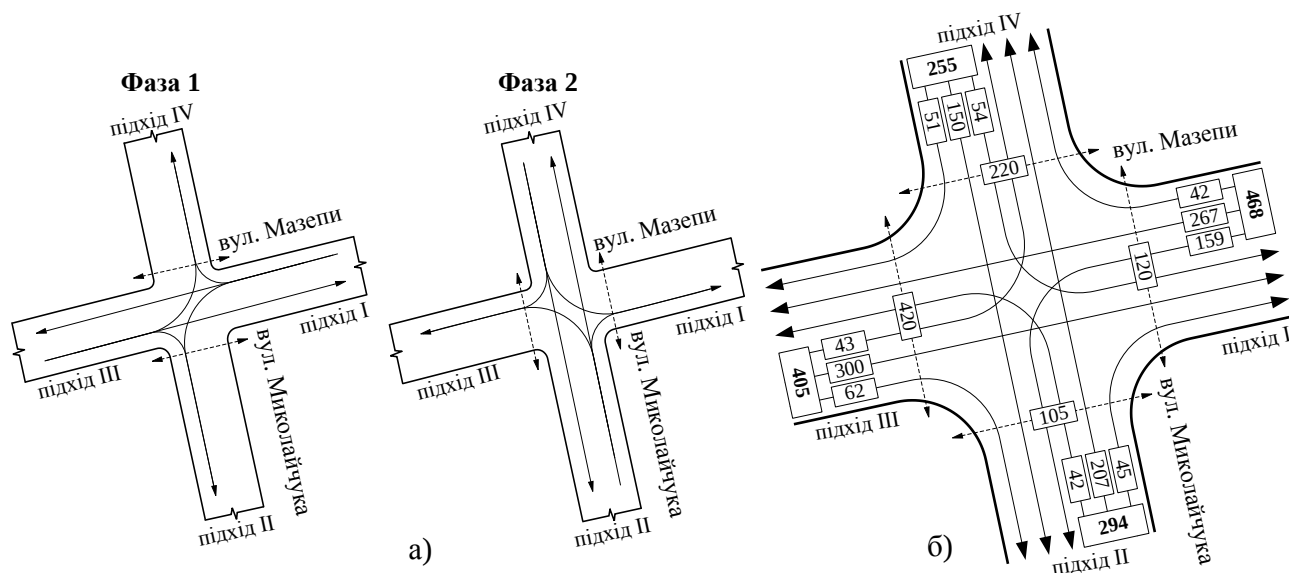


Рисунок 4.12 – Існуючі умови руху на перехресті вулиць Мазепи – Миколайчука:

а – схема пофазного роз'їзду; б – фактичні значення годинної інтенсивності транспортних (без автобусів) та пішохідних потоків у піковий період

Через вулицю Миколайчука на підході II проходить 1 автобусний маршрут з інтервалом 420 с, а на підході IV – 6 автобусних маршрутів, з яких 4 повертають праворуч і 2 ліворуч. Середній інтервал між тими, що повертають праворуч становить 170 с; ліворуч – 690 с.

Біля перехрестя на вулиці Мазепи є два зупинні пункти, які розташовані за перехрестям, причому один з них відразу за перетином (підхід III), інший – на відстані 60 м.

Для зменшення затримок автобусів на перехресті шляхом забезпечення їм просторово-часового пріоритету, пропонується впровадити у зоні цього перехрестя спеціальну смугу типу 2.1 на вулиці Мазепи в обох напрямках (на підході I та III), а також спеціальну смугу типу 2.2 і 2.4 на підході IV вулиці Миколайчука. В результаті, ширина проїзної частини на вул. Мазепи у місцях, де наявні спеціальні смуги становитиме 15 м, а на вул. Миколайчука – 11 м, причому ширина спеціальної смуги в обох випадках становитиме 4 м.

За наявності спеціальних смуг у зоні цього перехрестя та при різному поєднанні сигнальних груп у фазі між автобусами і неперіоритетними потоками будуть виникати конфлікти. Тому для забезпечення пріоритету в часі доцільно

використовувати алгоритм, що ґрунтується на виклику спеціальної фази. Водночас, для оптимального керування неперіоритетними ТП на перехресті, цей алгоритм доцільно поєднувати із алгоритмом пошуку часового розриву в потоці та алгоритмом зміни чергування фаз.

Для перевірки ефективності цих пропозицій використовується програмне забезпечення VISSIM, у середовищі якого створено імітаційну модель перехрестя вулиць Мазепи – Миколайчука [13].

Схема геометричних параметрів перехрестя за наявності у його зоні спеціальних смуг, розподіл усіх напрямків руху на сигнальні групи та розташування детекторів наведено на рис. 4.13, а. Сигнальні групи, що виділено для неперіоритетних ТЗ присвоєно назви K1–K4; для пішоходів – F1–F4; для автобусів – B1 (B1a, B1b), B2 (B2a, B2b), B3 (B3a, B3b).

Довжина елементів спеціальних смуг у зоні перехрестя, зокрема оптимальна довжина спеціальної смуги на підході до перехрестя визначаються за методикою, що розроблена у розділі 3.

У моделі VISSIM приймається, що бажана швидкість легкового і вантажного автомобіля становить 50 км/год, а тролейбуса і автобуса – 40 км/год. Вхідна інтенсивність транспортних потоків сигнальних груп K1–K4, а також їх частки потоків прямого напрямку та частки легкових автомобілів у потоці (не враховуючи автобусів) задаються ті, що спостерігаються за існуючих умов (рис. 4.12, б). Пішохідним потокам у моделі задаються значення, що отримані при натурному дослідженні, зокрема 120, 105, 420, 220 піш./год відповідно для сигнальних груп F1–F4. Для маршрутних автобусів сигнальних груп B1a, B1b, B2a, B2b, B3a, B3b замість значень інтенсивності приймаються інтервали руху між автобусами, значення яких відповідають існуючим умовам на перехресті, а саме: B1a – 100 с; B1b – 220 с; B2a – 525 с; B2b – 165 с; B3a – 170 с; B3b – 690 с. Автобусному маршруту, що проходить вул. Миколайчука на підході II спільно із транспортними потоками сигнальної групи K2, задається інтервал 420 с.

Для реалізації в моделі VISSIM адаптивного керування світлофорною сигналізацією, де один з алгоритмів забезпечує пріоритетний проїзд перехрестя,

використовується його додатковий модуль VAR. Цей модуль вимагає створення VAR-фалу, який описує логіку роботи контролера і PUA-фалу, в якому визначено сигнальні групи, їх поєднання у фази та тривалість перехідних інтервалів.

Поєднання сигнальних груп у фази та можливі варіанти їх чергування наведено на рис. 4.13, б. Тривалість перехідних інтервалів, зокрема для переходу з фази 2 до фаз 7–10 становить 5 с. Тривалість усіх інших фазових переходів для сигнальних груп K1–K4 становить 3 с, а для F1–F4 – 4 с, при цьому тривалість жовтого сигналу в усіх випадках становить 3 с. На основі цих даних, а також тих, що наведені на рис. 4.13, б створюється Файл-PUA у програмі WordPad.

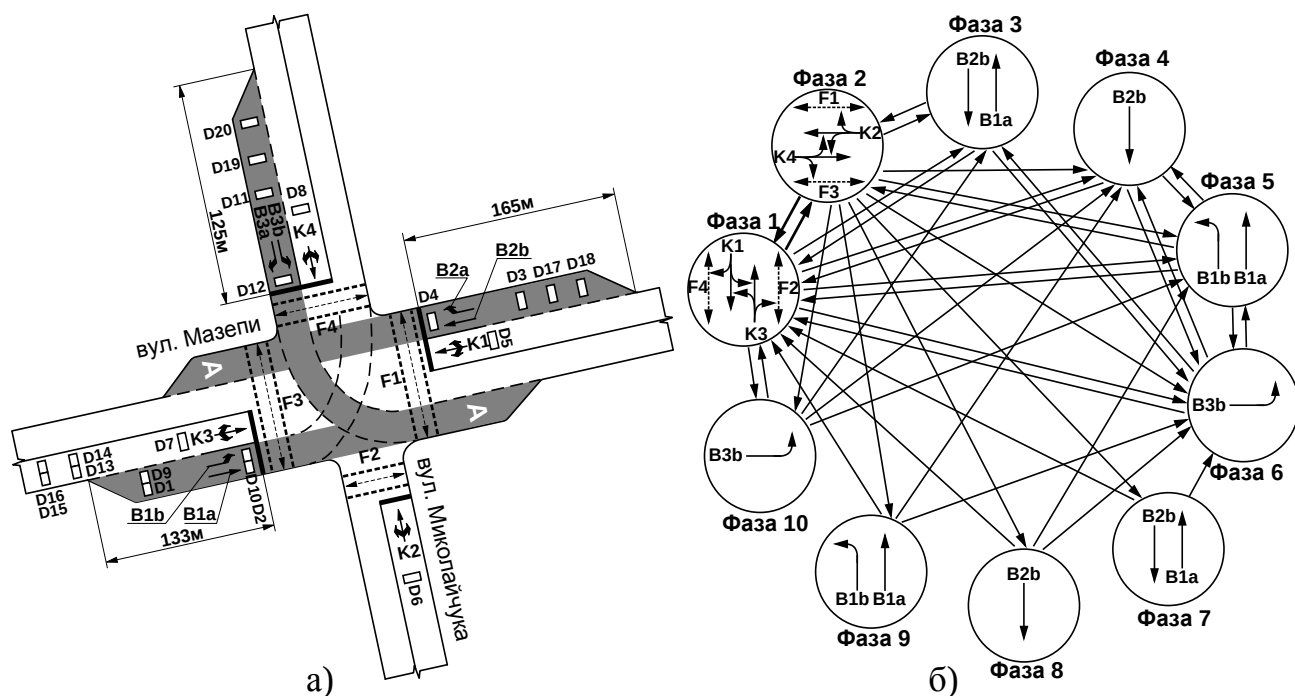


Рисунок 4.13 – Схема пропонованих змін на перехресті вулиць Мазепи – Миколайчука: а – геометричні параметри перехрестя за наявності у його зоні спеціальних смуг; б – послідовність зміни фаз

Файл-VAR є результатом перетворення розробленої логіки керування сукупності алгоритмів, ключовим з яких є той, що забезпечує пріоритет у часі через виклик спеціальної фази. Логіка керування розробляється в окремому програмному модулі VisVAR у формі блок-схеми [80, 97]. Блок-схема сукупності алгоритмів наведена в додатку Ж.

Щоб забезпечити пріоритетний проїзд перехрестя шляхом виклику спеціальної фази, як видно з рис. 4.13, б використовується вісім фаз (з 3 по 10), які пропускаються у випадку відсутності автобусів на підходах. Фази 4, 6 – 10 після їх завершення, крім тих, що викликаються, завжди переходять на фазу 1, тоді як фаза 3 і 5 можуть змінюватися як на фазу 1, так і на фазу 2.

Щоб реалізувати різну тривалість перехідних інтервалів між фазою 1 або фазою 2 і фазою, яка викликається, що, своєю чергою, дозволяє забезпечити абсолютний пріоритет проїзду, використовуються одні і ті ж автобусні сигнальні групи в різних фазах (наприклад: сигнальні групи B1a та B2b у фазі 3 та 7, і.т.д.). Найвищий ступінь пріоритету мають автобуси сигнальних груп B1a та B2b, далі – B1b, а тоді вже – B3b.

Для виявлення появи автобусів сигнальної групи B1a використовуються детектори D1, D2, D13, D15; для B1b – D9, D10, D14, D16; для B2b – D3, D4, D17, D18; для B3b – D11, D12, D19, D20. Поява автобусів сигнальних груп B2a та B3a детекторами не фіксуються, оскільки вони не потребують забезпечення пріоритету в часі за допомогою світлофорної сигналізації (повертають праворуч із спеціальної смуги). Щоб виявити часовий розрив у потоці непріоритетних ТЗ сигнальних груп K1–K4 використовуються відповідно детектори D5–D8. Детектори D2, D4, D10, D12 розташовані на відстані 8 м від стоп-лінії; D5–D8 – 30 м; D1, D3, D9, D11 – 67 м; D13, D14, D17, D19 – 135 м; D15, D16, D18, D20 – 156 м.

Як критерій для кількісної оцінки ефективності просторово-часового пріоритету на цьому перехресті в моделі використовується показник середня затримка автобуса та автомобіля на підході [40]. Щоб усереднити результати проводиться 10 імітацій, де тривалість однієї становить 1 год, причому початок фіксування результатів розпочинається із 400 с.

Крім цього, з метою порівняння цих результатів з тими, які можна отримати з умов, де пріоритетний проїзд на перехресті не забезпечується, додатково було створено окрему модель цього ж перехрестя в середовищі VISSIM без наявності спеціальних смуг у його зоні при тих же вхідних даних. При цьому, світлофорна

сигналізація працює в адаптивному режимі за алгоритмом пошуку часового розриву у ТП на усіх підходах при двохфазному роз'їзді транспортних і пішохідних потоків (аналогічно як на рис. 4.11, б фаза 1 та 2). Результати моделювання значень середньої затримки при обох випадках наведено в табл. 4.7 та 4.8.

Таблиця 4.7 – Ефективність роботи перехрестя вулиць Мазепи – Миколайчука при забезпеченні просторово-часового пріоритету

Середня затримка, с	Транспортні потоки сигнальних груп						
	K1	K2	K3	K4	B1	B2	B3
автомобіля та автобуса	70,02	69,83	29,03	79,71	3,91	4,85	6,07

Таблиця 4.8 – Ефективність роботи перехрестя вулиць Мазепи – Миколайчука при адаптивному керуванні без забезпечення пріоритету

Середня затримка, с	Транспортні потоки сигнальних груп			
	K1	K2	K3	K4
автомобіля	63,28	53,16	27,69	60,39
автобуса	66,24	71,30	21,77	58,28

З таблиці 4.7 та 4.8 видно, що застосування просторово-часового пріоритету на обраному перехресті дає змогу зменшити затримки автобусів на 82, 93 та 90 % відповідно для маршрутів сигнальних груп B1, B2 та B3. Це, своєю чергою, дає змогу зменшити тривалість часу обороту автобусів на маршрутах, їх витрати палива та викидів шкідливих речовин у довкілля. Водночас, цей пріоритет зумовлює незначне зростання значень затримок для непріоритетних ТП. Зокрема, значення затримок ТЗ сигнальних груп K1–K4 зростають відповідно на 11, 31, 5 та 32%.

Середня затримка автобуса на перехресті при забезпеченні просторово-часового пріоритету порівняно із адаптивним керуванням без забезпечення

пріоритету зменшується на 87 % (з 47,22 до 6,24 с), а середня затримка автомобіля – збільшується на 19 % (з 50,53 до 60,07 с).

4.4. Висновки до розділу

1. Розроблено транспортну модель міста Львова в середовищі VISUM з моделлю попиту на ІТ, ГТ, велосипед, пішохідний рух і вантажний транспорт. Модель попиту створена за класичною 4-х ступеневою моделлю попиту, причому створення транспортного руху (І етап 4-х ступеневої моделі) виконано за методикою запропонованою проф. Д. Лозе з використанням Microsoft Excel.

2. З використанням транспортної моделі у VISUM та її даних встановлено прогнози зміни інтенсивності руху як на перегонах вулиці обраної ділянки, так і на усіх елементах вуличної мережі міста при виділенні спеціальних смуг для маршрутних автобусів.

3. З використанням VISUM та запропонованих критеріїв проведено оцінку доцільності впровадження спеціальних смуг на перегонах частини вулиці Стрийська (м. Львів), за якою встановлено, що їх впровадження дає змогу зменшити тривалість руху автобусів до 23–25 %. Результати дослідження дозволяють стверджувати про справедливість прийнятих гіпотез у теоретичних дослідженнях, засвідчують переваги запропонованих критеріїв, їх простоту використання та придатність до застосування на практиці.

4. За результатами модельного експерименту у VISSIM встановлено, що впровадження методу «спеціальна смуга у зоні перехрестя» на пересіченні вулиць Мазепи – Миколайчука (місто Львів) дає змогу зменшити на 87 % середню затримку автобуса на перехресті порівняно з адаптивним керуванням без забезпечення пріоритету. Отримані результати свідчать про ефективність запропонованого методу для забезпечення просторово-часового пріоритету на регульованих перехрестях особливо, коли на їх підходах є не більше двох смуг руху.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене актуальне наукове завдання, яке полягає у визначенні та обґрунтуванні критеріїв впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць і розробленні методу, що забезпечує автобусам просторово-часовий пріоритет на регульованих перехрестях. Проведені у дисертаційній роботі дослідження дають змогу зробити такі висновки:

1. Обґрунтовано, що як основний критерій впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць доцільно використовувати не інтенсивність руху автобусів, а мінімальний обсяг пасажиропотоку. Визначено діапазон його значень (від 960–5434 пас./год) і запропоновано емпіричну формулу для розрахунку цього показника залежно від дорожньо-транспортних умов на перегонах. Доведено, що стан потоку на неперіоритетних смугах доцільно визначати рівнем завантаження руху, допустима область якого не перевищує 0,75 завантаження перегону, а основним етапом його розрахунку є прогноз зміни інтенсивності руху на неперіоритетних смугах.

2. Розроблено та формалізовано метод «спеціальна смуга у зоні перехрестя», що дає змогу забезпечити автобусам просторово-часовий пріоритет на регульованих перехрестях (здебільшого ізольованих), а також встановлено межі області його ефективного застосування. Запропоновано шість основних типів таких спеціальних смуг і встановлено, що ключовим етапом впровадження є визначення їхньої оптимальної довжини на підході до перехрестя.

3. Розроблено імітаційні моделі для визначення максимальної довжини черги ТЗ на підході до ізольованого та координованого регульованого перехрестя, за значеннями яких визначається оптимальна довжина спеціальної смуги на відповідному підході. Значення черги транспортних засобів за імітаційною моделлю для ізольованих перехресть є аналогічними до тих, що визначаються за німецькими нормами HBS (відхилення не перевищує 7,5%) і близькими до тих, які видає VISSIM, причому найкращі результати досягаються, якщо часові інтервали між ТЗ, що надходять до перехрестя розподіляються за законом Гіпер-Ерланга з параметром $\alpha = 3$. Імітаційна модель для координованого перехрестя

адекватно відтворює на ньому реальний процес (утворення груп ТЗ на живлячому підході, їх деформація на суміжному та виключення з нього ТЗ з другорядних підходів, які не потрапляють у чергу) і визначає значення максимальної довжини черги аналогічні тим, що видає VISSIM (відхилення не перевищує 22%).

4. На основі даних розробленої транспортної моделі міста у VISUM та запропонованих критеріїв проведено оцінку доцільності впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиці, за якою встановлено, що вони дають змогу зменшити тривалість руху автобусів на 23–25%, що, своєю чергою, доводить переваги запропонованих критеріїв та їх придатність для застосування на практиці.

5. Отримані результати досліджень свідчать про те, що застосування методу «спеціальна смуга у зоні перехрестя» на ізольованому регульованому перехресті, дає змогу зменшити на 87% середню затримку автобусів порівняно з адаптивним керування без забезпечення пріоритету.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автомобильные перевозки и организация дорожного движения: Справочник. Пер. с англ./ В.У. Рэнкин, П. Клафи, С. Халберт и др. – М.: Транспорт, 1981. – 592 с.
2. База даних головного управління статистики у Львівській області [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://lv.ukrstat.gov.ua/> – 10.02.2015 г. – Загл. з екрану.
3. Брайловский Н.О. Управление движением транспортных средств / Н. О. Брайловский, Б. И. Грановский. – М.: Транспорт, 1975. – 112 с.
4. Браннольте У. Стратегическое планирование транспортной инфраструктуры. Методики проектной оценки в Германии [Электронный ресурс] / У. Браннольте, К. Беттгер, В. Л. Швецов, Ф. Аппельт // ГИС-Ассоциация, Управление развитием территории, 2008, № 1–4. – Режим доступа: <http://www.gisa.ru/50526.html>.
5. Буга П.Г. Организация пешеходного движения в городах / П. Г. Буга, Ю. Д. Шелков. – М.: Высш. школа, 1980. – 232 с.
6. Вікович І.А. Оцінка функцій спеціальних смуг в умовах вулично-дорожньої мережі міста / І.А. Вікович, Р.М. Зубачик // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту: науковий журнал. – 2011. – №2. – С. 81–89.
7. Вікович І.А. Розробка основного критерію впровадження спецсмуг на перегонах вулиць для громадського транспорту / І.А. Вікович, Р.М. Зубачик // Східно-Європейський журнал передових технологій: науковий журнал. – Харків: технологічний центр. – 2011. – № 6/4 (54). – С. 28–34.
8. Вікович І.А. Моделювання попиту на індивідуальний та громадський транспорт з використанням програмного забезпечення VISUM // І.А. Вікович, Р.М. Зубачик // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля: науковий журнал. – 2012. – № 6 (177), Ч.1. – С. 193–203.
9. Вікович І.А. Розробка методу забезпечення пріоритету маршрутним автобусам на регульованих перехрестях / І.А. Вікович, Р.М. Зубачик // Східно-

Європейський журнал передових технологій: науковий журнал. – Харків: технологічний центр. – 2013. – № 5/3 (65). – С. 27–33.

10. Вікович І.А. Розробка імітаційної моделі для визначення максимальної довжини черги транспортних засобів / І.А. Вікович, Р.М. Зубачик // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: збірник наукових праць. – Харків, 2013. – № 70(1043). – С. 48–59.

11. Вікович І.А. Розроблення імітаційної моделі для визначення максимальної довжини черги автомобілів на координованому перехресті / І.А. Вікович, Р.М. Зубачик // Технологічний аудит та резерви виробництва: науковий журнал. – Харків: технологічний центр. – 2013. – № 6/1 (14). – С. 19–26.

12. Вікович І.А. Визначення ефективності методу «спеціальна смуга у зоні перехрестя» з позиції забезпечення пріоритету у часі / І.А. Вікович, Р.М. Зубачик, Д.О. Беспалов // Технологічний аудит та резерви виробництва: науковий журнал. – Харків: технологічний центр. – 2014. – № 5/1(19). – С. 40–45.

13. Викович И.А. Анализ эффективности метода «специальная полоса в зоне перекрестка» на реальном регулируемом пересечении / И.А. Викович, Р.М. Зубачик // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: науч.-произв. журн. Наука и транспорт. – Гомель, 2014. – № 2 (29). – С. 44–48.

14. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – 2-е изд., стер. – М.: Висш. шк., 2000. – 480 с.

15. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – 2-е изд., стер. – М.: Висш. шк., 2000. – 480 с.

16. Врубель Ю.А. Организация дорожного движения в двух частях / Ю.А. Врубель. – Мн.: Белорусский фонд организации дорожного движения, 1996. – 328 с.

17. Гаврилов А.А. Моделирование дорожного движения / А.А. Гаврилов. – М.: Транспорт, 1980. – 190 с.

18. Гаврилов Е.В. Організація дорожнього руху / Е.В. Гаврилов, М.Ф. Дмитриченко, В.К. Доля. – К.: Знання України, 2007. – 452 с.

19. Гаврилов Е.В. Основи теорії систем і управління / Е.В. Гаврилов, М.Ф. Дмитриченко, В.К. Доля, О.Т. Лановий, І.Е. Линник, В.П. Поліщук. – К.: Знання України, 2005. – 344 с.
20. Генеральний план м. Львова до 2025 року. Загальна пояснювальна записка. Т. 1. Економічна та архітектурно-планувальна частина // Ухвала № 3924 від 30.09.2010 Про затвердження містобудівної документації “Корегування генерального плану м. Львова“ II-стадія. Генеральний план“.
21. Гук В.І. Транспортні потоки: теорія та її застосування в урбанізації / В.І. Гук, Ю.М. Шкодовський: монографія. – Х.: Золоті сторінки, 2009. – 232 с.
22. ДБН В.2.3-5-2001. Вулиці та дороги населених пунктів. Споруди транспорту. – К.: Держбуд України, 2001. – 51 с.
23. Дідківська Л.С. Гнучкі методи світлофорного регулювання в умовах не стаціонарності параметрів транспортного потоку: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Л.С. Дідківська. – К. НТУ, 2011. – 20 с.
24. Дмитриченко М.Ф. Основи теорії транспортних процесів і систем. / М.Ф. Дмитриченко, Л.Ю. Яцківський, С.В. Ширяева, В.З. Докуніхін // Навчальний посібник для ВНЗ. – К.: Видавничий Дім «Слово», 2009. – 336 с.
25. Дмитриченко М.Ф. Про координоване управління транспортними потоками на вулично-дорожній мережі міста / М.Ф. Дмитриченко, І.А. Вікович, Р.М. Зубачик // Вісник Національного транспортного університету: науково-технічний збірник. – К.: НТУ. – 2010. – № 21, Ч.2. – С. 67–72.
26. Дмитриченко М.Ф. Розробка алгоритму дій щодо впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиці для громадського транспорту / М.Ф. Дмитриченко, І.А. Вікович, Р.М. Зубачик // Вісник Національного транспортного університету: науково-технічний збірник. – К.: НТУ. – 2011. – № 23, Ч.2. – С. 15–22.
27. Долль Х. Німецький досвід запровадження системи пріоритетного руху трамваїв і автобусів на регульованих перехрестях за методом «зеленої хвилі» / Х. Долль, Г. Лістль // Автошляховик України. Науково-виробничий журнал, 2006. – № 6 (194). – С. 19–22.

28. Доля В.К. Пасажирські перевезення: підручник. / В.К. Доля. – Харків.: Видавництво «Форт», 2011. – 504 с.
29. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими / Д. Дрю. – М.: Транспорт, 1976. – 424 с.
30. Зубачик Р.М. Дослідження ефективності критеріїв впровадження спеціальних смуг для автобусів з використанням VISUM / Р.М. Зубачик // Східно-Європейський журнал передових технологій: науковий журнал. – Харків: технологічний центр. – 2014. – № 5/3 (71). – С. 48–54.
31. Зубачик Р.М. Спосіб забезпечення пріоритетних умов руху на вулично-дорожній мережі міста під час спеціальних пасажирських перевезень / Р.М. Зубачик // Автошляховик України: науковий журнал. – 2011. – №4. – С. 16–20.
32. Иносэ Х. Управление дорожным движением. Пер. с англ. / Х. Иносэ, Т. Хамада – М.: Транспорт, 1983. – 248 с.
33. Капитанов В.Т. Управление транспортными потоками в городах / В.Т. Капитанов, Е.Б. Хилажев. – М.: Транспорт, 1985. – 144 с.
34. Клишковштейн Г.И. Организация дорожного движения: учеб. для вузов. / Г.И. Клишковштейн, М.Б. Афанасьев; 5-е изд. – М.: Транспорт, 2001. – 247 с.
35. Коноплянко В.И. Организация и безопасность дорожного движения. – М.: Транспорт, 1991. – 183 с.
36. Конспект лекцій з дисципліни „Технічні засоби організації дорожнього руху” для студентів за фахом 7.100402 „Організація дорожнього руху” / В.І. Єресов. – К.: УТУ, 1998. – 92 с.
37. Красников А.Н. Городские улицы и дороги / А.Н. Красников. – М.: Стройиздат, 1984. – 140 с.
38. Кременец Ю.А. Технические средства организации дорожного движения / Ю.А. Кременец – М.: Транспорт, 1990. – 255 с.

39. Кременец Ю.А. Технические средства организации дорожного движения: учеб. для вузов. / Ю.А. Кременец, М.П. Печерский, М.Б. Афанасьев. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 279 с.

40. Левашев А.Г. Проектирование регулируемых пересечений: учеб. пособие. / А.Г. Левашев, А.Ю. Михайлов, И.М. Головных. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 208 с.

41. Лобанов Е.М. Транспортная планировка городов / Е.М. Лобанов – М.: Транспорт, 1990. – 240 с.

42. Лобашов О.О. Практикум з дисципліни «Організація дорожнього руху»: навч. посіб. / О.О. Лобашов, О.В. Прасоленко; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х. : ХНАМГ, 2011. – 221 с.

43. Лозе Д. Моделирование транспортного предложения и спроса на транспорт для пассажирского и служебного транспорта – обзор теории моделирования / Д. Лозе // Сб. докладов 7-й межд. конф. «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах». – СПб: СПб. гос. архит.-строит. ун-т. – 2006. – С. 170–186.

44. Петров В.В. Автоматизированные системы управления дорожным движением в городах / В.В. Петров: Учебное пособие. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2007. – 104 с.

45. Печерский М.П. Автоматизированные системы управления движением в городах / М.П. Печерский, Б.Г. Хорович. – М.: Транспорт, 1979. – 176 с.

46. Повзун А.И. Об обеспечении приоритетного проезда маршрутного пассажирского транспорта на регулируемых перекрестках / А.И. Повзун, С.В. Кононыхин, Е.В. Руденков // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. Науковий журнал. – 2012. – №1. – С. 23–28.

47. Полищук В.П. Проектирование автоматизированных систем управления на автомобильных дорогах / В.П. Полищук. – К.: УМК ВО, 1990. – 55 с.

48. Поліщук В.П. Теорія транспортного потоку: методи та моделі організації дорожнього руху / В.П. Поліщук, О.П. Дзюба. – К.: Знання України, 2008. – 175 с.
49. Поліщука В.П. Організація та регулювання дорожнього руху: підручник. / В.П. Поліщука, О.О. Бакуліч, О.П. Дзюба, В.І. Єресов та ін. – К.: Знання України, 2012. – 468 с.
50. Полозенко П.М. Комплексна оцінка режимів світлофорного регулювання на перехрестях: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / П. М. Полозенко. – К., 1999. – 136 с.
51. Пономаренко Л.А. Управління нестационарними транспортними потоками на регульованих перехрестях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Л.А. Пономареко. – К., НТУ, 2006. – 20 с.
52. Поштар О.М. Врахування змін показників руху транспортних потоків при управлінні на міських магістралях / О.М. Поштар. // Автошляховик України, вид. Мінтрансу України. – 1997. – №3. – С. 45–46.
53. Пржибыл П. Телематика на транспорте (пер. с чешского) / П. Пржибыл, М. Свитек. – М.: МАДИ, 2003. – 540 с.
54. Проблемы устойчивого развития городского транспорта в Российской Федерации / Материалы конференции, посвященной 80-летию ОАО «НИИАТ». – М., 2011. – 114 с.
55. Пугачев И.Н. Организация и безопасность движения: учеб. пособие. / И. Н. Пугачев. – Хабаровск: Изд-во Хабар. Гос. техн. ун-та, 2004. – 232 с.
56. Романов А.Г. Дорожное движение в городах: закономерности и тенденции / А. Г. Романов. – М.: Транспорт, 1984. – 81с.
57. Рябець Я.В. Комплексна оцінка потенційної небезпеки руху на перехрестях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 «Транспортні системи» / Я.В. Рябець. – Київ, 2009. – 20 с.
58. Сеньо П.С. Теорія ймовірності та математична статистика / П.С. Сеньо. – К.: Центр навчальної літератури, 2004. – 448 с.

59. Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации дорожного движения / В.В. Сильянов. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.
60. Сильянов В.В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц: учебник для студ. высш. учебн. заведений / В.В. Сильянов, Э.Р. Домке. – М.: ИЦ «Академия», 2008. – 352 с.
61. Стратегія міського транспортного руху у місті Львові. – Львів 2009. – 286 с.
62. Транспорт і зміна клімату: модуль 5е. – Ешборн, 2010. – 51с.
63. Указания по организации приоритетного движения транспортных средств общего пользования. – М.: Транспорт, 1984. – 32 с.
64. Чабанюк Я.М. Теорія ймовірності і математична статистика. Практик. / Г.І. Білушак, Я.М. Чабанюк. – 1-е вид. – Л.: 2001. – 418 с.
65. Четверухін Б.М. Математична модель руху груп автомобілів, сформованих світлофорною сигналізацією на регульованому перехресті / Б.М. Четверухін, В.Ф. Душник, З.Д. Дерех. // Безпека дорожнього руху України. Науково-технічний вісник. – 2002. – № 2. – С. 81–93.
66. Четверухін Б.М. Аналіз процесу розпаду груп транспортних засобів, сформованих світлофорним об'єктом, на перегонах магістралі / Б.М. Четверухін, В.Ф. Душник, П.М. Полозенко // Безпека дорожнього руху України. Науково-технічний вісник. – 2005. – № 1 – 2. – С. 162–166.
67. Шештокас В.В. Конфликтные ситуации и безопасность движения в городах / В.В. Шештокас, Д.С. Самойлов. – М.: Транспорт, 1987. – 207 с.
68. Шештокас В.В. Город и транспорт / В.В. Шештокас. – М.: Стройиздат. – 1984. – 176 с.
69. Шелков Ю.Д. Организация дорожного движения в городах: Методическое пособие. / Ю.Д. Шелков. – М.: Научно-исследовательский центр ГАИ МВД России, 1995. – 143 с.

70. Швецов В.Л. Транспортные модели в системе государственного управления / В.Л. Швецов, А.В. Прохоров, И.В. Ильин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – № 5(85). – С. 20–25.

71. Швецов В.Л. Средства моделирования PTV Vision VISUM как основа технологии управления транспортными системами / В. Л. Швецов, Ф. А. Ущев // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах: Сборник докладов восьмой международной научно-практической конференции. СПб гос. архит. – строит. ун-т. СПб, 2008. – С. 544.

72. Хейт Ф. Математическая теория транспортных потоков. Пер. с англ. / Ф. Хейт. – М.: Мир, 1966. – 187 с.

73. Хилажев Е.Б. Системы и средства автоматизированного управления дорожным движением в городах / Е.Б. Хилажев, В.С. Соколовский, В.М. Гурулев, Я.И. Зайденберг. – М.: Транспорт, 1984. – 184 с.

74. Хомяк Я.В. Организация дорожного движения / Я.В. Хомяк. – К.: Вища школа, 1986. – 270 с.

75. Якимов М.Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов: монография / М.Р. Якимов. – М.: Логос, 2013. – 188 с.

76. Якимов М.Р. Транспортное планирование: практические рекомендации по созданию транспортных моделей городов в программном комплексе PTV Vision VISUM: монография / М.Р. Якимов, Ю.А. Попов. – М.: Логос, 2014. – 200 с.

77. Янішевський С.В. Оперативне керування реверсивним рухом в автоматизованих системах керування рухом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / С.В. Янішевський. – К. НТУ, 1998. – 17 с.

78. Andrews Larry C. Special functions of mathematics for engineers / Larry C. Andrews. – 2nd. ed. New York: McGraw-Hill, 1992. – 454 p.

79. Barnes G. Understanding urban travel demand: problems, solutions, and the role of forecasting / G. Barnes, G. Davis. – Minneapolis, Minnesota Department of Transportation, 1999. – 113 p.

80. Beispielsammlung zu den Richtlinien für Lichtsignalanlagen / Forschungsgesellschaft für Straßen - und Verkehrswesen. 2010. – 92.
81. Bus rapid transit. Planning guide. – New York.: 3ed edition, 2007. – 825 p.
82. Davol P. Angus. Modeling of traffic signal control and transit signal priority strategies in a microscopic simulation laboratory / Angus P. Davol. – Massachusetts institute of Technology, 2001. – 118 p.
83. Farzaneh M. Modeling traffic dispersion: Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering / M. Farzaneh. – Blacksburg, Virginia, 2005. – 139 p.
84. Gan A. Vehicle occupancy data collection methods / A. Gan, R. Jung, K. Liu, X. Li, D. Sandoval. – Office of research and development state of Florida Department of Transportation, Florida, 2005. – 83 p.
85. Garrow M. Development and evaluation of transit signal priority strategies / M. Garrow, R. Machemehl. – Center for Transportation Research The University of Texas at Austin, 1997. – 147 p.
86. Gilbert A. Bus rapid transit: Is Transmilenio a miracle cure? / A. Gilbert // Transport Reviews. – 2008. Volume 28, No. 4. – P. 439–467.
87. Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. – Bundesanstalt für Straßenwesen, 2001. – 370.
88. Hidalgo D.E. TransMilenio BRT system in Bogotá: high-performance and positive impacts; main results of an ex-post evaluation. / D.E. Hidalgo, L. Pereira, N. Estupiñán, P. Jiménez // Research in Transportation Economics. – 2013. Vol. 39, No. 1. – P. 133–138.
89. Highway Capacity Manual. – TRB, Washington, DC, 2000. – 1134 p.
90. Kim S. A bus priority signal strategy for regulation headways of buses / S. Kim, M. Park, K. Chon // Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. – 2005. Volume 6. – P. 435–448.
91. Kuzmyak J. Richard. Vehicle occupancy: Report 6, 1977 NPTS / J. Richard Kuzmyak. Highway statistics division Federal highway administration, Washington, 1981. – 76 p.

92. Lester S. East London Transit / S. Lester // Transportation research, London, GB, 2001. – P. 40–42.
93. Lohse D. Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. / D. Lohse. – Band 2: Verkehrsplanung, 2. Auflage, Berlin, Verlag für Bauwesen GmbH, 1997. – 247 p.
94. Levinson H. Bus rapid transit, volume 1: Implementation guidelines / H. Levinson, S. Zimmerman, J. Clinger, J. Gast, S. Rutherford, E. Bruhn. – Washington, 2003. – 90 p.
95. Levinson H. Bus Rapid Transit: Synthesis of case studies. / H. Levinson, S. Zimmerman, J. Clinger, J. Gast // Transportation Research Record 1841. – 2003. – P. 1–11.
96. Ortuzar D. Modelling Transport / G. Willumsen, D. Ortuzar. – 3rd Edition, London, 2006. – 300 p.
97. Scnabel W. Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung / W. Scnabel, D. Lohse. – Band 1: Straßenverkehrstechnik, 2. Auflage, Berlin, Verlag für Bauwesen GmbH, 1997. – 595 p.
98. Scnabel W. Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung / W. Scnabel, D. Lohse. – Band 2: Verkehrsplanung, 2. Auflage, Berlin, Verlag für Bauwesen GmbH, 1997. – 610 p.
99. Schiller C. Integration des ruhenden Verkehrs in die Verkehrsangebots und Verkehrsnachfragemodellierung / C. Schiller. – Schriftenreihe Heft 8, Dresden, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der TU Dresden, 2004. – 172 p.
100. Seo Y.U. A Study on Setting-Up a Methodology and Criterion of Exclusive Bus Lane in Urban Area / Y.U. Seo, H. Jang, J.H. Park. // Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 5, 2005. – P. 339–341.
101. Vehicle occupancy determinators / Arizona Department of Transportation. Arizona, 1989. – 133 p.
102. Vehicle occupancy study / City of Lincoln, Nebraska, 2006. – 80 p.
103. VISSIM 5.40 – User Manual / PTV AG, Karlsruhe, 2012. – 763 p.
104. VISUM 11.0 Fundamentals / PTV AG, Karlsruhe, 2009. – 690 p.

105. Vuchic R. Vukan. Urban transit systems and Technology / Vukan R. Vuchic. 2007. – 150 p.
106. Wasson J. Reconciled Platoon Accommodation at Traffic Signals / J. Wasson, M. Abbas, D. Bullock, A. Rhodes, C. Zhu. – Indianapolis, 1999. – 217 p.
107. Yu L. Real-Time Calibration of Platoon Dispersion Model to Optimize the Coordinated Traffic Signal Timing in ATMS Networks / L. Yu. – Texas, Texas Southern University, 1999. – 51 p.

ДОДАТОК А

РОЗРАХУНКОВІ ФОРМУЛИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ДОВЖИНИ ЧЕРГИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

А.1 Розрахункова формула для визначення максимальної довжини черги транспортних засобів за американськими нормами HCM [89]

$$Q_i = Q_1 + Q_2, \quad (\text{A.1})$$

$$Q_1 = PF_2 \cdot \frac{\frac{N_i \cdot T_u}{3600} \left(1 - \frac{\lambda}{T_u} \right)}{1 + \left[\min(1, 0; X_i) \cdot \frac{\lambda}{T_u} \right]}, \quad (\text{A.2})$$

$$PF_2 = \frac{\left(1 - R_p \cdot \frac{\lambda}{T_u} \right) \cdot \left(1 - \frac{N_i}{M_{H_i}} \right)}{\left(1 - \frac{\lambda}{T_u} \right) \cdot \left[1 - R_p \cdot \frac{N_i}{M_{H_i}} \right]}, \quad (\text{A.3})$$

$$Q_2 = 0,25 \cdot P_i \cdot T \cdot \left[(X_i - 1) + \sqrt{(X_i - 1)^2 + \frac{8 \cdot k_B \cdot X_i}{P_i \cdot T} + \frac{16 \cdot k_B \cdot Q_0}{(P_i \cdot T)^2}} \right], \quad (\text{A.4})$$

де Q_i – максимальна довжина черги ТЗ на i -й смузі, авт.;

Q_1 – середня довжина черги при рівномірному прибутті ТЗ до перехрестя;

Q_2 – довжина черги при випадковому прибутті ТЗ до перехрестя;

PF_2 – коефіцієнт коригування при періодичному надходженні ТЗ до перехрестя (для ізольованих перехресть $PF_2 = 1,0$);

N_i – інтенсивність руху на i -й смузі, авт./год;

T_u – тривалість циклу, с;

λ – ефективна тривалість фази, с;

X_i – ступінь насичення на i -й смузі руху;

M_{H_i} – потік насичення i -ї смуги руху, авт./год;

P_i – пропускна здатність i -ї смуги руху, авт./год;

T – тривалість періоду розрахунку, год;

Q_0 – початкова довжина черги на початку періоду розрахунку (стандартне значення 0);

k_B – коефіцієнт коригування для раннього прибуття;

R_p – коефіцієнт групи або «пачки» ТЗ (для ізольованих підходів приймають 1,0).

$$R_p = \frac{\beta_{\text{гр}}}{\lambda}, \quad (\text{A.5})$$

де $\beta_{\text{гр}}$ – частка ТЗ, що прибувають на зелений сигнал.

Таблиця А.1 – Залежність між типом прибуття та коефіцієнтом групи ТЗ (R_p)

Тип прибуття	Межі коефіцієнта автоколони R_p	Значення (R_p)	Якість прогресії	Коментарі
1	$\leq 0,50$	0.333	дуже слабка	80 % прибувають на початок червоної фази
2	$> 0,50 - 0,85$	0.667	несприятлива	40–80 % прибувають впродовж червоної фази;
3	$> 0,85 - 1,15$	1.000	випадкове прибуття	для ізольованих перетинів
4	$> 1,15 - 1,50$	1.333	сприятлива	40–80 % прибувають впродовж зеленої фази;
5	$> 1,50 - 2,00$	1.667	дуже сприятлива	80 % прибувають на початок зеленої фази
6	$> 2,00$	2.000	незвичайний	для координованого регулювання

А.2 Розрахункова формула для визначення максимальної довжини черги транспортних засобів за німецькими нормами HBS [87]

$$Q_i = \left(e^{0,022 \cdot (S-50)} - 1 \right) \cdot \sqrt{m_q + Q_{GR}} + (m_q + Q_{GR}), \quad (\text{А.6})$$

де Q_i – максимальна довжина черги транспортних засобів, авт.;

S – запобігання надмірному скупченню, % (90; 95);

N_i – інтенсивність руху на i -й смузі руху, авт./год;

t_q – тривалість забороненого сигналу, с;

T – тривалість періоду розрахунку, с;

$m_q = \frac{N_i \cdot t_q}{T}$ – середня кількість ТЗ, що прибувають при забороненому

сигналі, авт.;

Q_{GR} – кількість ТЗ у черзі в момент завершення дозволеного сигналу, авт.
(табл. А.2).

Таблиця А.2. – Визначення величини Q_{GR} від ступеня насичення X_i

Ступіть насичення	Розрахункові формули	
	для визначеного періоду T	для одного циклу
$X_i \leq 0,65$	$Q_{GR} = 0$	$Q_{GR} = 0$
$X_i = 0,9$	$Q_{GR} = \frac{1}{0,26 + m / 150}$	
$X_i = 1,0$	$Q_{GR} = 0,3476 \cdot \sqrt{n_c} \cdot U^{0,565}$	$Q_{GR} = 0,545 \cdot \sqrt{n_c} \cdot U^{0,565}$
$X_i = 1,2$	$Q_{GR} = \frac{(n_c \cdot (X_i - 1) \cdot U + 25 - 20 \cdot X_i)}{2}$ або $Q_{GR} = 0,1 \cdot n_c \cdot U + 0,5$	$Q_{GR} = (n_c \cdot (X_i - 1) \cdot U + 25 - 20 \cdot X_i)$ або $Q_{GR} = 0,2 \cdot n_c \cdot U + 1,0$
$X_i > 1,2$	$Q_{GR} = n_c \cdot (X_i - 1) \cdot U / 2$	$Q_{GR} = n_c \cdot (X_i - 1) \cdot U$

$$n_c = \frac{t_3 \cdot M_{n_i}}{T}, \quad (\text{A.7})$$

де Q_{GR} – кількість ТЗ у черзі в момент завершення дозволеного сигналу, авт.;

X_i – ступінь насичення на i -й смузі;

n_c – максимальна кількість ТЗ, що проїжджають перехрестя впродовж дії дозволеного сигналу одного циклу, авт.;

U – кількість циклів регулювання за період розрахунку;

t_3 – тривалість дозволеного сигналу, с;

M_{n_i} – потік насичення i -ї смуги руху, авт./год;

T – тривалість періоду розрахунку, с.

$$m = \frac{N_i \cdot T_u}{T}, \quad (\text{A.8})$$

m – середній час прибуття автомобілів до перехрестя впродовж дії дозволеного сигналу;

T_u – тривалість циклу, с.

ДОДАТОК Б

ІНТЕРФЕЙС ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЧЕРГИ НА ІЗОЛЬОВАНОМУ ПЕРЕХРЕСТІ

Вхідні дані 1 Далі Тривалість періоду розрахунку: 15 хв. 30 хв. 45 хв. 60 хв. ☒ використовувати розгін моделі 15 хв. Крок моделювання: 1 с 0,1 с 0,01 с 0,001 с Кількість підходів до перехрестя: 1 2 3 4 Кількість смуг руху: 1 2 3 Кількість імітацій: 1 000	Назад Вхідні дані 2 Далі Ідеальний потік насичення: 1 800 Ширина смуги руху: 3,6 Поздовжній ухил: 0 Радіус заокруглення лівого повороту: 20 Радіус заокруглення правого повороту: 25 Пішохідний рух: слабкий середній сильний	Назад Вхідні дані 3 Далі Інтенсивність руху: 500 Розподіл тран. засобів за напрямками: ← 5% ↑ 90% → 5% Розподіл вантажівок за напрямками: ← 1% ↑ 2% → 1% Розподіл автобусів за напрямками: ← 2% ↑ 3% → 2% Динамічний габарит: легковий 6 вантажний 7 автобус 10
Назад Вхідні дані 4 Готово Тривалість світлофорного циклу: 60 Тривалість світлофорних сигналів: 39 3 18 Стартова затримка: легковий 2 вантажний 0 автобус 0 Розподіл прибуття: Розподіл Ерланга ($a = 3$)	Середня Макс₁ Макс₂ МАКС. Максимальна черга за цикл 10,73	Середня Макс₁ Макс₂ МАКС. Максимальна черга за 1000 імітацій 16

Рисунок Б.1 – Інтерфейс імітаційної моделі для розрахунку довжини черги транспортних засобів на ізолюваному регульованому перехресті

ДОДАТОК В

ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДЕЛІ ПРОПОЗИЦІЇ МІСТА ЛЬВОВА

Таблиця В.1 – Кількісний склад та загальний обсяг елементів моделі пропозиції у VISUM

№ з/п	Назва	Кількість елементів
1	Вузли	10811
2	Відрізки	27696
3	Повороти	80554
4	Транспортні райони	530
5	Примикання	5952
6	Пункти зупинки	687
7	Зони зупинки	614
8	Зупинки	611
9	Маршрути ГТ	135
10	Варіанти маршрутів ГТ	268
11	Кількість обслуговуючих поїздок ГТ за добу	20559

ДОДАТОК Г

АНКЕТА ДЛЯ ОПИТУВАННЯ

Фрагмент анкети
для проведення опитування мешканців міста Львова щодо їх транспортної поведінки

Загальні відомості

1. Вкажіть Вашу стать

☐ чоловік
☐ жінка
2. Вкажіть, будь ласка, скільки Вам років?

☐ до 7 р.

☐ 24–29 р.

☐ 50–59 р.

☐ понад 70 р.

☐ 7–17 р.

☐ 30–39 р.

☐ 60–70 р.

☐ 18–23 р.

☐ 40–49 р.
3. Вкажіть будь ласка де Ви проживаєте?
Тут слід вказати, в якому районі міста Львова чи за містом Ви проживаєте

☐ Галицький р-н. м. Львова
☐ Залізничний р-н. м. Львова
☐ Личаківський р-н. м. Львова
☐ Сихівський р-н. м. Львова
☐ Франківський р-н. м. Львова
☐ Шевченківський р-н. Львова

☐ у зоні до 5-ти км навколо межі м. Львова
☐ у зоні 5–10 км навколо межі м. Львова
☐ у зоні понад 10 км навколо межі м. Львова
4. Якщо Ви проживаєте в одному із районів міста, то вкажіть чи Ви у ньому прописані?

☐ так
☐ ні, але прописаний в іншому районі міста
☐ ні не прописаний у м. Львові
5. Як називається зупинка громадського транспорту, що найближче розташована біля Вашого будинку, або вкажіть назву вулиці та номер будинку, в якому Ви живете? _____
6. Скільки осіб у Вашій сім'ї, включаючи Вас, що проживають разом з Вами?

☐ 1

☐ 3

☐ 5

☐ 2

☐ 4

☐ понад 5
7. Скажіть, будь ласка, чи є у Вас власний автомобіль?

☐ так ☐ ні
8. Скільки автомобілів є у Вашій сім'ї?

☐ немає ☐ 2 ☐ понад 3
☐ 1 ☐ 3
9. Що з перерахованого найкраще характеризує Ваш статус?

☐ відвідую дитячий садок
☐ навчаюсь у школі

☐ навчаюсь у коледжі, технікумі, ПТУ, у вищому навчальному закладі

- ☐ працюю ☐ домогосподарка
☐ працюючий пенсіонер ☐ безробітний(на)
☐ непрацюючий пенсіонер

10. Ваше місце роботи/навчання знаходиться у Львові або у Львівській області?

- ☐ у Львові ☐ у Львівській області ☐ в іншому регіоні

11. Чи пов'язана Ваша робота з активними переміщеннями по місту?

Мається на увазі, що Ви працюєте водієм, кур'єром, торговим агентом, працюєте в сфері послуг, яка пов'язана з роз'їздами по місту або за місто.

- ☐ так ☐ ні

Дослідження транспортної поведінки одного з БУДНІХ ДНІВ тижня

Нас цікавить усі Ваші поїздки, що відбулися впродовж одного з БУДНІХ ДНІВ тижня (наприклад, цього або минулого). Якщо поїздок не було, але Ви переміщалися пішки, то не забудьте їх також відзначити в анкеті, за винятком переміщень до зупинок громадського транспорту (автобус, тролейбус, трамвай), парковок та стоянок таксі. Не забувайте також зворотні поїздки-переміщення, зокрема повернення додому та короткі поїздки-переміщення (наприклад, занести лист на пошту, піти до магазину за покупками поблизу свого будинку тощо). Приклад типової поїздки-переміщення: поїздка-переміщення ДІМ – РОБОТА. З дому пішки до зупинки автобуса, після цього поїздка автобусом, далі знов пішки до робочого місця. Це ОДНА поїздка-переміщення, яка виконується автобусом.

12. Вкажіть, будь ласка, БУДНІЙ ДЕНЬ тижня, про який Ви інформуєте в анкеті?

- ☐ понеділок ☐ середа ☐ п'ятниця
☐ вівторок ☐ четвер

13. Який був початковий та кінцевий пункти N-ї поїздки-переміщення?

Поставте № поїздки-переміщення напроти початкового та кінцевого пунктів.

Назва початкових та кінцевих пунктів поїздки	Початковий пункт	Кінцевий пункт
дім, квартира		
робота, робоче місце		
інше робоче місце (службова поїздка по робочим справам)		
дитячий садок		
школа, гімназія, ліцей		
коледж, технікум, ПТУ, вищий навчальний заклад		
начальні кузи, курси підвищення кваліфікації		
магазин, ринок, супермаркет, аптека (щоденні покупки)		
магазин, ринок, супермаркет (інші покупки)		
установи культури (театр, кінотеатр, опера, концертний зал, виставка, музей)		

установи громадського харчування (кафе, бар, ресторан, клуб)		
парк, сквер, прогулянки по місту, відпочинок на свіжому повітрі (також похід вивести собаку)		
заклади фізкультурно-спортивного профілю (фітнес-клуб, басейн, спортивний зал)		
установи побутового обслуговування (перукарня, ательє, хімчистка, майстерня)		
медичні заклади (лікарня, поліклініка, клініка)		
банк, страхова компанія, пошта		
приватний візит (поїздка в гості до друзів чи знайомих)		
дача за містом (поїздка на дачу за місто)		
культові споруди (церква, храм, дім молитви)		
інше		

14. Вкажіть, будь ласка, приблизний час початку N-ї поїздки-переміщення?

Поставте № поїздки-переміщення біля відповідного діапазону

- | | | |
|--|--|--|
| ☐ 05:00 – 06:00 | ☐ 12:00 – 13:00 | ☐ 19:00 – 20:00 |
| ☐ 06:00 – 07:00 | ☐ 13:00 – 14:00 | ☐ 20:00 – 21:00 |
| ☐ 07:00 – 08:00 | ☐ 14:00 – 15:00 | ☐ 21:00 – 22:00 |
| ☐ 08:00 – 09:00 | ☐ 15:00 – 16:00 | ☐ 22:00 – 23:00 |
| ☐ 09:00 – 10:00 | ☐ 16:00 – 17:00 | ☐ 23:00 – 00:00 |
| ☐ 10:00 – 11:00 | ☐ 17:00 – 18:00 | ☐ 00:00 – 01:00 |
| ☐ 11:00 – 12:00 | ☐ 18:00 – 19:00 | |

15. Вкажіть, будь ласка, який вид транспорту Ви використовували при N-й поїздки-переміщенні?

- | | |
|---|--|
| ☐ домашній автомобіль в якості водія | ☐ електричка |
| ☐ домашній автомобіль в якості пасажирів | ☐ автобус (маршрутка) |
| ☐ інший автомобіль в якості пасажирів | ☐ тролейбус |
| ☐ службовий автомобіль | ☐ трамвай |
| ☐ таксі | ☐ мотоцикл |
| | ☐ велосипед |
| | ☐ йшов(ла) пішки |

16. Якщо при N-й поїздки-переміщенні Ви використовували домашній, інший або службовий автомобіль, то яка кількість осіб, включаючи Вас, була в автомобілі?

В інших випадках цей пункт не потрібно заповнювати

- | | | |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| ☐ 1 | ☐ 3 | ☐ понад 4 |
| ☐ 2 | ☐ 4 | |

17. Вкажіть, будь ласка, скільки приблизно часу тривала Ваша N-а поїздка-переміщення?

- | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|--|
| ☐ до 5 хв. | ☐ 40 - 50 хв. | ☐ 90 - 100 хв. |
| ☐ 5 - 10 хв. | ☐ 50 - 60 хв. | ☐ 100 - 110 хв. |
| ☐ 10 - 20 хв. | ☐ 60 - 70 хв. | ☐ 110 - 120 хв. |
| ☐ 20 - 30 хв. | ☐ 70 - 80 хв. | ☐ понад 120 хв. |
| ☐ 30 - 40 хв. | ☐ 80 - 90 хв. | |

18. Вкажіть, будь ласка, довжину Вашої N-ї поїздки-переміщення?

- | | | |
|---|---|---|
| ☐ до 1,0 км | ☐ 15,0 - 17,0 км | ☐ 31,0 - 33,0 км |
| ☐ 1,0 - 3,0 км | ☐ 17,0 - 19,0 км | ☐ 33,0 - 35,0 км |
| ☐ 3,0 - 5,0 км | ☐ 19,0 - 21,0 км | ☐ 35,0 - 37,0 км |
| ☐ 5,0 - 7,0 км | ☐ 21,0 - 23,0 км | ☐ 37,0 - 39,0 км |
| ☐ 7,0 - 9,0 км | ☐ 23,0 - 25,0 км | ☐ 39,0 - 41,0 км |
| ☐ 9,0 - 11,0 км | ☐ 25,0 - 27,0 км | ☐ понад 41 км |
| ☐ 11,0 - 13,0 км | ☐ 27,0 - 29,0 км | |
| ☐ 13,0 - 15,0 км | ☐ 29,0 - 31,0 км | |

19. Скажіть, будь ласка, чи здійснювали Ви ще поїздки-переміщення в цей день?

■ так	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐	■ ні	☐
-------	---	------	--------------------------

Якщо Ви відповіли «так», то знову повертайтеся до питання 13.

ДОДАТОК Д

РЕЗУЛЬТАТИ ОПИТУВАНЬ ЩОДО ТРАНСПОРТНОЇ РУХОМОСТІ НАСЕЛЕННЯ МІСТА ЛЬВОВА

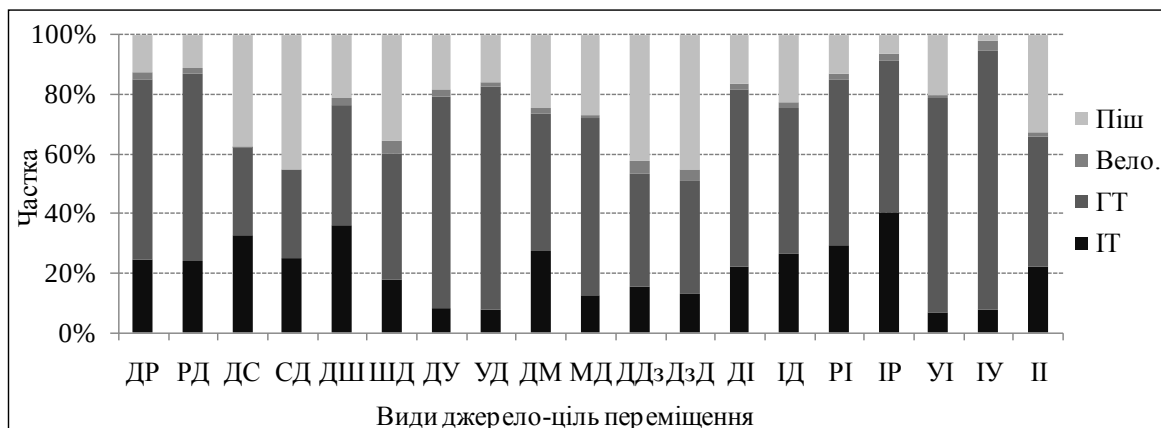


Рисунок Д.1 – Частки різних видів транспорту залежно мети поїздки-переміщення

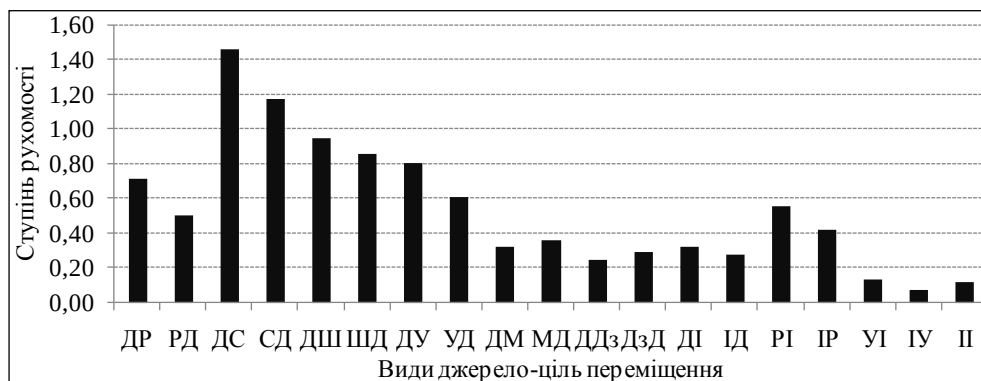


Рисунок Д.2 – Ступінь рухомості населення залежно від мети проїздки-переміщення

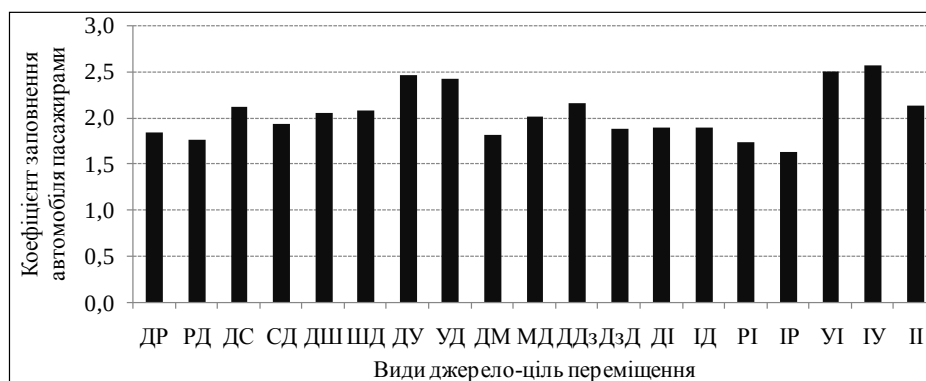


Рисунок Д.3 – Коефіцієнт заповнення автомобіля пасажирами залежно від мети проїздки-переміщення

Таблиця Д.1 – Вид функції корисності залежно від виду джерело-ціль переміщень

Вид джерело-ціль переміщень	ДР	РД	ДС	СД	ДШ	ШД	ДУ	УД	ДМ	МД
Вид функції	Logit									
Вид джерело-ціль переміщень	ДДз	ДзД	ДІ	ІД	РІ	ІР	УІ	ІУ	ІІ	
Вид функції	Logit				Box Cox		Logit			

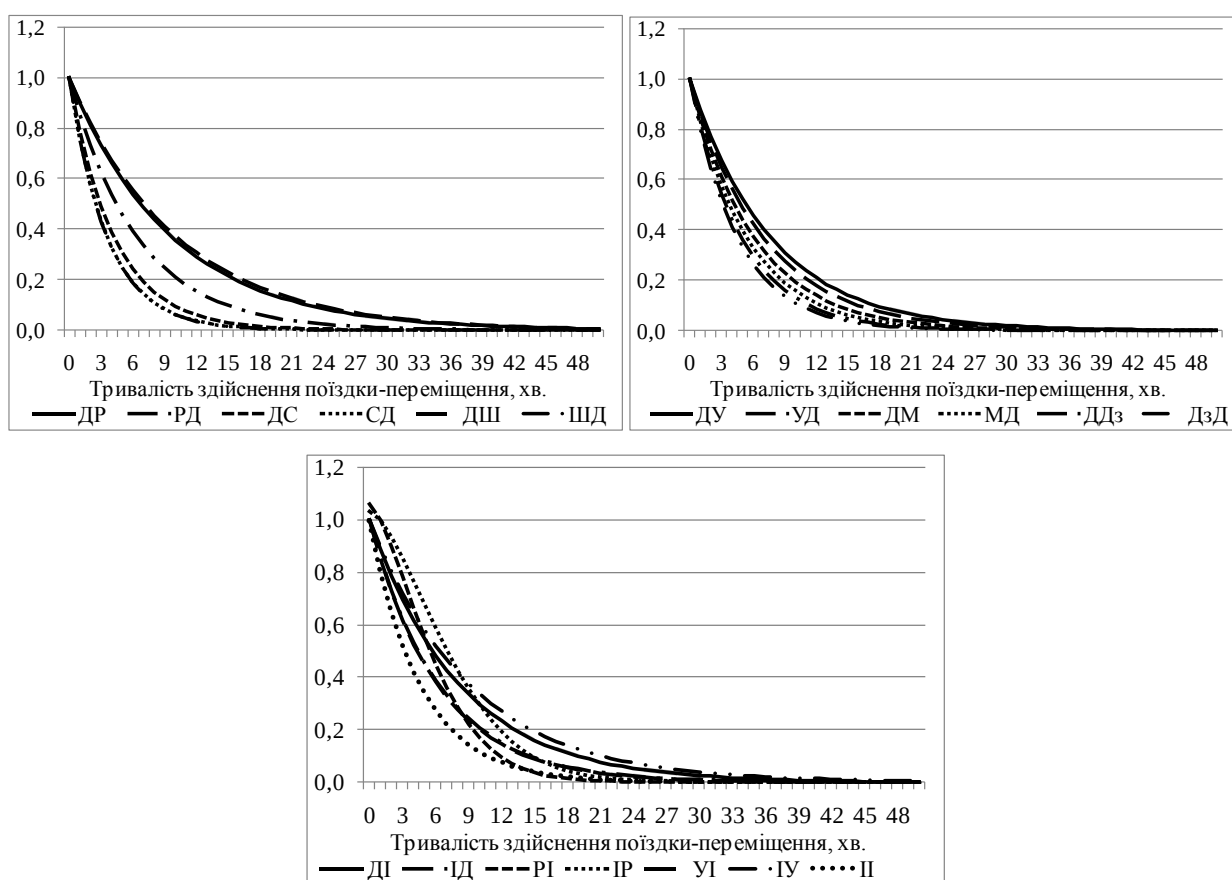


Рисунок Д.4 – Графіки функцій корисності залежно від виду джерело-ціль переміщень

Таблиця Д.2 – Вид функцій корисності залежно від виду джерело-ціль переміщення та виду транспорту

Вид джерело- ціль переміщень	Вид транспорту			
	ІТ	ГТ	Вело.	Піш.
ДР	Box Cox	Box Cox	Box Cox	Box Cox
РД	Box Cox	Box Cox	Box Cox	Box Cox
ДС	Logit	Logit	Box Cox	Box Cox
СД	Logit	Logit	Box Cox	Box Cox
ДШ	Logit	Logit	Box Cox	Box Cox
ШД	Logit	Logit	Box Cox	Box Cox
ДУ	Logit	Logit	Box Cox	Box Cox
УД	Logit	Logit	Box Cox	Box Cox
ДМ	Logit	Box Cox	Box Cox	Box Cox
МД	Logit	Box Cox	Box Cox	Box Cox
ДДз	Logit	Box Cox	Box Cox	Box Cox
ДзД	Logit	Box Cox	Box Cox	Box Cox
ДІ	Box Cox	Box Cox	Box Cox	Box Cox
ІД	Box Cox	Box Cox	Box Cox	Box Cox
РІ	Box Cox	Box Cox	Box Cox	Box Cox
ІР	Box Cox	Box Cox	Box Cox	Box Cox
УІ	Box Cox	Box Cox	Box Cox	Box Cox
ІУ	Box Cox	Box Cox	Box Cox	Box Cox
ІІ	Logit	Box Cox	Box Cox	Box Cox

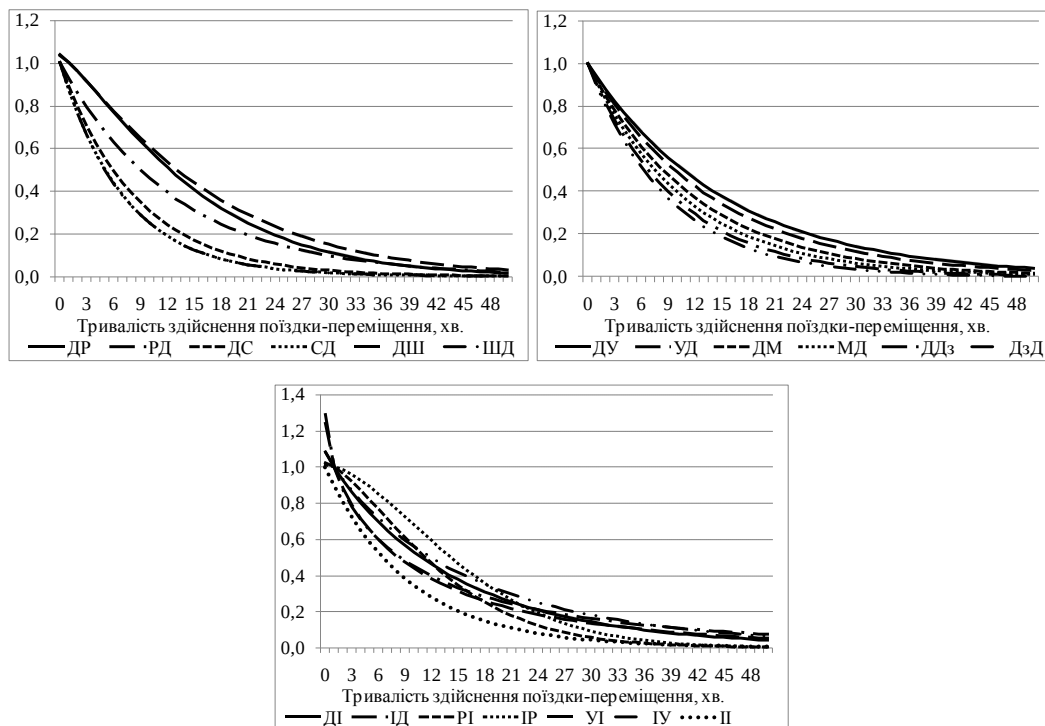


Рисунок Д.5 – Графіки функцій корисності залежно виду джерело-ціль переміщень індивідуальним транспортом

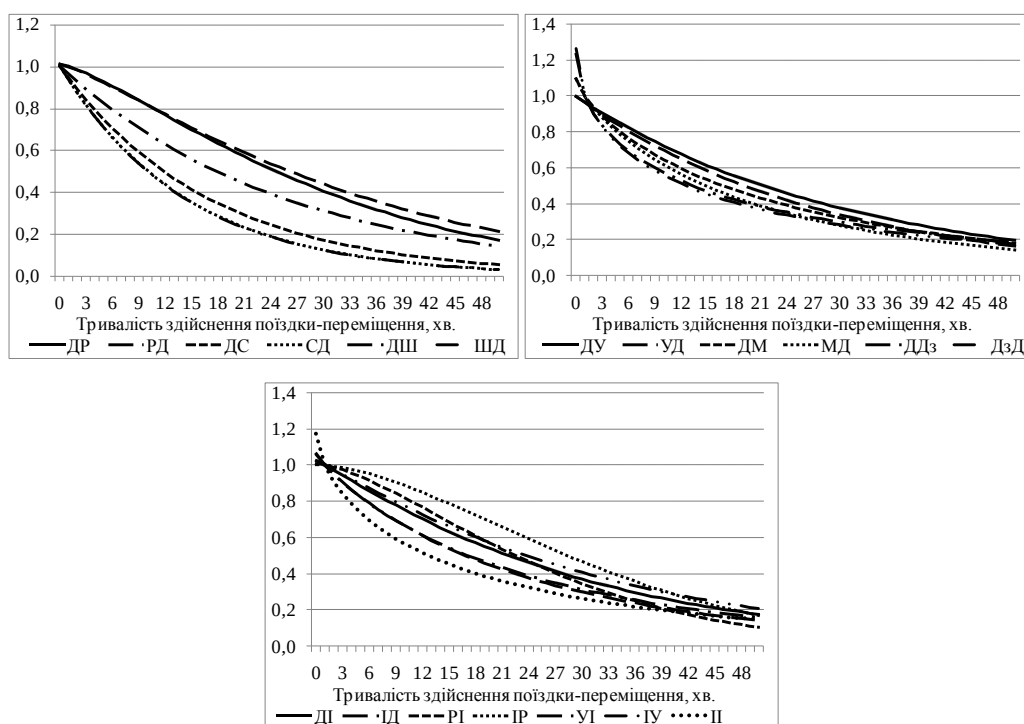


Рисунок Д.6 – Графіки функцій корисності залежно виду джерело-ціль переміщень громадським транспортом

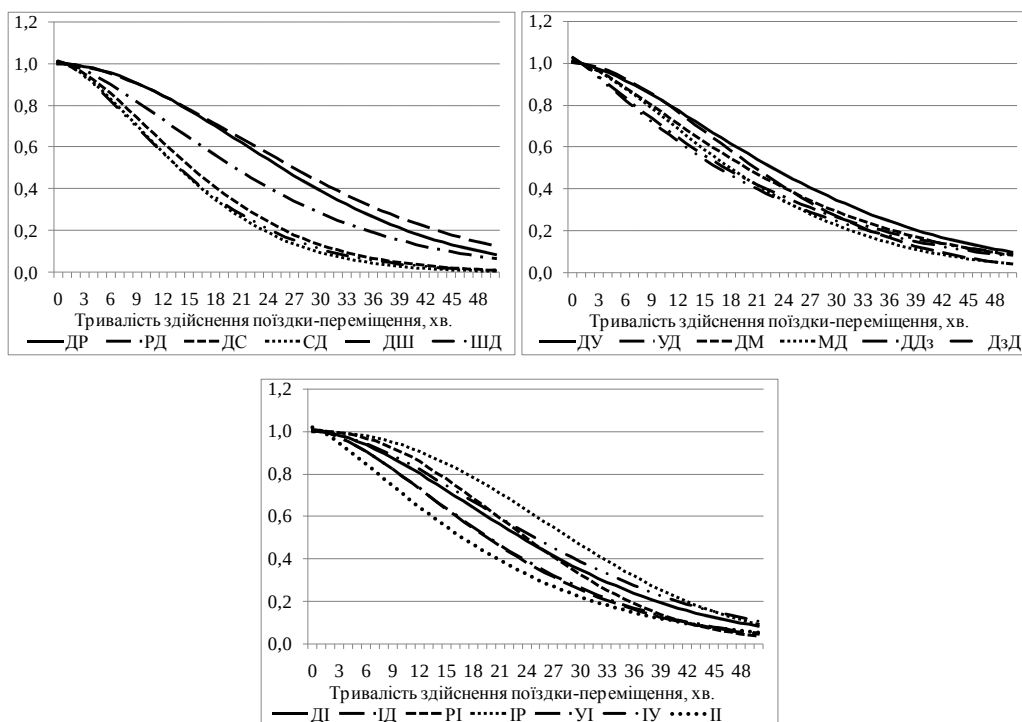


Рисунок Д.7 – Графіки функцій корисності залежно виду джерело-ціль переміщень велосипедом

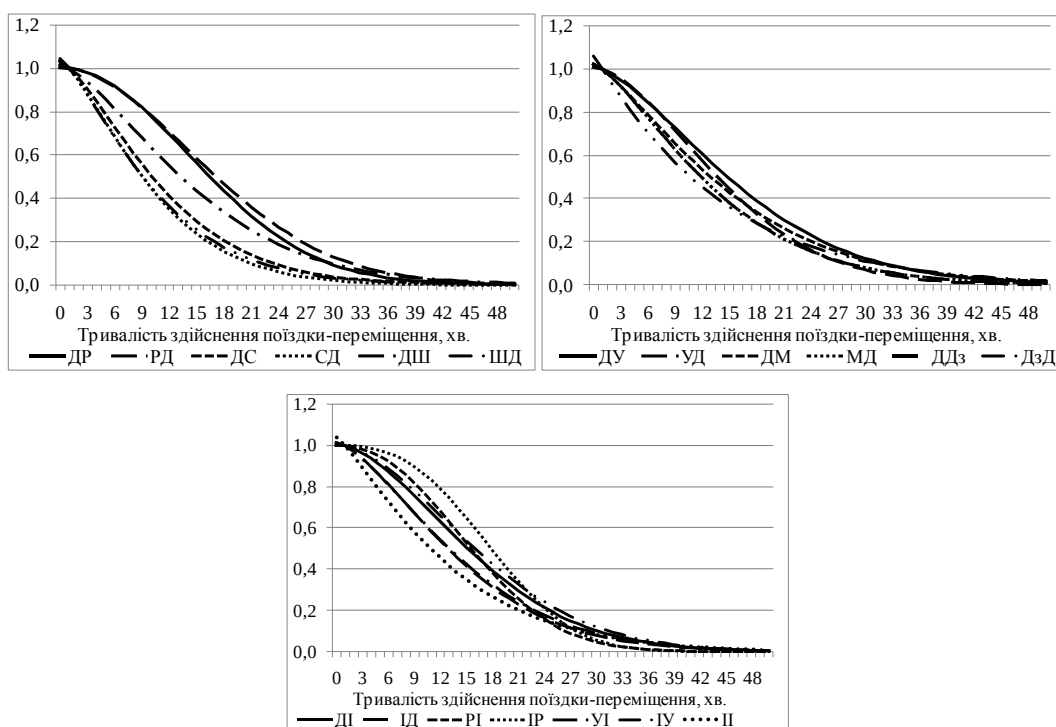


Рисунок Д.8 – Графіки функцій корисності залежно виду джерело-ціль переміщень пішки

ДОДАТОК Е
МІСЦЯ ПРОВЕДЕННЯ НАТУРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ВУЛИЧНІЙ
МЕРЕЖІ МІСТА

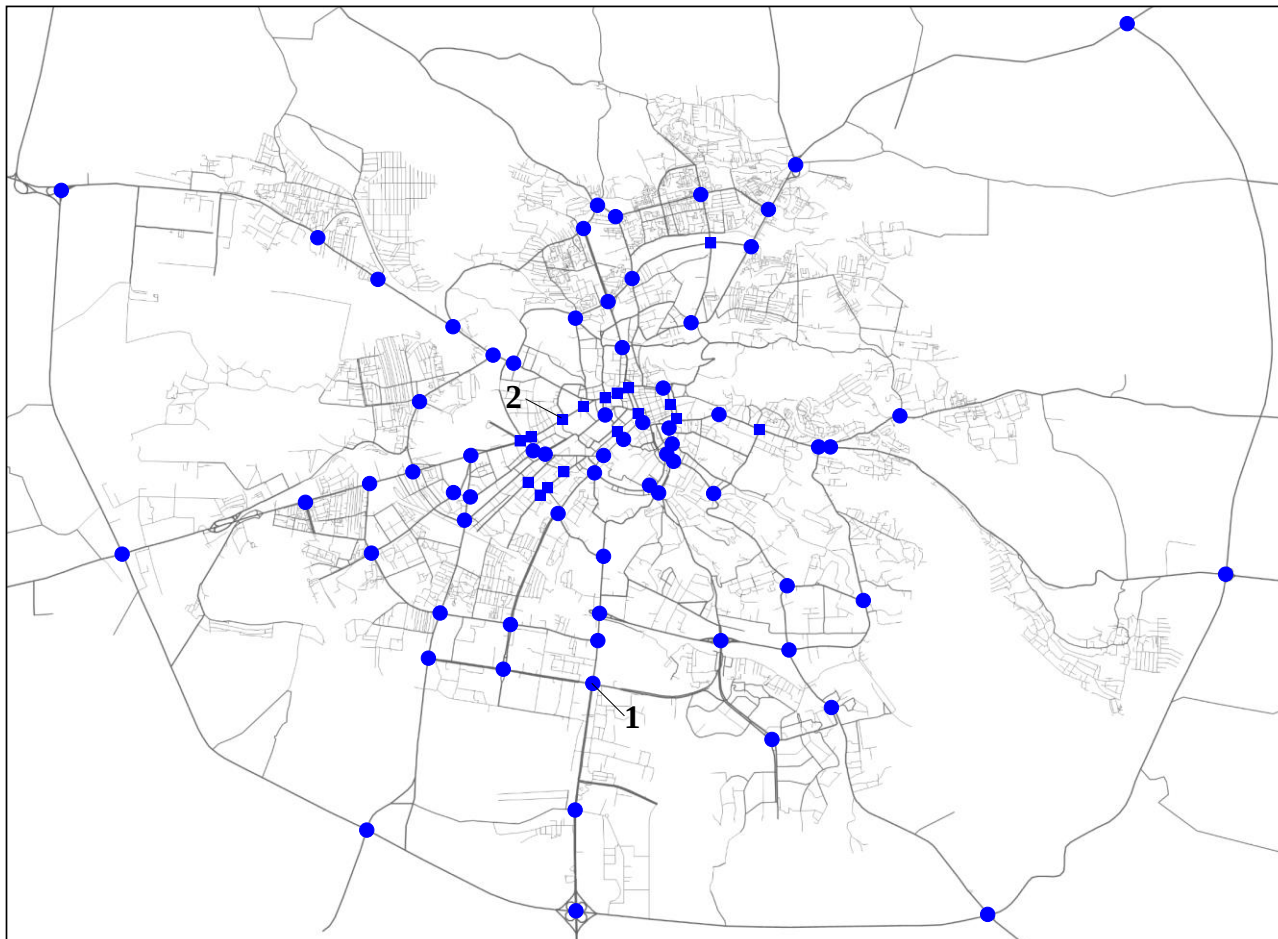
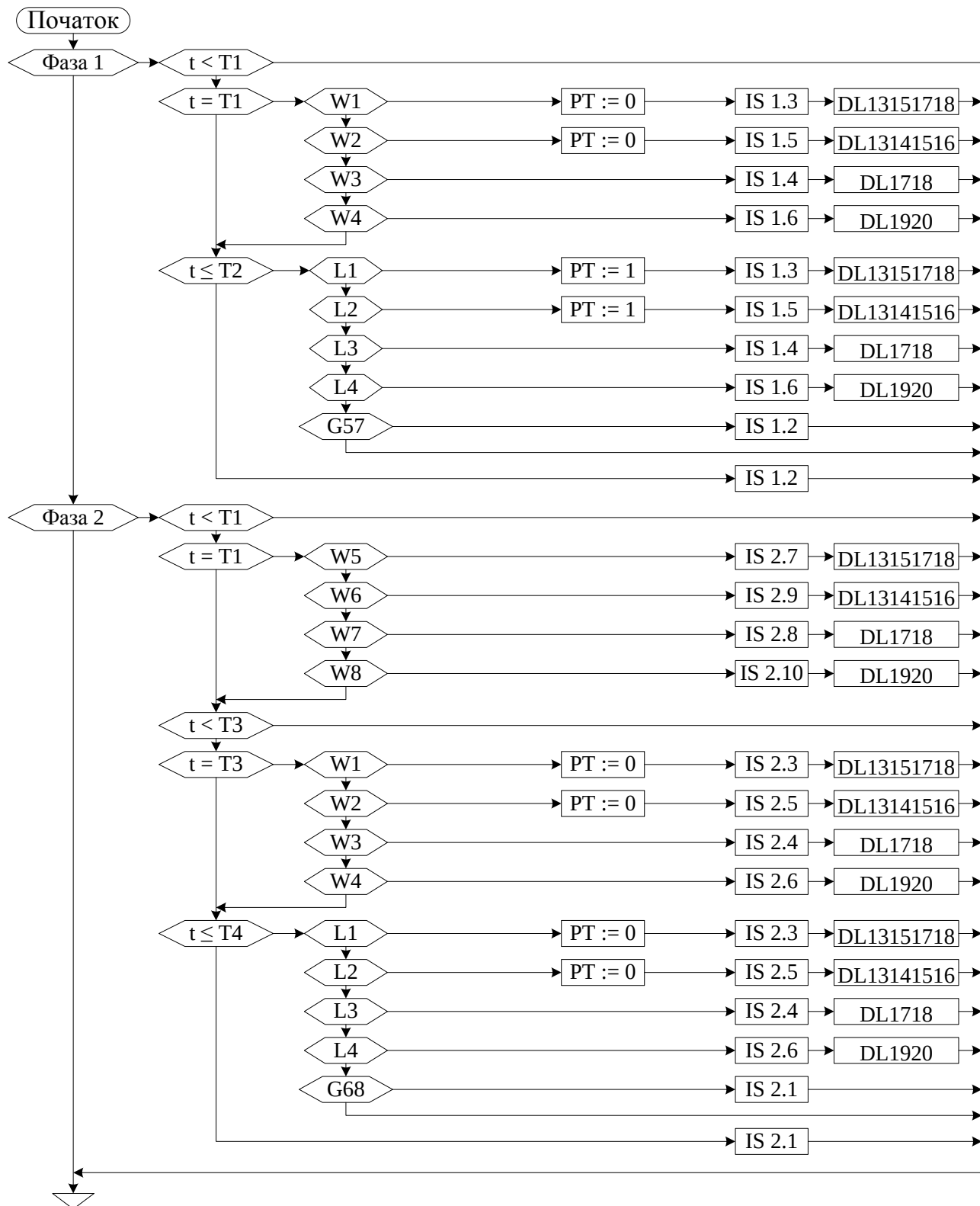
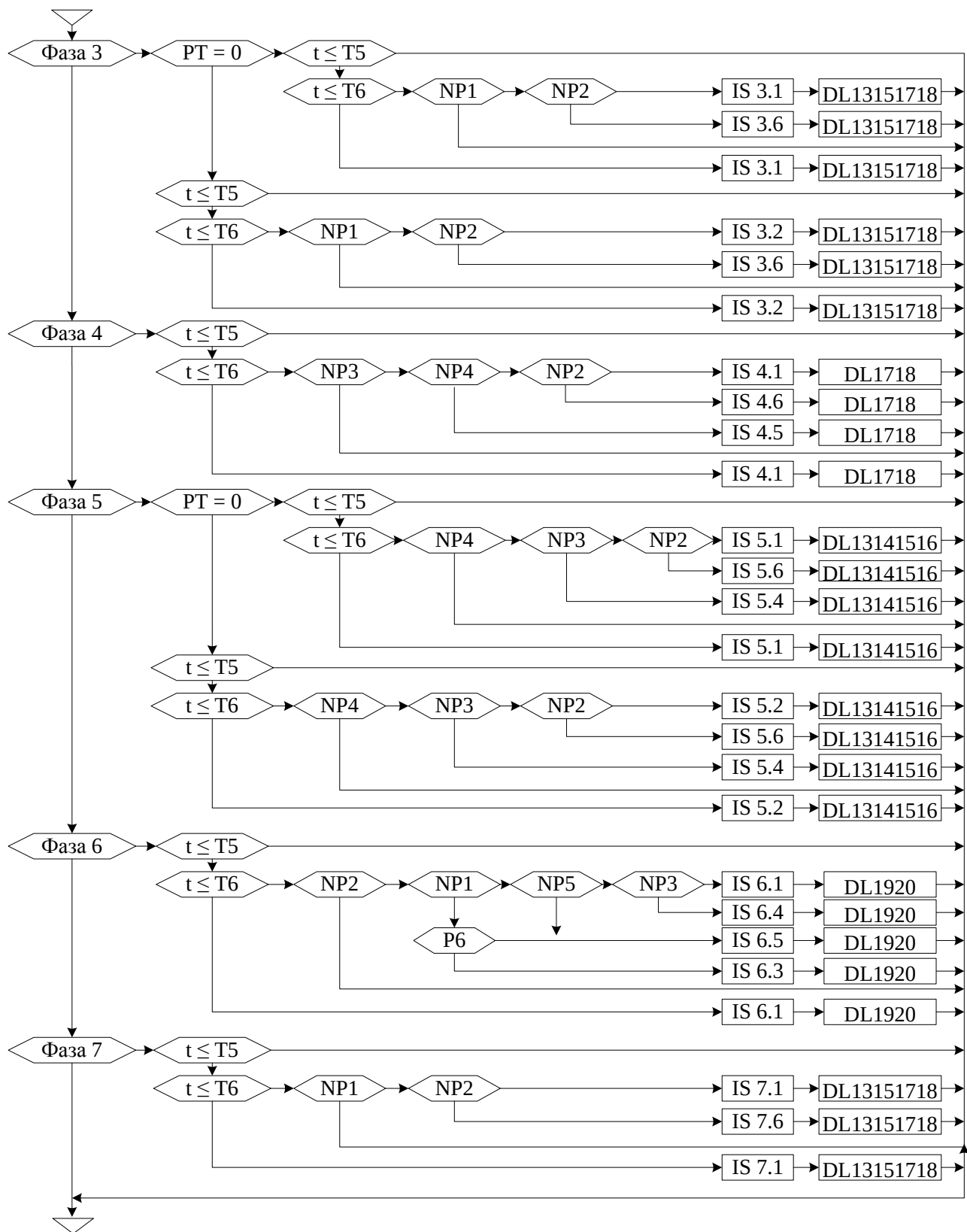


Рисунок Е.1 – Схема дислокації місць збору даних про інтенсивності транспортних потоків на вулично-дорожній мережі міста: 1 – за результатами натурних досліджень; 2 – з відеодетекторів

ДОДАТОК Ж

БЛОК-СХЕМА СУКУПНОСТІ АДАПТИВНИХ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ





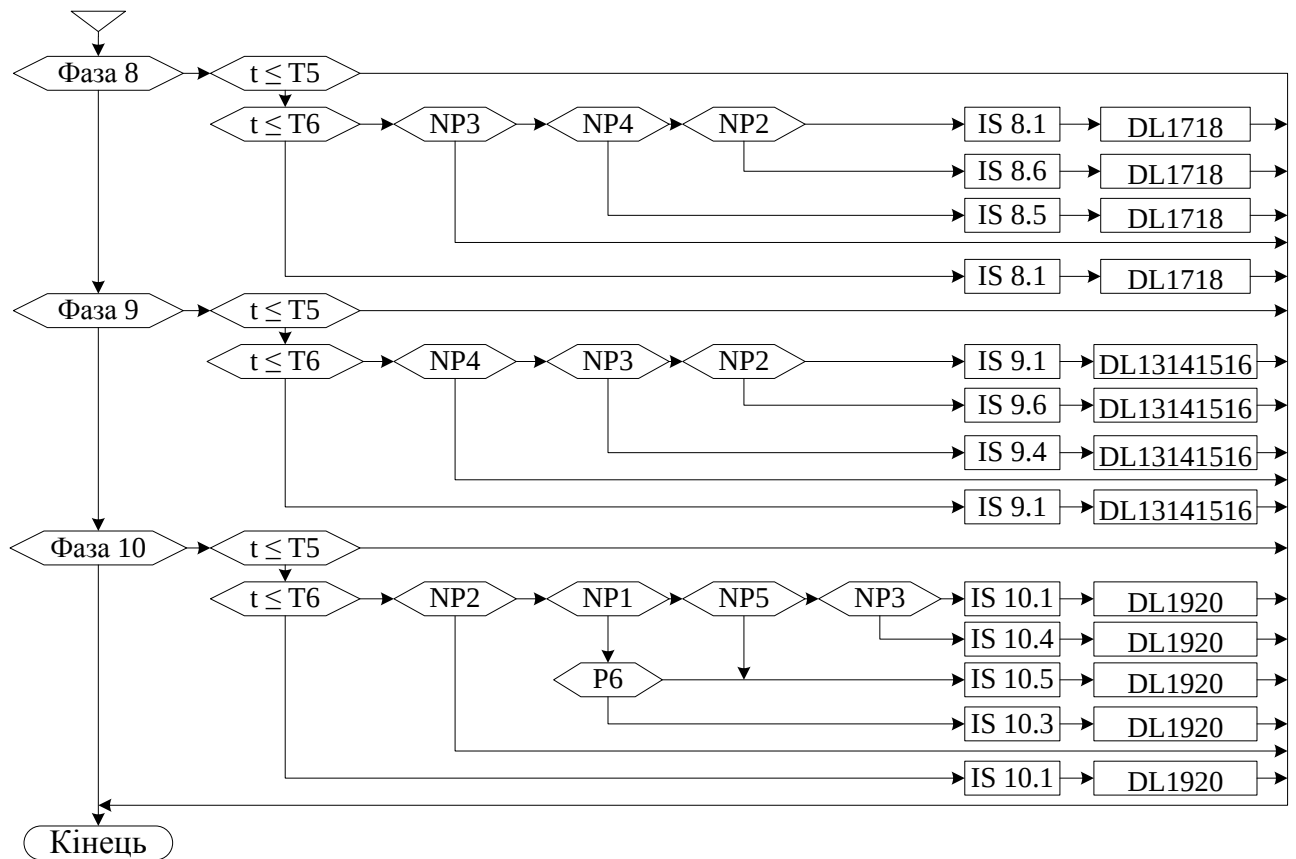


Рисунок Ж.1 – Блок-схема сукупності адаптивних алгоритмів керування на перехресті вулиць Мазепи – Миколайчука

Блок-схема на рис. Ж.1 сформована на основі таких умов:

1) часові умови керування:

- $T1 = 9$ с – мінімальна тривалість дозволеного сигналу фази 1;
- $T2 = 37$ с – максимальна тривалість дозволеного сигналу фази 1;
- $T3 = 11$ с – мінімальна тривалість дозволеного сигналу фази 2;
- $T4 = 17$ с – максимальна тривалість дозволеного сигналу фази 2;
- $T5 = 5$ с – мінімальна тривалість дозволеного сигналу фази 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10;
- $T6 = 10$ с – максимальна тривалість дозволеного сигналу фази 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10;

2) логічні умови:

- W1 – завантаження детекторів D2 і D4 від появи автобусів сигнальних груп B1a та B2b є не менше 1 с, або детектори D13 і D17 зафіксували появу автобусів сигнальних груп B1a та B2b;
- W2 – завантаження детекторів D2 або D10 від появи автобусів відповідно сигнальних груп B1a та B1b є не менше 1 с, або детектори D13 або D14 зафіксували появу автобусів відповідно сигнальних груп B1a та B1b;
- W3 – завантаження детектора D4 від появи автобуса сигнальної групи B2b є не менше 1 с, або детектор D17 зафіксував появу автобуса сигнальної групи B2b;
- W4 – завантаження детектора D12 від появи автобуса сигнальної групи B3b є не менше 1 с, або детектор D19 зафіксував появу автобуса сигнальної групи B3b;
- W5 – завантаження детекторів D2 і D4 від появи автобусів сигнальних груп B1a та B2b є не менше 1 с, або детектори D15 і D18 зафіксували появу автобусів сигнальних груп B1a та B2b;
- W6 – завантаження детекторів D2 або D10 від появи автобусів відповідно сигнальних груп B1a та B1b є не менше 1 с, або детектори D15 або D16 зафіксували появу автобусів відповідно сигнальних груп B1a та B1b;
- W7 – завантаження детектора D4 від появи автобуса сигнальної групи B2b є не менше 1 с, або детектор D18 зафіксував появу автобуса сигнальної групи B2b;
- W8 – завантаження детектора D12 від появи автобуса сигнальної групи B3b є не менше 1 с, або детектор D20 зафіксував появу автобуса сигнальної групи B3b;
- L1 – автобуси сигнальних груп B1a та B2b були виявлені на детекторі D1 і D3 впродовж поточного часового кроку моделювання;
- L2 – автобуси сигнальних груп B1a або B1b були виявлені відповідно на детекторі D1 та D9 впродовж поточного часового кроку моделювання;

- L3 – автобус сигнальної групи B2b був виявлений на детекторі D3 впродовж поточного часового кроку моделювання;
- L4 – автобус сигнальної групи B3b був виявлений на детекторі D11 впродовж поточного часового кроку моделювання;
- NP1 – на детекторах D1 або D3 не виявлено автобусів сигнальних груп B1a та B2b, або завантаження детекторів D1 або D2 або D3 або D4 від появи автобусів відповідно сигнальних груп B1a та B2b є менше 1 с;
- NP2 – на детекторі D11 не виявлено автобус сигнальної групи B3b, або завантаження детекторів D11 або D12 від появи автобуса сигнальної групи B3b є менше 1 с;
- NP3 – на детекторі D3 не виявлено автобус сигнальної групи B2b, або завантаження детекторів D3 або D4 від появи автобуса сигнальної групи B2b є менше 1 с;
- NP4 – на детекторах D1 або D9 не виявлено автобусів сигнальних груп B1a та B1b, або завантаження детекторів D1 або D2 або D9 або D10 від появи автобусів відповідно сигнальних груп B1a та B1b є менше 1 с;
- NP5 – на детекторі D9 не виявлено автобус сигнальної групи B1b, або завантаження детекторів D9 або D10 від появи автобуса сигнальної групи B1b є менше 1 с;
- P6 – на детекторі D9 виявлено автобус сигнальної групи B1b, або завантаження детекторів D9 або D10 від появи автобуса сигнальної групи B1b є не менше 1 с;
- G57 – детектори D5 та D7 зафіксували часовий розрив у транспортному потоці сигнальних груп K1 та K3;
- G68 – детектори D6 та D8 зафіксували часовий розрив у транспортному потоці сигнальних груп K2 та K4.
- DL13151718, DL13141516, DL1718, DL1920 – очищує пам'ять детекторів D13, D14, D15, D16, D17, D18, D19 та D20;

3) інші умови:

- PT := 0 – перехід до фази 1;

- $PT := 1$ – перехід до фази 2;
- IS 1.2 – виконується перехід з фази 1 у фазу 2.

ДОДАТОК К
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Начальник управління житлового
господарства
департаменту житлового
господарства та інфраструктури



Ю.Б. Голець

2015 року

АКТ

про використання результатів наукових досліджень дисертаційної роботи
Зубачика Романа Михайловича

Комісія у складі начальника управління транспорту і зв'язку Щира В.Д. та членів комісії – заступника начальника управління транспорту і зв'язку Журбенка С.В. та головного спеціаліста відділу транспорту Кравецької О.М. склали цей акт про те, що в управлінні транспорту і зв'язку департаменту житлового господарства та інфраструктури Львівської міської ради використовуються результати дисертаційної роботи Зубачика Романа Михайловича, зокрема:

- методика для оцінки доцільності впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць та її перевірка на прикладі магістральної вулиці Стрийська (м. Львів) на ділянці від перехрестя вулиць Стрийська-Сокільницька до Стрийська-Наукова-Хуторівка;
- метод «спеціальна смуга у зоні перехрестя» для забезпечення просторово-часового пріоритету автобусам на регульованих перехрестях, підходи яких мають не більше двох смуг руху в одному напрямку;
- імітаційна модель підходу(ів) до ізолюваного регульованого перехрестя для визначення оптимальної довжини спеціальної смуги на підході і для аналізу роботи перехрестя за показником максимальна довжина черги транспортних засобів.

Голова комісії

Члени комісії:

Щир В.Д.

Журбенко С.В.

Кравецька О.М.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор Львівського
комунального підприємства

«Львівавтодор»

«Львівавтодор» О.І. Береза

« » 2015 року**АКТ**

про впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи
Зубачика Романа Михайловича

Комісія у складі заступника директора ЛКП «Львівавтодор» Калитича Є.О. і членів комісії – головного інженера ЛКП «Львівавтодор» Гаврилів І.І. та начальника відділу з обслуговування світлофорних об'єктів Туркевича М.Є. склали цей акт про те, що у ЛКП «Львівавтодор» впроваджено і використовуються результати дисертаційної роботи Зубачика Романа Михайловича:

- методика для оцінки доцільності впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць за визначеними критеріями;
- метод «спеціальна смуга у зоні перехрестя» для забезпечення просторово-часового пріоритету автобусам на регульованих перехрестях, підходи яких мають не більше двох смуг руху в одному напрямку;
- імітаційна модель підходу(ів) до ізольованого регульованого перехрестя та імітаційна модель ділянки координації для визначення оптимальної довжини спеціальної смуги на підході до перехрестя і для аналізу роботи перехрестя за показником максимальна довжина черги транспортних засобів;
- транспортна модель міста Львова у програмному середовищі VISUM, для техніко-економічного аналізу ефективності заходів транспортної інфраструктури, зокрема заходів організації дорожнього руху.

Голова комісії

Члени комісії:



Калитич Є.О.

Гаврилів І.І.

Туркевич М.Є.