

ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ
КАФЕДРА ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ І ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

на тему: **«Модель системи управління транспортним потоком двох
взаємопов'язаних перехресть»**

Виконав: студент 4 курсу, групи 4ТТ
спеціальності

275.03 – Транспортні технології (на
автомобільному транспорті)

Волошанський В. О.

Керівник к.т.н., доц. Славич В. П.

Рецензент к.т.н., доц. Луб'яний П. В.

Херсон – 2026 р.

ЗАТВЕРДЖЕНО

Наказ Міністерства освіти і науки,
молоді та спорту України
29 березня 2012 року № 384

Форма № Н-9.01

ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ.

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення _____ Інженерії та транспорту
Кафедра, циклова комісія _____ Транспортних систем і технічного сервісу
Рівня вищої освіти _____ бакалавр
спеціальність _____ 275 Транспортні технології
спеціалізація 275.03 на автомобільному транспорті

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТСТС

к.т.н., доц. _____
П. В. Луб'яний

“ ____ ” _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА****СТУДЕНТУ**

Волошанський Володимир Осипович

- Тема проекту (роботи) «Модель системи управління транспортним потоком двох взаємопов'язаних перехресть»
керівник проекту (роботи) к.т.н., доцент Славич В. П.
затверджені наказом вищого навчального закладу від 26.01.2026 року № 122-с
- Строк подання студентом проекту (роботи) 03.06.2026 р.
- Вихідні дані до проекту (роботи): Інтенсивність руху, кількість транспортних засобів, відстань між перехрестями, ширина перехресть, швидкість руху автомобілів, параметри світлофорного циклу.
- Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ,
1 Теоретичні засади ефективності управління транспортним потоком на взаємопов'язаних перехрестях,
2 Моделювання процесів роботи світлофорного регулювання,
3 Модель координації роботи взаємопов'язаних перехресть,
Висновки,
Список використаних джерел.
- Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
матеріали демонстраційної графічної частини формату А4

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Славич В. П.		
2	Славич В. П.		
3	Славич В. П.		

7. Дата видачі завдання 02.02.2026**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	10.02.2026	
2	Теоретичні засади ефективності управління транспортним потоком на взаємопов'язаних перехрестях	10.03.2026	
3	Моделювання процесів роботи світлофорного регулювання	10.04.2026	
4	Модель координації роботи взаємопов'язаних перехресть	10.05.2026	
5	Висновки	01.06.2026	

Студент _____ Волошанський В. О.
(підпис)

Керівник проєкту (роботи) _____ Славич В. П.
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячена розробці моделі системи управління транспортним потоком двох взаємопов'язаних перехресть. У роботі проведено аналіз сучасних підходів до організації дорожнього руху та методів керування транспортними потоками. Розроблено математичну та дискретно-клітинкову моделі координованого світлофорного регулювання. Отримано аналітичні залежності для визначення параметрів світлофорних фаз. Проведено числове моделювання та оцінено ефективність запропонованого підходу. Результати роботи можуть бути використані для підвищення пропускної здатності вулично-дорожньої мережі та зменшення транспортних затримок.

ANNOTATION

The qualification work is devoted to the development of a model of a traffic flow control system for two interconnected intersections. The work analyzes modern approaches to the organization of road traffic and methods of traffic flow control. A mathematical and discrete-cellular model of coordinated traffic light regulation is developed. Analytical dependencies are obtained for determining the parameters of traffic light phases. Numerical modeling is carried out and the effectiveness of the proposed approach is assessed. The results of the work can be used to increase the throughput of the street and road network and reduce traffic delays.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра на тему „Модель системи управління транспортним потоком двох взаємопов’язаних перехресть” містить 76 стор., 16 використаних джерел.

Актуальність теми обумовлена необхідністю підвищення ефективності функціонування міських транспортних систем та зменшення транспортних заторів в умовах зростання інтенсивності дорожнього руху.

Метою роботи є розробка моделі керування світлофорною сигналізацією для координації роботи двох взаємопов’язаних перехресть.

Об’єктом дослідження є процес управління транспортними потоками, предметом – методи координації світлофорного регулювання та математичні моделі транспортних потоків.

У роботі використано методи математичного моделювання та дискретно-клітинковий підхід. Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованої моделі для оптимізації роботи світлофорних об’єктів і підвищення пропускної здатності транспортної мережі.

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМ ПОТОКОМ НА ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНИХ ПЕРЕХРЕСТЯХ

- 1.1. Особливості організації дорожнього руху в міських умовах
- 1.2. Основні принципи управління транспортними потоками
- 1.3. Системи світлофорного регулювання транспортних потоків
- 1.4. Координація роботи взаємопов'язаних перехресть
- 1.5. Методи моделювання транспортних потоків
- 1.6. Аналіз сучасних досліджень і технологій управління дорожнім рухом
- 1.7. Передумови розробки моделі управління транспортними потоками

РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РОБОТИ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

- 2.1 Ключові критерії побудови моделі керування світлофорним регулюванням
- 2.2 Математична модель керування світлофорною сигналізацією
- 2.3 Оцінювання ефективності функціонування світлофорної системи
- 2.4 Адаптивне керування транспортними потоками
- 2.5 Висновки

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЬ КООРДИНАЦІЇ РОБОТИ ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНИХ ПЕРЕХРЕСТЬ

- 3.1 Побудова дискретно-клітинкової моделі взаємопов'язаних перехресть
- 3.2 Розрахунок параметрів світлофорного регулювання для системи взаємопов'язаних перехресть
- 3.3 Числове моделювання та практичний приклад розрахунку параметрів світлофорного регулювання
- 3.4 Висновки

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ВСТУП

Системи управління світлофорними об'єктами зазвичай поділяють на два основні типи: системи з фіксованими параметрами (так званим «жорстким» управлінням) та адаптивні системи, які можуть змінювати свої режими залежно від поточної дорожньої ситуації.

Жорстке управління передбачає роботу світлофорів за наперед визначеним циклом. Перемикання сигналів здійснюється за постійними часовими інтервалами, без урахування фактичної інтенсивності руху чи інших динамічних факторів (наприклад, добових коливань трафіку). Такий підхід зазвичай застосовують на перехрестях з передбачуваним і відносно рівномірним потоком транспорту.

Інтелектуальне (адаптивне) управління, навпаки, здатне змінювати тривалість фаз у режимі реального часу. Для цього використовуються різні типи датчиків – відеокамери, індукційні петлі, акустичні сенсори та інші пристрої, що здійснюють моніторинг транспортних і пішохідних потоків. Отримані дані обробляються алгоритмами оптимізації, які формують найбільш ефективну часову структуру світлофорного циклу.

Порівняно з традиційними системами, адаптивні рішення забезпечують низку переваг:

Підвищення пропускної здатності. Гнучке налаштування фаз дозволяє скоротити затримки та зменшити ймовірність виникнення заторів.

Рациональне використання енергії. Оптимізація режимів роботи світлофорів у періоди слабкого руху сприяє зниженню енергоспоживання.

Швидка реакція на зміни. Система оперативно перебудовує режими при зміні інтенсивності руху, що робить керування більш ефективним і стабільним.

Таким чином, адаптивні світлофорні системи є більш сучасним та результативним інструментом управління дорожнім рухом, особливо в умовах інтенсивного міського трафіку та складної мережі перехресть.

Постановка проблеми.

Однією з проблем міських перехресть у випадку жорсткого управління є такий параметр, як кількість транспортних засобів, що встигає проїжджати за час горіння дозволеного сигналу світлофору. Цей параметр є важливим для ефективності роботи світлофора. Цей параметр може бути критичним у міських умовах, де велика кількість автомобілів може утворювати затори, якщо час, присвячений руху, недостатній для відведення всім транспортним засобам.

При жорсткому управлінні світлофорами важливо забезпечити, щоб час, виділений на рух автомобілів, був достатнім для того, щоб уникнути заторів і забезпечити плавний рух транспорту. Це може вимагати ретельного налаштування часів циклів світлофорів, урахування пікових навантажень і взаємодії з іншими світлофорами на маршруті.

Тому розроблення та впровадження систем управління транспортним потоком на перехресті, що дозволяють враховувати кількість транспортних засобів, що встигає проїжджати за час горіння дозволеного сигналу світлофору, є важливою задачею. Збалансоване управління світлофорами дозволяє оптимізувати рух транспорту в місті, знижувати викиди вуглецю та час очікування, сприяючи загальній ефективності транспортної інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Останні дослідження з управління світлофорними сигналами показують перехід від класичних методів із жорсткими циклами до адаптивних і інтелектуальних підходів. Деякі роботи розглядають вплив зовнішніх факторів, таких як викиди від транспортних засобів на міське середовище, що може враховуватися при оптимізації трафіку [1]. Класичні моделі, що оптимізують параметри фіксованих сигналів, досі використовуються як базові для порівняння [2, 3], але їх ефективність обмежена при змінному трафіку.

Сучасні роботи акцентують увагу на застосуванні симуляційних систем та інтелектуальних контролерів, що дозволяють оцінювати різні стратегії

управління в реальних умовах [4]. Значну увагу отримали методи підсилювального навчання для адаптивного контролю світлофорів, включно з мультиагентними та глибокими моделями, які здатні враховувати взаємозв'язки між перехрестями та оптимізувати транспортні потоки [5-10].

Кооперативні підходи та графові моделі дозволяють агентам ефективно взаємодіяти, зменшуючи загальний час у дорозі [6, 10]. Загальний тренд сучасних публікацій – інтеграція класичних і новітніх інтелектуальних методів для покращення пропускну здатності мереж та зниження заторів [7-9].

Оглядові статті також підкреслюють проблеми масштабування та необхідність інтеграції новітніх підходів у практичні системи управління [11, 12].

Мета та задачі дослідження.

Мета цієї роботи полягає в створенні такої моделі системи управління світлофорною сигналізацією системи двох розташованих одне за одним регульованих перехресть, що дає змогу фіксованій групі автомобілів з транспортного потоку, що знаходиться на підході до першого перехрестя, після включення дозволеного сигналу світлофору на цьому перехресті при переміщенні до другого перехрестя перетнути його на дозволений сигнал.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМ ПОТОКОМ НА ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНИХ ПЕРЕХРЕСТЯХ

1.1. Особливості організації дорожнього руху в міських умовах

Сучасні міста характеризуються високою концентрацією транспортних потоків, значною щільністю забудови та постійним зростанням рівня автомобілізації населення. У зв'язку з цим організація дорожнього руху стає однією з найважливіших складових функціонування міської інфраструктури. Ефективність транспортної системи безпосередньо впливає на економічний розвиток міста, екологічний стан навколишнього середовища, безпеку учасників дорожнього руху та комфорт пересування населення.

Особливістю міського дорожнього руху є його нерівномірний характер. Інтенсивність транспортних потоків суттєво змінюється залежно від часу доби, дня тижня, погодних умов, функціонального призначення окремих районів міста та інших факторів. Найбільші навантаження виникають у так звані пікові періоди, коли значна кількість транспортних засобів одночасно переміщується основними магістралями. У таких умовах навіть незначні порушення пропускної здатності можуть призводити до формування заторів і збільшення часу поїздки.

Однією з основних проблем міських транспортних систем є обмежена пропускна здатність вулично-дорожньої мережі. На відміну від заміських автомобільних доріг, міські магістралі мають значну кількість регульованих і нерегульованих перехресть, пішохідних переходів, зупинок громадського транспорту та інших елементів, які впливають на безперервність руху. Саме перехрестя вважаються найбільш складними ділянками транспортної мережі, оскільки на них відбувається перетин і перерозподіл транспортних потоків різних напрямків.

Організація руху на перехрестях вимагає забезпечення балансу між безпекою та пропускнуою здатністю. З одного боку, необхідно мінімізувати ймовірність виникнення конфліктних ситуацій між транспортними потоками та пішоходами, а з іншого – забезпечити максимально ефективне використання дорожньої інфраструктури. Для цього застосовуються різні засоби регулювання, серед яких особливе місце займають світлофорні системи.

Важливою особливістю міського руху є наявність взаємозв'язку між окремими ділянками транспортної мережі. Зміна режиму роботи одного перехрестя може суттєво впливати на умови руху на сусідніх перехрестях. У випадку недостатньо узгодженого регулювання виникають ситуації, коли транспортні засоби накопичуються між перехрестями та блокують подальший рух. Такі процеси особливо характерні для центральних районів міст із високою інтенсивністю руху та малою відстанню між перехрестями.

На ефективність організації дорожнього руху також впливають поведінкові особливості водіїв. Час реакції на сигнали світлофора, швидкість розгону транспортних засобів, дотримання дистанції та схильність до ризикованих маневрів формують реальну картину транспортного процесу. Навіть за однакових умов руху фактична пропускна здатність перехрестя може змінюватися залежно від складу транспортного потоку та поведінки його учасників.

Суттєвим фактором є також розвиток громадського транспорту та збільшення кількості пішоходів у великих містах. Організація дорожнього руху повинна враховувати інтереси всіх учасників транспортного процесу. У сучасних умовах значна увага приділяється створенню виділених смуг для громадського транспорту, облаштуванню безпечних пішохідних переходів і впровадженню інтелектуальних систем регулювання.

Окремою проблемою міських транспортних систем є екологічне навантаження. Часті зупинки транспортних засобів, рух у режимі розгону та гальмування, а також тривале очікування на світлофорах призводять до

збільшення витрат пального та зростання обсягів шкідливих викидів у атмосферу. У зв'язку з цим сучасні системи управління дорожнім рухом орієнтовані не лише на підвищення пропускної здатності, але й на зменшення негативного впливу транспорту на навколишнє середовище.

Для підвищення ефективності функціонування міських транспортних мереж активно впроваджуються автоматизовані системи управління дорожнім рухом. Такі системи використовують інформацію від датчиків, відеокамер та інших засобів моніторингу для оперативної зміни режимів світлофорного регулювання відповідно до поточної дорожньої ситуації. Координація роботи суміжних перехресть дозволяє формувати більш рівномірний транспортний потік та зменшувати затримки транспортних засобів.

Таким чином, організація дорожнього руху в міських умовах є складним багатофакторним завданням, яке потребує комплексного підходу до управління транспортними потоками. Особливого значення набуває координація роботи взаємопов'язаних перехресть, оскільки саме від ефективності їх функціонування значною мірою залежить пропускна здатність та стабільність роботи всієї транспортної мережі міста.

1.2. Основні принципи управління транспортними потоками

Управління транспортними потоками є важливою складовою організації дорожнього руху та спрямоване на забезпечення безпечного, безперервного й ефективного переміщення транспортних засобів вулично-дорожньою мережею. В умовах сучасних міст ефективність управління транспортними потоками набуває особливого значення через постійне зростання інтенсивності руху, збільшення кількості транспортних засобів та обмежені можливості розширення дорожньої інфраструктури.

Транспортний потік розглядається як сукупність транспортних засобів, що переміщуються певною ділянкою дороги в одному напрямку. Основними характеристиками транспортного потоку є інтенсивність руху, щільність

транспортного потоку та середня швидкість транспортних засобів. Саме ці параметри визначають стан дорожнього руху та дозволяють оцінювати ефективність функціонування транспортної мережі.

Інтенсивність транспортного потоку характеризує кількість транспортних засобів, що проходять через певний переріз дороги за одиницю часу. Даний показник є одним із основних при аналізі транспортних систем, оскільки він дозволяє оцінити рівень завантаження дорожньої мережі. Зі збільшенням інтенсивності руху підвищується ймовірність виникнення заторів, особливо на регульованих перехрестях та ділянках із недостатньою пропускнуою здатністю.

Щільність транспортного потоку визначає кількість транспортних засобів, що одночасно знаходяться на певній ділянці дороги. Висока щільність руху призводить до зменшення середньої швидкості транспортних засобів та збільшення часу затримок. При досягненні критичних значень щільності виникають нестійкі режими руху, що можуть супроводжуватися формуванням транспортних заторів.

Середня швидкість руху є важливим показником ефективності транспортної системи. Вона залежить від інтенсивності потоку, режиму регулювання руху, геометричних параметрів дороги, поведінки водіїв та багатьох зовнішніх факторів. Підтримання стабільної швидкості транспортного потоку дозволяє зменшити кількість зупинок, скоротити витрати часу на пересування та знизити негативний вплив транспорту на навколишнє середовище.

Одним із базових принципів управління транспортними потоками є принцип безпеки дорожнього руху. Організація руху повинна забезпечувати мінімізацію конфліктних ситуацій між транспортними засобами, пішоходами та іншими учасниками дорожнього руху. Для цього використовуються світлофорне регулювання, дорожні знаки, дорожня розмітка, островці безпеки та інші технічні засоби організації руху.

Іншим важливим принципом є забезпечення пропускної здатності транспортної мережі. Пропускна здатність визначається максимальною кількістю транспортних засобів, яка може пройти через певну ділянку дороги або перехрестя за встановлений проміжок часу. Ефективне управління транспортними потоками спрямоване на раціональний розподіл транспортного навантаження та запобігання перевантаженню окремих ділянок мережі.

Значну роль у сучасних системах управління транспортними потоками відіграє принцип координації руху. Його сутність полягає в узгодженні режимів роботи суміжних світлофорних об'єктів для забезпечення безперервного руху транспортних засобів. Найбільш поширеним прикладом реалізації такого підходу є організація «зеленої хвилі», за якої транспортні засоби можуть послідовно перетинати кілька перехресть без зупинки за умови дотримання встановленої швидкості руху.

Важливим принципом є адаптивність систем управління дорожнім рухом. Транспортна ситуація в містах постійно змінюється залежно від часу доби, погодних умов, аварійних ситуацій та інших факторів. Тому сучасні системи управління повинні мати можливість оперативно змінювати параметри світлофорного регулювання відповідно до поточного стану транспортного потоку. Для цього використовуються датчики руху, відеоспостереження та автоматизовані системи аналізу транспортної ситуації.

Одним із принципів сучасного управління транспортними потоками є пріоритетність окремих видів транспорту. У багатьох містах реалізуються заходи, спрямовані на підвищення ефективності роботи громадського транспорту шляхом виділення окремих смуг руху або надання пріоритету при проїзді регульованих перехресть. Такий підхід дозволяє скоротити час перевезення пасажирів та підвищити привабливість громадського транспорту.

Окреме значення має принцип екологічної ефективності. Зменшення кількості затримок, оптимізація режимів руху та скорочення часу роботи транспортних засобів у режимі холостого ходу сприяють зниженню рівня

шкідливих викидів та шумового навантаження. У сучасних умовах екологічний аспект є одним із важливих критеріїв оцінки ефективності транспортних систем.

Таким чином, управління транспортними потоками базується на комплексі взаємопов'язаних принципів, спрямованих на забезпечення безпеки, підвищення пропускної здатності, зменшення затримок та покращення екологічних показників транспортної системи. Реалізація цих принципів є особливо важливою для взаємопов'язаних перехресть, де ефективність управління одним об'єктом безпосередньо впливає на роботу сусідніх ділянок дорожньої мережі.

1.3. Системи світлофорного регулювання транспортних потоків

Світлофорне регулювання є одним із основних засобів організації дорожнього руху в сучасних містах. Його головне призначення полягає у впорядкуванні руху транспортних засобів і пішоходів на перехрестях та інших конфліктних ділянках дорожньої мережі. Використання світлофорів дозволяє розподіляти транспортні потоки в часі, зменшувати кількість конфліктних ситуацій та підвищувати рівень безпеки дорожнього руху.

Необхідність застосування світлофорного регулювання обумовлена постійним зростанням інтенсивності транспортних потоків у містах. На ділянках із високим транспортним навантаженням пріоритетний або нерегульований рух часто не забезпечує необхідної пропускної здатності та призводить до утворення заторів. У таких умовах світлофорні системи стають важливим елементом управління транспортними потоками та дозволяють більш ефективно використовувати можливості дорожньої інфраструктури.

Основним принципом роботи світлофорного регулювання є почергове надання права руху окремим транспортним потокам або пішоходам. Для цього використовується циклічна зміна сигналів світлофора, що формує визначену послідовність фаз регулювання. Кожна фаза забезпечує рух певних напрямків

транспорту при одночасному обмеженні інших потоків для уникнення конфліктів.

Світлофорний цикл складається з кількох фаз, тривалість яких визначається характеристиками транспортного потоку, геометричними параметрами перехрестя та вимогами безпеки. До складу циклу входять основні такти, під час яких дозволяється рух певного напрямку, а також проміжні такти, призначені для очищення перехрестя від транспортних засобів перед перемиканням сигналів. Загальна тривалість циклу суттєво впливає на ефективність організації дорожнього руху.

Одним із найпоширеніших типів систем світлофорного регулювання є системи з фіксованими параметрами або жорстким циклом управління. У таких системах тривалість фаз і послідовність перемикання сигналів задаються заздалегідь та залишаються незмінними протягом роботи світлофорного об'єкта. Перевагою цього підходу є простота реалізації та стабільність функціонування. Однак ефективність жорсткого регулювання значно знижується при змінній інтенсивності транспортного потоку, оскільки система не здатна оперативно реагувати на зміни дорожньої ситуації.

При використанні систем із жорстким регулюванням особливо важливим є правильний вибір тривалості фаз світлофорного циклу. Недостатня тривалість дозволеного сигналу може призводити до накопичення транспортних засобів і формування черг, тоді як надмірно тривалі фази спричиняють неефективне використання часу циклу та збільшення затримок для інших напрямків руху.

Більш сучасним напрямом розвитку є адаптивні системи світлофорного регулювання. На відміну від жорстких систем, адаптивне управління передбачає зміну параметрів роботи світлофорів у реальному часі залежно від поточної транспортної ситуації. Такі системи використовують інформацію від датчиків руху, індукційних петель, відеокамер або інших засобів моніторингу транспортних потоків.

Адаптивні системи дозволяють автоматично змінювати тривалість фаз, порядок їх увімкнення та параметри світлофорного циклу відповідно до інтенсивності руху. Це сприяє зменшенню транспортних затримок, скороченню довжини черг і підвищенню пропускної здатності перехресть. Особливо ефективними такі системи є в умовах нерівномірного транспортного навантаження, характерного для великих міст.

Важливе місце серед систем світлофорного регулювання займають координовані системи управління. Їх основною метою є узгодження роботи декількох суміжних перехресть для забезпечення більш рівномірного руху транспортних потоків. Координація світлофорів дозволяє організовувати так звану «зелену хвилю», при якій транспортні засоби можуть послідовно перетинати кілька перехресть без зупинки за умови дотримання встановленої швидкості руху.

Для взаємопов'язаних перехресть координація режимів регулювання має особливе значення. За відсутності узгодженого управління транспортні засоби, що залишають одне перехрестя, можуть накопичуватися перед наступним, створюючи ефект блокування руху. Координоване управління дозволяє мінімізувати подібні ситуації та забезпечити більш стабільний режим функціонування транспортної мережі.

Сучасні тенденції розвитку світлофорних систем пов'язані із впровадженням інтелектуальних транспортних технологій. Такі системи використовують елементи штучного інтелекту, методи машинного навчання та прогнозування транспортних потоків для автоматичного вибору найбільш ефективних режимів регулювання. Це дозволяє враховувати не лише поточний стан дорожнього руху, але й можливі зміни транспортної ситуації в майбутньому.

Крім транспортної ефективності, системи світлофорного регулювання мають важливе соціальне та екологічне значення. Рациональна організація руху сприяє зменшенню часу очікування, підвищенню комфорту учасників дорожнього руху та зниженню рівня стресу водіїв. Одночасно скорочується

кількість зупинок транспортних засобів, що позитивно впливає на рівень шкідливих викидів та витрати пального.

Таким чином, системи світлофорного регулювання є важливим елементом сучасної транспортної інфраструктури. Їх розвиток спрямований на підвищення ефективності управління транспортними потоками, забезпечення безпеки дорожнього руху та оптимізацію функціонування міських транспортних мереж. Особливу роль у цьому процесі відіграють адаптивні та координовані системи управління, які дозволяють враховувати складну взаємодію транспортних потоків на суміжних перехрестях.

1.4. Координація роботи взаємопов'язаних перехресть

Однією з найважливіших задач організації дорожнього руху в сучасних містах є забезпечення узгодженої роботи суміжних регульованих перехресть. У випадку значної інтенсивності транспортних потоків функціонування кожного окремого перехрестя безпосередньо впливає на роботу сусідніх ділянок вулично-дорожньої мережі. Саме тому ефективне управління транспортними потоками неможливе без координації режимів світлофорного регулювання між взаємопов'язаними перехрестями.

Взаємопов'язаними називають такі перехрестя, між якими існує стійкий транспортний зв'язок, тобто транспортні засоби, що залишають одне перехрестя, через короткий проміжок часу прибувають до іншого. Найчастіше подібна ситуація виникає на магістральних вулицях із невеликою відстанню між перехрестями. У таких умовах режими роботи світлофорів повинні враховувати не лише локальні параметри руху, але й загальний стан транспортного потоку на всій ділянці дороги.

При відсутності координації світлофорних сигналів транспортні засоби змушені багаторазово зупинятися на кожному перехресті, що призводить до збільшення затримок, утворення черг та зниження середньої швидкості руху. Особливо негативно це проявляється в години пік, коли навіть незначна

неузгодженість режимів регулювання може спричинити формування заторів на значній частині транспортної мережі.

Основною метою координації взаємопов'язаних перехресть є створення умов для максимально безперервного руху транспортних потоків. Для досягнення цього використовуються узгоджені режими світлофорного регулювання, при яких транспортні засоби мають можливість послідовно перетинати декілька перехресть без зупинки. Найбільш поширеним прикладом такого підходу є організація «зеленої хвилі».

Принцип «зеленої хвилі» полягає в синхронізації моментів увімкнення дозволеного сигналу світлофора на сусідніх перехрестях відповідно до середньої швидкості руху транспортного потоку. Якщо транспортний засіб рухається із заданою швидкістю, він потрапляє на кожне наступне перехрестя в момент дії зеленого сигналу. Це дозволяє суттєво зменшити кількість зупинок та скоротити час проходження маршруту.

Для реалізації координованого управління необхідно враховувати низку факторів. Одним із найважливіших є відстань між перехрестями. Саме вона визначає час, за який транспортний потік переміщується від одного світлофорного об'єкта до іншого. При невеликій відстані між перехрестями виникає ризик накопичення транспортних засобів на міжперехресній ділянці, що може призвести до блокування руху.

Іншим важливим параметром є середня швидкість транспортного потоку. Вона залежить від інтенсивності руху, геометричних характеристик дороги, погодних умов та поведінки водіїв. При розрахунку режимів координації необхідно враховувати реальні умови руху, оскільки значне відхилення фактичної швидкості від розрахункової знижує ефективність узгодженого регулювання.

Важливу роль у координації перехресть відіграє вибір тривалості світлофорного циклу. Для забезпечення стабільної роботи взаємопов'язаних перехресть цикли регулювання повинні бути узгодженими або кратними між

собою. Це дозволяє підтримувати повторюваність режимів руху та забезпечувати синхронність роботи світлофорних об'єктів.

У практиці організації дорожнього руху застосовуються різні методи координації світлофорів. Найпростішим є жорстко координоване управління, при якому параметри світлофорних циклів задаються заздалегідь та залишаються незмінними протягом певного періоду часу. Такий підхід є ефективним у випадках стабільної інтенсивності руху, однак його можливості обмежені при значних коливаннях транспортного навантаження.

Більш сучасним підходом є адаптивна координація, що передбачає автоматичну зміну параметрів регулювання відповідно до поточної дорожньої ситуації. У таких системах використовуються транспортні детектори, відеоспостереження та алгоритми аналізу транспортних потоків. Адаптивні системи дозволяють оперативно реагувати на зміну інтенсивності руху та забезпечувати більш ефективне використання пропускної здатності дорожньої мережі.

Для взаємопов'язаних перехресть особливого значення набуває проблема утворення транспортних черг. Якщо довжина черги на одному перехресті перевищує довжину міжперехресної ділянки, транспортні засоби можуть блокувати рух на сусідньому перехресті. Подібне явище отримало назву «ефект замикання» або «блокування перехрестя». Для запобігання таким ситуаціям система управління повинна враховувати не лише інтенсивність руху, але й фактичний стан міжперехресних ділянок.

Суттєвий вплив на координацію роботи перехресть мають також пішохідні потоки та рух громадського транспорту. У центральних районах міст значна кількість пішохідних переходів може обмежувати можливості збільшення тривалості дозволених фаз для транспорту. Одночасно сучасні системи управління часто передбачають пріоритетний пропуск громадського транспорту, що також впливає на структуру світлофорного циклу.

Сучасні інтелектуальні транспортні системи дозволяють реалізовувати складні алгоритми координації перехресть із використанням елементів

штучного інтелекту та прогнозування транспортних потоків. Такі системи здатні аналізувати поточний стан дорожнього руху, прогнозувати можливі зміни транспортної ситуації та автоматично змінювати режими регулювання для досягнення оптимальних показників функціонування транспортної мережі.

Таким чином, координація роботи взаємопов'язаних перехресть є важливим напрямом удосконалення систем управління дорожнім рухом. Узгодження режимів світлофорного регулювання дозволяє підвищити пропускну здатність транспортної мережі, зменшити транспортні затримки, покращити безпеку дорожнього руху та забезпечити більш ефективне функціонування міської транспортної інфраструктури.

1.5. Методи моделювання транспортних потоків

Моделювання транспортних потоків є важливим інструментом дослідження та оптимізації дорожнього руху. Використання моделей дозволяє аналізувати поведінку транспортних систем, оцінювати ефективність різних методів управління та прогнозувати зміни транспортної ситуації без необхідності проведення складних і дорогих експериментів у реальних умовах. Особливого значення моделювання набуває при дослідженні регульованих перехресть та взаємодії транспортних потоків у міських умовах.

Основною метою транспортного моделювання є відтворення процесів руху транспортних засобів із необхідним рівнем точності. Залежно від характеру задачі та рівня деталізації використовуються різні типи моделей, які відрізняються способом опису транспортного потоку, масштабом дослідження та математичним апаратом.

У сучасній теорії транспортних систем виділяють три основні підходи до моделювання транспортних потоків: макроскопічний, мікроскопічний та мезоскопічний. Кожен із них має власні особливості, переваги та обмеження.

Макроскопічні моделі розглядають транспортний потік як єдине безперервне середовище, подібне до потоку рідини. У таких моделях не аналізується поведінка окремих транспортних засобів, а основна увага приділяється узагальненим характеристикам потоку, таким як інтенсивність руху, щільність транспортного потоку та середня швидкість. Макроскопічний підхід дозволяє ефективно досліджувати великі транспортні мережі та оцінювати загальні закономірності руху.

Однією з переваг макроскопічних моделей є відносна простота математичного опису та можливість аналізу масштабних транспортних систем. Проте такі моделі мають обмежену точність при дослідженні локальних процесів на окремих перехрестях, оскільки не враховують індивідуальну поведінку транспортних засобів і водіїв.

Мікроскопічні моделі, навпаки, описують рух кожного окремого транспортного засобу. У межах такого підходу враховуються параметри прискорення, гальмування, дистанції між автомобілями, реакція водіїв на дорожню ситуацію та інші поведінкові характеристики. Мікроскопічні моделі дозволяють детально аналізувати процеси формування черг, взаємодію транспортних потоків на перехрестях та ефективність різних режимів світлофорного регулювання.

Перевагою мікроскопічного підходу є високий рівень деталізації та можливість точного відтворення реальної транспортної ситуації. Однак використання таких моделей потребує значних обчислювальних ресурсів, особливо при дослідженні великих транспортних мереж із високою інтенсивністю руху.

Мезоскопічні моделі займають проміжне положення між макроскопічними та мікроскопічними підходами. У них транспортний потік розглядається як сукупність груп транспортних засобів, для яких визначаються спільні параметри руху. Такий підхід дозволяє поєднати достатню точність опису транспортних процесів із помірними вимогами до обчислювальних ресурсів.

Серед сучасних методів транспортного моделювання значну увагу привертають дискретно-клітинкові моделі або моделі клітинкових автоматів. У таких моделях транспортна мережа поділяється на окремі клітинки однакового розміру, кожна з яких може перебувати в певному стані. Найчастіше клітинка або зайнята транспортним засобом, або вільна. Переміщення транспортних засобів описується як послідовний перехід між сусідніми клітинками відповідно до встановлених правил.

Основною перевагою дискретно-клітинкових моделей є простота реалізації та можливість ефективного моделювання складних транспортних процесів. Такий підхід дозволяє описувати рух транспортних потоків у дискретному часі, враховувати обмеження пропускнуої здатності, формування черг та взаємодію транспортних засобів на перехрестях.

Дискретно-клітинкові моделі є особливо зручними для дослідження взаємопов'язаних перехресть. Завдяки поділу транспортної мережі на окремі елементи можна точно визначати положення транспортних засобів, аналізувати процес їх накопичення між перехрестями та моделювати режими координації світлофорного регулювання.

Важливою перевагою клітинкових моделей є можливість моделювання транспортних потоків у реальному часі. Це створює передумови для використання таких моделей у складі адаптивних систем управління дорожнім рухом, де необхідно швидко аналізувати транспортну ситуацію та приймати рішення щодо зміни параметрів світлофорного регулювання.

У сучасних дослідженнях транспортних систем широко використовуються також імітаційні моделі. Імітаційне моделювання дозволяє відтворювати складні транспортні процеси шляхом багаторазового програвання різних сценаріїв руху. Такий підхід є ефективним при аналізі нестандартних ситуацій, оцінці впливу аварій або змін організації дорожнього руху.

Для реалізації транспортних моделей використовуються спеціалізовані програмні середовища та системи моделювання. Найбільш поширеними є

програмні комплекси, що дозволяють створювати моделі транспортних мереж, задавати параметри руху та аналізувати результати функціонування транспортної системи. Використання комп'ютерного моделювання значно спрощує процес дослідження та дозволяє проводити експерименти без втручання у реальний дорожній рух.

При виборі методу моделювання важливо враховувати особливості поставленої задачі. Для аналізу роботи окремих перехресть і координації світлофорних сигналів найбільш доцільним є використання мікроскопічних або дискретно-клітинкових моделей, оскільки вони дозволяють детально описувати поведінку транспортних потоків та враховувати часові параметри руху.

Таким чином, методи моделювання транспортних потоків є важливим засобом дослідження сучасних транспортних систем. Використання різних підходів до моделювання дозволяє аналізувати транспортні процеси на різних рівнях деталізації та створює основу для розробки ефективних систем управління дорожнім рухом. Для задач координації взаємопов'язаних перехресть особливу ефективність демонструють дискретно-клітинкові моделі, які забезпечують достатню точність опису транспортних процесів при відносній простоті реалізації.

1.6. Аналіз сучасних досліджень і технологій управління дорожнім рухом

Сучасний розвиток транспортних систем супроводжується постійним зростанням інтенсивності дорожнього руху, збільшенням кількості транспортних засобів та ускладненням структури транспортних потоків. У зв'язку з цим проблема ефективного управління дорожнім рухом набуває особливої актуальності як у наукових дослідженнях, так і в практиці організації транспортної інфраструктури. Основною метою сучасних систем управління є підвищення пропускну здатності вулично-дорожньої мережі,

зменшення транспортних затримок та забезпечення безпеки учасників дорожнього руху.

Упродовж останніх років значна кількість наукових досліджень присвячена вдосконаленню методів світлофорного регулювання. Традиційні системи з жорсткими циклами поступово поступаються місцем адаптивним та інтелектуальним системам управління, здатним реагувати на зміну транспортної ситуації в режимі реального часу. Такий перехід обумовлений необхідністю підвищення ефективності роботи транспортних мереж у складних умовах сучасних міст.

Одним із найбільш поширених напрямів досліджень є оптимізація параметрів світлофорного циклу. У наукових роботах розглядаються методи визначення оптимальної тривалості фаз регулювання, мінімізації затримок транспортних засобів та забезпечення узгодженого функціонування суміжних перехресть. Дослідження показують, що правильний вибір параметрів світлофорного циклу дозволяє суттєво зменшити довжину транспортних черг та покращити пропускну здатність дорожньої мережі.

Важливим напрямом сучасних досліджень є використання адаптивних систем управління дорожнім рухом. Такі системи базуються на безперервному зборі інформації про стан транспортних потоків за допомогою відеокамер, індукційних датчиків, радарів та інших технічних засобів. Отримані дані аналізуються автоматизованими алгоритмами, які змінюють параметри роботи світлофорів відповідно до поточного транспортного навантаження.

Перевагою адаптивних систем є їх здатність оперативно реагувати на зміну дорожньої ситуації. На відміну від систем із фіксованими параметрами, адаптивне управління дозволяє враховувати добові коливання інтенсивності руху, виникнення заторів або аварійних ситуацій. Це забезпечує більш ефективне використання пропускну здатності перехресть та зменшує транспортні затримки.

Значний інтерес у сучасних дослідженнях викликає використання методів штучного інтелекту та машинного навчання для управління

транспортними потоками. Особливо активно розвиваються методи підсилювального навчання, при яких система управління самостійно формує оптимальні режими регулювання на основі аналізу результатів власної роботи. Такі алгоритми здатні адаптуватися до складних та змінних умов руху без необхідності попереднього жорсткого програмування.

У сучасних роботах також активно досліджуються мультиагентні системи управління транспортом. У таких системах кожне перехрестя розглядається як окремий агент, який приймає рішення на основі локальної інформації та взаємодіє з іншими агентами транспортної мережі. Подібний підхід дозволяє забезпечити координацію роботи великої кількості взаємопов'язаних перехресть та підвищити стійкість системи управління.

Окремий напрям сучасних досліджень пов'язаний із використанням транспортного моделювання та комп'ютерної симуляції. Імітаційні моделі дозволяють аналізувати різні режими роботи транспортної мережі, оцінювати ефективність алгоритмів управління та прогнозувати наслідки змін організації дорожнього руху. Використання симуляційних систем значно спрощує процес дослідження транспортних потоків та дозволяє проводити експерименти без ризику для реального дорожнього руху.

Сучасні технології управління дорожнім рухом також передбачають інтеграцію транспортних систем у єдине інформаційне середовище. У межах концепції інтелектуальних транспортних систем здійснюється об'єднання світлофорних об'єктів, транспортних детекторів, систем відеоспостереження та центрів управління рухом. Це дозволяє забезпечити централізований контроль транспортної ситуації та оперативне реагування на зміни дорожньої обстановки.

Важливим елементом сучасних транспортних технологій є використання систем пріоритетного пропуску громадського транспорту. Подібні системи дозволяють автоматично змінювати режими світлофорного регулювання для скорочення затримок автобусів, тролейбусів або трамваїв. Це

сприяє підвищенню ефективності роботи громадського транспорту та стимулює його використання в умовах міста.

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється також екологічним аспектам управління дорожнім рухом. Зменшення кількості зупинок транспортних засобів, оптимізація швидкісних режимів та скорочення часу простою на світлофорах дозволяють знизити рівень шкідливих викидів і витрати пального. У зв'язку з цим ефективне управління транспортними потоками розглядається не лише як транспортне, але і як важливе екологічне завдання.

Перспективним напрямом розвитку транспортних технологій є використання концепції «розумного міста». У межах цього підходу системи управління дорожнім рухом інтегруються з іншими міськими інформаційними системами, включаючи системи громадського транспорту, моніторингу навколишнього середовища та міської інфраструктури. Це дозволяє забезпечити комплексне управління транспортними процесами та підвищити ефективність функціонування міського середовища.

Незважаючи на значні досягнення у сфері транспортних технологій, сучасні системи управління дорожнім рухом мають низку проблем та обмежень. Серед них можна виділити складність масштабування адаптивних систем, необхідність значних фінансових витрат на впровадження сучасного обладнання, а також залежність ефективності управління від якості збору та обробки транспортної інформації.

Таким чином, сучасні дослідження у сфері управління дорожнім рухом спрямовані на створення більш гнучких, адаптивних та інтелектуальних систем регулювання транспортних потоків. Використання новітніх інформаційних технологій, методів штучного інтелекту та транспортного моделювання створює передумови для підвищення ефективності транспортної інфраструктури, зменшення транспортних затримок та покращення умов руху в сучасних містах.

1.7. Передумови розробки моделі управління транспортними потоками

Проведений аналіз особливостей функціонування сучасних транспортних систем показав, що проблема ефективного управління транспортними потоками залишається однією з найбільш актуальних у сфері організації дорожнього руху. Постійне збільшення кількості транспортних засобів, зростання інтенсивності руху та ускладнення структури міських транспортних мереж призводять до суттєвого навантаження на дорожню інфраструктуру. У великих містах транспортні потоки характеризуються високою нерівномірністю, значною кількістю конфліктних точок та постійною зміною умов руху залежно від часу доби, погодних умов та особливостей транспортного навантаження.

Одним із найбільш важливих елементів міської транспортної мережі є регульовані перехрестя, оскільки саме вони забезпечують організацію руху транспортних потоків різних напрямків та визначають рівень пропускну здатності дорожньої мережі в цілому. Ефективність роботи світлофорних об'єктів безпосередньо впливає на швидкість пересування транспортних засобів, рівень транспортних затримок, довжину транспортних черг та безпеку дорожнього руху. Недостатньо ефективна організація світлофорного регулювання призводить до значних втрат часу, збільшення витрат пального та погіршення екологічної ситуації у міському середовищі.

Особливу складність становить організація руху на взаємопов'язаних перехрестях, які розташовані на невеликій відстані одне від одного та функціонують у межах єдиного транспортного коридору. У подібних умовах робота одного світлофорного об'єкта безпосередньо впливає на транспортну ситуацію на сусідніх ділянках дорожньої мережі. Якщо режими світлофорного регулювання не є узгодженими між собою, транспортні засоби після проходження одного перехрестя змушені зупинятися перед наступним. Це призводить до накопичення транспортних засобів на міжперехресних

ділянках, зниження середньої швидкості руху та виникнення транспортних заторів.

У процесі аналізу сучасних систем світлофорного регулювання було встановлено, що значна кількість існуючих систем використовує фіксовані параметри світлофорного циклу. Подібний підхід є достатньо простим з точки зору реалізації, однак він не забезпечує необхідної гнучкості в умовах змінної інтенсивності транспортних потоків. При використанні жорстко заданих часових інтервалів світлофорне регулювання не враховує поточний стан дорожнього руху, кількість транспортних засобів перед перехрестям та особливості взаємодії суміжних транспортних вузлів. У результаті цього навіть за відносно невеликого транспортного навантаження можуть виникати значні затримки руху.

Водночас використання повністю адаптивних або інтелектуальних систем керування дорожнім рухом потребує значних технічних ресурсів, складних алгоритмів обробки інформації та застосування спеціалізованих засобів моніторингу транспортних потоків. Реалізація таких систем пов'язана з високою вартістю обладнання та складністю впровадження, особливо у вже сформованій міській інфраструктурі. Тому одним із перспективних напрямів удосконалення транспортних систем є створення математичних моделей, які дозволяють досліджувати транспортні процеси, оцінювати ефективність різних режимів світлофорного регулювання та визначати оптимальні параметри функціонування транспортної мережі.

Застосування математичного моделювання дає можливість аналізувати особливості функціонування транспортних потоків без необхідності проведення експериментів у реальних умовах дорожнього руху. Це дозволяє значно спростити процес дослідження, зменшити витрати часу та уникнути можливого негативного впливу на функціонування транспортної системи міста. За допомогою моделей можна досліджувати вплив окремих параметрів світлофорного циклу на ефективність руху, визначати закономірності

формування транспортних черг та оцінювати ефективність різних стратегій управління дорожнім рухом.

Особливого значення математичне моделювання набуває у випадку дослідження взаємопов'язаних перехресть. У таких системах необхідно враховувати не лише параметри окремого перехрестя, а й процес руху транспортних засобів між суміжними транспортними вузлами. Координація режимів світлофорного регулювання дозволяє забезпечити більш рівномірний рух транспортних потоків та створити умови для безперервного проходження транспортних засобів через декілька перехресть поспіль. Реалізація подібного підходу сприяє зменшенню кількості зупинок, скороченню часу затримок та підвищенню пропускнуої здатності транспортної мережі.

У межах проведеного аналізу встановлено, що одним із найбільш доцільних підходів до дослідження транспортних потоків є використання дискретно-клітинкових моделей. Подібний підхід дозволяє представляти дорожню мережу у вигляді окремих ділянок або клітин, у межах яких можуть розташовуватися транспортні засоби. Використання дискретного представлення транспортного потоку забезпечує можливість детального аналізу процесів руху, формування транспортних черг та зміни стану транспортної системи у часі.

Перевагою дискретно-клітинкового підходу є відносна простота реалізації при достатньо високій точності опису транспортних процесів. Подібні моделі дозволяють враховувати інтенсивність руху, швидкість транспортного потоку, часові параметри світлофорного циклу та особливості взаємодії транспортних засобів між собою. Крім того, використання такого підходу створює можливість проведення численних обчислювальних експериментів та аналізу різних режимів функціонування транспортної системи.

Необхідність координації роботи суміжних перехресть обумовлює потребу у визначенні параметрів, які забезпечують узгоджений рух транспортних потоків між транспортними вузлами. До таких параметрів

належать тривалість фаз світлофорного циклу, час зміни сигналів світлофора, швидкість руху транспортних засобів та відстань між перехрестями. Саме аналіз взаємозв'язку між цими параметрами дозволяє формувати режими світлофорного регулювання, які забезпечують мінімізацію транспортних затримок та підвищення ефективності функціонування транспортної системи.

Таким чином, результати проведеного теоретичного аналізу підтверджують необхідність побудови математичної моделі управління транспортними потоками для взаємопов'язаних регульованих перехресть. Розробка подібної моделі дозволить дослідити особливості координації світлофорного регулювання, визначити основні параметри функціонування транспортної системи та оцінити ефективність різних режимів організації дорожнього руху.

У другому розділі роботи буде розглянуто процес побудови математичної моделі системи світлофорного регулювання для двох взаємопов'язаних перехресть. Особливу увагу буде приділено визначенню основних критеріїв реалізації моделі, формуванню структури транспортної системи та опису процесу руху транспортних потоків у межах дискретно-клітинкового підходу. Також буде виконано математичний опис параметрів світлофорного циклу та взаємодії транспортних потоків між суміжними перехрестями.

У третьому розділі планується проведення практичного дослідження розробленої моделі та аналіз ефективності координованого управління транспортними потоками. Буде розглянуто приклад взаємодії двох регульованих перехресть, виконано розрахунок параметрів світлофорного регулювання та досліджено вплив узгодження режимів роботи світлофорних об'єктів на процес руху транспортних засобів. Отримані результати дозволять оцінити ефективність запропонованого підходу та визначити можливості його практичного застосування для вдосконалення систем управління дорожнім рухом.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РОБОТИ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

2.1 Ключові критерії побудови моделі керування світлофорним регулюванням

Сучасна транспортна інфраструктура великих міст функціонує в умовах постійного зростання інтенсивності дорожнього руху. Щорічне збільшення кількості транспортних засобів, розвиток міської забудови, поява нових житлових районів та комерційних зон створюють значне навантаження на дорожню мережу. Особливо складною є ситуація на регульованих перехрестях, де одночасно взаємодіють транспортні та пішохідні потоки різної інтенсивності. У таких умовах ефективність функціонування світлофornoї сигналізації безпосередньо впливає на рівень пропускнуої здатності доріг, тривалість затримок транспорту, безпеку учасників дорожнього руху та загальний стан транспортної системи міста.

Традиційні методи світлофорного регулювання базуються на використанні фіксованих часових циклів, параметри яких визначаються заздалегідь та змінюються лише у визначені проміжки часу. Подібний підхід є відносно простим у реалізації, однак він не дозволяє враховувати динамічні зміни транспортної ситуації. У результаті цього в одних напрямках можуть формуватися надмірні транспортні черги, тоді як інші підходи до перехрестя використовуються неефективно. Це призводить до збільшення часу простою автомобілів, перевитрат пального та погіршення екологічної ситуації.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває розробка адаптивних систем керування дорожнім рухом, здатних оперативно реагувати на зміну транспортних потоків. Такі системи базуються на використанні сучасних інформаційних технологій, методів математичного моделювання та алгоритмів інтелектуального аналізу даних. Основною особливістю

адаптивного світлофорного регулювання є можливість зміни параметрів роботи світлофорного об'єкта в режимі реального часу залежно від поточної дорожньої ситуації.

Одним із головних критеріїв, що враховуються під час побудови моделі керування світлофорною сигналізацією, є інтенсивність транспортного потоку. Саме цей параметр визначає ступінь завантаження підходів до перехрестя та впливає на тривалість фаз світлофорного циклу. У процесі функціонування системи здійснюється безперервний аналіз кількості транспортних засобів, що наближаються до перехрестя або перебувають у черзі. На основі отриманих даних система може автоматично змінювати тривалість зеленого сигналу для окремих напрямків руху.

При значному збільшенні транспортного потоку на певному підході доцільним є збільшення тривалості дозвільного сигналу. Це дозволяє зменшити довжину транспортної черги та скоротити час очікування водіїв. Водночас для напрямків із меншою інтенсивністю руху тривалість зеленої фази може бути зменшена. Подібний підхід забезпечує більш рівномірний розподіл транспортних потоків та підвищує ефективність використання пропускної здатності перехрестя.

Не менш важливим критерієм є забезпечення безпеки дорожнього руху. Перехрестя традиційно належать до найбільш небезпечних елементів транспортної інфраструктури, оскільки саме тут відбувається перетин транспортних і пішохідних потоків. Неправильно обрані параметри світлофорного циклу можуть призводити до виникнення аварійних ситуацій, конфліктів між учасниками дорожнього руху та збільшення ризику дорожньо-транспортних пригод.

Під час формування алгоритмів управління необхідно враховувати швидкість руху транспортних засобів, інтенсивність пішохідних потоків, наявність громадського транспорту та особливості дорожньої інфраструктури. Особливу увагу слід приділяти районам підвищеної небезпеки, зокрема

територіям поблизу навчальних закладів, медичних установ, торговельних центрів та пішохідних зон.

Суттєвий вплив на ефективність світлофорного регулювання має екологічний фактор. Під час тривалого простою на заборонений сигнал автомобілі продовжують працювати на холостому ходу, що супроводжується додатковими викидами шкідливих речовин у навколишнє середовище. Зростання кількості транспортних заторів негативно впливає на якість повітря у великих містах та створює додаткове навантаження на екосистему міського середовища.

Застосування адаптивних алгоритмів керування дозволяє скоротити час очікування транспортних засобів на перехрестях та зменшити рівень шкідливих викидів. Крім цього, зменшення кількості зупинок і повторних розгонів автомобілів сприяє економії пального та зниженню енергетичних витрат транспортної системи.

Важливою складовою сучасної системи світлофорного регулювання є врахування інтенсивності пішохідного руху. У центральних районах міст, біля зупинок громадського транспорту та місць масового скупчення людей кількість пішоходів може суттєво перевищувати середні показники. У таких умовах система повинна забезпечувати достатній часовий інтервал для безпечного переходу проїзної частини.

Для цього можуть використовуватися спеціальні датчики пішохідного руху, кнопки виклику дозвільного сигналу або системи автоматичного аналізу відеозображення. У разі збільшення інтенсивності пішохідного потоку система може автоматично продовжувати тривалість зеленого сигналу для пішоходів. Це особливо важливо для людей похилого віку, дітей та осіб з обмеженими можливостями.

Окрему роль у сучасних транспортних системах відіграє забезпечення пріоритетного руху спеціального транспорту. У разі наближення автомобілів швидкої допомоги, пожежної служби або поліції система керування повинна забезпечувати безперешкодний проїзд через регульоване перехрестя. Для

реалізації подібних функцій можуть використовуватися радіосигнали, GPS-моніторинг або спеціалізовані системи зв'язку між транспортними засобами та світлофорними об'єктами.

Крім транспортних факторів, система керування повинна враховувати часові характеристики руху. У ранкові та вечірні години пік транспортні потоки суттєво змінюють свою інтенсивність та напрямок. Наприклад, у ранковий час основний потік транспорту зазвичай спрямований у центральну частину міста, тоді як увечері спостерігається зворотна ситуація. Адаптивна система регулювання повинна враховувати ці особливості та змінювати параметри роботи світлофорів відповідно до поточної ситуації.

Значний вплив на дорожній рух мають погодні умови. Під час дощу, туману, снігопаду або ожеледиці погіршується видимість, збільшується гальмівний шлях транспортних засобів та зменшується середня швидкість руху. У таких умовах виникає необхідність коригування параметрів світлофорного циклу, зокрема збільшення тривалості жовтого сигналу та часових інтервалів між фазами.

Необхідно також враховувати особливості функціонування громадського транспорту. Автобуси, тролейбуси та трамваї повинні рухатися відповідно до встановленого графіка, тому система може надавати їм пріоритет під час проїзду перехресть. Це дозволяє підвищити ефективність роботи громадського транспорту та покращити якість транспортного обслуговування населення.

Суттєвий вплив на режими світлофорного регулювання мають особливості забудови міської території. У районах із високою щільністю населення та значною концентрацією транспортних потоків необхідно використовувати більш гнучкі алгоритми керування рухом. У таких випадках застосування адаптивних систем дозволяє уникнути виникнення критичних заторів та забезпечити стабільне функціонування транспортної мережі.

Особливої уваги потребує організація дорожнього руху поблизу об'єктів критичної інфраструктури – вокзалів, лікарень, адміністративних центрів,

аеропортів та великих торговельних комплексів. Для таких зон характерне різке коливання транспортного навантаження залежно від часу доби або проведення масових заходів.

Проведення концертів, спортивних подій, фестивалів або громадських заходів також може суттєво впливати на транспортну ситуацію. У подібних умовах адаптивна система управління повинна оперативно реагувати на зміну інтенсивності транспортних потоків та забезпечувати безпечний рух усіх учасників дорожнього процесу.

Отже, сучасна модель керування світлофорною сигналізацією повинна враховувати велику кількість взаємопов'язаних факторів. Використання інтелектуальних методів аналізу та адаптивних алгоритмів дозволяє значно підвищити ефективність регулювання дорожнього руху, скоротити транспортні затори, зменшити рівень забруднення навколишнього середовища та підвищити рівень безпеки дорожнього руху.

2.2 Математична модель керування світлофорною сигналізацією

У даному дослідженні розглядається модель керування світлофорною сигналізацією, основною особливістю якої є можливість адаптації параметрів роботи світлофорного об'єкта залежно від кількості транспортних засобів, що накопичуються на підходах до перехрестя під час дії забороненого сигналу. Запропонований підхід спрямований на підвищення ефективності функціонування транспортної системи шляхом регулювання довжини транспортних черг та зменшення часу затримки автомобілів.

На сучасному етапі розвитку транспортних систем проблема перевантаження міських перехресть є однією з найбільш актуальних. Зростання кількості транспортних засобів призводить до збільшення інтенсивності руху, виникнення заторів та зниження середньої швидкості транспортного потоку. Особливо складною є ситуація на регульованих

перехрестях, де неефективно підібрані параметри світлофорного циклу можуть спричиняти значне накопичення автомобілів у межах окремих напрямків руху.

Для вирішення зазначеної проблеми доцільним є використання математичних моделей, які дозволяють аналізувати процеси руху транспортних потоків та визначати оптимальні параметри світлофорного регулювання. У даній роботі для моделювання транспортної системи використовується дискретна клітинкова модель перехрестя.

Клітинкові моделі є одним із найбільш поширених інструментів дослідження транспортних потоків. Їх основною перевагою є відносна простота реалізації та можливість детального відображення процесів руху транспортних засобів. У межах такого підходу дорожня мережа представляється у вигляді набору окремих клітинок однакового розміру. Кожна клітинка може перебувати лише в одному з двох можливих станів: бути вільною або зайнятою автомобілем.

Подібний підхід дозволяє імітувати процес переміщення транспортних засобів по дорожній мережі через дискретні часові інтервали. У кожний момент часу автомобіль може перейти лише до сусідньої клітинки за умови, що вона не зайнята іншим транспортним засобом. Якщо наступна клітинка є зайнятою, автомобіль залишається на місці, внаслідок чого формується транспортна черга.

У межах дослідження розглядається класичне Х-подібне перехрестя з чотирма підходами. Кожен підхід характеризується власною інтенсивністю транспортного потоку та параметрами руху. Перехрестя є регульованим і обладнане світлофорним об'єктом, який функціонує у двофазному режимі. У першій фазі дозвільний сигнал отримують напрямки 1–3, тоді як напрямки 2–4 перебувають у режимі забороненого сигналу. У другій фазі ситуація змінюється навпаки.

Такий принцип організації руху є одним із найбільш поширених у транспортній практиці, оскільки дозволяє ефективно розділяти конфліктні транспортні потоки та забезпечувати безпечний проїзд перехрестя.

Першим етапом побудови математичної моделі є визначення основних параметрів транспортної системи. До таких параметрів належать довжина підходів до перехрестя, кількість клітинок дорожньої мережі, часові інтервали між транспортними засобами та характеристики транспортного потоку для кожного окремого напрямку.

Після визначення параметрів системи формується модель руху транспортних засобів. Переміщення автомобілів між сусідніми клітинками здійснюється через однакові проміжки часу Δt . Якщо попереду розташована клітинка є вільною, автомобіль переміщується вперед. У випадку, коли наступна клітинка зайнята іншим автомобілем, транспортний засіб змушений очікувати звільнення ділянки дороги. Саме цей процес і призводить до утворення транспортних черг перед перехрестям.

Важливим етапом дослідження є розробка алгоритму керування світлофорною сигналізацією. Основним критерієм регулювання у запропонованій моделі виступає допустима кількість транспортних засобів, що можуть накопичуватися на підході до перехрестя під час дії забороненого сигналу.

Алгоритм функціонування системи передбачає постійний аналіз кількості автомобілів, які перебувають у черзі на кожному напрямку руху. На основі отриманої інформації здійснюється визначення необхідної тривалості фаз світлофорного циклу. У разі перевищення встановленого значення кількості транспортних засобів система автоматично коригує параметри роботи світлофора для забезпечення більш ефективного розосередження транспортного потоку.

Після побудови дискретної моделі перехрестя необхідно детально проаналізувати принцип функціонування транспортної системи в умовах

дії світлофорного регулювання. Для цього вводиться набір параметрів, які дозволяють описати процес руху транспортних засобів, накопичення автомобілів перед стоп-лінією та формування транспортних черг під час дії забороненого сигналу світлофора.

Особливістю запропонованої моделі є використання дискретного принципу представлення дорожньої мережі. У межах такого підходу дорожня ділянка поділяється на окремі клітинки однакового розміру, кожна з яких у певний момент часу може бути або вільною, або зайнятою транспортним засобом. Подібний підхід дозволяє спростити процес математичного опису транспортних потоків та забезпечує можливість проведення імітаційного моделювання роботи перехрестя.

У реальних умовах транспортний потік є складною динамічною системою, у якій постійно змінюються швидкість руху, щільність транспортних засобів та інтенсивність надходження автомобілів до перехрестя. Саме тому використання дискретної клітинкової моделі є доцільним, оскільки вона дозволяє описувати процес руху транспорту через прості правила переміщення між сусідніми клітинками.

Кожен автомобіль у межах моделі займає одну клітинку та може переміщуватися лише вперед у напрямку руху транспортного потоку. Переміщення транспортних засобів здійснюється через однакові часові інтервали Δt . Якщо клітинка попереду є вільною, автомобіль переходить до неї. У випадку, коли наступна клітинка зайнята іншим автомобілем, транспортний засіб змушений залишатися на місці до моменту звільнення ділянки дороги.

Саме такий механізм дозволяє моделювати процес утворення транспортних заторів та накопичення черг перед регульованим перехрестям. Під час дії забороненого сигналу світлофора автомобілі поступово накопичуються перед стоп-лінією, формуючи транспортну чергу, довжина якої залежить від інтенсивності транспортного потоку та тривалості червоної фази.

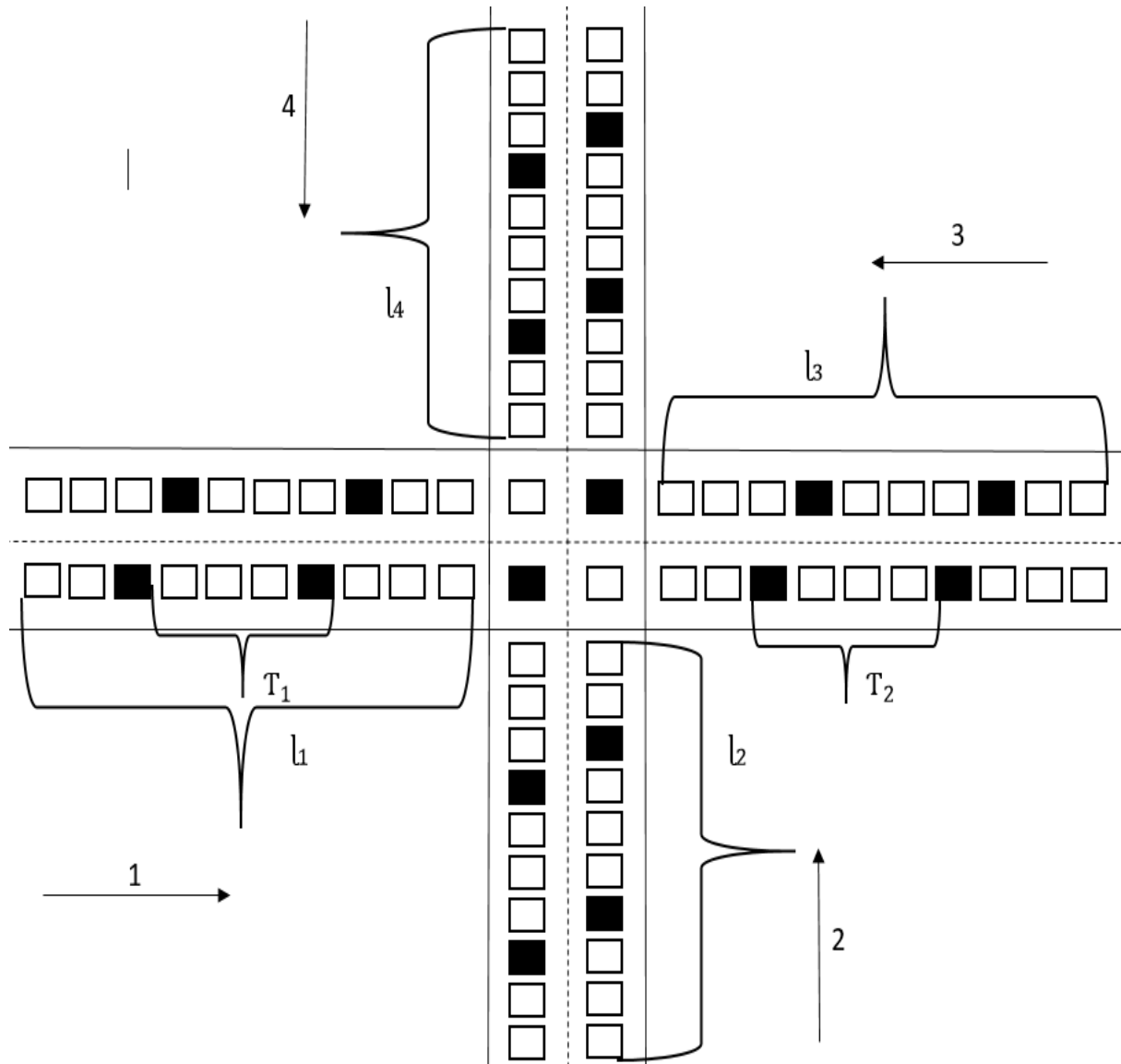


Рис. 2.1 – Дискретна модель перехрестя

Для математичного опису транспортної системи вводяться основні параметри моделі, які характеризують інтенсивність руху транспортних потоків та геометричні параметри дорожньої мережі (табл.2.1).

Таблиця 2.1

Вхідні параметри моделі

Позначення	Опис	Одиниця виміру
Δt	Час, за який в систему перехрестя прибуває один новий автомобіль (усереднений для кожного з підходів до перехрестя)	Секунди
T_1	Середній часовий інтервали між сусідніми машинами для підходу 1 перехрестя	Секунди
T_2	Середній часовий інтервали між сусідніми машинами для підходу 2 перехрестя	Секунди
T_3	Середній часовий інтервали між сусідніми машинами для підходу 3 перехрестя	Секунди
T_4	Середній часовий інтервали між сусідніми машинами для підходу 4 перехрестя	Секунди
l_1	Відстань (в кількостях клітин) від початку мережі до перехрестя для підходу 1 перехрестя	Одиниць
l_2	Відстань (в кількостях клітин) від початку мережі до перехрестя для підходу 2 перехрестя	Одиниць
l_3	Відстань (в кількостях клітин) від початку мережі до перехрестя для підходу 3 перехрестя	Одиниць

l_4	Відстань (в кількостях клітин) від початку мережі до перехрестя для підходу 4 перехрестя	Одиниць
-------	--	---------

Після введення основних параметрів системи необхідно визначити залежність між кількістю автомобілів, що накопичуються перед перехрестям, та тривалістю забороненого сигналу світлофора. Для цього використовується параметр p , який характеризує кількість транспортних засобів, що накопичуються на підході під час дії червоного сигналу.

Використання даного параметра дозволяє адаптувати тривалість світлофорного циклу залежно від реальної транспортної ситуації. Чим більшим є значення p , тим більшою буде тривалість відповідної фази світлофорного регулювання. Подібний підхід дозволяє запобігати надмірному накопиченню транспортних засобів на окремих напрямках руху.

Для виведення математичних залежностей будується допоміжна схема руху автомобілів. Вона дозволяє наочно представити процес переміщення транспортних засобів у межах системи перехрестя та дослідити механізм формування транспортної черги.

Під час побудови допоміжної схеми розглядається лише один із підходів до перехрестя. Це дозволяє спростити процес аналізу та зосередитися на закономірностях руху транспортного потоку.

Схема являє собою послідовність часових станів системи, у межах яких відображається положення автомобілів у різні моменти часу. Інтервал між сусідніми рядками схеми дорівнює Δt , тобто часу, за який транспортний засіб може зміститися на одну клітинку вперед.

У початковий момент часу в систему надходять перші транспортні засоби. Автомобілі займають початкові клітинки дорожньої мережі та починають рух у напрямку перехрестя. Після завершення першого часового інтервалу всі автомобілі зміщуються вперед на одну клітинку за умови, що попереду є вільне місце.

Одночасно з переміщенням транспортних засобів до системи можуть надходити нові автомобілі. У результаті цього відбувається поступове збільшення щільності транспортного потоку на підході до перехрестя.

Після другого часового інтервалу автомобілі знову переміщуються вперед. Якщо певна клітинка виявляється зайнятою іншим транспортним засобом, автомобіль не може продовжити рух і залишається на місці. Саме в цей момент починає формуватися транспортна черга.

На наступних етапах моделювання процес накопичення автомобілів продовжується. У разі тривалої дії забороненого сигналу кількість транспортних засобів перед стоп-лінією поступово збільшується, а довжина черги зростає.

Подібна схема дозволяє дослідити динаміку накопичення транспортних засобів, визначити критичні параметри транспортного потоку та оцінити вплив тривалості забороненого сигналу на ефективність функціонування перехрестя.

Крім цього, допоміжна схема руху автомобілів дозволяє оцінити процес розосередження транспортного потоку після ввімкнення дозвільного сигналу. Після зміни фази світлофора автомобілі починають поступово залишати зону перехрестя, а довжина транспортної черги зменшується.

Аналіз подібних процесів є особливо важливим під час розробки адаптивних систем керування дорожнім рухом, оскільки дозволяє визначити оптимальні параметри роботи світлофornoї сигналізації для різних режимів транспортного навантаження.

1	Δt_0	3 2 1
2	Δt_1	3 2 1
3	Δt_2	4 3 2 1
4	Δt_3	4 3 2 1
5	Δt_4	4 3 2 1
6	Δt_5	5 4 3 2 1
7	Δt_6	5 4 3 2 1
8	Δt_7	5 4 3 2 1
9	Δt_8	6 5 4 3 2 1
10	Δt_9	6 5 4 3 2 1
11	Δt_{10}	6 5 4 3 2 1
12	Δt_{11}	7 6 5 4 3 2 1
13	Δt_{12}	7 6 5 4 3 2 1
14	Δt_{13}	7 6 5 4 3 2 1
15	Δt_{14}	8 7 6 5 4 3 2 1
16	Δt_{15}	8 7 6 5 4 3 2 1
17	Δt_{16}	8 7 6 5 4 3 2 1
18	Δt_{17}	9 8 7 6 5 4 3 2 1
19	Δt_{18}	9 8 7 6 5 4 3 2 1
20	Δt_{19}	9 8 7 6 5 4 3 2 1

Рис. 2.2 – Схема руху машин

Для визначення тривалості забороненої фази для першого підходу спочатку необхідно розрахувати час, потрібний для накопичення першого автомобіля перед стоп-лінією перехрестя. Це значення визначається довжиною підходу та часовими характеристиками руху транспортного потоку.

Тривалість забороненої фази для першого автомобіля визначається за формулою:

$$T_q^1(p) = (T_1 - 1).$$

Отримана залежність характеризує початковий момент накопичення транспортного потоку на першому підході до перехрестя.

Наступним етапом є визначення аналогічного значення для другого автомобіля. Очевидно, що час накопичення другого транспортного засобу буде більшим за попереднє значення на величину Δt_1 , оскільки автомобілі прибувають до системи через певні часові інтервали.

Аналогічний принцип використовується і для всіх наступних транспортних засобів. Кожне нове значення тривалості забороненої фази буде збільшуватися відповідно до часових інтервалів між сусідніми автомобілями.

Тоді для довільного значення p формула набуває вигляду:

$$T_{(ч)}^1(p) = (T_1 - 1) \cdot p \cdot \Delta t_1$$

Дана залежність показує, що тривалість забороненої фази безпосередньо залежить від кількості транспортних засобів, які накопичуються на підході до перехрестя. Зі збільшенням значення p пропорційно зростає і тривалість відповідної фази світлофорного циклу.

Подібний підхід дозволяє реалізувати адаптивний принцип керування транспортними потоками, за якого параметри роботи світлофорного об'єкта змінюються залежно від поточної дорожньої ситуації.

Аналогічним способом визначаються залежності для інших напрямків руху:

$$T_{(ч)}^2(p) = (T_2 - 1) \cdot p \cdot \Delta t_2$$

$$T_{(ч)}^3(p) = (T_3 - 1) \cdot p \cdot \Delta t_3$$

$$T_{(ч)}^4(k) = (T_4 - 1) \cdot p \cdot \Delta t_3$$

Отримані залежності дозволяють окремо оцінити характеристики транспортних потоків для кожного підходу до перехрестя. Оскільки інтенсивність руху на різних напрямках може суттєво відрізнятися, тривалості фаз також можуть мати різні значення.

Для забезпечення ефективної роботи двофазної системи світлофорного регулювання необхідно визначити максимальні значення тривалостей фаз для груп напрямків 1–3 та 2–4.

У такому випадку параметри світлофорного регулювання визначаються системою:

$$\begin{cases} T_{ч}^{(1-3)}(p) = \max[T_{ч}^1(p); T_{ч}^3(p)] \\ T_{ч}^{(2-4)}(p) = \max[T_{ч}^2(p); T_{ч}^4(k)] \end{cases}$$

Використання функції максимуму дозволяє врахувати найбільш навантажений напрямок руху в межах відповідної фази світлофорного циклу. Це забезпечує більш ефективне розосередження транспортних потоків та запобігає надмірному накопиченню автомобілів.

Остаточні значення заборонених фаз визначаються за виразами:

$$\begin{cases} T_q^{(1-3)}(p) = T_3^{(2-4)}(p) \\ T_q^{(2-4)}(p) = T_3^{(1-3)}(p) \end{cases}$$

Отримані залежності описують взаємозв'язок між фазами світлофорного циклу та дозволяють визначити оптимальні параметри роботи системи регулювання.

Повний світлофорний цикл визначається сумою тривалостей знайдених фаз:

$$T_q(p) = T_q^{(1-3)}(p) + T_q^{(2-4)}(p)$$

Повертаючись до початкових параметрів системи, остаточно залежність для визначення повного світлофорного циклу матиме вигляд:

$$T_q(p) = \max[(T_1 - 1) \cdot p \cdot \Delta t_1; (T_3 - 1) \cdot p \cdot \Delta t_3] + \\ + \max[(T_2 - 1) \cdot p \cdot \Delta t_2; (T_4 - 1) \cdot p \cdot \Delta t_4]$$

Отримана математична модель дозволяє визначати параметри світлофорного регулювання залежно від допустимої кількості автомобілів, що накопичуються на підходах до перехрестя. Основною перевагою запропонованого підходу є можливість штучного обмеження довжини транспортних черг та запобігання утворенню критичних заторів.

Запропонована система може бути використана для модернізації існуючих світлофорних об'єктів у межах міських транспортних мереж. Її застосування дозволить підвищити ефективність регулювання дорожнього руху, скоротити затримки транспортних засобів та покращити загальний рівень функціонування транспортної інфраструктури міста.

2.3 Оцінювання ефективності функціонування світлофорної системи

Ефективність роботи світлофорної сигналізації визначається не лише тривалістю світлофорного циклу, а й показниками функціонування транспортної системи загалом. До основних критеріїв оцінювання ефективності регульованого перехрестя належать середній час затримки транспортних засобів, довжина транспортної черги, рівень завантаження підходів та пропускна здатність перехрестя.

Одним із найбільш важливих показників є середній час затримки транспортних засобів перед перехрестям. Даний параметр характеризує ефективність організації дорожнього руху та дозволяє оцінити рівень транспортних втрат, що виникають унаслідок очікування дозволу на проїзд перехрестя.

Для визначення середнього часу затримки транспортних засобів використовується залежність:

$$t_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$$

де t_i – час затримки окремого транспортного засобу;

n – кількість автомобілів у транспортному потоці.

Отримане значення дозволяє оцінити ефективність роботи системи світлофорного регулювання. Зменшення середнього часу затримки свідчить про підвищення ефективності організації дорожнього руху та скорочення транспортних втрат.

Важливим параметром транспортної системи є також коефіцієнт завантаження підходу до перехрестя. Даний показник характеризує ступінь заповнення дорожньої ділянки транспортними засобами та дозволяє оцінити ризик виникнення заторної ситуації.

Коефіцієнт завантаження визначається за формулою:

$$k_i = \frac{N_i}{L_i}$$

де N_i – кількість транспортних засобів на підході;

L_i – максимальна місткість підходу.

У випадку, коли значення коефіцієнта наближається до одиниці, транспортний потік переходить у перевантажений стан, що може призвести до формування транспортного затору. За малих значень коефіцієнта транспортний потік є вільним, а рух транспортних засобів здійснюється без суттєвих затримок.

Для оцінювання ефективності роботи регульованого перехрестя також використовується показник пропускної здатності. Він характеризує максимальну кількість транспортних засобів, які можуть пройти через перехрестя за одиницю часу.

Пропускна здатність визначається залежністю:

$$Q = \frac{N}{T_{\text{ц}}}$$

де Q – пропускна здатність перехрестя;

N – кількість транспортних засобів;

$T_{\text{ц}}$ – тривалість світлофорного циклу.

Зі збільшенням тривалості циклу може покращуватися пропуск транспортних потоків для окремих напрямків руху, однак надмірне збільшення часу фаз здатне призводити до зростання затримок на інших підходах. Саме тому під час налаштування параметрів світлофорного регулювання необхідно забезпечувати баланс між пропускною здатністю та середнім часом затримки транспортних засобів.

Додатково ефективність транспортної системи може оцінюватися за допомогою сумарної довжини транспортних черг. Надмірне накопичення автомобілів на підходах до перехрестя негативно впливає на функціонування дорожньої мережі та може призводити до блокування суміжних ділянок дороги.

Запропонована модель дозволяє контролювати процес накопичення транспортних засобів та обмежувати максимальну довжину транспортної черги шляхом адаптивної зміни параметрів світлофорного циклу.

2.4 Адаптивне керування транспортними потоками

Сучасні транспортні системи характеризуються постійною зміною інтенсивності дорожнього руху залежно від часу доби, погодних умов, проведення масових заходів та інших факторів. У зв'язку з цим використання фіксованих режимів світлофорного регулювання не завжди забезпечує ефективне функціонування транспортної мережі.

Для підвищення ефективності організації дорожнього руху доцільним є використання адаптивних алгоритмів керування світлофорною сигналізацією. Основною особливістю таких систем є можливість автоматичної зміни параметрів світлофорного циклу залежно від поточної транспортної ситуації.

У межах запропонованої моделі вводиться коефіцієнт адаптації системи керування:

$$A = \frac{p_{\text{поточне}}}{p_{\text{допустиме}}}$$

де $p_{\text{поточне}}$ — поточна кількість транспортних засобів у черзі;

$p_{\text{допустиме}}$ — допустиме значення кількості автомобілів.

Даний коефіцієнт дозволяє оцінити рівень завантаження транспортної системи. Якщо значення A перевищує одиницю, це свідчить про

перевантаження підходу до перехрестя та необхідність збільшення тривалості зеленої фази. У випадку, коли значення коефіцієнта є меншим за одиницю, тривалість світлофорного циклу може бути скорочена.

Для забезпечення ефективного функціонування транспортної системи доцільним є використання оптимізаційного підходу до керування дорожнім рухом. Основною метою оптимізації є мінімізація сумарного часу затримки транспортних засобів на регульованому перехресті.

Функція оптимізації може бути представлена у вигляді:

$$F = \min \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)$$

де t_i – час затримки окремого транспортного засобу;

n – кількість автомобілів у системі.

Застосування подібного критерію дозволяє зменшити транспортні втрати та забезпечити більш рівномірний розподіл транспортних потоків між напрямками руху.

У реальних умовах транспортні потоки мають випадковий характер, тому під час моделювання доцільно враховувати імовірнісні характеристики прибуття автомобілів до перехрестя. Для опису випадкового надходження транспортних засобів може використовуватися розподіл Пуассона:

$$P(n) = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!}$$

де λ – середня інтенсивність транспортного потоку;

n – кількість транспортних засобів.

Використання імовірнісного підходу дозволяє більш точно відображати реальні умови функціонування транспортної системи та враховувати нерівномірність транспортних потоків у різні періоди часу.

Для реалізації адаптивного керування може використовуватися наступний алгоритм роботи системи:

1. Зчитування даних про кількість транспортних засобів на кожному підході.
2. Визначення коефіцієнта завантаження транспортної системи.
3. Аналіз поточного значення параметра A .
4. Розрахунок оптимальної тривалості фаз світлофорного циклу.
5. Зміна параметрів роботи світлофорної сигналізації.
6. Повторення циклу аналізу через визначений часовий інтервал.

Запропонований підхід дозволяє забезпечити більш ефективне функціонування транспортної системи в умовах змінної інтенсивності дорожнього руху. Використання адаптивних алгоритмів керування дає можливість скоротити час затримки транспортних засобів, зменшити довжину транспортних черг та підвищити пропускну здатність регульованих перехресть.

2.5 Висновки

У другому розділі було розглянуто основні принципи побудови моделі керування світлофорною сигналізацією в умовах змінної інтенсивності транспортних потоків. Проведений аналіз показав, що ефективність функціонування регульованих перехресть значною мірою залежить від правильного вибору параметрів світлофорного циклу, а також від здатності системи адаптуватися до поточної транспортної ситуації. Визначено основні критерії функціонування системи керування, серед яких інтенсивність транспортного потоку, довжина транспортних черг, середній час затримки транспортних засобів та пропускну здатність перехрестя.

У межах дослідження було побудовано дискретну клітинкову модель перехрестя, яка дозволяє описувати процес руху транспортних засобів у вигляді переміщення між окремими клітинками дорожньої мережі.

Запропонований підхід дав можливість формалізувати процес накопичення автомобілів під час дії забороненого сигналу світлофора та отримати математичні залежності для визначення тривалості фаз світлофорного циклу. Розроблена модель дозволяє враховувати кількість транспортних засобів на кожному підході до перехрестя та змінювати параметри регулювання відповідно до рівня транспортного навантаження.

У процесі дослідження також було розглянуто показники оцінювання ефективності функціонування світлофорної системи. Введено залежності для визначення середнього часу затримки транспортних засобів, коефіцієнта завантаження підходів та пропускної здатності регульованого перехрестя. Використання зазначених параметрів дозволяє виконувати комплексний аналіз транспортної ситуації та оцінювати ефективність роботи системи світлофорного регулювання за різних режимів функціонування транспортної мережі.

Особливу увагу у розділі приділено адаптивному керуванню транспортними потоками. Запропоновано використання коефіцієнта адаптації системи, який дозволяє автоматично коригувати параметри світлофорного циклу залежно від поточного рівня завантаження перехрестя. Крім цього, було розглянуто оптимізаційний підхід до керування дорожнім рухом, основною метою якого є мінімізація сумарного часу затримки транспортних засобів. Використання елементів імовірнісного моделювання дозволило врахувати випадковий характер надходження автомобілів до перехрестя та наблизити модель до реальних умов функціонування транспортної системи.

Отримані результати підтверджують доцільність використання адаптивних моделей світлофорного регулювання для підвищення ефективності організації дорожнього руху. Запропонована модель може бути використана як основа для подальшого вдосконалення інтелектуальних систем керування транспортними потоками та впровадження сучасних автоматизованих засобів управління міською транспортною інфраструктурою.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЬ КООРДИНАЦІЇ РОБОТИ ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНИХ ПЕРЕХРЕСТЬ

3.1 Побудова дискретно-клітинкової моделі взаємопов'язаних перехресть

Для побудови запропонованої моделі управління транспортними потоками використовується дискретно-клітинковий підхід до опису транспортної мережі [3–5]. Даний метод моделювання є одним із найбільш поширених способів дослідження транспортних систем, оскільки дозволяє достатньо просто описувати процес руху транспортних засобів та формування транспортних потоків на регульованих ділянках дорожньої мережі.

Суть дискретно-клітинкового підходу полягає у поділі транспортної мережі на окремі елементарні ділянки — клітинки. Кожна клітинка може перебувати лише в одному із двох можливих станів: вільному або зайнятому транспортним засобом. Для наочного подання станів клітинок використовується умовне графічне позначення: чорним кольором позначаються зайняті клітинки, а білим — вільні.

Процес переміщення транспортних засобів у межах моделі здійснюється шляхом послідовного переходу автомобілів між сусідніми клітинками через однакові проміжки часу. Такий процес умовно можна розглядати як «стрибкоподібний» рух автомобілів уздовж транспортної мережі. При цьому важливою умовою є те, що переміщення можливе лише у вільну клітинку. Якщо наступна клітинка вже зайнята іншим транспортним засобом, автомобіль змушений очікувати її звільнення. Саме така особливість дискретно-клітинкових моделей дозволяє описувати процес утворення транспортних заторів та накопичення автомобілів перед регульованими перехрестями.

На відміну від безперервних математичних моделей транспортних потоків, дискретно-клітинковий підхід дозволяє враховувати індивідуальний

рух окремих транспортних засобів, а також досліджувати вплив режимів світлофорного регулювання на формування черг та зміну інтенсивності руху.

У межах даного дослідження розглядається транспортна мережа, яка складається із двох взаємопов'язаних регульованих перехресть, розташованих послідовно одне за одним. Для зручності подальшого аналізу перше перехрестя будемо називати «перехрестя 1», а друге — «перехрестя 2». Передбачається, що між зазначеними перехрестями існує транспортний зв'язок, у межах якого здійснюється переміщення групи транспортних засобів.

На головному напрямку руху перед перехрестям 1 формується група автомобілів фіксованої чисельності, яка надалі повинна безперешкодно пройти через обидва регульовані перехрестя. Саме забезпечення координованого пропуску цієї групи транспортних засобів є основною задачею побудови моделі.

Однією з основних переваг запропонованого підходу є можливість дослідження процесу координації світлофорних сигналів між суміжними перехрестями. У сучасних міських транспортних системах неузгоджена робота світлофорів часто призводить до накопичення значних транспортних черг між перехрестями, збільшення часу затримки автомобілів та зниження пропускної здатності транспортної мережі. Саме тому питання синхронізації режимів роботи світлофорної сигналізації є важливим напрямком розвитку інтелектуальних транспортних систем.

У моделі передбачається, що обидва перехрестя обладнані світлофорними об'єктами, які працюють у двофазному режимі регулювання. При цьому одна із фаз забезпечує дозвіл руху для головного напрямку, а інша — виконує функцію забороненого сигналу.

Для спрощення подальших математичних перетворень у межах дослідження розглядаються лише загальні тривалості фаз світлофорного циклу без окремого поділу на основні та проміжні такти. Такий підхід дозволяє сконцентрувати увагу саме на процесі координації транспортних потоків між взаємопов'язаними перехрестями. У випадку практичного впровадження

отриманих результатів значення проміжних тактів можуть бути додатково враховані відповідно до чинних нормативних документів у сфері організації дорожнього руху.

Для побудови математичної моделі вводяться основні параметри транспортної системи, які характеризують особливості функціонування досліджуваної мережі. До таких параметрів належать тривалості фаз світлофорного регулювання, тривалості світлофорних циклів, кількість транспортних засобів у групі, відстань між перехрестями, ширина перехресть та часовий інтервал переміщення автомобілів між сусідніми клітинками.

Використання зазначених параметрів дозволяє формалізувати процес руху транспортних потоків у межах транспортної мережі та виконати подальше математичне моделювання процесу координації роботи світлофорної сигналізації.

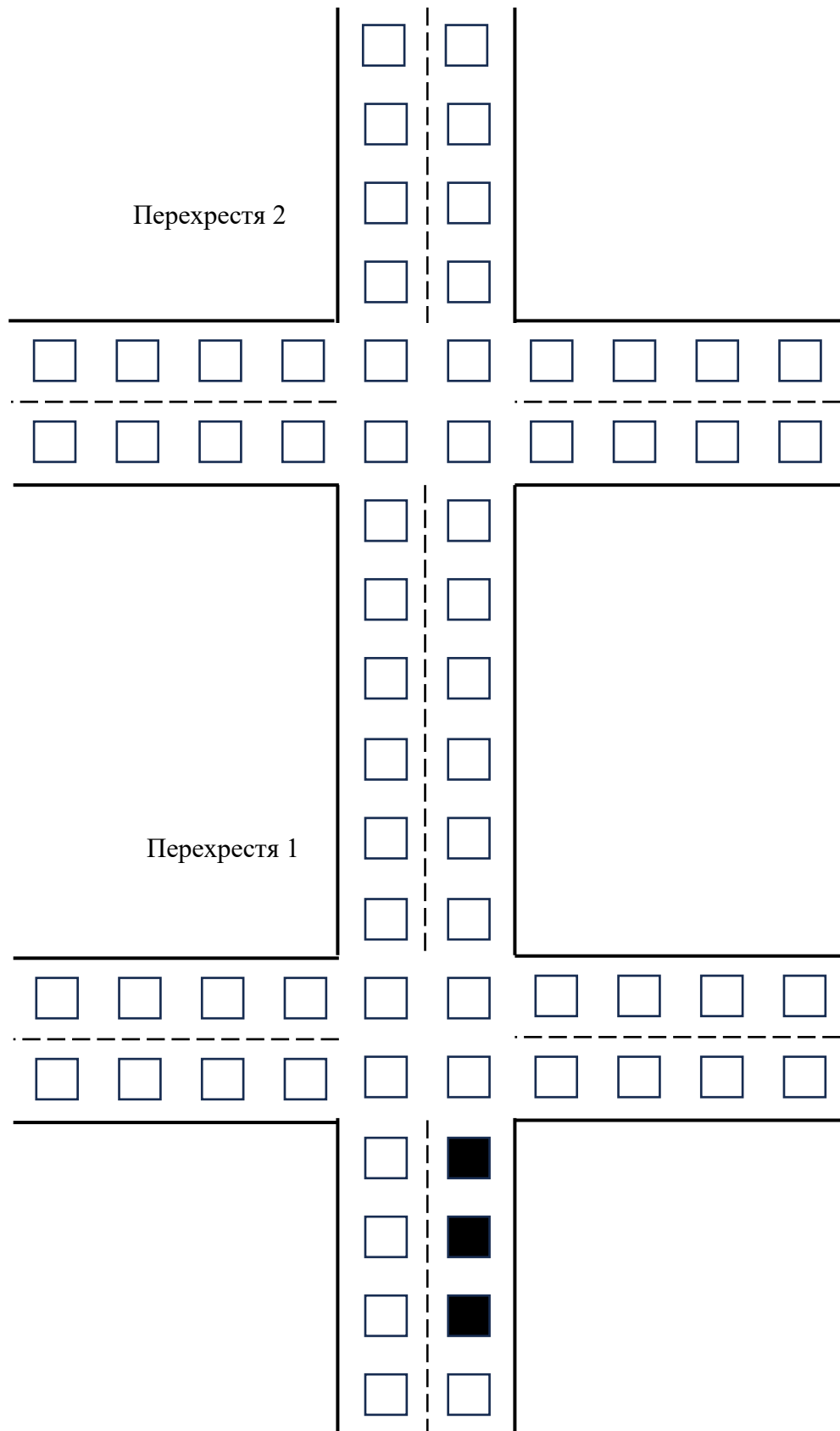


Рис. 3.1 – Клітинкова модель транспортної мережі з двох перехресть,
розташованих одне за одним

Процес управління починається в деякий початковий момент часу. Припустимо, що в цей момент зазначена група автомобілів вже розташована на підході. Будемо вважати, що обидва перехрестя оснащені світлофорними сигналізаціями, які працюють в двофазних режимах.

Для зручності подальших розмірковувань, будемо розглядати тільки тривалості світлофорних фаз без поділення їх на основні та проміжні такти. Якщо для практичного застосування необхідно буде встановлення конкретних значень тактів, то потрібно буде зі значень тривалостей фаз відняти відповідні рекомендовані фіксовані значення проміжних тактів для отримання значень тривалостей основних тактів.

Введемо необхідні вхідні параметри моделі, що показано в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Параметри моделі

№	Позначення параметру	Назва параметру	Одиниця виміру параметру
Вхідні параметри моделі			
1	t_0	Початковий момент часу	одиниць часу
2	k	Кількість автомобілів в групі	одиниць
3	T_C^1	Тривалість циклу першого перехрестя	одиниць часу
4	T_{F1}^1	Тривалість першої (дозволеної) фази першого перехрестя	одиниць часу
5	T_{F2}^1	Тривалість другої (забороненої) фази першого перехрестя	одиниць часу
6	T_C^2	Тривалість циклу другого перехрестя	одиниць часу
7	T_{F1}^2	Тривалість першої (забороненої) фази другого перехрестя	одиниць часу
8	T_{F2}^2	Тривалість другої (дозволеної) фази другого перехрестя	одиниць часу
9	L_{1-2}	Відстань (у клітинках) між перехрестями	одиниць
10	S_p	Ширина кожного з перехресть (у клітинках)	одиниць

11	Δt	Час, за який один автомобіль переміщується із однієї клітинки в сусідню	одиниць часу
----	------------	---	--------------

3.2 Розрахунок параметрів світлофорного регулювання для системи взаємопов'язаних перехресть

Після побудови дискретно-клітинкової моделі транспортної мережі наступним етапом дослідження є визначення параметрів світлофорного регулювання для двох взаємопов'язаних перехресть. Основною задачею даного етапу є забезпечення узгодженого режиму роботи світлофорних об'єктів, за якого група транспортних засобів зможе проходити систему перехресть із мінімальними затримками та без утворення додаткових транспортних черг.

У межах дослідження приймається, що в початковий момент часу на першому перехресті для головного напрямку руху вмикається дозволений сигнал світлофора. У той самий момент часу на другому перехресті для цього ж напрямку повинен діяти заборонений сигнал. Подібна організація роботи світлофорів дозволяє забезпечити синхронізацію руху транспортного потоку між двома регульованими ділянками дорожньої мережі.

Заборонений сигнал на другому перехресті повинен працювати до того моменту, поки перший автомобіль із сформованої групи транспортних засобів не досягне межі другого перехрестя. Таким чином, тривалість забороненої фази другого перехрестя визначається часом, необхідним транспортному засобу для подолання ширини першого перехрестя та відстані між двома регульованими об'єктами.

Знайдемо через який час від початку відліку необхідно увімкнути на другому перехресті дозволений сигнал, інакшими словами, знайдемо тривалість забороненої фази перехрестя 2:

$$T_{F1}^2 = (S_p + L_{1-2}) \cdot \Delta t$$

Отримана залежність дозволяє визначити момент часу, у який необхідно увімкнути дозволений сигнал на другому перехресті для забезпечення безперервного руху транспортного потоку.

Наступним етапом дослідження є визначення тривалості дозволеної фази першого перехрестя. Даний параметр повинен забезпечити проходження всієї групи транспортних засобів через зону перехрестя без виникнення затримок або розриву транспортного потоку.

Для аналізу процесу проходження автомобілів через перехрестя будується допоміжна схема зміни положення транспортних засобів у транспортній мережі. На основі такої схеми можна визначити часові характеристики руху автомобілів та встановити закономірності зміни положення транспортних засобів у клітинковій системі.

Розглянемо випадок, коли ширина перехрестя становить $S_p=2$.

У цьому випадку формується таблиця зміни положення транспортних засобів та відповідного часу їх переміщення мережею (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

Зміну положення автомобілів на мережі та відповідний витрачений
на це час у випадку $S_p=2$

№	Положення автомобілів на фрагменті транспортної мережі	Час, за який досягається положення
1		0
2		Δt
3		$2\Delta t$
4		$3\Delta t$
5		$4\Delta t$
6		$5\Delta t$
7		$6\Delta t$
8		$7\Delta t$

Як видно з табл. 2 для одного автомобіля час покидання зони перехрестя 1 у випадку $S_p=2$ складає $3\Delta t$, для другого автомобіля $5\Delta t$, для третього – $7\Delta t$. Аналогічно розмірковуючи, зрозуміло, що для k -го автомобіля цей час складатиме $(2k+1)\Delta t$.

Знайдемо подібні величини при $S_p=3$. Вони відповідно будуть складати:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \rightarrow 4\Delta t \\ 2 \rightarrow 6\Delta t \\ 3 \rightarrow 8\Delta t \\ \dots \\ k \rightarrow (2k + 2) \cdot \Delta t \end{array} \right. .$$

Тоді для довільного значення ширини перехрестя S_p ці величини будуть відповідно дорівнювати:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \rightarrow (S_p + 1) \cdot \Delta t \\ 2 \rightarrow (S_p + 3) \cdot \Delta t \\ 3 \rightarrow (S_p + 5) \cdot \Delta t \\ \dots \\ k \rightarrow (S_p + 2k - 1) \cdot \Delta t \end{array} \right. .$$

Отже, тривалість дозволеної фази перехрестя 1 дорівнює:

$$T_{F1}^1 = (S_p + 2k - 1) \cdot \Delta t.$$

Далі визначимо тривалість дозволеної фази перехрестя 2. Вона буде дорівнювати часу, за який останній k -ий автомобіль групи покине зону перехрестя 2. Ця величина умовно складається з двох частин, перша з яких дорівнює часу, за який k -ий автомобіль подолає відстань від поточного свого розташування на мережі в той момент, коли починає працювати дозволена фаза перехрестя 2, та часу подолання зони самого перехрестя 2.

Для з'ясування положення k -го автомобіля групи в системі виконаємо індуктивні розмірковування.

Якщо $k=1$, то очевидно, що тривалість дозволеної фази перехрестя 2 дорівнює часу покидання автомобілем зони перехрестя, тобто:

$$T_{F2}^2|_{k=1} = (S_p + 1) \cdot \Delta t.$$

При $k=2$ отримаємо:

$$T_{F2}^2|_{k=2} = (S_p + 3) \cdot \Delta t.$$

При $k=3$ маємо:

$$T_{F2}^2|_{k=3} = (S_p + 5) \cdot \Delta t.$$

Тоді для довільного значення k тривалість дозволеної фази перехрестя 2 буде визначатися виразом:

$$T_{F2}^2 = (S_p + 2k - 1) \cdot \Delta t.$$

Тоді повний світлофорний цикл для перехрестя 2 дорівнює:

$$\begin{aligned}
T_C^2 &= T_{F1}^2 + T_{F2}^2 = \\
&= (S_p + L_{1-2}) \cdot \Delta t + (S_p + 2k - 1) \cdot \Delta t = \\
&= (2S_p + L_{1-2} + 2k - 1) \cdot \Delta t.
\end{aligned}$$

Враховуючи, що для узгодженої роботи системи двох перехресть, необхідне виконання умови:

$$T_C^1 = T_C^2.$$

Тоді, повний світлофорний цикл для перехрестя 1 буде визначатись за допомогою системи:

$$\left\{ \begin{aligned} T_{F1}^1 &= T_{F2}^2 = (S_p + 2k - 1) \cdot \Delta t \\ T_{F2}^1 &= T_{F1}^2 = (S_p + L_{1-2}) \cdot \Delta t \\ T_C^1 &= T_{F1}^1 + T_{F2}^1 = (S_p + 2k - 1) \cdot \Delta t + (S_p + L_{1-2}) \cdot \Delta t = \\ &= (2S_p + L_{1-2} + 2k - 1) \cdot \Delta t. \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} T_{F1}^1 &= T_{F2}^2 = (S_p + 2k - 1) \cdot \Delta t \\ T_{F2}^1 &= T_{F1}^2 = (S_p + L_{1-2}) \cdot \Delta t \\ T_C^1 &= T_{F1}^1 + T_{F2}^1 = (S_p + 2k - 1) \cdot \Delta t + (S_p + L_{1-2}) \cdot \Delta t = \\ &= (2S_p + L_{1-2} + 2k - 1) \cdot \Delta t \end{aligned} \right.$$

Таким чином, отримані математичні залежності дозволяють визначити параметри узгодженого світлофорного регулювання для системи двох

взаємопов'язаних перехресть. Використання запропонованого підходу забезпечує можливість координації транспортних потоків, зменшення затримок транспортних засобів та підвищення ефективності функціонування міської транспортної мережі.

3.3 Числове моделювання та практичний приклад розрахунку параметрів світлофорного регулювання

Для перевірки працездатності запропонованої дискретно-клітинкової моделі виконаємо числовий приклад розрахунку параметрів світлофорного регулювання для системи двох взаємопов'язаних перехресть. Проведення числового моделювання дозволяє оцінити ефективність отриманих математичних залежностей та перевірити можливість їх практичного застосування для організації координованого дорожнього руху.

У межах прикладу розглядається транспортна мережа, що складається з двох регульованих перехресть, між якими здійснюється рух групи транспортних засобів. Основною задачею моделювання є визначення тривалостей фаз світлофорного регулювання, за яких буде забезпечено безперервний рух транспортного потоку через обидва перехрестя без виникнення додаткових затримок.

Для дослідження приймемо такі вихідні параметри транспортної системи:

- 1) довжина між перехрестями – 1000 м;
- 2) ширина перехрестя – 35 м;
- 3) динамічний розмір транспортних засобів у сукупності одиниць – 4 м;
- 4) середня швидкість автомобілів – 45 км/год;
- 5) кількість автомобілів у групі – 20.

Для застосування моделі необхідно перетворити вхідні параметри на параметри, зазначені в табл. 1. Результати перетворень представлені в табл. 3.

Таблиця 3.3

Вхідні параметри моделі

№	Позначення параметру	Значення параметру	Одиниця виміру параметру
Вхідні параметри моделі			
1	k	20	одиниць
2	L_{1-2}	$=1000/4=250$	одиниць
3	S_p	$=[35/4]+1=9$	одиниць
4	Δt	$=(5/45)*3,6=0,4$	секунди

Розрахуємо значення тривалості фаз та циклів світлофора, використовуючи наведені вище формули:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{F1}^1 = [(9 + 2 \cdot 20 - 1) \cdot 0,4] + 1 = 20 \text{ (с)} \\ T_{F2}^1 = [(9 + 250) \cdot 0,4] + 1 = 104 \text{ (с)} \\ T_C^1 = T_{F1}^1 + T_{F2}^1 = 20 + 104 = 124 \text{ (с)} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} T_{F1}^2 = T_{F2}^1 = 104 \text{ (с)} \\ T_{F2}^2 = T_{F1}^1 = 20 \text{ (с)} \\ T_C^2 = T_{F1}^1 + T_{F2}^1 = 104 + 20 = 124 \text{ (с)} \end{array} \right.$$

Результати розрахунків представлені у вигляді табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Вихідні параметри моделі

№	Позначення параметру	Значення параметру	Одиниця виміру параметру
Вихідні параметри моделі			
1	T_C^1	124	секунди
2	T_{F1}^1	20	секунди
3	T_{F2}^1	104	секунди
4	T_C^2	124	секунди
5	T_{F1}^2	104	секунди
6	T_{F2}^2	20	секунди

Аналіз отриманих результатів показує, що запропонована модель дозволяє забезпечити координацію режимів роботи світлофорної сигналізації для двох взаємопов'язаних перехресть. Завдяки узгодженню тривалостей фаз світлофорного циклу транспортний потік може проходити систему перехресть без додаткових зупинок, що сприяє зменшенню транспортних затримок та скороченню довжини транспортних черг.

Крім цього, результати моделювання підтверджують можливість практичного застосування запропонованого підходу для побудови систем

координованого світлофорного регулювання в умовах міської транспортної мережі. Використання подібних моделей дозволяє підвищити ефективність функціонування транспортної інфраструктури, покращити пропускну здатність перехресть та знизити рівень перевантаження дорожньої мережі у години пікових навантажень.

3.4 Висновки

Таким чином, у розділі було розроблено дискретно-клітинкову модель транспортної мережі для системи двох взаємопов'язаних регульованих перехресть. Запропонований підхід дозволив представити транспортну мережу у вигляді сукупності окремих клітинок, між якими здійснюється переміщення транспортних засобів через визначені проміжки часу. Використання дискретно-клітинкового опису дало можливість формалізувати процес руху автомобілів, описати умови утворення транспортних черг та врахувати особливості проходження транспортних потоків через регульовані перехрестя.

У межах дослідження було проаналізовано процес координації роботи світлофорної сигналізації для двох послідовно розташованих перехресть. Встановлено, що узгодження тривалостей світлофорних фаз дозволяє забезпечити безперервний рух групи транспортних засобів між перехрестями без виникнення додаткових затримок. Для цього було введено основні параметри моделі, які характеризують транспортну систему, зокрема відстань між перехрестями, ширину перехресть, кількість транспортних засобів у групі та часовий інтервал переміщення автомобілів між клітинками.

У процесі математичного моделювання отримано залежності для визначення тривалостей дозволених та заборонених фаз світлофорного регулювання. На основі проведених розрахунків встановлено закономірності зміни часу проходження транспортними засобами зони перехрестя залежно від кількості автомобілів у групі та геометричних параметрів транспортної

мережі. Отримані математичні вирази дозволили визначити повні світлофорні цикли для кожного з перехресть та забезпечити їх синхронізовану роботу.

Особливу увагу у розділі було приділено числовому моделюванню запропонованої системи. Проведений приклад розрахунку підтвердив працездатність отриманих математичних залежностей та показав можливість практичного використання моделі для визначення параметрів координованого світлофорного регулювання. Результати моделювання продемонстрували, що узгодження фаз світлофорної сигналізації дозволяє зменшити транспортні затримки, скоротити довжину транспортних черг та підвищити ефективність функціонування міської транспортної мережі.

Отримані результати свідчать про доцільність використання дискретно-клітинкових моделей для дослідження процесів управління транспортними потоками. Запропонована модель може бути використана як основа для подальшого вдосконалення систем координованого світлофорного регулювання та розробки адаптивних методів керування транспортними потоками в умовах сучасної міської інфраструктури.

ВИСНОВКИ

У результаті виконаного дослідження було розглянуто теоретичні та практичні аспекти організації управління транспортними потоками на взаємопов'язаних регульованих перехрестях. Проведений аналіз сучасних підходів до організації дорожнього руху показав, що традиційні системи світлофорного регулювання з жорстко заданими параметрами не завжди забезпечують необхідний рівень ефективності в умовах змінної інтенсивності транспортних потоків. Особливо гостро ця проблема проявляється у великих містах, де значна кількість транспортних засобів та мала відстань між перехрестями спричиняють утворення заторів, збільшення часу затримок і зниження пропускної здатності транспортної мережі.

У першому розділі роботи було досліджено особливості організації дорожнього руху в міських умовах, принципи управління транспортними потоками та сучасні системи світлофорного регулювання. Встановлено, що ефективність функціонування міської транспортної системи значною мірою залежить від рівня координації роботи суміжних перехресть. Аналіз сучасних наукових досліджень показав перспективність використання адаптивних та інтелектуальних методів управління дорожнім рухом, а також доцільність застосування математичного моделювання для дослідження транспортних процесів. Окрему увагу приділено дискретно-клітинковим моделям, які забезпечують достатню точність опису транспортних потоків при відносній простоті реалізації.

У другому розділі було розроблено математичну модель керування світлофорною сигналізацією на взаємопов'язаних перехрестях. Запропонована модель базується на дискретному представленні дорожньої мережі та враховує процес накопичення транспортних засобів перед перехрестями під час дії забороненого сигналу світлофора. У межах дослідження визначено ключові критерії побудови системи керування, серед яких особливе значення мають інтенсивність транспортного потоку, довжина

транспортних черг, часові параметри світлофорного циклу та забезпечення безпеки дорожнього руху. Розроблений підхід дозволяє здійснювати аналіз транспортної ситуації та коригувати параметри світлофорного регулювання відповідно до поточного стану транспортних потоків.

У третьому розділі було виконано практичне дослідження процесу координації роботи двох взаємопов'язаних перехресть та проведено розрахунок параметрів світлофорного циклу для забезпечення безперервного проходження визначеної групи транспортних засобів. Отримані результати підтвердили ефективність запропонованого підходу до управління транспортними потоками. Встановлено, що узгодження режимів світлофорного регулювання дозволяє зменшити кількість зупинок транспортних засобів, скоротити час затримок та підвищити пропускну здатність транспортної мережі. Крім того, застосування координованого управління сприяє зниженню рівня транспортного перевантаження та покращенню умов руху на міжперехресних ділянках.

Проведене дослідження підтвердило, що використання математичних моделей і сучасних методів транспортного моделювання є ефективним інструментом для аналізу та оптимізації систем управління дорожнім рухом. Запропонована модель може бути використана як основа для подальшого розвитку адаптивних та інтелектуальних систем світлофорного регулювання, а також для вдосконалення існуючих транспортних систем у міських умовах.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості застосування розробленого підходу для підвищення ефективності функціонування регульованих перехресть, зменшення транспортних заторів, скорочення часу очікування транспортних засобів та покращення екологічних показників міського середовища. Використання координованого світлофорного регулювання створює передумови для формування більш стабільного та безпечного транспортного процесу в умовах сучасного міста.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zabyshnyi Y. O., Semchuk Y. M., Melnyk V. M., Dolishniy B. V. Influence of exhaust for air condition in cities. *The Scientific Heritage*. 2016. Vol. 1, No. 3(3). P. 28–34.
2. Шевченко В. В. Обґрунтування ефективного напрямку розвитку систем світлофорного управління з жорсткими циклами регулювання. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2022. Т. 16, № 2. С. 110–119.
3. Sabar, N. R., Kieu, L. M., Chung, E., et al. A memetic algorithm for real world multi-intersection traffic signal optimisation problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2017. No. 63. P. 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.04.021>.
4. Jin, J., Ma, X., & Kosonen, I. An intelligent control system for traffic lights with simulation-based evaluation. *Control Engineering Practice*. 2017. No. 58. P. 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.09.009>.
5. Mladen Miletic, Edouard Ivanjko, Martin Gregurić, Krešimir Kušić. A review of reinforcement learning applications in adaptive traffic signal control. *IET Intelligent Transport Systems*. Vol. 16, Issue10. P. 1269-1285. <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/itr2.12208>
6. Lee, J., Chung, J., Sohn, K. Reinforcement learning for joint control of traffic signals in a transportation network. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2020. Vol. 69, Issue 10. P. 1375–1387. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2962514>
7. Jin, J., Ma, X.: Hierarchical multi-agent control of traffic lights based on collective learning. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 2018. Vol. 68, P. 236–248. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.10.013>
8. Xiaoyuan Liang; Xunsheng Du; Guiling Wang; Zhu Han. A deep reinforcement learning network for traffic light cycle control. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2019. Vol. 68 Issue 2. P. 1243–1253. <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2890726>

9. Martin Gregurić, Miroslav Vujić, Charalampos Alexopoulos, Mladen Miletić. Application of deep reinforcement learning in traffic signal control: An overview and impact of open traffic data. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, Issue 11. 4011. <https://doi.org/10.3390/app10114011>

10. Shantian Yang, Bo Yang, Hau-San Wong, Zhongfeng Kang. Cooperative traffic signal control using multi-step return and off-policy asynchronous advantage actor-critic graph algorithm. *Knowledge Based Syst*. 2019. Vol. 183, 104855. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.07.026>

11. Qadri, S.S.S.M., Gökçe, M.A. & Öner, E. State-of-art review of traffic signal control methods: challenges and opportunities. *Eur. Transp. Res. Rev.* 2020. Vol. 12, No. 55. <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00439-1>

12. Hao Wei, Guanjie Zheng, Victor Gayah, Zhenhui Li. A survey on traffic signal control methods. arXiv. 2019. arXiv: 1904.08117. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.08117>

13. Славич В. П., Савченко М. О. Критеріальна модель управління рухом автомобільного транспорту. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Автомобіле- та тракторобудування. 2024. № 2. С. 65–70.

14. Славич В. П., Савченко М. О. Модель управління параметрами світлофорної сигналізації в залежності від встановленої пропускної здатності. *Вісник ХНТУ*. 2024. № 3(90). С. 118–122.

15. Славич В. П., Савченко М. О. Модель чотирифазної системи управління транспортним потоком. *Науковий вісник ХДМА*. 2024. № 28. С. 196–204.

16. Славич В. П., Волошанський В. О. Модель системи управління транспортним потоком двох взаємопов'язаних перехресть. *Науковий вісник ХДМА*. 2025. № 31. С. 91–99. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.2.31.091-099>