

Міністерство освіти і науки України  
Криворізький національний університет  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на здобуття ступеню вищої освіти – магістр  
за освітньо-професійною програмою  
«Комп'ютерні науки»

зі спеціальності  
*122 – Комп'ютерні науки*

тема роботи:

*«Інтелектуальна система управління роботою  
автомобільного перехрестя в залежності від його типу»*

Виконав ст. гр. КН-23м	_____	Богацький В. С.
Керівник	_____	Маринич І. А.
Нормоконтроль	_____	Маринич І. А.
Завідувач кафедри	_____	Рубан С. А.

Кривий Ріг – 2024

**КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ****Факультет:** інформаційних технологій**Кафедра:** автоматизації, комп'ютерних наук і технологій**Ступінь вищої освіти:** Магістр**Спеціальність:** 122 – Комп'ютерні науки**ЗАТВЕРДЖУЮ**Зав. кафедри: к.т.н. Рубан С.А.« 5 » липня 2024 р.**ЗАВДАННЯ****на кваліфікаційну роботу магістра**студентові групи КН-23м Богацькому Віталію Сергійовичу**1. Тема кваліфікаційної роботи:** «Інтелектуальна система управління роботою автомобільного перехрестя в залежності від його типу»затверджено наказом по університету № 594с від 04.07.2024 р.**2. Термін здачі кваліфікаційної роботи:** 01.12.2024 р.**3. Склад кваліфікаційної роботи:** Пояснювальна записка обсягом 95с., додатки, презентація у Microsoft PowerPoint (15 слайдів) в електронному та друкованому вигляді**4. Консультанти кваліфікаційної роботи:**Розділ 1-3доц. Маринич І. А.Нормоконтрольдоц. Маринич І. А.

## 5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>10.07.24</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>15.07.24</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>18.08.24</i>
4	<i>Розділ 3</i>	<i>19.09.24</i>
5	<i>Висновки</i>	<i>15.10.24</i>
6	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>20.11.24</i>
7	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>28.11.24</i>
8	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>01.12.23</i>

6. Дата видачі завдання: 28.06.2024р.

Керівник \_\_\_\_\_ /Маринич І.А./

7. Запевнення: Я, *Богацький Віталій Сергійович*, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Здобувач \_\_\_\_\_ /Богацький В. С./

## АНОТАЦІЯ

Богацький В. С. «Інтелектуальна система управління роботою автомобільного перехрестя в залежності від його типу».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеню вищої освіти магістр за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерні науки» зі спеціальності 122 – Комп'ютерні науки. – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2024..

Метою роботи є аналіз та розробка математичного опису затримок та методів управління проїздом транспортних засобів через перехрестя дорожньої мережі міста, інтелектуального керування роботою світлофорів на перехрестях.

У першому розділі проведено аналіз 3 найвідоміших інтелектуальних транспортних систем: їх призначення, вирішувані завдання. Розглянуто основні поняття моделювання інтелектуальних транспортних систем, визначено мінімальний час дозволяючого сигналу світлофора, поставлено цілі та завдання дослідження.

В другому розділі проаналізовано основні моделі затримки Бекмана та Вебстера, виявлено їх переваги та недоліки. Проведено порівняльний аналіз моделей затримки транспортного засобу, розроблено нову модель затримки, засновану на законах фізики, та проведено експериментальну оцінку її адекватності реальним умовам.

В третьому розділі розроблено інтелектуальну систему адаптивного керування роботою дорожнього перехрестя, запропоновано варіанти її реалізації на основі дискретно-подієвого управління за допомогою моделі транспортної затримки.

Оптимальне управління світлофорами дозволяє скоротити час проїзду транспортних засобів через перехрестя і, відповідно, знизити рівень негативних факторів.

*Ключові слова:*

АЛГОРИТМ, ЗАТРИМКА ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, ПЕРЕХРЕСТЯ, ТРАНСПОРТНА СИСТЕМА

## ANNOTATION

Bohatskyi V. S. «Intelligent control system for managing the operation of a road intersection depending on its type».

Graduation master`s work for obtaining an educational degree «Master» for the educational and professional program «Computer science» in specialty 122 – «Computer science». – Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, 2024.

The aim of this work is to analyze and develop a mathematical description of delays and methods for managing vehicle passage through city road network intersections, as well as the intelligent control of traffic lights at intersections.

The first section provides an analysis of the most well-known intelligent transportation systems, including their purpose and the problems they address. The main concepts of intelligent transportation system modeling are considered, the minimum duration of the green signal at traffic lights is determined, and the goals and objectives of the study are set.

In the second section, the main delay models of Beckmann and Webster are analyzed, identifying their strengths and weaknesses. A comparative analysis of vehicle delay models is conducted, a new delay model based on physical laws is developed, and its adequacy under real conditions is experimentally evaluated.

In the third section, an intelligent system for adaptive management of road intersection operations is developed, with proposed implementation options based on discrete-event control and control using the vehicle delay model.

Optimal traffic light management reduces vehicle travel time through intersections, thereby lowering the level of the aforementioned negative factors.

*Keywords:*

ALGORITHM, VEHICLE DELAY, INTELLIGENT MANAGEMENT SYSTEM, INTERSECTIONS, TRANSPORTATION SYSTEM

## ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМ РУХОМ	10
1.1 Загальні відомості про системи дорожнім рухом	10
1.2 Інформаційне забезпечення дорожнього руху	11
1.3 Технічна організація дорожнього руху	12
1.4 Рух без світлофорів	15
1.5 Аналіз реалізованих рішень	16
1.6 Інтелектуальні транспортні системи	24
Висновки за розділом:	26
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ	27
2.1 Мінімальний час дозвільного сигналу світлофора	27
2.2 Аналіз моделі затримки Бекмана	37
2.3 Аналіз моделі затримки Вебстера	46
2.4 Чисельне моделювання роботи моделі Вебстера для реальних умов проїзду	48
2.5 Значимість параметрів для затримки	53
2.6 Розробка нової математичної модель затримки	55
2.7 Оцінка адекватності моделі	64
Висновки за розділом:	68
РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПЕРЕХРЕСТЯМ	70
3.1 Основні засади	70
3.2 Дискретно-подійне керування подіями	75
3.3 Управління моделлю затримки транспорту	83
3.4 Структура інтелектуальної системи управління дорожнього руху	87

3.5 Технічне забезпечення пропонуємої системи	90
Висновки за розділом:	91
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	95
ДОДАТОК А	98
ДОДАТОК Б	100

## ВСТУП

Швидке зростання кількості автомобільного транспорту, особливо в міських районах, постійно підкреслює необхідність впровадження заходів для мінімізації негативних наслідків автомобілізації. Перевантаження вулично-дорожньої інфраструктури призводить до зниження ефективності транспортної системи, що проявляється у збільшенні часу затримок, витрат палива, кількості зупинок, прискореному зношуванні транспортних засобів, дорожньої розмітки та покриття, підвищує кількість дорожньо-транспортних пригод та значно погіршує екологічну обстановку (забруднення повітряного басейну, збільшення шуму).

Проблема має комплексне рішення, яке пов'язане, в основному, з оптимальним регулюванням руху потоків автотранспорту на перехрестях, а також розширенням доріг, збільшенням кількості смуг руху, використанням об'їзних доріг та ін.

*Актуальність теми.* Актуальність даної теми пояснюється постійним зростанням навантаження на вулично-дорожню мережу (ВДМ), що негативно впливає на ефективність експлуатації транспортних засобів (ТЗ). Це проявляється у збільшенні часу затримок, кількості зупинок, витрат палива, прискореному зношуванні автомобілів, дорожньої розмітки та покриття. Крім того, зростає кількість дорожньо-транспортних пригод, а екологічна ситуація суттєво погіршується. Світлофорне регулювання руху, здебільшого налаштоване на «жорсткі» календарні або сезонні режими, не забезпечує ефективного вирішення проблеми оптимального проїзду перехресть.

У світовій практиці значну увагу приділяють розробці систем управління дорожнім рухом автомобільного транспорту. На сьогодні адаптивні системи керування трафіком активно впроваджуються в більшості міст США та Європи, де вже існують успішні приклади реалізації таких систем і проектів.

В даний час розроблено безліч автоматизованих транспортних систем, які вирішують різні завдання управління міським рухом на різних рівнях (від



оптимального управління пропускнуою спроможністю перехресть до особистої безпеки водіїв автотранспорту) та за допомогою різних технічних засобів.

У 1991 році в Європейському Союзі було створено Європейську Асоціацію учасників ринку інтелектуальних транспортних систем ERTICO. Цей консорціум об'єднує провідних європейських виробників, зацікавлених у розвитку ринку інтелектуальних транспортних систем, громадські організації, представників різних міністерств і відомств, кінцевих користувачів та інші зацікавлені сторони.

Основною метою ERTICO є розробка та впровадження програм, спрямованих на розвиток європейських інноваційних технологій у сфері дорожньої інфраструктури. Зокрема, асоціація займається впровадженням інтелектуальних транспортних систем для управління дорожнім рухом, покращення мобільності населення та перевезення вантажів, підвищенням якості життя, забезпеченням безпеки на дорогах і зменшенням негативного впливу автомобільного транспорту на навколишнє середовище.

Протягом останніх років ERTICO реалізувала низку важливих програм, спрямованих на підвищення безпеки дорожнього руху в країнах Євросоюзу, зокрема:

- *ADASIS (Advanced Driver Assistant Systems Interface Specification)* – інтеграція точних картографічних даних у навігаційні системи для прогнозування дорожньої ситуації, що допомагає водієві ефективніше реагувати на умови руху.

- *AIDE (Adaptive Integrated Driver-Vehicle Interface)* – застосування електронних систем, які допомагають концентрувати увагу водія під час виконання складних маневрів, наприклад, відключаючи відволікаючі функції в салоні автомобіля.

- *ERTRAC (The European Road Transport Research Advisory Council)* – координація науково-дослідних інститутів Європи в галузі дорожньої інфраструктури та транспорту для оптимізації наукових досліджень і впровадження інновацій.

- *FeedMAP* – забезпечення регулярного оновлення даних електронних карт.
- *HeavyRoute* – розробка рішень для забезпечення швидких, безпечних та ефективних вантажних перевезень.
- *IP PReVENT* – впровадження систем ADAS (Advanced Driver Assistance Systems), які надають водіям превентивну інформацію про потенційні загрози на дорозі, допомагаючи уникати аварійних ситуацій.
- *SpeedAlert Forum* – інформування водіїв про необхідність дотримання встановлених обмежень швидкості.
- *EuroRoadS* – створення централізованої бази даних про дорожню інфраструктуру в Європі.
- *FRAME Forum* – розробка архітектури для створення Європейської інтелектуальної транспортної системи.

Ці програми спрямовані на вдосконалення управління дорожнім рухом, підвищення безпеки, зниження екологічного впливу транспорту та покращення мобільності в країнах Євросоюзу.

*Метою роботи* є аналіз та розробка математичного опису затримок та методів управління проїздом транспортних засобів через перехрестя дорожньої мережі міста, оптимального адаптивного керування роботою світлофорів на перехрестях.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- Аналіз методів математичного моделювання роботи керованих перехресть.
- Аналіз існуючих моделей затримки транспортного засобу на перехресті.
- Розробка нової математичної моделі затримки транспортного засобу на перехресті відповідно до фізичних законів процесів проїзду транспортних засобів.
- Розробка принципів роботи, структури та складових частин ІСУСП.

*Методи дослідження.* У роботі використано математичне та комп'ютерне моделювання транспортних процесів у міській інфраструктурі з використанням методів системного та статистичного аналізу, теорії чутливості, фізичного змісту процесів при проїзді перехрестя транспортних засобів тощо.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМ РУХОМ

#### 1.1 Загальні відомості про системи дорожнім рухом

У сучасних автоматизованих системах управління дорожнім рухом, широко впроваджених у більшості європейських країн, активно використовується інформація, отримана від відеокамер, що є частиною підсистем відеоконтролю. Ці дані дозволяють ефективно організовувати управління транспортними потоками, координувати роботу основних транспортних вузлів міста та оперативно реагувати на зміни дорожньої ситуації.

Головною перевагою систем відеоконтролю є інтеграція числової та візуальної інформації, що суттєво відрізняє їх від традиційних систем спостереження. Завдяки цьому забезпечується миттєвий зворотний зв'язок із оператором або диспетчером центру управління, що дозволяє швидко реагувати на позаштатні ситуації чи виконувати планові перевірки.

Принцип функціонування системи відеоконтролю досить простий і широко відомий. Над обраною ділянкою дороги, транспортним вузлом, магістраллю або небезпечним відрізком траси на певній висоті встановлюється відеокамера. Відеосигнал з неї передається до модуля обробки відеоінформації. У цьому модулі виконується аналіз зображення: виділення рухомих транспортних засобів, оцінка їх параметрів і розрахунок різних інтегральних показників.

Отримані дані можуть бути передані до центру управління. У залежності від потреб, центр отримує або числову інформацію (для передачі якої потрібна мінімальна пропускна здатність каналу), або відеозображення з контрольованої ділянки для детального аналізу дорожньої ситуації.

Системи відеоконтролю, орієнтовані на транспорт, надають широкий спектр даних, які можна розділити на три основні категорії:

### *1. Інформація про трафік для статистичної обробки*

Цей тип даних використовується для аналізу транспортного потоку та його параметрів:

- Загальна кількість виявлених автомобілів;
- Швидкість руху транспортних засобів;
- Прискорення транспортного потоку;
- Щільність потоку;
- Зайнятість смуг руху;
- Класифікація транспортних засобів за типами.

### *2. Інформація про події на дорозі*

Ці дані спрямовані на виявлення ситуацій, що потребують оперативної реакції:

- Перевищення швидкості, висока щільність потоку або зайнятість смуг;
- Утворення заторів або рух у зустрічному напрямку;
- Автомобілі, які зупинилися чи повільно рухаються;
- Виявлення сторонніх предметів на дорозі.

### *3. Інформація про наявність або відсутність автомобілів*

Цей тип інформації особливо корисний для управління світлофорними об'єктами:

- Виявлення автомобілів, які наближаються до перехрестя;
- Фіксація транспортних засобів, що зупинилися на перехресті;
- Облік автомобілів, які проїхали через зони контролю;
- Вимірювання довжини черги перед світлофором.

Досвід розвинених країн показує, що останній тип даних широко застосовується у світлофорних системах. Інтеграція відеоконтролю з модулями управління світлофорами дозволяє синхронізувати їхню роботу у перевантажених транспортних вузлах.

Наприклад, у традиційних системах пішоходам виділяється однаковий час для переходу дороги незалежно від транспортної ситуації. У сучасних

автоматизованих системах відеоконтроль дозволяє коригувати тривалість сигналів світлофорів залежно від кількості автомобілів чи довжини черги, що суттєво підвищує ефективність транспортного потоку та знижує затримки.

## 1.2 Інформаційне забезпечення дорожнього руху

У багатьох країнах світу організовано ефективну систему інформування учасників дорожнього руху про ситуацію на маршрутах, можливі об'їзди перевантажених ділянок та місця паркування. На перехрестях доріг розміщуються не тільки знаки, що вказують дозволені напрямки руху, але й інформація про назви районів і вулиць, що допомагає водіям орієнтуватися в місті.

Для передачі важливої інформації водіям використовуються різноманітні засоби, такі як багатопозиційні дорожні знаки, світлові табло зі змінною інформацією, а також спеціальні радіо- і відеоканали. Наприклад, після активації світлових табло, що попереджають про затори, ситуація на дорогах покращувалася вже через 20-30 хвилин, у той час як без таких пристроїв ліквідація заторів могла займати до 3-4 годин. Це демонструє, наскільки ефективно інформування через такі системи покращує потік транспорту і знижує час затримок.

## 1.3 Технічна організація дорожнього руху

На сьогоднішній день вже розроблено технології, які забезпечують інтеграцію комп'ютерних чіпів у транспортних засобах та дорожній інфраструктурі. Серед таких технологій — спеціальні радары та системи радіопопередження, які допомагають уникати зіткнень на дорогах. Також активно впроваджуються блокуючі пристрої, що не дозволяють запускати двигун автомобіля водіям, які перебувають у стані сп'яніння.

Супутникові технології та навігаційні системи, які поки що доступні лише обмеженому колу користувачів, скоро стануть звичним явищем. Вони допоможуть водіям орієнтуватися в незнайомих містах, а також викликати допомогу простим натисканням кнопки. Окрім того, все більше поширення отримують системи, що автоматично передають сигнал у поліцію у випадку спрацювання подушок безпеки або угону автомобіля. Ці технології поступово змінюють підхід до безпеки на дорогах і значно підвищують рівень захисту водіїв і пасажирів.

*Франція.* У європейських країнах одним із важливих стимулів для технічної модернізації систем управління дорожнім рухом стало впровадження нових підходів у Франції. Спершу, у 2003 році, було ухвалено новий закон "Про зміни правил дорожнього руху", який передбачав значне посилення санкцій за порушення на дорогах. Лише після цього розпочалась технічна модернізація дорожньої інфраструктури.

Зокрема, у Франції було впроваджено централізоване управління світлофорами, що дозволило оптимізувати транспортний потік у містах. На основних дорогах встановили нові камери, оснащені радарми, які автоматично фіксували перевищення швидкості, реєстрували номери автомобілів та обличчя водіїв. Ці дані передавалися до центрального комп'ютера, де автоматично виписувався штраф для власника транспортного засобу без участі правоохоронців.

Завдяки таким нововведенням, кількість дорожньо-транспортних пригод у Франції знизилась на третину за два роки. Однак варто зазначити, що в інших європейських країнах можуть бути специфічні особливості технічної організації дорожнього руху, що залежить від місцевих умов та потреб.

*Велика Британія.* У Великій Британії розроблено кілька інноваційних систем для підвищення безпеки на дорогах і покращення організації дорожнього руху. Одна з таких технологій — «транспортні відеокамери», які вмонтовані в дорожнє покриття у вигляді світлящих маячків. Ці маячки, оснащені

відеокамерами, здатні вимірювати швидкість автомобілів, визначати знос покришок і ідентифікувати номерні знаки транспортних засобів. Камера, що має діаметр 13 см і піднімається над асфальтом на менше ніж 4 мм, здатна працювати подібно до світлофора. Вона подає водіям сигнали червоного або зеленого кольору, в залежності від швидкості руху транспортного засобу. Ці пристрої планується встановлювати на залізничних переїздах і пішохідних переходах, однак їхні дані не використовуватимуться для стягнення штрафів, а лише як система попередження для учасників руху.

Також у Великій Британії розроблена нова система для моніторингу паркування за допомогою супутників. Датчики, що працюють на базі GPS або нової європейської системи Galileo, зможуть виявляти автомобілі, припарковані в недозволених місцях, і автоматично надсилати повідомлення до поліції. Це дозволить оперативно виявляти порушення та вживати необхідних заходів. Вартість одного сенсора, який обслуговує лише невеликий відрізок дороги (приблизно 2 метри), становить 30 фунтів стерлінгів (приблизно 50 доларів), що є економічно доцільним з огляду на потенційні доходи від штрафів.

Крім того, у Великій Британії активно використовують лазерний пристрій для сканування місця дорожньо-транспортної пригоди, що дозволяє значно швидше оформлювати всі необхідні документи та визначати винуватців ДТП. Це значно зменшує час, необхідний для оформлення аварії (тепер займає близько 5 хвилин замість 1 години), знижує затори та покращує пропускну здатність доріг.

*Японія.* З початку 2006 року в Японії були впроваджені «розумні» номерні знаки для автомобілів, оснащені вбудованими мікрочіпами. Ці чіпи зберігають і передають важливу інформацію про автомобіль, зокрема його номер, розмір, місце реєстрації та дані власника. Головною метою експерименту, який ініційовано міністерством будівництва та транспорту, є зменшення скупчення автомобілів на центральних магістралях японських міст у години пік.

Механізм роботи нової системи полягає в тому, що водії, які хочуть потрапити в центральну частину міста в години пік, повинні будуть платити



спеціальні збори, сума яких визначатиметься автоматично за допомогою мікрочіпа на номерному знаку. Для впровадження цієї системи необхідна згода місцевих органів влади, і наразі шість великих муніципалітетів Японії висловили бажання реалізувати таку технологію. Якщо експеримент буде успішним, нова система може бути розширена на всі міста з населенням понад 100 тисяч автомобілів.

Основні переваги, яких очікують від цієї системи, — це не тільки покращення транспортного потоку, але й зниження рівня забруднення навколишнього середовища. В Японії, подібно до Сінгапуру, вперше було впроваджено автоматизовану систему збору зборів за в'їзд до центру міста в години пік.

#### 1.4 Рух без світлофорів

Декілька європейських муніципалітетів ризикнули провести експеримент під назвою «Голі вулиці», який несподівано закінчився приголомшливим успіхом. Фахівці з планування та проектування міських транспортних потоків у Німеччині, Данії та Голландії провели експеримент із запровадженням некерованих вулиць та перехресть, та знайшли їх більш ефективними порівняно з традиційними моделями. Як показала практика, водії витрачають менше часу на поїздки, а в години пік на дорогах рідше створюються пробки.

Ідея проекту наступна: замість регулюючих світлофорів та дорожніх знаків, учасники руху використовують невербальний контакт один з одним. Іншими словами, не обмежені нічим водії та пішоходи стають більш обережними та уважними, загострюються їхні почуття, прокидається внутрішня дисципліна. Проектувальники порівнюють це із ситуацією, коли водій під'їжджає до перехрестя зі зламаним світлофором, або рухається вулицею, яку перетинають футбольні фанати: у ці моменти доводиться гранично концентруватися на керуванні автомобілем, і саме у таких стресових ситуаціях водії показують свій

справжній клас.

Місця можливої появи дітей на проїжджій частині відзначені яскравим кольором, що сигналізує водіям про те, що необхідно бути особливо обережним. І справді, у «піддослідних» містах водії завчасно знижують швидкість перед в'їздом до шкільної зони, як показало соціальне опитування: «ніхто не хоче збити дитину».

У багатьох країнах, що розвиваються, нерегульований дорожній рух – невід'ємна частина міського життя. У перевантажених транспортних потоках Балі або Індонезії водії автомобілів, автобусів, мотоциклів, скутерів та інші учасники руху ігнорують знаки та світлофори, проте цілком безпечно пересуваються, покладаючись на негласні правила і своє чуття. Звичайно, ця система працює найчастіше в місцях з повільним трафіком та великою кількістю пішоходів.

### 1.5 Аналіз реалізованих рішень

У роботі [1] розглянуто модель затримки автотранспорту на регульованому перехресті Бекмана, проаналізовано фізичний зміст складових моделі, визначено значущість параметрів, їхній внесок у величину затримки транспорту з утворенням черги. Проаналізовано недоліки моделі під час її використання для керування сигналами світлофора.

Модель Бекмана в контексті світлофорного регулювання має деякі обмеження, зокрема те, що інтенсивність роз'їзду завжди повинна бути більшою за інтенсивність прибуття транспорту. Це призводить до того, що фактичні інтенсивності прибуття та роз'їзду транспорту до перехрестя не є суттєвими для моделі, важливим є лише їх відношення, яке повинно бути меншим за 1. Окрім цього, величина черги транспорту на перехресті майже не впливає на затримки.

Враховуючи ці фактори, найбільший внесок у затримку транспорту, згідно з моделлю Бекмана, вносять:

- Час дозволяючого сигналу світлофора — близько 44%.
- Час забороняючого сигналу — близько 31%.
- Інтенсивності прибуття і роз'їзду транспорту — по 12-13%.

При адаптивному керуванні світлофорами за допомогою цієї моделі, режим роботи для наступного циклу проїзду перехрестя можна розраховувати на основі результатів попереднього циклу, що дозволяє коригувати параметри світлофорного регулювання в реальному часі в залежності від змінюваних умов руху.

У роботі [2] розглянуто з інтервалом 0,2 сек. процеси, що відбуваються під час проїзду перехрестя чергою транспортних засобів від стоп-лінії до досягнення швидкості 60 км/год – фази розгону та основна, швидкість, прискорення, положення на полотні перехрестя, інтенсивність руху. Розроблено методику визначення мінімального часу дозвільного сигналу світлофора. Розрахована мінімальна тривалість включення роздільного сигналу світлофора для схеми конкретного перехрестя, його залежність від різних факторів. Так при старті від стоп-лінії перехрестя автомобіль під час руху проходить дві фази – фазу розгону від 0 до 60 км/год та основну фазу – рух зі швидкістю 60 км/год. ТС долають перехрестя у фазі розгону, оскільки час розгону автомобіля від 0 до 60 км/год для більшості ТС становить 4с., за цей час воно проходить 126 м дороги, а реальні перехрестя мають суттєво меншу довжину. Перший у черзі автомобіль закінчує проїзд перехрестя шириною 18 м на швидкості 22 км/год через 1,5 с, другий – 25,5 км/год через 1,7 с., третій – 28,5 км/год через 1,9 с. , ..., 21-й – на швидкості 60 км/год через 4,3 с після старту зі своєї позиції у черзі за 108 м до початку стоп-лінії. Для однієї лінії дороги інтенсивність руху ТЗ через перехрестя після старту зі стоп-лінії наростає з 0 до 28 авт/с. Мінімальний час сигналу світлофора не залежить від кількості смуг руху, і визначається тільки швидкістю і прискоренням проїзду полотна перехрестя. Методика визначення мінімальної тривалості дозвільного сигналу світлофора містить два етапи:

- визначення часу та відстані, що проходить ТЗ на одній смузі за фазу розгону від початку стоп-лінії.
- до нього додається час, за який ТЗ проїжджає відстань від початку стоп-лінії до кінця перехрестя в основній фазі.

Отриманий результат складе мінімальний час сигналу світлофора, що дозволяє, при будь-якій кількості смуг руху.

У роботі [3] розглядаються питання та результати застосування статистичного моделювання (так званого методу МонтеКарло) - одного з різновидів імітаційного моделювання - для оцінки ефективності організації дорожнього руху на прикладі перетину вулиць. Наводяться результати моделювання за довжиною черги та величиною затримки для одного автомобіля для сценарію розширення проїжджої частини перетину та/або введення адаптивного регулювання транспортних потоків. Розрахунки проводились у розробленій авторами програмі «SmartAdaptive+», призначеної для техніко-економічної оцінки ефективності заходів щодо організації дорожнього руху та застосування адаптивного регулювання та заходів щодо зміни конфігурації вузлів вулично-дорожньої мережі (УДС).

Одним із рішень, що дозволяє підвищити зручність дорожнього руху шляхом зменшення середніх затримок, є адаптивне регулювання, яке підлаштовується під параметри транспортних потоків, що змінюються за короткі проміжки часу. Програмний продукт «SmartAdaptive+», розроблений на кафедрі автомобільних доріг та аеродромів Тюменського індустріального університету та працює за принципом статистичного моделювання дорожніх ситуацій, дозволяє змоделювати застосування адаптивного регулювання на вузлі з видачею необхідної підсумкової інформації щодо параметрів черг та затримок транспортних засобів. На прикладі розглядається в цій статті приватного перетину вулиць, на якому встановлено світлофорне регулювання, виявлено зниження зручності руху для головного напрямку, в результаті якого транспортні потоки, що повертають ліворуч, затримують пропуск прямого напрямку, тому що

рух здійснюється в одну смугу і автомобілі змушені об'їжджати повертаючі транспортні засоби із заїздом на узбіччя. Середньозважена затримка одного автомобіля становить на вулиці 1 17,5 с, на вулиці 2 – 26,25 с. Застосування вищезгаданого програмного продукту дозволяє змоделювати результати потенційного застосування адаптивного регулювання, так і реконструкції вузла зі збільшенням кількості смуг руху. За умови застосування адаптивного регулювання середньозважена затримка одного автомобіля на перетині складе 18,97 с. Збільшення кількості смуг руху – до 13,28 з. При збільшенні смуг руху та застосуванні адаптивного регулювання – 12,42 с. При збільшенні інтенсивності руху пропускна спроможність перетину буде вичерпана і домогтися прийнятної зручності руху без збільшення смуг руху тільки організаційними заходами неможливо. У цьому випадку зі збільшенням кількості смуг руху затримка становитиме 36,8 с, при введенні адаптивного регулювання та збільшення кількості смуг руху – 27,8 с. Надалі для вирішення завдань організації дорожнього руху на ізольованих міських перетинах рекомендується для обґрунтування заходів щодо організації та оптимізації дорожнього руху на перетинах вулично-дорожньої мережі ширше застосовувати транспортне моделювання.

У роботі [4] описано склад та особливості функціонування сучасних систем управління дорожнім рухом та запропоновано новий спосіб адаптивного керування дорожнім рухом на основі передбачення транспортних потоків та швидких моделей оптимізації перехресть.

Система управління дорожнім рухом, що була запропонована, здатна продемонструвати високу ефективність завдяки комплексній оптимізації кожного окремого перехрестя. Вона враховує не лише поточні інтенсивності транспортних потоків, але й прогнозує їх зміни, що дозволяє приймати рішення щодо зміни режимів світлофора в реальному часі.

Завдяки використанню технологій, таких як відеоконтроль, датчики та інші системи збору даних, система може здійснювати точний моніторинг кожного

транспортного засобу, що проїжджає через перехрестя, і враховувати їх рух не лише на окремому перехресті, але й між сусідніми вузлами. Такий підхід дає змогу ефективно координувати транспортні потоки, зменшувати затори та забезпечувати безперебійний рух, оптимізуючи час проїзду та знижуючи витрати палива і забруднення навколишнього середовища.

Оптимізація керування кожним окремим перехрестям у реальному часі є можливою завдяки використанню системи мікроскопічного дискретно-подійного моделювання транспортних потоків. Дана система моделювання внаслідок застосування дискретно-подійного підходу має високу продуктивність і точність. Якість оптимізації управління транспортними потоками високою мірою залежить від точності передбачення щільності потоків транспорту. При цьому точність передбачення тим вища, чим менше часовий інтервал передбачення. При використанні на локальних перехрестях апаратного забезпечення достатньої продуктивності перерахунок оптимальних довжин фаз циклу регулювання світлофорного об'єкта може проводитись з початком кожної наступної фази. У цьому випадку тимчасовий інтервал передбачення, що реально використовується, скоротиться до тривалості однієї фази, тобто до 15-100 с, в результаті чого підвищиться ефективність оптимізації.

У роботі [5] описується детермінована система обслуговування, до якої надходять вимоги із трьох черг. Характеристики системи обслуговування, такі як інтенсивність та швидкість обслуговування, є стабільними та не залежать від часу. Подано визначення стаціонарного режиму та циклу обслуговування для вимог із трьох черг. Основна мета статті – знайти необхідні та достатні умови, при виконанні яких гарантується існування стаціонарного режиму роботи сервісної системи. При реалізації стаціонарного режиму обслуговування виключається можливість нескінченного накопичення запитів, у свій порядок обслуговування черг встановлюється заздалегідь і змінюється у майбутньому. У рамках математичної моделі детермінованої системи обслуговування запроваджуються деякі технологічні обмеження. Їх виконання необхідне

побудови адекватної моделі. Зокрема, передбачається, що обслуговування вимоги не може бути перервано. Є також обмеження тривалість циклу обслуговування. Доказ основного результату ґрунтуються на вирішенні нерівностей, отриманих при розгляді математичної моделі функціонування системи обслуговування. У доказі дається геометрична інтерпретація безлічі допустимих (що забезпечують стаціонарний режим) тривалостей безперервного обслуговування вимог, отриманих з черг.

Була розглянута детермінована система обслуговування з одним обслуговуючим пристроєм та трьома чергами з обмеженням на довжину циклу. Для такої системи було виведено необхідні та достатні умови встановлення стаціонарного режиму роботи системи, які були сформульовані у вигляді теорем 1 та 2. Теорема 1 раніше була отримана для систем без обмеження на довжину циклу; теорема 2 є новим результатом, вона має велику практичну цінність порівняно з теоремою 1, оскільки умови цієї теореми зручніші для перевірки існування в даній системі стаціонарних режимів. Також звернемо увагу на те, що теорему 2 можна використовувати і для випадку, коли обмеження на довжину циклу не накладається, для чого потрібно покласти рівним  $L$  нескінченності.

У роботі [6] дано короткий опис автоматизованої системи управління рухом транспортних та пішохідних потоків у місті. Наведено структуру системи, її функції, а також особливості реалізації апаратних засобів. У багатьох країнах накопичено позитивний досвід зниження негативних явищ автомобілізації за рахунок впровадження автоматизованих систем управління дорожнім рухом (АСУДР).

У роботі [7] розглядається завдання визначення оптимальних змін пропускної спроможності маршрутів транспортної мережі. Обстежувана транспортна мережа представлена графом з однією парою витік-стік і  $n$  альтернативними маршрутами, що не перетинаються. Завдання пошуку оптимальної стратегії зміни пропускної спроможності транспортної мережі формулюється як завдання дворівневої оптимізації. Верхнім рівнем моделюється

процес прийняття рішення адміністрацією міста, що має технічну можливість впливати на пропускну спроможність вулично-дорожньої мережі (ремонт, модернізація, будівництво нових ділянок тощо). Передбачається, що адміністрація мінімізуватиме загальний час руху транспортних потоків по мережі. Нижнім рівнем моделюється поведінка учасників руху, які реагують зміни дорожньої інфраструктури. Вважається, що кожен водій прагне мінімізувати свій особистий час руху із району відправлення до району прибуття. Для досліджуваної мережі оптимальне рішення знайдено явно. Розроблено методологічний інструмент підтримки прийняття рішень у галузі планування інфраструктурних змін вулично-дорожньої мережі міста.

У цьому роботі було розглянуто завдання знаходження оптимальної стратегії управління топологією транспортної мережі як завдання дворівневої оптимізації. Верхній рівень моделював процес ухвалення рішення адміністрацією під час планування змін вулично-дорожньої мережі. Передбачалося, що адміністрація прагне мінімізувати загальний час руху транспортних потоків. Цільова функція була заснована на другому принципі Вардропа. Нижній рівень моделював процес розподілу транспортних потоків залежно від інфраструктурних змін, які проводяться адміністрацією. Вважалося, кожен учасник руху прагне мінімізувати свій особистий час руху за умов конкурентної маршрутизації транспортних потоків. Відповідне завдання умовної оптимізації базувалося першому принципі Вардропа. Отримано її рішення для мережі з паралельних маршрутів при лінійній BPR-функції затримки та рівноважному по Вардропу розподілі транспортних потоків міста у явному вигляді. На основі цих теоретичних результатів можна розробити методологічні інструменти прийняття рішень у галузі управління вулично-дорожньою мережею великих міст. Їх можна врахувати під час вирішення інфраструктурних проблем транспортних мереж великої розмірності.

У роботі [8] розглянуто метод, що дозволяє підвищити пропускну спроможність перехресть дорожньої мережі міста за рахунок оптимального



налаштування циклу світлофора. Метод знаходження оптимального циклу світлофора базується на розробленій автором програмі. За допомогою програми моделюється рух автомобільного потоку через одне регульоване перехрестя і шляхом перебору визначаються найкращі параметри світлофора. У програмі використовується мікроскопічне моделювання, вхідні потоки автотранспорту моделюються як найпростіші; використовується спрощена модель руху розумного водія (The Intelligent Driver Model, IDM).

Мета даної роботи була така: розробити метод знаходження оптимальних параметрів світлофора для заданих значень інтенсивності вхідних потоків на перехресті. У ході виконання роботи була розроблена програма моделювання транспортних потоків, яка дозволяє задавати вхідні параметри (габарити перехрестя, кількість смуг руху, інтенсивність руху автомобілів) та отримувати всі необхідні вихідні параметри. Також у програмі можна встановити параметри оптимізації, після чого програма виконає відбір значень, відповідних заданим параметрам. Усі результати можна скопіювати у MS Excel, де побудувати необхідні графіки, провести подальший аналіз та вибрати оптимальний цикл світлофора. Слід зазначити, що автомобілі при перетині перехрестя не робили лівого повороту, і на перехресті не було пішоходів. Інтенсивність потоку автомобілів, що під'їжджають, передбачалася розподіленою за показовим законом. Перелічені умови значною мірою вплинули на отримані результати.

У роботі [9] запропоновано методичний підхід до визначення рівня пристосованості вантажного автоперевізника до змінного попиту. Обґрунтовано застосування нечітких множин для інтерпретації якісної інформації, необхідної для детальної оцінки рівня пристосованості вантажного автоперевізника до змінного характеру попиту. Розроблено алгоритм її діагностики. Наведено результати апробації запропонованого алгоритму. Таким чином, встановлено, що збільшення максимальної тривалості зеленого сигналу для транспортних засобів  $t_{\max}$  с 20 до 40 с призводить до різкого зростання середньої затримки пішоходів при інтенсивності руху транспортних засобів понад 1000 авт/год в обох

напрямок. Аналіз показує, що з використанням жорсткого режиму регулювання найбільш точної формулою з метою оцінки середньої затримки пішоходів на регульованому пішохідному переході є рівняння Брауна і Роддіна (6).

У роботі [10] вивчається один із методів локальної стабілізації періодичних орбіт нелінійних дискретних систем, пов'язаний з побудовою зворотного зв'язку, що запізнюється. Пропонується альтернативний підхід до побудови характеристичного полінома для лінеаризованої в околиці Т-циклу системи із запізненням. Доведено, що альтернативний підхід еквівалентний стандартним, проте безпосередньо дає можливість набувати нових форм характеристичних поліномів. Ці форми виявляються зручними у вирішенні проблеми управління хаосом і дозволяють застосувати методи геометричної теорії функції комплексного змінного.

## 1.6 Інтелектуальні транспортні системи

Сучасний підхід до вирішення завдань керування транспортною інфраструктурою великого міста забезпечується розробкою та використанням інтелектуальних транспортних систем (ІТС). Аналіз досвіду проектування та розвитку ІТС, принципів їх інтеграції, використання при здійсненні вантажних та пасажирських перевезень, при управлінні транспортними потоками у різних транспортних ситуаціях дозволяє зробити висновок про доцільність використання ІТС на автомобільному транспорті.

Термін «інтелектуальні транспортні системи» (ІТС) описує сукупність інтегрованих технологій, що об'єднують управління транспортною інфраструктурою, зокрема вулично-дорожньою мережею, технічними засобами організації дорожнього руху та транспортними потоками. Метою ІТС є оптимізація функціонування дорожнього руху за допомогою використання передових інформаційних технологій. Це дозволяє забезпечити збір та обробку інформації про стан інфраструктури та поточні транспортні потоки в реальному

часі, що, у свою чергу, дає змогу ефективно керувати рухом, знижувати затори та покращувати безпеку на дорогах.

У ІТС активно використовуються математичні моделі затримки транспортного засобу на перехрестях залежно від тривалості фаз сигналів світлофора, інтенсивності прибуття та вибуття транспортного засобу, завантаження під'їзду, наявності черги та ін. Переважне поширення набули моделі, що враховують як детерміновані, так і імовірнісні властивості транспортного потоку. Найбільш відомою є модель Вебстера, що широко використовується на практиці по всьому світу, але має свої обмеження.

Одна з моделей розрахунку затримки, що найточніше враховує умови руху на перехресті, що регулюється представлена в американському посібнику з пропускної спроможності доріг (НСМ 1994 - highway capacity manual). При порівняльному тестуванні аналітичних моделей НСМ 2000, ССГ 1995 та моделі Вебстера було доведено, що в умовах малонасиченого потоку оцінки затримок мають приблизно однакові результати. Разом з тим оцінки затримок за методикою НСМ 1994 занижені, особливо це проявляється при перенасиченому русі, коли інтенсивність під'їзду перевищує інтенсивність роз'їзду автомашин на перехресті і утворюються черги. Формула Вебстера за наявності заторів втрачає сенс, працездатними залишаються моделі НСМ 2010, НСМ 1994 та ССГ 1995.

При виведенні формул визначення показників рівня обслуговування на перехресті допускалися гіпотези, що спрощують аналітичні висновки, але послаблюють практичну застосовність моделей. Таким чином, аналітичні алгоритми і моделі, що використовуються в даний час, не завжди видають адекватну оцінку затримок транспортних засобів на перехрестях, що регулюються. В умовах транспортних потоків високої щільності розрахунки за різними формулами призводять до різних результатів. З іншого боку, аналітичні формули застосовні лише окремих перехрестях і дозволяють розрахувати параметри координованого управління.

Як критерій оптимізації може виступати мінімізація сумарної затримки транспортного засобу, вирівнювання завантажень транспортних напрямків, мінімізація затримок всіх учасників руху, мінімізація обсягу емісії вихлопних газів та ін.

Найбільш поширеним методом оптимізаційного розрахунку параметрів світлофорного регулювання є алгоритм transyt (traffic network study tool), розроблений TRL (Великобританія) на початку 70-х років і продовжує вдосконалюватися дотепер. У рамках методу реалізується ітераційний процес взаємодії двох основних структурних блоків: імітаційної моделі та оптимізатора.

Імітаційна модель дозволяє на підставі відомостей про поточні значення параметрів регулювання, інформації про час проїзду між стоп-лініями та транспортні потоки дозволяє розрахувати значення критерію оптимальності.

Оптимізатор змінює значення параметрів регулювання, аналізуючи отримане значення критерію оптимальності та реалізуючи задану користувачем стратегію.

Стратегія пошуку найкращих параметрів регулювання transyt являє собою поєднання методу випадкового пошуку з градієнтним спуском, а також використовує генетичний алгоритм в одній з останніх версій.

#### *Висновки до розділу:*

Існуючі інтелектуальні транспортні системи вирішують досить широке коло завдань організаційного характеру. Питання вирішуються системами на різних рівнях - від локального контролю дорожнього руху на дорогах вулиці, району, міста до міжміського сполучення.

Ключовим питанням організації дорожнього руху є інтелектуальний оптимальний контроль роботи світлофорів в залежності від завантаженості доріг і перехресть.

Світлові сигнали від відеокамер, які є джерелами первинної інформації для контролю, можуть бути ненадійними в умовах поганої видимості (погодні умови, недостатнє освітлення доріг у темний час доби тощо).

Необхідно розробити транспортну систему інтелектуального оптимального управління світлофорами на конкретному перехресті, використовуючи дротові канали зв'язку і вбудовані в дорожнє полотно датчики для його зайняття автомобілями

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

Для розробки ІТС потрібно розглянути роботу перехрестя та транспортних засобів, їх можливі стани, пропускну здатність перехрестя, фази регулювання сигналів світлофора, умови формування черг, час затримки автотранспорту при проїзді перехрестя тощо.

#### 2.1 Мінімальний час дозвільного сигналу світлофора

Пропускна здатність перехрестя залежить не тільки від його геометрії - ширини дороги, що перетинається (кількості її смуг), напрямку руху (пряме перетин або поворот-розворот), розташування стоп-лінії щодо початку перетину, але і від тривалості дозвільного сигналу світлофора.

Розроблені моделі затримки транспортних засобів (МЗ) на перехресті дають досить загальну картину поведінки автомобілів при під'їзді та перетині перехрестя для різних циклів регулювання – швидкість їх прибуття та роз'їзду, утворення черги тощо. Метою дослідження є поведінка одиниці ТС при проїзді перехрестя та обґрунтування мінімального проміжку часу для сигналу світлофора.

Розглянемо поведінку одного автомобіля, що стоїть першим у черзі перед стоп-лінією. При включенні зеленого сигналу світлофора він починає рух по перехрестю, який містить дві фази – фазу розгону (стартування з місця, набір швидкості) та основну фазу (рівномірний рух із дозволеною швидкістю). Передбачається, що інших перешкод (звуження дороги, об'їзду місця ремонтних робіт тощо) на перехресті відсутні.

Основним рівнянням транспортного потоку є співвідношення між швидкістю руху  $v$ , інтенсивністю  $q$  та щільністю потоку  $\rho$ :

$$q = V\rho;$$

де  $\rho$  – щільність транспортного потоку, тобто. кількість автомобілів, що припадають на одиницю довжини однорідної за транспортно-експлуатаційними характеристиками ділянки дороги, км.

$q$  – інтенсивність руху (кількість автомобілів, що перетинають перехрестя в одиницю часу), сек., хв., год., доба.

Таким чином, чим вища щільність транспортного потоку і нижча його інтенсивність, тим нижчою буде загальна швидкість руху, це призводить до утворення транспортних затримок та заторів (черг, «пробок») на дорогах.

Якщо затори на перегонах викликаються природними причинами (щільність автомобілів на полотні перевищує її пропускну спроможність) і спостерігаються, в основному, у години «пік», то світлофор є штучною перепорою, що діє найчастіше цілодобово.

Як відомо, цикл роботи світлофора складається з трьох фаз: дозвільний сигнал (зелений), попереджувальний (жовтий) та забороняючий (червоний). якщо перемикає сигнали світлофора часто, наприклад, зелений і червоний змінювати через 15-20 сек., то автомобілі рухатимуться лише у фазі розгону, тобто. на малій швидкості, в режимі «зліт - посадка» та пропускну спроможність перехрестя буде низька.

Максимальна інтенсивність руху через перехрестя досягається лише за швидкості 60 км/год (припустимою міських умов), тобто. після фази розгону, коли автомобіль проходить перехрестя вже на великій транспортній швидкості. при цьому інтенсивність розвантаження полотна (кількість автомобілів, що проїжджають в секунду) стає найбільшою, а щільність затора перед перехрестям (число машин на одиницю довжини полотна) швидко зменшується.

Тривалість цієї фази обмежується тільки режимом роботи світлофора - в години пік сигнали перемикаються часто (приблизно через 2-4 хв. для 3-4-х смугового напрямку дороги в кожену сторону і від 0,5 до 2 хв. для перетинає 1-2-х смугового), при цьому час включення вибирається пропорційним числу

смуг на дорогах, що перетинаються, в інші години світлофор перемикається рідше або переводиться на жовтий миготливий сигнал. в інтелектуальних світлофорних системах сигнал на перемикання визначається чергою на дорозі, що перетинає.

Однак, мінімальний час роботи зеленого сигналу світлофора має визначатися тривалістю як фази розгону транспортного засобу ТЗ, так і основною фазою у будь-який час доби та за будь-яких черг.

При розрахунку регулювання транспортних потоків на перехрестях вектор стану ТС можна задавати так:

$$S_{tc} = (V, a, t, x)$$

де:  $v$  - швидкість,  $a$  - прискорення,  $t$  - тривалість перебування може  $S_{tc}$ ,  $x$  - координата ТС на дорожній смузі.

При проїзді перехрестя розгін транспортних засобів відбувається постійним значенням прискорення. у цьому випадку рух транспортних засобів на полотні перехрестя описується відомими залежностями:

$$v(t) = V_0 + at \quad (2.1)$$

$$x(t) = x_0 + V_0 t + \frac{at^2}{2} \quad (2.2)$$

де:  $v(t)$  – швидкість транспортного засобу в момент часу  $t$ ;  $x(t)$  – відстань, пройдена ТЗ за час  $t$ ;  $V_0$  – початкова швидкість;  $a$  – прискорення руху;  $t$  – час проїзду перехрестя;  $x_0$  – початковий шлях.

Для розрахунків можна прийняти будь-яку систему розмітки смуг руху, наприклад, - 4 смуги шириною 3 метри, по дві смуги в кожную сторону - рисунок 2.1.

Число смуг не важливо. Відстань від початку стоп-лінії до початку перехрестя становить від 1 до 10 метрів, приймаємо його рівним 6 метрам. Таким чином, автомобіль для повного перетину перехрестя, при русі прямо або з поворотом вліво, повинен проїхати 18 метрів.



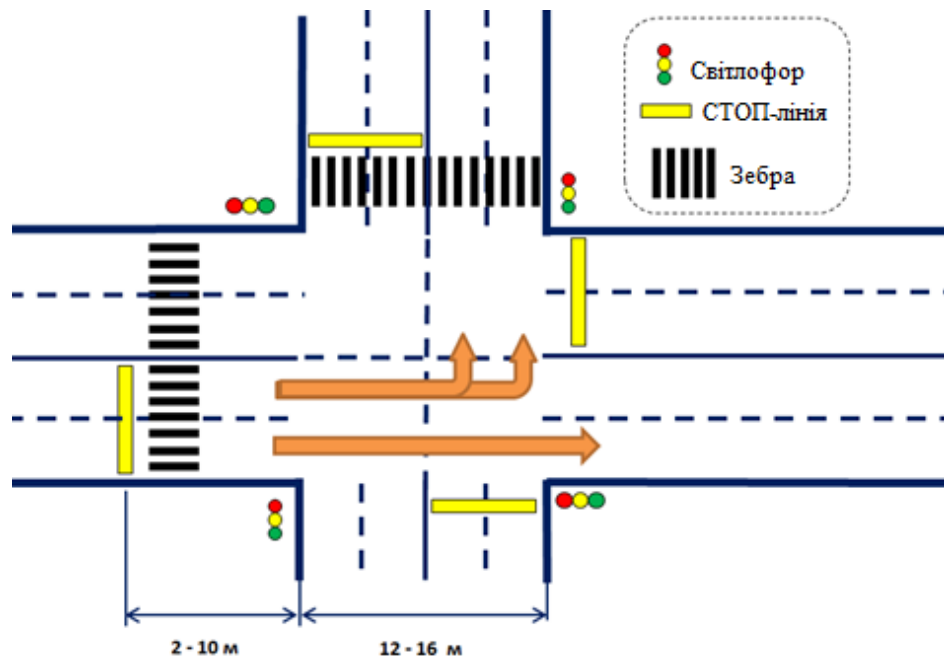


Рисунок 2.1 – Схема проїзду перехрестя

Вибір величини прискорення  $a$  обґрунтовано такими положеннями. Для легкових машин популярних моделей згідно з паспортними даними автомобілів час розгону машини від 0 до 100 км/год займає від 4,0 (Ferrari, Lamborghini) до 18,2 с (OpelCorsa), середній час розгону 15,75 с, прискорення, що досягається, при цьому коливається в межах від 25,0 до 5,49 м/с<sup>2</sup> відповідно.

Насправді дані таблиці 2.1 отримують дослідним шляхом. Для цього вибирають рівну горизонтальну ділянку дороги довжиною не менше 300 м, і в момент старту гонщик різко тисне на педаль газу до упору, задаючи максимально можливе прискорення. Однак дані, зняті за допомогою реєстратора RacelogicVBOX (основний прилад для таких вимірів), секундоміра або GPS відрізняються один від одного на величину до 20% по машині однієї моделі. Крім того, у різних джерелах наводяться різні дані, також на величину показника впливає думка керівництва компанії, що випускає автомобіль.

Фахівці вважають, що цей показник має суто психологічне значення, а на практиці машина з більшим часом розгону до 100 км/год (Kia) обганяє автомобіль

із вищими стартовими параметрами (Mazda). Максимальне прискорення водій вибирає самостійно, наприклад, під час обгону.

Таблиця 2.1– Розгін від 0 до 100 км/год

№ п/п	Марка и модель	Время разгона, с	Ускорение разгона, м/с <sup>2</sup>
1	Ferrari California, Lamborghini LP-560	4,0	25,00
2	Porsche Cayenne V6	7,8	12,82
3	Alfa Romeo Giulietta и Infiniti EX	9,4	10,64
4	BMW X1	9,7	10,31
5	Lexus CT200h	10,3	9,71
6	Volvo XC60	11,2	8,93
7	Audi A1	11,7	8,55
8	Honda Jazz	12,8	7,81
9	Jeep Wrangler, Toyota Corolla, Nissan Note	13,1	7,63
10	Hyundai Solaris	13,4	7,46
11	Daewoo Matiz и Mazda2	14,0	7,14
12	Mercedes-Benz B180 CDI	14,1	7,09
13	Kia Picanto и Seat Ibiza	14,4	6,94
14	Ford Focus	14,9	6,71
15	Skoda Fabia	15	6,67
16	Peugeot Partner/Citroen Berlingo	15,2	6,58
17	Land Rover Defender, Renault Kangoo	15,8	6,33
18	Mitsubishi i-Miev	15,9	6,29
19	Volkswagen Polo	16,1	6,21
20	Lada 4×4	16,4	6,10
21	Suzuki Jimny	17,2	5,81
22	Opel Corsa	18,2	5,49

У таблиці 2.2 наведено розраховані за функціями (2.1) та (2.2) дані про стани одиничного ТЗ при його русі по полотну перехрестя від початку стоплінії до кінця перетину і далі дискретність часу  $t = 0,2$  с.

Таблиця 2.2 – Стан транспортних засобів

Час $t$ , с	$a$ , м/с <sup>2</sup>	$V(t)$ , км/Г	$x(t)$ , м	Інтенсивність $q(t)$ , авт/с
1	2	3	4	5
0,2	15	3	0,6	1,39
0,4	15	6	1,8	2,78
0,6	15	9	3,6	4,18
0,8	15	12	6	5,57
1,0	15	15	9,3	6,96
1,2	15	18	12,6	8,35
1,4	15	21	16,8	9,74
1,6	15	24	21,6	11,13
1,8	15	27	27	12,53
2	15	30	33	13,92
2,2	15	33	39,6	15,31
2,4	15	36	46,8	16,70
2,6	15	39	54,6	18,09
2,8	15	42	63	19,48
3	15	45	72	20,88
3,2	15	48	81,6	22,27
3,4	15	51	91,8	23,66
3,6	15	54	102,6	25,05
3,8	15	57	114	26,44
4	15	60	126	27,83
4,2	15	60	138,6	27,83
6,4	15	60	277,2	27,83

Зазвичай, зі стоп-лінії водій після старту не різко, а плавно збільшує тиск на педаль газу, задаючи тим самим рівномірне прискорення машини до кінця розгону. Тому воно вважається постійним. Якщо прийняти прискорення руху ТЗ досить великим -  $a = 15\text{м/с}^2 = \text{const}$ , то на кожному кроці збільшення часу швидкість ТЗ на наступній позиції полотна перехрестя плавно наростатиме за лінійним законом.

З таблиці 2.2 слідує, що перший автомобіль проїжджає перехрестя за 1,5 з, набравши швидкість 22 км/год. У середньому, швидкість проїзду перехрестя становить близько 40 – 45 км/год.

За розрахованими даними у фазі розгону та в основній фазі побудовано графіки зміни швидкості та величини переміщення першого в черзі автомобіля при його старті від початку стоп-лінії – рисунок 2.2.

З рисунка 2.2 (до пунктирної лінії) випливає, що при розгоні з постійним прискоренням швидкість руху ТЗ зростає лінійно, а відстань, що проходить автомобілем, збільшується в статичній формі, тобто що вище швидкість машини, то більшу ділянку дороги воно долає в одиницю часу.

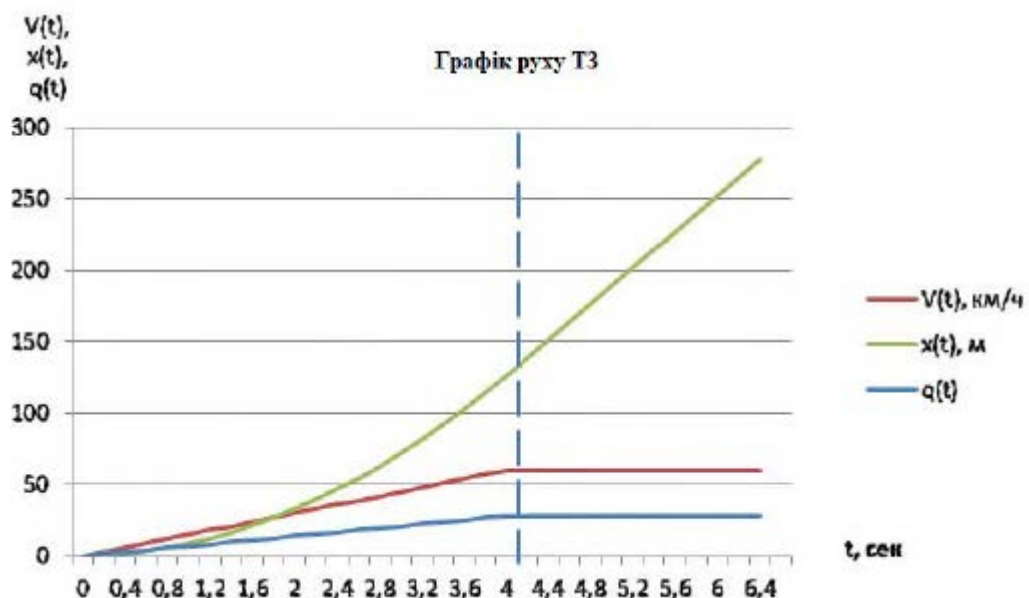


Рисунок 2.2 – Фаза розгону і основна фаза

Таким чином, швидкість 60 км/год досягається через 4сек., коли

автомобіль проїде 126 м – від початку стоп-лінії до кінця перехрестя (такі широкі перехрестя зустрічаються рідко, переважно на центральних магістралях великих міст). Зазвичай середня довжина автомобіля становить приблизно 4 м., відстань між машинами в черзі інтуїтивно вибирається рівною приблизно 2 м., тому для другого транспортного засобу дистанція для фази розгону збільшується на 6 м, для третього - на 12 м і т.д.

Оскільки ділянка розгону дорівнює 126 м, то при проїзді перехрестя фаза розгону закінчиться лише для 21-го автомобіля (126 м/с), який закінчуватиме проїзд перехрестя на швидкості 60 км/год. 22-й автомобіль в'їде на стоп-лінію та перехрестя зі швидкістю 60 км/год, тобто. вже в основній фазі.

Мінімальний час сигналу світлофора для 22-го автомобіля становить (для наведених даних) 4 с у фазі розгону плюс час проїзду перехрестя в основній фазі. За цей час його проїдуть 22 машини. Для прискорення  $a = 10\text{м/с}^2$  мінімальний час становитиме 6 сек.

Інтенсивність руху ТЗ через перехрестя залежить від їх швидкості та кількості, вона визначається за формулою<sup>^</sup>

$$q = V\rho; \quad (2.3)$$

де  $\rho$  - щільність транспортного потоку,  $q$  –інтенсивність руху.

Після пунктирної лінії рис 2.2 показані стани машини в основній фазі.

Під час основної фази, коли ТЗ рухається зі швидкістю 60 км/год, щільність транспортного потоку для довжини черги в 1 км становитиме  $1000\text{ м}/6\text{ м} = 167$  машин, при цьому інтенсивність руху  $q$  складе  $60\text{ км/год} \cdot 167\text{ авт} = 10\,000$  машин на годину або 27-28 машин на секунду. Під час розгону інтенсивність поступово зростає від 0 до 28 авт/с.

Так як прийнята довжина перехрестя від стоп-лінії до кінця дороги, що перетинає, становить 18 м, то перший автомобіль (див. табл. 1.2) встигає проїхати його за 1,5 с і досягти швидкості близько 22 км/год., що відповідає інтенсивності порядку 10,4 авт/с. Друга машина має шлях для розгону на 6 м більше, тому на виїзді за 1,7 зі швидкістю 25,5 км/год забезпечує інтенсивність

вже близько 11,8 авт/с, для третього ТЗ  $q$  досягає 13,2 авт/с і т.д. до 22-го ТЗ. 22-й автомобіль вже зі швидкістю 60 км/год в'їжджає на перехрестя і інтенсивність руху дорівнює 28 авт/с.

Ці положення справедливі для черги ТЗ, розташованої перед стоп-лінією перехрестя на одній смузі полотна дороги.

При багатосмуговій розмітці на кожній смузі дороги діють розглянуті вище положення, тобто. швидкість 60 км/год досягається ТЗ через 4 з кінці фази розгону, на той час ТЗ проходить відстань в 126 м, що зазвичай більше довжини будь-якого перехрестя, тобто. основна маса черги (до 22-ї машини) подолає перехрестя у фазі розгону. Усі параметри (швидкість, прискорення, пройдений шлях, інтенсивність потоку) справедливі для будь-якої смуги, але загальна інтенсивність проїзду перехрестя всіма чергами прямо-пропорційно числу смуг.

Так, при двосмуговій розмітці інтенсивність збільшиться в 2 рази - до 56 авт/с, при трисмуговому - в 3 рази, до 84 авт/с і т.д., але всі вони рухатимуться у фазі розгону. Інтенсивність проїзду перехрестя зростає, але загальна по всіх смугах середня швидкість залишається такою ж, як і на одній смузі.

Вигляд функції (1.3) та рис. 1.2 свідчать, що інтенсивність не має математичного екстремуму, наведені розрахунки показують, що для односмугового руху  $q$  досягає максимуму через час  $t = 4$  с при проїзді шляху  $x(t) = 126$  м, коли швидкість ТЗ стає рівною  $V(t) = 60$  км/год.

Якщо зрушити цю відстань до стоп-лінії, то вийде, що її початку швидкості 60 км/год досягне лише 22-й автомобіль через 4 з. Ще 0,3 з ним знадобиться для проїзду самого перехрестя, таким чином мінімальний час проїзду перехрестя становить 4,3 с.

На основі вищевикладеного розроблено методику визначення мінімальної тривалості дозвільного сигналу світлофора:

- Визначається час та відстань, що проходить автомобіль від початку стоп-лінії по одній смузі за фазу розгону
- До нього додається час, за який автомобіль проїжджає відстань від

початку стоп-лінії до кінця перехрестя в основній фазі. Це і буде мінімальний час сигналу світлофора.

Для багатосмугового полотна цей час множиться на кількість смуг руху, кількість перехрестя автомобілів, що проїхали:

$$N = 22k$$

де  $k$  - кількість смуг руху в одному напрямку.

Основні результати та висновки:

- При старті від стоп-лінії перехрестя автомобіль під час руху проходить дві фази – фазу розгону від 0 до 60 км/год та основну фазу – рух зі швидкістю 60 км/год.

- ТЗ долають перехрестя у фазі розгону, оскільки час розгону автомобіля від 0 до 60 км/год для більшості ТЗ становить 4 с., за цей час воно проходить 126 м дороги, а реальні перехрестя мають суттєво меншу довжину.

- ТЗ долають перехрестя у фазі розгону із середньою швидкістю порядку 43 км/год., мінімальний час сигналу світлофора - до 4 с.

- Перший у черзі автомобіль закінчує проїзд перехрестя шириною 18 м на швидкості 22 км/год через 1,5 с, другий - 25,5 км/год через 1,7 с., Третій - 28,5 км/год через 1,9 с, ... , 21-й - на швидкості 60 км/год через 4,3 секунди після старту зі своєї позиції в черзі за 108 м до початку стоп-лінії.

- Для однієї смуги дороги інтенсивність руху ТЗ через перехрестя після старту зі стоп-лінії збільшується з 0 до 28 авт/с.

- Мінімальний час дозвільного сигналу світлофора не залежить від числа смуг руху, і визначається лише швидкістю та прискоренням проїзду полотна перехрестя.

- Методика визначення мінімальної тривалості дозволяючого сигналу світлофора містить два етапи:

1. визначення часу та відстані, що проходить ТЗ на одній смузі за фазу розгону від початку стоп-лінії.

2. до нього додається час, протягом якого ТЗ проїжджає відстань від

початку стоп-лінії до кінця перехрестя в основній фазі.

Отриманий результат складе мінімальний час дозволяючого сигналу світлофора при будь-якій кількості смуг руху.

## 2.2 Аналіз моделі затримки Бекмана

При моделюванні процесів руху транспортних потоків зазвичай використовують три рівні їх опису: макроскопічний, мезоскопічний і мікроскопічний. Макроскопічний рівень призначений для опису потоку автомобілів на рівні міста, області (області) або цілої країни, для цього розробляються математичні моделі потоків транспортних засобів, в основному з використанням законів гідродинаміки окремі транспортні засоби - автомобілі різних типів, при цьому створюються моделі конкретних перехресть і розв'язок населеного пункту. Мезоскопічний рівень займає проміжне місце між макроскопічним і мікроскопічним рівнями, об'єднує математичний опис окремих перетинів в єдиній взаємодії, а також оперує окремими чергами або групами транспортних засобів.

Моделі мікроскопічного рівня, які враховують поведінку кожного окремого транспортного засобу як учасника дорожнього руху, дають найбільш достовірні результати для моделювання конкретних перехресть. За умови їх достатньої реалізації (тобто їх продуктивності) моделі цього рівня з найбільшим ефектом в режимі реального часу використовуються для реалізації адаптивного управління потоками транспортних засобів на міських перехрестях.

Математичні моделі, які призначені для опису тимчасової затримки транспортного засобу на перехресті доріг при регулюванні руху за допомогою світлофорів, поділяються на дві категорії:

1. так звані «точні» моделі, які в режимі реального часу описують динамічну ситуацію на перехресті під'їзних шляхів в заданий момент часу. Вони представлені моделями М. Бекман, В. Макніл, Дж. Дароччі та ін.);



2. так звані «приблизні» моделі, які враховують стаціонарні, існуючі дорожні умови і наближені до фактичної ситуації на дорозі. Характерними моделями цієї групи є моделі Ф. Вебстера, Дж. Міллер, Дж. Ньюелла та ін.).

Перша «точна» модель була створена Бекманом, в ній використовується біномічний закон прибуття ТЗ на перехрестя, що дозволяє оцінити середню затримку одного транспортного засобу за цикл  $d$ ,  $s$ , в ході регулювання світлофора при «жорсткому» перемиканні його сигналів. Він приймає детермінований закон зміни сигналів світлофора:

$$d = \frac{c - g}{c(1 - \frac{q}{s})} \left[ \frac{q_0}{q} + \frac{c - g + 1}{2} \right] \quad (2.4)$$

де:  $c$  - тривалість контрольного циклу, с;  $g$  - час подачі зеленого сигналу світлофора, с;  $q$  - інтенсивність наближення транспортного засобу до перехрестя, авто/с;  $s$  - інтенсивність черги транспортних засобів, авто/с;  $q_0$  - значення черги, що залишилася, автор.

Основне завдання полягає в аналізі моделі з позицій фізичного змісту його складових, визначення значущості (ваги, кількісного внеску) кожного параметра в величину затримки транспорту при формуванні аварійної ситуації, аналіз недоліків моделі при її використанні для управління сигналами світлофора.

Модель відноситься до групи «точних» і показує час затримки будь-якого автомобіля в черзі. Припустимо, що модель описує стан регульованого перехрестя в часовому інтервалі в 1 секунду, тоді інтенсивність руху ТЗ, як і кількість автомобілів в секунду, буде відповідати просто числу автомобілів.

Відношення забороненого сигналу світлофора (перша складова)  $(c-q)$  до часу циклу  $c$ , за яке на стоп-лінії затримується ТЗ  $(1 - q/s)$ . Вираз  $q/s$  показує швидкість прибуття транспортних засобів  $q$  у порівнянні з їх інтенсивністю виїзду  $s$ . У інтервалі в одну секунду це відношення числа прибулих автомобілів до числа виїздів, тобто частки прибулих автомобілів в числі виїздів.  $(1 - q/s)$  – це кількість машин, які не встигли проїхати до перехрестя, а  $c(1 - q/s)$  – час у повному циклі  $c$ , протягом якого вагони не встигли проїхати і утворили чергу.

Тобто перший дріб відображає відносний час проїзду сигналу світлофора, але не на повний час циклу  $c$ , а на його частину, на яку утворюється черга з  $q_0$  машин.

Час відносного збільшення числа машин показує вираз  $q_0/q$ , а частка  $(c - g + 1)/2$  є поправочним коефіцієнтом у вигляді  $1/2$  тривалості забороненого сигналу світлофору, який збільшено на 1.

Для обчислення часу затримки в черзі на транспортний засіб у разі світлофорного регулювання, можна скористатися стандартними підходами, використовуючи теоретичні моделі, зокрема модель Бекмана, яка дозволяє визначити затримку в черзі в залежності від таких параметрів, як інтенсивність прибуття транспортних засобів, час циклу регулювання світлофорного сигналу, та час затримки на кожній фазі світлофора. У випадку оптимального часу циклу, де час зеленого і червоного сигналу рівний, можна використовувати наступні припущення: час зеленого і червоного сигналу 120 с кожен; затримка на перехресті залежить від співвідношення між інтенсивністю прибуття і роз'їзду.

Таблиця 2.3 – Час затримки  $d$  при малих значеннях  $q$  та  $s$

$d$ , сек	$c$ , сек	$g$ , сек	$c - g$ , сек	$q$ , ав/сек	$s$ , авт/сек	$q_0$ , авт
0,00	240	240	0	2	3	30
3,23	240	228	12	2	3	30
8,25	240	216	24	2	3	30
15,08	240	204	36	2	3	30
23,70	240	192	48	2	3	30
34,13	240	180	60	2	3	30
46,35	240	168	72	2	3	30
60,38	240	156	84	2	3	30
76,20	240	144	96	2	3	30
93,83	240	132	108	2	3	30
113,25	240	120	120	2	3	30
134,48	240	108	132	2	3	30

157,50	240	96	144	2	3	30
182,33	240	84	156	2	3	30
208,95	240	72	168	2	3	30
237,38	240	60	180	2	3	30
267,60	240	48	192	2	3	30
299,63	240	36	204	2	3	30
333,45	240	24	216	2	3	30
369,08	240	12	228	2	3	30

Графік функції затримки автомобіля в динаміці, виходячи з даних табл.2.3, наведено на рис. 2.3.

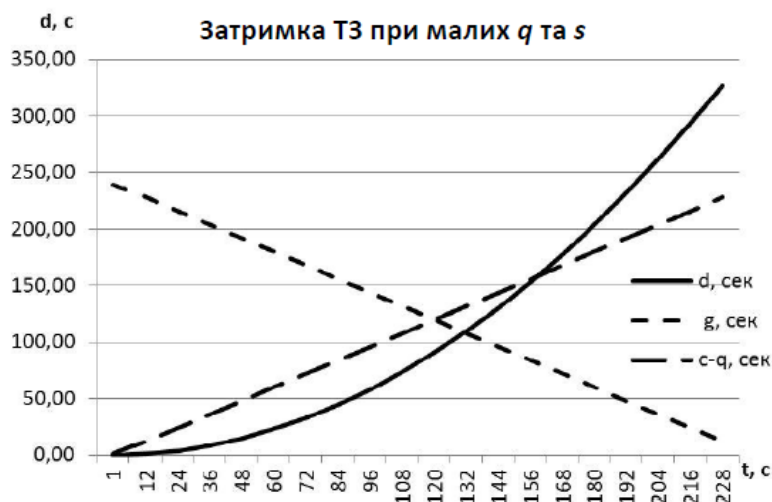


Рисунок 2.3 – Залежність часу затримки автомобіля на сигнали світлофора

З нього видно, що зі збільшенням тривалості заборонного сигналу світлофора і зменшенням дозвільного часу збільшується час затримки транспорту відповідно до степеневого закону.

Модель має наступні недоліки:

– Робота моделі заснована на припущенні, що інтенсивність виїзду  $s$  завжди повинна перевищувати інтенсивність наближення транспортного засобу  $q$ , інакше затримка  $d$  перетвориться у від'ємне число. В дійсності кількість

автомобілів, що наближаються, може перевищувати кількість машин, що виїжджають під час зеленої фази сигналу, що якраз і є причиною утворення черг.

– Кількісні показники  $q$  та  $s$  не здійснюють вплив на  $d$ , тому що вони можуть бути, як і великими (наприклад 200 та 300), так і маленькими (наприклад 2 та 3). Вагомим є те, щоб їх коефіцієнт був менше 1, а фактична інтенсивність виїзду машин на перехрестя та їх виїзду з нього була не значною для моделі, величина затримки  $d$  та графік - практично не змінюються (таб 2.4 - рис. 2.4.

– Черга  $q_0$  не має значного впливу на затримку, наприклад якщо збільшити  $q_0$  у 10 разів (1000 %), то це призведе до зміни значення  $d$  всього на 0,06%.

Таблиця 2.4 – Час затримки  $d$  при великих значеннях  $q$  та  $s$

$d$ , сек	$c$ , сек	$g$ , сек	$c - g$ , сек	$q$ , ав/сек	$s$ , авт/сек	$q_0$ , авт
0,01	240	239	1	200	300	30
1,00	240	228	12	200	300	30
3,80	240	216	24	200	300	30
8,39	240	204	36	200	300	30
14,79	240	192	48	200	300	30
22,99	240	180	60	200	300	30
32,99	240	168	72	200	300	30
44,78	240	156	84	200	300	30
58,38	240	144	96	200	300	30
73,78	240	132	108	200	300	30
90,98	240	120	120	200	300	30
109,97	240	108	132	200	300	30
130,77	240	96	144	200	300	30
153,37	240	84	156	200	300	30
177,77	240	72	168	200	300	30
203,96	240	60	180	200	300	30
231,96	240	48	192	200	300	30

261,76	240	36	204	200	300	30
293,36	240	24	216	200	300	30
326,75	240	12	228	200	300	30

Таким чином, модель Бекмана не є універсальною і підходить тільки для опису конкретних ситуацій руху транспортного засобу через перехрестя. Для того щоб визначити кількісні показники впливу аргументів функції  $d = f(c, g, q, s, q_0)$  на значення її значення, необхідно проаналізувати чутливість виразу (2.4) до варіації параметрів - аргументів  $c, g, q, s, q_0$ .

Метод знаходження кількісного внеску параметрів функції  $u = f(x, y, z)$  в її значення розроблено за умови диференційованості функції  $u$ . У методі використовується відношення відносних похибок параметрів  $\delta x, \delta y, \delta z, \dots$  і сама функція  $\delta u$ .

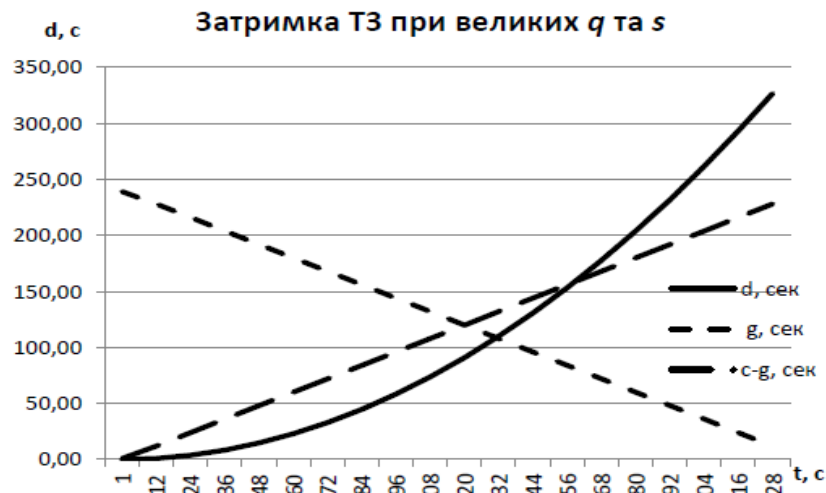


Рисунок 2.4 – Час затримки  $d$  для великих  $q$  і  $s$

Ця залежність виглядає так:

$$\delta u = \frac{1}{u} \left( x \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right| \delta x + y \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \delta y + z \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \delta z + \dots \right)$$

або

$$\delta u = K_x \delta x + K_y \delta y + K_z \delta z + \dots, \quad (2.5)$$

де:

$$K_x = \frac{x}{u} \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right|; \quad K_y = \frac{y}{u} \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|; \quad K_z = \frac{z}{u} \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \quad - \text{ коефіцієнти впливу (значущості)}$$

відповідних аргументів  $x, y, z, \dots$  функції  $u$ .

Наводячи всі аргументи  $x, y, z, \dots$  Сумарна похибка, наприклад,  $\delta i = 1\%$ , може бути визначена по тому, на скільки відсотків зміниться значення  $\delta u$  при зміні кожного з параметрів на один відсоток.

Для визначення частинних похідних функції  $d$  з параметрів  $c, g, q, s$  і  $q_0$  необхідно перетворити функцію (2.4) в більш однорідну структуру, тобто відкрити дужки:

$$d = \frac{2cq_0s + c^2qs - 2cqgs + cqs - 2q_0gs + qg^2s - qgs}{2cqs - 2cq^2}$$

і взяти з нього часткові похідні для кожного з параметрів  $c, g, q, s$  і  $q_0$ . Потім визначають коефіцієнти значущості  $K_i$  для кожного параметра в різний час сигналу світлофора і визначають процентний внесок кожного параметра в величину затримки  $d$ .

У таблиці 2.5 наведені результати обчислень компонент  $K_i \cdot \delta i$  рівняння чутливості (2.5) по кожному параметру (середні значення в останньому рядку), за якими побудовані графіки зміни впливу аргументів моделі (2.4) на затримку  $d$  у функції часу – рис. 2.5.

Таблиця 2.5 – Внесок аргументів у величину функції  $d$

$t, \text{сек}$	$c, \%$	$g, \%$	$q, \%$	$s, \%$	$q_0, \%$
1	6,89	92,90	0,03	0,16	0,02620
12	11,10	88,42	0,16	0,28	0,02624
24	15,44	83,33	0,55	0,66	0,02621
36	19,46	78,05	1,19	1,28	0,02612
48	23,14	72,62	2,06	2,15	0,02597
60	26,47	67,09	3,17	3,24	0,02575
72	29,43	61,50	4,49	4,55	0,02548
84	32,01	55,89	6,01	6,06	0,02515
96	34,20	50,31	7,71	7,75	0,02477

108	36,00	44,79	9,58	9,61	0,02434
120	37,43	39,37	11,58	11,60	0,02387
132	38,49	34,07	13,70	13,71	0,02337
144	39,21	28,93	15,92	15,92	0,02284
156	39,59	23,96	18,21	18,21	0,02228
168	39,66	19,20	20,57	20,55	0,02171
180	39,45	14,64	22,96	22,93	0,02112
192	38,97	10,30	25,37	25,34	0,02052
216	37,33	2,31	30,19	30,15	0,01931
228	35,26	1,31	31,73	31,68	0,01822
Середній	30,89	43,76	12,65	12,68	0,02347

Так, найбільш значущим параметром функції затримки є час зеленого сигналу світлофора  $g$  – 43,76%, друге місце займає час циклу  $c$  – 30,89%, третє і четверте місця ділять інтенсивність проїзду автомобілів  $s$  із середнім внеском в значення  $d$  - 12,68% і інтенсивність прибуття  $q$  з вагою 12,65%, п'яте місце по довжині черги  $q_0$  становить 0,0024%.

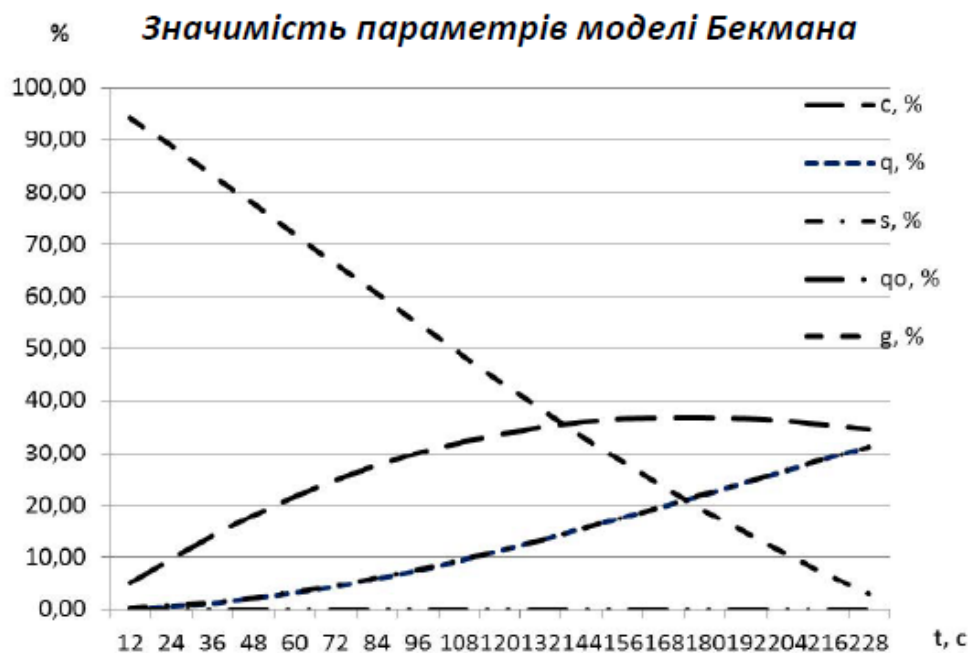


Рисунок 2.5 – Вплив параметрів моделі на затримку

Можна погодитися і з істотним впливом на затримку зеленого сигналу світлофора, так як він формує час проїзду автомобілів, основною причиною затримки є заборонний сигнал, він представлений в моделі часом циклу  $s$ , значення  $s$  і  $q$  практично однакові за важливістю, але практично відсутність впливу на затримку черги  $q_0$  перед світлофором є істотним недоліком моделі Бекмана.

Ключові результати та висновки:

- Залежність затримки транспорту перед перехрестям з жорстким регулюванням світлофорів носить степеневий характер.
- Недоліки: інтенсивність проїзду завжди повинна бути більше, ніж інтенсивність руху; фактична інтенсивність виїзду транспортних засобів на перехрестя і їх проїзд не є значущими для моделі, потрібно лише, щоб їх коефіцієнт був менше 1; Розмір черги практично не впливає на значення затримки транспортування.
- На модель Бекмана найбільший кількісний показник має вплив на затримку викликаний часом пропускнуго сигналу світлофора - близько 44%, на другому місці - час забороненого сигналу - близько 31%, майже такий же внесок в затримку вносить інтенсивність прибуття і виїзду - по 12-13%, і практично не впливає на затримку черга транспортних засобів - менше 1%.
- З адаптивним керуванням світлофором за допомогою моделі Бекмана режим роботи наступного циклу проїзду перехрестя може бути розрахований за результатами попереднього.

### 2.3 Аналіз моделі затримки Вебстера

Багато навчальної та наукової літератури присвячено питанням затримки транспортного засобу перед стоп-лінією перехрестя [19, 29, 40, 54 та ін.]. За нормативну прийняту загальноприблизну модель затримки Ф. В. Вебстера [30, 31], вона заснована на поєднанні теоретичного аналізу і чисельного



моделювання, але на практиці може давати недостовірні результати. Тому представляє інтерес розглянути фізичний сенс кожної складової моделі, їх вплив на затримку транспорту, взаємозв'язок з іншими характеристиками перетину, а також визначити внесок кожного параметра моделі в величину величини затримки [3].

Для вивчення моделі було використано два методи:

1. Чисельний метод моделювання - розрахунки всіх параметрів і компонентів моделі, а також самої затримки для реальних практичних умов роботи перетину. Розрахунки були виконані для визначення числового значення кожної компоненти моделі, їх кількісного значення в рамках функції затримки.

2. Метод чутливості відносних похибок [43, 44] дозволяє знайти значимість кожного параметра для функції затримки (їх «вага», внесок в величину затримки).

Модель Ф. В. Вебстера має вигляд [59]:

$$d = \frac{c \left(1 - \frac{g}{c}\right)^2}{2 \left[1 - \left(\frac{g}{c}\right) x\right]} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65 \left(\frac{c}{q^2}\right)^{\frac{1}{3}} x^{2+\left(\frac{g}{c}\right)} \quad (2.6)$$

де:  $c$  - довжина контрольного циклу, с;  $d$  - середня затримка одного ТЗ у цикл, с;  $g$  - тривалість зеленого сигналу, с;  $x$  - рівень насиченості транспортного потоку (ступінь завантаженості під'їзду), авт.;  $q$  - інтенсивність прибуття ТЗ засобу, авто/с.

Модель (2.6) включає в себе три частини. Перший описує час затримки при стаціонарному наближенні транспортного потоку, другий враховує випадкову складову процесу прибуття транспортних засобів за законом Пуассона, припускаючи при цьому сталість інтенсивності їх виїзду відповідно до пропускної спроможності регульованого перехрестя. Третя частина служить для регулювання тривалості затримки, її величина в межах 1 ÷ 10% від величини суми перших двох частин.

Пропускную здатність перехрестя, яка повинна відповідати постійній

інтенсивності проїзду транспортного засобу, можна визначити наступним чином. Згідно з [24, 31, 34], рекомендується використовувати рівняння при оцінці практичної пропускної здатності в конкретних дорожніх умовах:

$$P = \beta P_{max}$$

де  $\beta$  - кінцевий коефіцієнт зниження пропускної здатності, що дорівнює виробленню часткових коефіцієнтів  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_{14}$ , які враховують розмір смуги руху, наявність і ширину узбіччя, кількість транспортних засобів, що повертаються на перехресті, наявність перешкод і т. д., варіюються в діапазоні від 0,7 до 1,0, їх добуток в середньому становить 0,85.

$P_{max} = 2100 - 4000$  Вт/год, – максимальна практична пропускна здатність легкових автомобілів в залежності від кількості смуг на дорожньому полотні.

Для практичних розрахунків можна взяти  $P_{max} = 2200$  авто/год, тоді  $P = 0,85 P_{max} = 1850$  авто/год або 0,51 авто/с.

Перша складова. Відношення  $g/s$  показує частку зеленого сигналу  $g$  у повному циклі  $s$ ,  $(1 - g/s)$  - частку заборонного сигналу в циклі, чисельник  $s(1 - g/s)^2$  відповідає квадрату часу частки заборонного сигналу в циклі,  $s$ .

У знаменнику компонента  $(g/c)x$  показує, на скільки змінюється навантаження заходу на посадку (під'їзд транспортного засобу до перехрестя) на частку зеленого сигналу в циклі,  $[1 - (g/c)x]$  – те саме, але для частки заборонного сигналу світлофора.

У загальному випадку перша складова відповідає половині часу зміни навантаження дорожнього полотна (черги) під час дії заборонного сигналу світлофора.

Друга складова показує зміну квадрата відносної щільності вагонів в черзі  $x$  по відношенню до залишкової щільності  $(1 - x)$  - хто не прибув, що відбувається при інтенсивності прибуття  $q$ .

У загальному випадку друга складова відповідає половині часу формування відносної щільності автомобілів в черзі (в квадраті) по відношенню до відносної щільності автомобілів, які не дійшли до перетину при інтенсивності

$q$ . Це і є випадковість затримки, так як вона може утворюватися, а може і не утворюватися при конкретних інтенсивностях  $q$  і ширині смуги руху.

Третя складова скорочує загальний час затримки транспортного засобу на його корекцію.

#### 2.4 Чисельне моделювання роботи моделі Вебстера для реальних умов проїзду

Для отримання числових значень тривалість затримки за моделлю (2.6) була розрахована на основі реальних даних проходження перехрестя за такими параметрами: час циклу  $c = 240$  с, швидкість прибуття  $q = 2$  авт/с, відносна щільність автомобілів при наближенні  $x = 0,8$ .

У таблиці 2.6 обчислюється час затримки в черзі транспортних засобів в функції часу проїзду заборонного сигналу світлофора  $c - g$ , с. У правій частині табл. 2.6 показані кількісні значення всіх трьох компонентів моделі (2.6).

Таблиця 2.6 – Час затримки  $d$  та значення складових моделі

$d, c$	$c, c$	$g, c$	$c-g, c$	$q, авт/с$	$x, авт$	1-е	2-е	3-е
0,27	240	240	0	2	0,8	0,000	0,8000	0,5337
1,49	240	228	12	2	0,8	1,250	0,8000	0,5643
4,49	240	216	24	2	0,8	4,286	0,8000	0,5966
8,61	240	204	36	2	0,8	8,438	0,8000	0,6309
13,47	240	192	48	2	0,8	13,333	0,8000	0,6671
18,84	240	180	60	2	0,8	18,750	0,8000	0,7053
24,60	240	168	72	2	0,8	24,545	0,8000	0,7458
30,64	240	156	84	2	0,8	30,625	0,8000	0,7886
36,89	240	144	96	2	0,8	36,923	0,8000	0,8338
43,31	240	132	108	2	0,8	43,393	0,8000	0,8817
49,87	240	120	120	2	0,8	50,000	0,8000	0,9323

56,53	240	108	132	2	0,8	56,719	0,8000	0,9857
63,29	240	96	144	2	0,8	63,529	0,8000	1,0423
70,11	240	84	156	2	0,8	70,417	0,8000	1,1021
77,00	240	72	168	2	0,8	77,368	0,8000	1,1653
83,94	240	60	180	2	0,8	84,375	0,8000	1,2322
90,93	240	48	192	2	0,8	91,429	0,8000	1,3029
97,95	240	36	204	2	0,8	98,523	0,8000	1,3776
105,00	240	24	216	2	0,8	105,652	0,8000	1,4567
112,07	240	12	228	2	0,8	112,813	0,8000	1,5402
118,58	240	1	239	2	0,8	119,400	0,8000	1,6210

Графік функції затримки транспортного засобу з моменту подачі заборонного сигналу світлофора, побудований за даними табл. 2.6, наведено на рисунку 2.6.

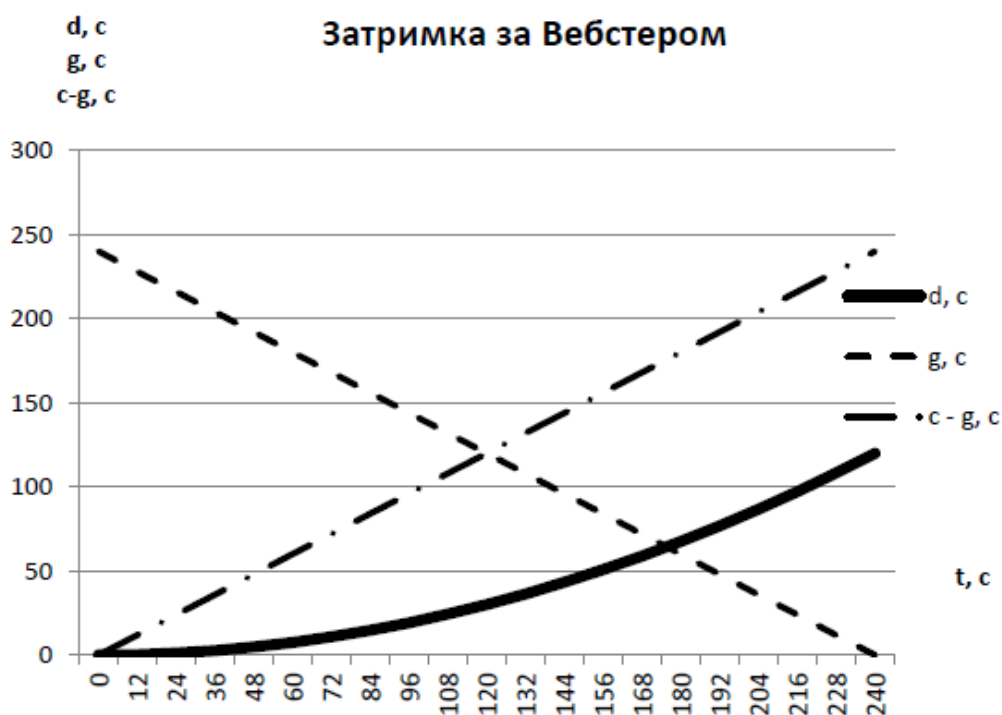


Рисунок 2.6 – Залежність часу затримки автомобіля від сигналів світлофора

З графіка видно, що зі збільшенням тривалості дії заборонного сигнального

знаку світлофора збільшується час затримки транспорту за слабо вираженим експоненціальним законом.

Для визначення кількісного впливу на  $d$  інтенсивності  $q$  і ступеня навантаження наближення  $x$  була перерахована таблиця 2.6 при різних значеннях  $q$  і  $x$ . При збільшенні інтенсивності від  $q = 2$  ав/с до  $q = 100$  авто/с, (тобто в 50 разів) час затримки збільшився на 0,7 секунди (з 118,58 до 119,30 секунди), другий член моделі зменшився з 0,8 до 0,016, і третя - від 1,62 до 0,119 (табл. 2.7).

Таблиця 2.7 – Час затримки  $d$  для великих  $q$  і значень складових моделі

$d, c$	$c, c$	$g, c$	$c-g, c$	$q, авт/с$	$x, авт$	1-е	2-е	3-е
0,02	240	240	0	100	0,8	0,000	0,016	0,0393
1,22	240	228	12	100	0,8	1,250	0,016	0,0416
4,26	240	216	24	100	0,8	4,286	0,016	0,0440
8,41	240	204	36	100	0,8	8,438	0,016	0,0465
13,30	240	192	48	100	0,8	13,333	0,016	0,0492
18,71	240	180	60	100	0,8	18,750	0,016	0,0520
24,51	240	168	72	100	0,8	24,545	0,016	0,0550
30,58	240	156	84	100	0,8	30,625	0,016	0,0581
36,88	240	144	96	100	0,8	36,923	0,016	0,0614
43,34	240	132	108	100	0,8	43,393	0,016	0,0650
49,95	240	120	120	100	0,8	50,000	0,016	0,0687
56,66	240	108	132	100	0,8	56,719	0,016	0,0726
63,47	240	96	144	100	0,8	63,529	0,016	0,0768
70,35	240	84	156	100	0,8	70,417	0,016	0,0812
77,30	240	72	168	100	0,8	77,368	0,016	0,0859
84,30	240	60	180	100	0,8	84,375	0,016	0,0908
91,35	240	48	192	100	0,8	91,429	0,016	0,0960
98,44	240	36	204	100	0,8	98,523	0,016	0,1015

105,56	240	24	216	100	0,8	105,652	0,016	0,1073
112,72	240	12	228	100	0,8	112,813	0,016	0,1135
119,30	240	1	239	100	0,8	119,400	0,016	0,1194

Зміна рівня навантаження  $x$  від 0,8 до 0,1 мало впливає на затримку ( $d = 119,03$ ), але зменшує значення другої та третьої складових моделі (2,7) до другого-третього знаків після коми – див. таблицю 2.8.

При  $x \geq 1$  величина затримки  $d$  прагне до нескінченності, тобто модель не працює з перенасиченими транспортними потоками з утворенням черг.

Таким чином:

- на тривалість затримки транспортного засобу практично не впливає друга та третя частини моделі;
- зміна  $q$  і  $x$  не змінює значення  $d$  в значних межах, графіки рисунку 1 практично не змінюються;
- При насиченому транспортному потоці ( $x \geq 1$ ) модель стає непрацездатною.

Таблиця 2.8 – Час затримки  $d$  при малому  $x$  і значення компонентів моделі

$d, c$	$c, c$	$g, c$	$c-g, c$	$q, авт/с$	$x, авт$	$1-e$	$2-e$	$3-e$
0,00	240	240	0	2	0,1	0,000	0,0028	0,0000
0,33	240	228	12	2	0,1	0,331	0,0028	0,0000
1,32	240	216	24	2	0,1	1,319	0,0028	0,0000
2,95	240	204	36	2	0,1	2,951	0,0028	0,0000
5,22	240	192	48	2	0,1	5,217	0,0028	0,0000
8,11	240	180	60	2	0,1	8,108	0,0028	0,0000
11,62	240	168	72	2	0,1	11,613	0,0028	0,0000
15,72	240	156	84	2	0,1	15,722	0,0028	0,0000
20,43	240	144	96	2	0,1	20,426	0,0028	0,0000
25,72	240	132	108	2	0,1	25,714	0,0028	0,0000

31,58	240	120	120	2	0,1	31,579	0,0028	0,0001
38,01	240	108	132	2	0,1	38,010	0,0028	0,0001
45,00	240	96	144	2	0,1	45,000	0,0028	0,0003
52,54	240	84	156	2	0,1	52,539	0,0028	0,0005
60,62	240	72	168	2	0,1	60,619	0,0028	0,0008
69,23	240	60	180	2	0,1	69,231	0,0028	0,0014
78,37	240	48	192	2	0,1	78,367	0,0028	0,0025
88,02	240	36	204	2	0,1	88,020	0,0028	0,0045
98,18	240	24	216	2	0,1	98,182	0,0028	0,0080
108,83	240	12	228	2	0,1	108,844	0,0028	0,0143
119,03	240	1	239	2	0,1	119,052	0,0028	0,0243

Для того щоб визначити кількісні показники впливу аргументів функції  $d = f(c, g, q, x)$  на значення її значення, необхідно проаналізувати чутливість виразу (2.6) до варіації параметрів -аргументів  $c, g, q, x$ .

## 2.5 Значимість параметрів для затримки

Кількісний внесок (значимість, значення, вага) кожного параметра функції (2.7) також визначали за рівнянням чутливості (2.5).

Для спрощення розрахунків можна знехтувати третьою складовою моделі (2.7), так як чисельне моделювання показало, що її внесок в загальне значення затримки незначний.

Визначити частинні похідні функції  $d$  за допомогою параметрів  $c, g, q$  і  $x$ . Перетворимо функцію (2.7) в більш однорідну структуру, тобто розкриємо дужки:

$$d = \frac{2c^2q - 2c^2qx - 4cqq + 4gcqx + 2g^2q - -2qq^2x + 2x^2 - 2gx^3}{4cq - 4cqx - 4gqx + 4gx^2q}$$

Потім визначають коефіцієнти значущості  $K_i$  для кожного параметра в

різний час сигналу світлофора і знаходять процентний внесок кожного параметра в значення затримки  $d$ .

У таблиці 2.9 наведені результати розрахунків складових  $K_i \cdot \delta_i$  регулювання чутливості (2.5) за всіма параметрами (середні дані в останньому рядку), яка використовується для побудови графіка зміни впливу аргументів моделі (2.6) на затримку  $d$  у часовій функції - рисунок 2.7.

Таблиця 2.9 – Внесок аргументів  $c$ ,  $g$ ,  $q$  та  $x$  у значення функції  $d$

$t, c$	$c, \%$	$g, \%$	$x, \%$	$q, \%$
1	29,51	0,39	61,38	8,71
12	28,30	4,47	58,87	8,36
24	27,09	8,56	56,35	8,00
36	25,98	12,31	54,04	7,67
48	24,96	15,77	51,90	7,37
60	24,01	18,97	49,94	7,09
72	23,13	21,93	48,11	6,83
84	22,32	24,68	46,41	6,59
96	21,56	27,25	44,83	6,36
108	20,85	29,64	43,36	6,15
120	20,18	31,89	41,97	5,96
132	19,56	33,99	40,68	5,77
144	18,97	35,97	39,46	5,60
156	18,42	37,83	38,31	5,44
168	17,90	39,59	37,23	5,28
180	17,41	41,25	36,20	5,14
192	16,94	42,82	35,23	5,00
204	16,50	44,32	34,32	4,87
216	16,08	45,73	33,44	4,75
228	15,68	47,07	32,61	4,63



240	15,30	48,35	31,83	4,52
Середнє	20,98	29,18	43,64	6,19

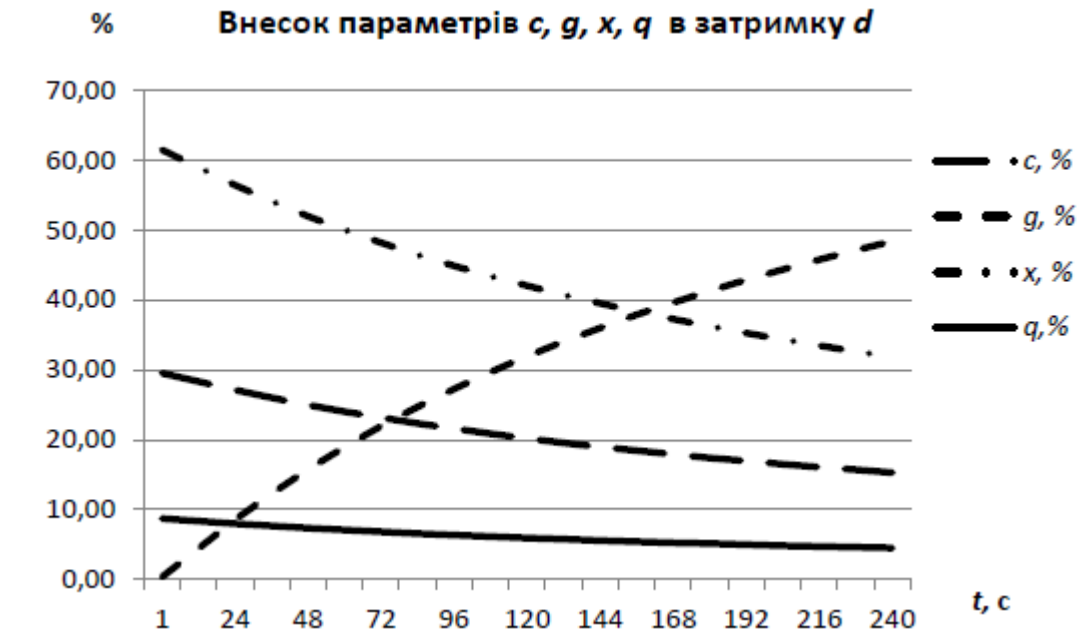


Рисунок 2.7 – Вплив параметрів моделі на затримку

Так, найбільш значущим параметром для функції затримки є  $x$  - рівень під'їзду транспортного засобу до перехрестя, його внесок в значення  $d$  становить в середньому 43,64%, друге місце займає  $g$  - тривалість зеленого сигналу світлофора, його вага для функції  $d$  становить 29,18%, третє місце займає час циклу  $c$  - 20,98%, четверте - інтенсивність прибуття  $q$  - 6,19%.

## 2.6 Розробка нової математичної моделі затримки

Недоліки розглянутих вище моделей обумовлюють необхідність розробки нової математичної моделі затримки транспортного засобу для її використання в системі управління перехрестями. Ось основні правила управління роботою світлофорів на перехресті.

Затримка транспортних засобів прямо пропорційно залежить від інтенсивності наближення автомобілів до перехрестя і обернено пропорційно - від інтенсивності їх виїзду з нього під час зеленого сигналу світлофора.

Тривалість дії сигналу роздільної здатності залежить від наступних правил:

– Коли інтенсивність руху транспорту не перевищує пропускну здатність перехрестя, є можливість оптимізувати час роботи світлофора, зокрема час зеленого сигналу, щоб максимально знизити затримки транспортних засобів. Це дозволяє досягти ефективного розподілу часу для кожної фази світлофорного циклу без створення надмірних черг на перехресті.

– Швидкість проходження перехрестя зверху регулює пропускну здатність перехрестя і, відповідно, інтенсивність проходження накопиченої черги.

Для конкретного перетину його місткість визначається виразом [34]

$$P = Q \frac{V}{D} \rho, \text{ авт/год}$$

де  $V$  – швидкість на перехресті (дозволена правилами дорожнього руху), км/год;  
 $D$  - відстань між машинами при даній швидкості, м;  $\rho$  - кількість смуг руху, шт.;  
 $Q$  - відношення часу зеленого сигналу світлофора до його часу циклу.

У [34] також зазначено, що «при нормальному прискоренні при русі з місця автомобілів  $a = 1,8 \text{ м/с}^2$  для перетину вулиці шириною 40 м необхідно 6,65с, що відповідає швидкості  $V = 12 \text{ м/с} = 43 \text{ км/год.}$ , яка неприпустима на перехресті з міркувань безпеки пішоходів. Саме тому режим перехрестя має бути близько 10 км/год, що відповідає перетину вулиці ТЗ за 14 секунд».

Для перехрестя двох доріг коефіцієнт  $Q$  (в залежності від кількості смуг) становить [34]: одна смуга – 0,40; дві смуги – 0,38; три смуги - 0,37.

На практиці, якщо на перехресті немає перешкод, наприклад, об'їзд перешкоди, звуження дороги, поворот автомобіля, то водій транспортного засобу розганяється і проїжджає перехрестя до кінця перехрестя, а потім рухається далі, намагаючись при цьому швидко вийти на дозволена в місті швидкість 60 км/год.

Саме тому середня швидкість машини на перехресті складає 25-40 км/год, конкретна величина визначається тільки з довжини перехрестя. Отже, величина

$P$  як швидкість зменшення черги  $s$  для типових умов  $Q = 0,40$  та  $D = 2$  (визначена при різних швидкостях) буде дорівнюватиме:

для  $V = 10$  км/год,  $s = 1,11$  авто/с;

для  $V = 30$  км/год,  $s = 3,33$  авто/с;

для  $V = 60$  км/год,  $s = 6,67$  авто/с.

Коли інтенсивність руху перевищує пропускну здатність перехрестя, важливо переходити на «жорсткий» режим регулювання фаз світлофора. Це дозволяє досягти максимальної пропускну здатності та зменшити затримки на перехресті, особливо в умовах інтенсивного трафіку.

*«Жорсткий» режим регулювання світлофора:*

У цьому режимі тривалість фаз світлофора визначається не лише поточними параметрами трафіку, але й кількістю смуг на перехресті. Це дає змогу більш ефективно використовувати доступну інфраструктуру і знизити час затримки для всіх учасників дорожнього руху.

*Ключові особливості:*

1. Пропорційне регулювання залежно від кількості смуг:

- Фаза зеленого сигналу для кожного напрямку на перехресті визначається пропорційно кількості смуг для того чи іншого напрямку.

- Чим більше смуг в тому чи іншому напрямку, тим більше транспортних засобів може пропустити світлофор, і, відповідно, більший час зеленого сигналу буде надаватись для цього напрямку.

2. Режим для смуг з правим поворотом:

- Для смуг, на яких здійснюються праві повороти, можливо, не досягається ліміт пропускну здатності, тому для цих смуг можна встановити додаткові фазові корекції.

- Це здійснюється за рахунок регулювання тривалості зеленої стрілки для правого повороту. Якщо на смузі правого повороту немає переповнення, то час зеленої стрілки буде знижено, що дозволяє компенсувати час для інших напрямків.

### 3. Смуги з переповненням та жорстке регулювання:

– Для смуг, де пропускна здатність вже досягнута (наприклад, основні смуги або смуги лівого повороту), переходять на «жорстке» регулювання. Це означає, що час червоної або зеленої фази змінюється з урахуванням поточного інтенсивного потоку.

– Наприклад, у випадку, якщо на одному напрямку інтенсивність перевищує пропускну здатність, система може застосувати більш тривалу фазу червоного сигналу для цього напрямку, щоб зменшити затори та пропустити більше транспортних засобів у наступному циклі.

#### *Вигоди та ефективність:*

##### 1. Максимізація пропускної здатності:

– Такий підхід дозволяє максимально ефективно використовувати доступну дорожню інфраструктуру і сприяє кращому розподілу часу на різні напрямки.

##### 2. Зменшення заторів:

– Регулювання часу зеленого сигналу пропорційно смугам дозволяє зменшити затори на перехрестях і оптимізувати потік транспорту навіть в умовах перевантаження.

##### 3. Адаптивність:

– За допомогою цього підходу можна адаптувати світлофорне регулювання в реальному часі залежно від інтенсивності руху, що дозволяє зменшити затримки та покращити загальний потік транспортних засобів.

Нова модель затримки транспортного засобу на перехресті, що ґрунтується на фізичних процесах, є важливим кроком у вдосконаленні систем управління дорожнім рухом. Така модель повинна враховувати не тільки кількість транспортних засобів, що проїжджають перехрестя, а й фізичні характеристики процесів, що відбуваються під час руху, а саме: рух транспортних засобів через перехрестя, взаємодію з іншими транспортними засобами, а також ефект від світлофорного регулювання.

Модель виглядає так:

$$d = \frac{(c - g)q}{gs} + \frac{q_0}{s} + kg \quad (2.7)$$

де  $k = 0 \div 0,5$  – коефіцієнт з урахуванням випадкових затримок (поворот ліворуч з просочуванням, об'їзд тимчасових перешкод).

При розробці моделі затримки транспортних засобів на перехресті, яка враховує функціонування перетину в часовому інтервалі в 1 секунду, інтенсивність прибуття та інтенсивність проїзду транспорту можна описати як кількість автомобілів на одиницю часу (автомобілі в секунду). Урахування інтенсивності прибуття та інтенсивності проїзду на перехресті в моделях затримки є важливим кроком для більш точного прогнозування затримок і організації ефективного управління дорожнім рухом. Моделі, що базуються на цих величинах, допомагають зменшити затори та оптимізувати час проходу транспортних засобів через перехрестя.

Вираз чисельника  $(c-g)q$  є тривалістю забороненої фази сигналу світлофора, за час якої прибуває  $q$  машин з інтенсивністю  $q$ . Тобто тривалість затримки  $d$  прямо пропорційна часу забороненого сигналу світлофору та інтенсивності наближення машини.

Вираз знаменника  $gs$  описує навпаки виїзд транспортних засобів з перехрестя. Тобто тривалість  $d$  обернено пропорційна інтенсивності проїзду машин та тривалості дозволяючого сигналу світлофору.

Складова  $q_0/s$  відповідає кількості машин у черзі, тобто тривалість затримки безпосередньо визначається кількістю машин у ній. А компонента  $kg$  враховує випадкові затримки (поворот праворуч з правої смуги, поворот ліворуч з просочуванням зустрічного транспорту, об'їзд перешкоди тощо).

У таблиці 2.10 наведені розрахунки значень затримок транспортних засобів за моделями (2.4, 2.6-2.7), з однаковими умовами проходження перехрестя ( $c=120c$ ) при дійсних значеннях параметрів  $s$ ,  $q$  і  $q_0$  (у моделі Бекмана використовують значення  $s$  та  $q$ , що дорівнюють 3 та 2 відповідно).

Таблиця 2.10 – Час затримки

$d, c$	$d, c$ <i>Вебстер</i>	$d, c$ <i>Бекман</i>	$c, c$	$g, c$	$s, авт/с$	$q, авт/с$	$q_0, авт$	$x, авт$
0,00	0,01	0,01	120	120	2	3	1	0,1
0,17	0,74	2,10	120	108	2	3	2	0,2
0,56	3,18	7,80	120	96	2	3	3	0,3
1,29	7,53	17,10	120	84	2	3	4	0,4
2,50	13,75	30,00	120	72	2	3	5	0,5
4,50	21,42	46,50	120	60	2	3	6	0,6
7,88	29,90	66,60	120	48	2	3	7	0,7
14,00	38,51	90,30	120	36	2	3	8	0,8
27,00	47,06	117,60	120	24	2	3	9	0,9
67,50	68,77	148,50	120	12	2	3	10	0,99
189,75	91,47	183,00	120	5	2	3	11	0,995

На рисунку 2.8 за табличними даними для моделі (2.7) побудовані графіки зміни тривалості затримок транспортного засобу, тривалості світлових сигналів фори, інтенсивність прибуття і відправлення транспорту і величина черги на перехресті в функції часу (без останнього рядка таблиці 3.1). На графіку видно, що час затримки транспортного засобу має вигляд силової функції, при цьому спостерігається збільшення тривалості затримки, коли інтенсивність наближення автомобіля перевищує межу перетину.

По наведеним даним (табл. 2.10) були побудовані криві затримки автомобільного транспорту для моделі (2.7) та моделей Вебстера і Бекмана (рис. 2.9)

Визначити, яка модель краща або гірша, досить складно, так як на графіках відображаються тільки дані з зафіксованими значеннями  $s$ ,  $q$ ,  $q_0$  та  $x$ , а в реальності прибуття і виїзд транспортних засобів, довжина черги і щільність машин на дорожній смузі не є постійними.

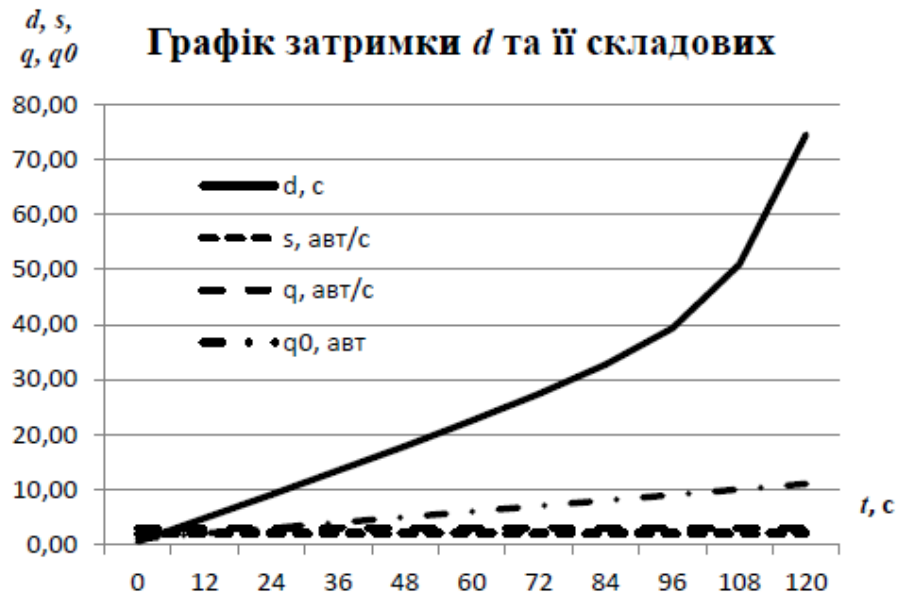


Рисунок 2.8 – Залежність часу затримки автомобіля від параметрів моделі

Однак слід зазначити, що модель (2.7) характеризується значним збільшенням тривалості затримки, коли інтенсивність наближення транспортних засобів досягає величини межі перетину. Саме така ситуація більш притаманна для реальних дорожніх умов: черга з транспортних засобів утворюється при зниженні інтенсивності проїзду машин, що проїжджають.  $k = 0,4$  характер лінії затримки запропонованої нової моделі фактично збігається з формою кривої Вебстера, хоча на інтервалі до 90 с вона має більш плоский вигляд, а зі збільшенням довжини черги зростає інтенсивніше.

У моделях Вебстера і Бекмана збільшення часу затримки при досягненні чергою критичного значення – перевищення пропускної спроможності перехрестя значно слабкіше, але вони розраховані тільки на роботу в ненасичених режимах проїзду через перехрестя.

На рисунку 2.9 наведено графік роботи нової моделі затримки при різних значеннях її випадкової складової  $k$ .

Рівень впливу аргументів функції  $d = f(c, g, q, q_0)$  на її числове значення можна визначити за допомогою рівняння чутливості (2.5). Він призначений для аналізу чутливості функції (2.7) до зміни параметрів  $c, g, q, q_0$  як аргументів  $d$ .

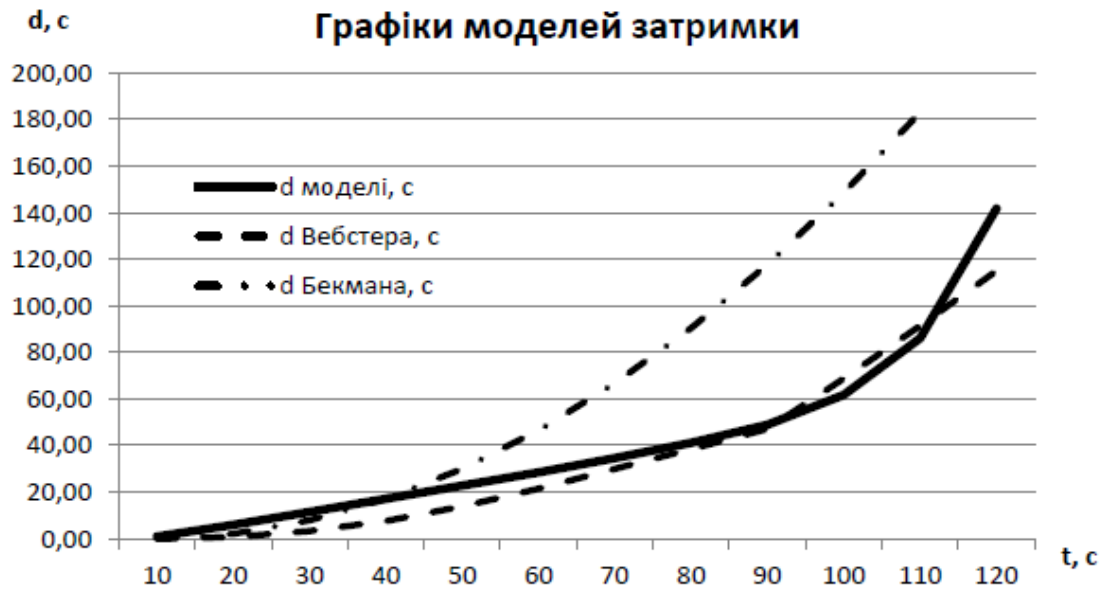


Рисунок 2.9 – Залежність часу затримки автомобіля від параметрів нової моделі і моделей Webster, Beckmann.

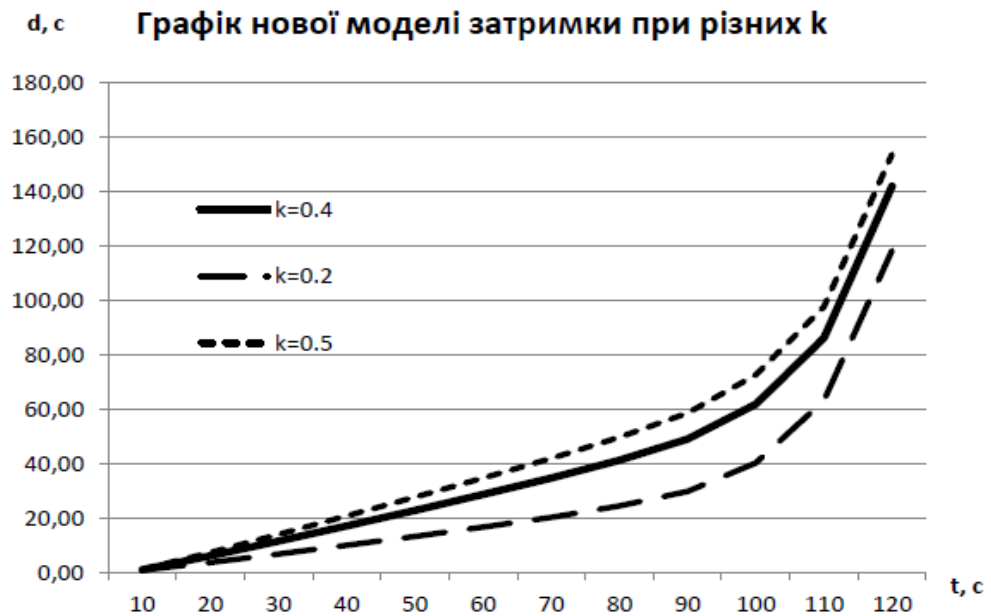


Рисунок 2.10 – Графіки нової моделі затримки при різних  $k$

Для кожного параметра розраховані компоненти  $K_i \cdot \delta_i$  рівняння чутливості (2.5) і наведені в таблиці 2.11.



Таблиця 2.11 – Внесок аргументів  $s$ ,  $g$ ,  $q$  і  $q_0$  у значення функції  $d$ 

$m, з$	$s, \%$	$c, \%$	$g, \%$	$q, \%$	$q_0, \%$
1	0,37	49,59	49,36	0,41	0,26
12	3,98	44,82	42,33	4,48	4,39
24	7,20	40,53	36,02	8,11	8,14
36	9,88	37,06	30,88	11,12	11,06
48	12,12	34,09	26,52	13,64	13,64
60	14,04	31,58	22,81	15,79	15,79
72	15,69	29,41	19,61	17,65	17,65
84	17,13	27,52	16,82	19,27	19,27
96	18,39	25,86	14,37	20,69	20,69
108	19,51	24,39	12,20	21,95	21,95
120	20,11	23,61	11,04	22,62	22,62
Середнє	12,58	33,50	25,63	14,16	14,13

З таблиці випливає, що найбільший вплив на затримку транспорту надає тривалість циклу, яка є аналогом часу подачі червоного сигналу світлофора  $r = c - g$ . Тривалість дозвільної фази сигналу світлофора забезпечує виїзд транспортного засобу - цим можна пояснити його значний вплив на затримку, те ж саме можна сказати і про інші параметри. Крім того, всі параметри мають однаковий числовий порядок по значущості - вони коливаються від 12 до 26, Тому для величини затримки не менш значущими є транспортні засоби на перехресті.

Як видно з графіка значень кожного параметра для функції затримки (рисунок 2.11), який складено на основі таблиці 2.11, значення значущості сигналів управління світлофором з часом зменшуються, а їх значення збільшуються з часом для параметрів руху транспорту (довжина черги, інтенсивність підходу/виїзду).

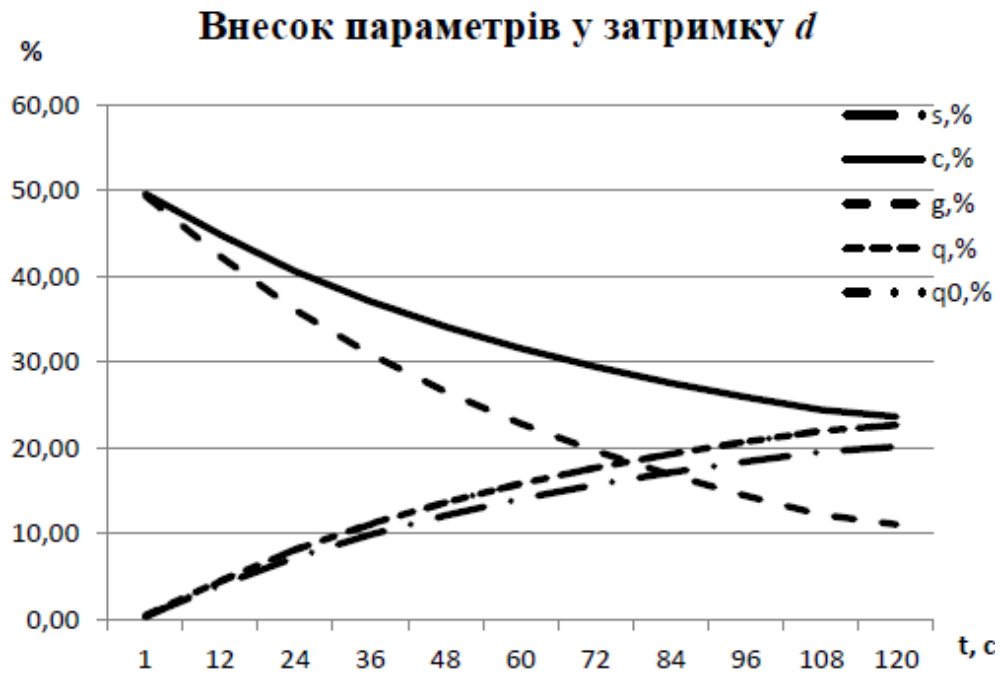


Рисунок 2.11 – Значимість параметрів моделі для затримки транспортного засобу

Проведений аналіз приводить до наступних висновків:

–Для моделі Бекмана інтенсивність виїзду транспортного засобу завжди повинна перевищувати інтенсивність його наближення до перехрестя. Насправді це не завжди так, і це головний недолік моделі.

–Числові значення інтенсивностей прибуття, відправлення і довжини наступного (щільності) транспорту для моделей Бекмана і Вебстера мало впливають на величину затримки  $d$ .

–Частка другого і третього доданків моделі Вебстера становить близько 1 – 1,7% від першого члена і практично не впливають на тривалість затримки ТС на перехресті.

–З точки зору фізики, моделі достовірно відображають процеси, що відбуваються на перехресті, тому що відповідають теорії розмірностей.

–Нова модель затримки фізично більш точно описує процеси при проходженні перехресть. Найбільш значущим параметром функції затримки в

ньому з внеском в 33,5% в величину затримки є час циклу (тривалість червоного сигналу світлофора), друге місце займає тривалість зеленої фази сигналу - 25,63%, внески інтенсивності наближення Транспортного засобу і довжини Транспортного засобу складають 14,16% і 14,13%, інтенсивності проїзду Транспортного засобу - 12,58%.

–Досягнення рівня пропускної спроможності перехрестя в моделях (3.1) і Вебстера призводить до значного збільшення транспортної затримки на перехресті.

–Вплив на затримку фаз сигналів світлофора зменшується протягом контрольного циклу, а також збільшується довжина черги та щільність заїзду/проїзду транспортних засобів.

– Нова модель затримки транспортного засобу на перехресті і зміна її параметрів в циклі регулювання світлофора більш наближена до реальних дорожніх умов, ніж базові моделі. В цілому нова модель близька до нормативної моделі Вебстера, але її компоненти мають більш прозорий фізичний зміст і в ній явно враховується черга транспортних засобів перед перехрестям.

## 2.6 Оцінка адекватності моделі

Згідно з [26], для оцінки адекватності та якості транспортних моделей на етапах калібрування<sup>1</sup> та валідації<sup>2</sup> використовуються загальноприйняті статистичні критерії, які дозволяють швидко оцінити основні якісні параметри створених моделей (формули 2.7–2.11).

На етапі калібрування моделей їх оцінюють за п'ятьма параметрами:

1. Середня абсолютна похибка: середнє відхилення абсолютних значень (різниця між спостережуваними та розрахунковими значеннями):

$$\delta_a = \frac{\sum_{i=1}^N |Z_i - U_i|}{N} \quad (2.7)$$

де  $N$  - число точок спостереження;  $Z_i$  – величина спостереження;  $U_i$  – обчислене

значення за допомогою моделі затримки;

2. Середнє відхилення абсолютних значень у відсотках:

$$\delta_p = \frac{\sum_{i=1}^N abc(Z_i - U_i)}{\sum_{i=1}^N Z_i} \times 100\% \quad (2.8)$$

3. Стандартне відхилення:

$$v_a = \frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - U_i)^2}{N} \quad (2.9)$$

4. Відносне стандартне відхилення:

$$v_p = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - U_i)^2}{N - 1}}}{\frac{\sum_{i=1}^N Z_i}{N}} \times 100\% \quad (2.10)$$

5. Коефіцієнт кореляції:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z}) \cdot (U_i - \bar{U})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2}} \quad (2.11)$$

де

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{i=1}^N Z_i}{N} \quad \bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^N U_i}{N}$$

1=1

У даний час немає чітких визначень критеріїв (2.7-2.11), при дотриманні яких модель вважається достовірною, їх значення істотно залежать від цілей і методу моделювання, а також від типу проекту.

З критеріїв, що розглядаються для практичного застосування, [26] рекомендовані значення тільки для відносних показників і коефіцієнта кореляції. Вони можуть мати такі орієнтовні значення: відносна середня похибка і відносне стандартне відхилення - не більше 10% для модельованої транспортної мережі в цілому і не більше 5% для її локальних ділянок, коефіцієнт кореляції - не менше 0,9.

Визначимо придатність нової моделі управління роботою світлофорів в

порівнянні з нормативною моделлю Вебстера.

Для калібрування та валідації моделей, вибірка вихідних даних (табл. 2.12) була отримана таким чином: за секундоміром визначали фактичний час затримки автомобіля  $Z$ , що знаходиться на відстанях 30, 60, 90, 150 і 200 м від перехрестя, коли він, після включення дозволеного сигналу світлофора, проходить відстань до стоп-лінії. На кожну дистанцію було зроблено по 5 вимірювань. Потім його порівнювали з тим же часом  $U$ , обчисленим на основі математичних моделей затримки.

Таблиця 2.12 – Порівняння моделей затримки

№	Інтервал, м	Z, с	U, с	
			New model	Webster
1	30	7,1	11,48	3,18
2		11,2		
3		8,6		
4		12		
5		11,5		
6	60	19,3	22,70	13,2
7		17,9		
8		21,04		
9		18,9		
10		22,2		
11	90	30,1	34,5	29,9
1	2	3	4	5
12	150	34,2	61,7	68,77
13		36,8		
14		32,9		
15		35,4		
16		60,05		
17	63			

18		62,5		
19		62		
20		62,6		
21	200	126,8	141,7	115,0
22		140,8		
23		142		
24		141,9		
25		139,9		

Метою етапу валідації [36] моделей є визначення факту придатності моделі для проведення експериментального аналізу об'єкта дослідження.

Входами на етап валідації служать калібровані моделі і набір незалежних даних тієї ж номенклатури, що і для калібру. Валідація імітаційної моделі є важливим етапом у її розробці та застосуванні, оскільки вона дозволяє перевірити, наскільки добре модель відображає реальну систему та чи можна використовувати її для прийняття рішень у практичних задачах. Валідація базується на порівнянні результатів, отриманих за допомогою імітаційної моделі, з фактичними даними, які були спостережені в реальній системі.

Якщо модель успішно проходить валідацію і результати відповідають реальним спостереженням, її можна використовувати для подальших досліджень і планування. Якщо виявляються значні розбіжності між результатами моделювання і реальними даними, модель потребує доопрацювання або коригування.

Процес валідації є необхідним для забезпечення точності і надійності імітаційних моделей, і саме він дає змогу визначити, чи можна використовувати модель для прогнозування поведінки транспортних систем, а також для оцінки ефективності управління дорожнім рухом.

У таблиці 2.13 наведені значення всіх статистичних критеріїв для нової моделі і моделі Вебстера, розраховані на основі одних і тих же

експериментальних даних затримок автомобілів при проходженні двох перехресть.

Таблиця 2.13 – Порівняння статистичних критеріїв

Критерій	Нова модель	Модель Вебстера
$\delta_a$	2,1916	9,53
$\delta_p$	4%	18%
$v_a$	3,68	12,17
$v_p$	7,13%	23,52%
$r$	0,91	0,84

Результати валідації показують, що нова модель описує процеси управління світлофорами більш точно, ніж модель Вебстера, і підходить для управління сигналами світлофора.

Однак ці моделі застосовні тільки до окремих перехресть і не дозволяють розрахувати координовані параметри управління.

Управління світлофорами може здійснюватися за різними критеріями, основними з яких є «мінімальна затримка  $d = \min$ » і «мінімальна затримка  $q_0 = \min$ »:

$$q_{0\min} = \frac{2dcq(s - q) - scq(c - 2g) - gs(c + qg + q)}{2s(c - g)} = \min \quad (2.12)$$

Для адаптивного управління світлофорами з критерієм, наприклад  $q_0 = \min$ , «точкова» модель може бути використана наступним чином (попередньо для габаритів конкретного перехрестя і умов пішохідного переходу визначається тривалість попереджувального сигналу  $u$ ):

1. За даними світлофорної роботи на перехресті в попередньому циклі  $c$  записуються значення параметрів  $c$ ,  $g$ ,  $q$ ,  $s$  і  $q_0$ .
2. Модель обчислює час затримки  $d$ .
3. За критерієм  $q_0 = \min$  обчислюються:
  - час циклу,  $c$ ;

- тривалість зеленого сигналу світлофора  $g$ ;
- Тривалість сигналу заборони дорівнює  $r$  як  $r = c - g - y$ .

4. Сигнали встановлюються на світлофорах перехрестя і підпункти 1 – 4 повторюються.

Таким чином, модель постійно підлаштовується під поточну ситуацію на дорозі і дозволяє розрахувати тривалість дозвільних і заборонних підписів в наступному циклі за результатами роботи світлофорів в попередньому циклі.

Функція (2.11) є залежністю від багатьох аргументів, тому пошук екстремуму  $q_0 = \min$  доцільно виконувати одним з методів математичного програмування, наприклад, методом координатного спуску, або інтелектуальними методами - методом сірих вовків, генетичними алгоритмами.

### *Висновки по розділу*

При збільшенні тривалості забороненого сигналу світлофора відповідно збільшується й час затримки транспорту відповідно до закону потужності. Це справедливо і для інших моделей із затримкою.

Головну роль в моделі Вебстера грає перша складова, її частка досягає 99%, тобто другою і третьою складовими можна знехтувати на практиці без втрати надійності моделі. Недоліками моделі є її практична нечутливість до зміни інтенсивності прибуття транспорту і щільності завантаження транспортного засобу до перехрестя, а також непрацездатність в умовах насиченого транспортного потоку з утворенням черги. З цього робимо висновок, що модель Вебстера не підходить для організації дорожнього руху при перевантаженні транспортної мережі у вигляді черг й заторів, що актуально, особливо в години пік.

Модель Бекмана має степеневий характер і має такі недоліки:

- для того, щоб затримка не стала від'ємною необхідно щоб інтенсивність проїзду перехрестя завжди була більшою ніж інтенсивність



прибуття транспорту, інакше модель втрачає свій фізичний сенс;

- числові значення інтенсивності заїзду - виїзду транспортних засобів на перехресті не є значущими для моделі, потрібно лише, щоб їх коефіцієнт був менше 1;

Розмір черги майже не впливає на значення затримки. Найбільший вплив у моделі Бекмана має час дозволеного сигналу світлофора  $\approx 44\%$ , другим йде час забороненого сигналу  $\approx 31\%$ , інтенсивність заїзду-виїзду  $\approx 12-13\%$  кожна, і практично не впливає на затримку черга транспортних засобів  $<1\%$ .

Моделі затримки Бекмана і Вебстера для заторів на дорогах у вигляді черг і заторів (які притаманні годинам пік) не підходять для управління трафіком.

Для нової моделі затримки найбільш значущим параметром є час циклу (як тривалість заборонного сигналу світлофора)  $\approx 33,5\%$ , далі йде тривалість зеленого сигналу  $\approx 25,63\%$ , інтенсивність прибуття і черги  $14,16\%$  та  $14,13\%$ , а також інтенсивність проходження  $\approx 12,58\%$ .

Запропонована модель і зміна включених в неї параметрів під час світлофорного циклу відповідають реальним ситуаціям проходження перехрестя з більшим наближенням, ніж розглянуті основні моделі затримки. Модель, в цілому, близька до нормативної моделі Вебстера, але її компоненти мають більш прозорий фізичний зміст і в ній явно враховується черга транспортних засобів на перехресті. Результати калібрування і валідації показують, що нова модель підходить для управління сигналами світлофорів і описує процеси управління світлофорами більш точно, ніж модель Вебстера.

## РОЗДІЛ 3

### РЕАЛІЗАЦІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПЕРЕХРЕСТЯМ

#### 3.1 Основні засади

Пробки в години пік стали великою проблемою в містах по всьому світу. Підвищення рівня автомобілізації призвело до того, що на регульованих перехрестях в години пік пропускна здатність доріг повністю вичерпується [8, 11, 14].

Вирішити проблему можна чотирма способами:

1     Метод полягає в розширенні дорожнього полотна за рахунок збільшення кількості смуг руху. Цей захід спрощує, але не вирішує проблему. Найширша дорога в світі має 50 смуг (Китай), в США - 26 смуг (Х'юстон), але пробки залишаються. Цей спосіб практично неможливо реалізувати, оскільки, по-перше, в забудованій частині міст ширина дорожнього полотна обмежена шириною вулиць, а по-друге, у місті не завжди вистачає коштів на реконструкцію доріг і будівництво нових, розширених під потреби транспортного руху.

2     Метод полягає у використанні неконтрольованих вулиць і перехресть. Кілька європейських муніципалітетів провели експеримент під назвою «Голі вулиці», який несподівано закінчився з великим успіхом. Планувальники міського руху в Німеччині, Данії та Нідерландах експериментували з впровадженням некерованих вулиць і перехресть і виявили, що вони ефективніші, ніж традиційні моделі. Як показала практика, водії витрачають менше часу на поїздки, а в години пік на дорогах рідше створюються пробки. Ідея проекту полягає в наступному: замість регулювання світлофорів і дорожніх знаків учасники дорожнього руху використовують невербальний контакт один з одним. Іншими словами, не обмежені нічим водії

і пішоходи стають більш обережними і уважними, у них загострюються органи чуття, прокидається внутрішня дисципліна. Однак, коли заторів багато, це дорого обходиться водіям і пішоходам, це обертається додатковим стресом.

3     Метод – світлофорний контроль перехресть в «жорсткому» режимі, тобто перемикання його сигналів на фіксований час відповідно до календарного (сезонного) і добовим графіком.

4     Метод – інтелектуальне управління режимами світлофора [4, 8, 11, 18, 20]. Інтелектуальні автоматизовані системи управління дорожнім рухом - це сукупність програмних і технічних засобів і заходів, спрямованих на зниження затримок руху, забезпечення безпеки, поліпшення параметрів вулично-дорожньої мережі, поліпшення екологічної обстановки.

У рідкісних випадках потрібне і чисто ручне управління світлофором, але в ручному режимі регулювальник оцінює потік транспорту на конкретній вулиці на око.

Основним призначенням інтелектуальної системи управління світлофорами на перехрестях (ІСУСП) є забезпечення ефективного регулювання транспортних потоків у місті за допомогою світлового сигнального обладнання.

Система є інтелектуальною, якщо вона (за визначенням) розпізнає ситуацію на об'єкті управління і виробляє оптимальні керуючі дії. Така система контролю перехресть вимагає нових методів розрахунку оптимальних режимів перемикання фаз світлофорів з урахуванням фактичних затримок руху. Такі інтелектуальні світлофори вимагають додаткового обладнання (рисунок 3.1).

1. Контролер ІСУСП. Він містить спеціалізований міні-комп'ютер з програмним, інтерфейсним обладнанням (адаптери, АЦП, ЦАП і т.д.). Контроль фаз сигналу обчислюється в контролері або безпосередньо за сигналами від датчиків зайнятості дорожнього полотна, або з математичної моделі затримки транспортного засобу перед перехрестям.

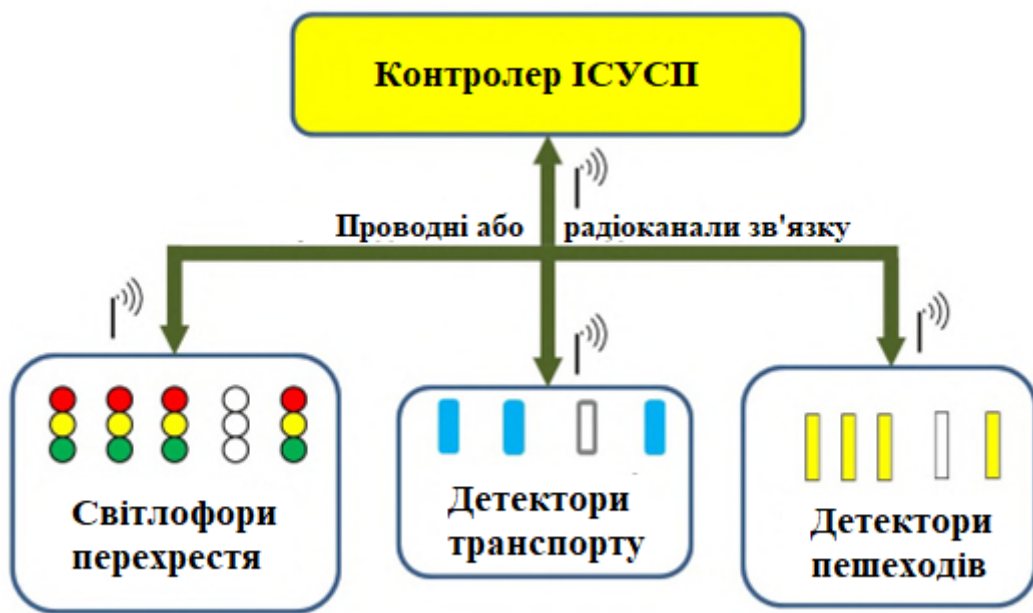


Рисунок 3.1 – Структурна схема ІСУСП

2. Детектори транспорту - це датчики зайнятості (черги) дорожнього полотна, які показують, наскільки далеко перед світлофором зайняті автомобілі. Детектори можуть бути реалізовані двома способами:

- як інфрачервоні датчики, в даному випадку випромінювальні датчики вбудовуються в дорожнє полотно і утворюють вертикальні інфрачервоні світлові потоки, які вловлюються датчиками на відтяжках поперек дороги і передаються на блок ISUSP. Сигнал про переривання світлового потоку автомобілем передається на контролер і сигналізує про наявність або проїзд транспортним засобом даного положення дорожнього полотна. Датчики також можуть встановлюватися на узбіччі дороги або над дорогою – більш дешевий варіант.

- як магнітно-індукційні датчики – їх можна монтувати в дорожнє полотно на глибину до 1,5 м, так як сила магнітного поля зберігає свої робочі характеристики. Коли автомобіль потрапляє в зону магнітного контуру датчика, показники магнітного випромінювання змінюються і ці дані надходять на контролер. Датчики – приймачі не потрібні, тому їх продають за нижчою вартістю.

– Датчики можуть розміщуватися в п'яти положеннях: на стоп-лінії, 30, 60, 90 і 150 м від стоп-лінії (відстані можуть бути різними); Використання відеодетекторів (відеокамер) в якості датчиків знижує надійність ІМСП, так як в умовах поганої видимості (сильний дощ, снігопад, темрява і т.д.) відеокамери можуть надавати недостовірні дані або не працювати зовсім. Крім того, вони вимагають включення в програмне забезпечення контролера спеціальної підпрограми для розпізнавання кількості вагонів в транспортній черзі перед перехрестям, при цьому розрізнити окремі транспортні засоби в черзі на відстані більше 100 м від відеокамери складно - транспортні засоби зливаються в безперервний нерозривний потік.

3. Датчики пішоходів являють собою тротуарні майданчики з інфрачервоними або магнітно-індукційними датчиками, сигнали яких передаються на блок ІСУСП. Індукційні датчики розташовуються на тротуарних майданчиках перед переїздами. У разі використання інфрачервоних елементів датчики - випромінювачі також монтуються в майданчики тротуарів і створюють вертикальні світлові потоки, які вловлюються датчиками - приймачами і передаються контролеру. Датчики прийому сигналу встановлюються на верхній горизонтальній перекладині пішохідної рами.

4. З'єднання кабелів або каналів радіозв'язку датчиків з контролером і світлофорами ІСУСП. Підключення периферійних пристроїв до контролера здійснюється за допомогою бездротового зв'язку, представленого CDMA, GPRS, GSM, дротового зв'язку, представленого xDSL, Ethernet або комбінованим методом, що поєднує елементи бездротового та дротового зв'язку – в залежності від існуючої прив'язки конкретного світлофора.

Розташування елементів ІСУСП показано на рисунку 3.2.

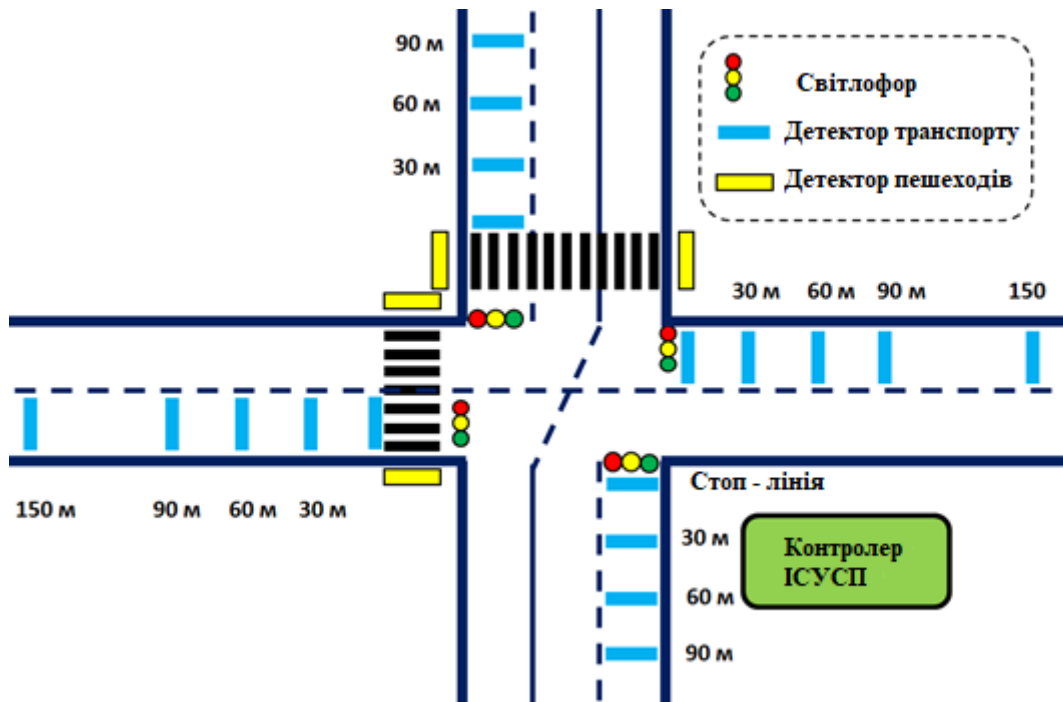


Рисунок 3.2 – Схема перехрестя з ІСУСП

Основні переваги та переваги ІСУСП:

- зниження витрати палива транспортного засобу;
- скорочення часу поїздки транспортних засобів;
- скорочення часу перебування пасажирів у дорозі;
- захист навколишнього середовища від шкідливих вихлопних газів і т.д.

ІСУСП використовує вітчизняні апаратні та програмні засоби, орієнтовані на сучасні технології та сучасні методи організації дорожнього руху відповідно до вимог міжнародного стандарту якості ISO 9001.

В даний час світлофори працюють в основному в календарному режимі, в залежності від режиму доби - в жовтому миготливому або «жорсткому» режимі, тобто вони автоматично перемикаються на фіксований час, пропорційний кількості смуг руху на пересічних дорогах. У години пік тривалість зеленого сигналу більша - до двох хвилин, в інший час - менше, є можливість переключитися на жовтий миготливий сигнал. Світлофор не реагує на ситуацію, коли всі транспортні засоби проїхали перехрестя, тобто напрямок вільне і продовжує зберігати для нього зелену фазу, а на напрямок переїзду не

перемикає.

Управляти світлофорами на перехресті за допомогою ІСУСП можна двома способами:

- розрахункова (системно-динамічна), в основі якої лежить математична модель затримки транспортного засобу при проїзді перехрестя.
- оптимізація (дискретно-подія), в основі якої лежить поточна ситуація зайнятості доріг перед перехрестям, наявність або відсутність на них рухомих або поставлених в чергу транспортних засобів.

### 3.2 Дискретне- подійне керування подіями

В його основі лежить імітаційна модель транспортних потоків, їх черг, часу проходження перехрестя, оптимізатор, який за критерієм оптимальності формує довжини фаз світлофора в залежності від дорожньої обстановки. Модель реалізована за допомогою датчиків прибуття на дорозі, сигнали яких відображають поточну ситуацію в даний момент часу [4, 17] – рисунок 3.3.

Критерій оптимальності  $d = \min$ , тобто мінімальний час затримки автотранспорту при проїзді перехрестя, фазовий час дозвільного сигналу визначається за загальною формулою , де  $t = 12 \cdot k \cdot m/nk$  - коефіцієнт зайнятості смуги руху, приймає значення 1, 2, 3, 5 і 10;  $m$  і  $n$  - кількість смуг руху на пересічній і головній дорогах відповідно.

Оптимізація або управління дискретними подіями передбачає, що:

- середня довжина легкового автомобіля (основного транспортного засобу на дорогах) становить 4 м, далі поміщається 6 вагонів з інтервалом 30 м з урахуванням кліренсу між автомобілями в 1 м, при 60 м – 12, при 90 м – 18 і при 150 м – 30 транспортних засобів;
- при швидкості 60 км/год автомобіль проїжджає відстань 16,6 м за 1 секунду, тобто поява транспортного засобу на рівні датчика 30 м, що викликає включення на нього зеленого сигналу світлофора, забезпечує автомобілю

цілком достатній час для подолання дистанції в 30 м близько 2 секунд (сигнали від датчиків на рівнях 60, 90 і 150 м від стоп-лінії забезпечують явно більший час);

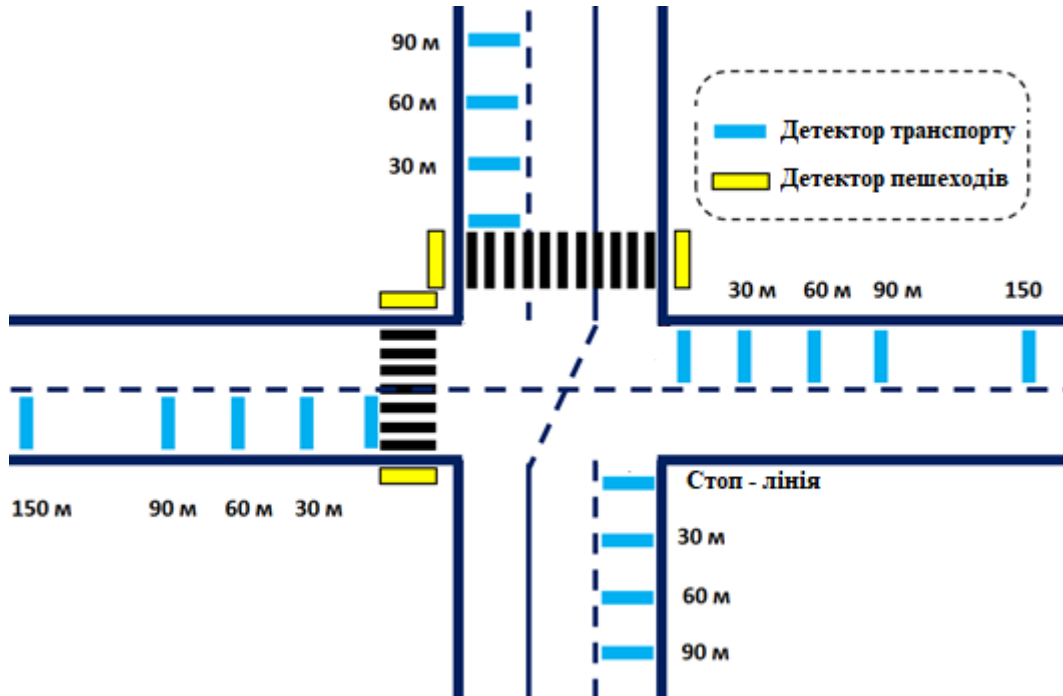


Рисунок 3.3 – Типова імітаційна модель перехрестя

- Максимальна тривалість циклу світлофора не залежить від кількості смуг і становить до 4 хвилин, з яких до 120 секунд – зелена фаза сигналу, 2-5 секунд – жовтий сигнал і решта 115-118 секунд – червоний. Максимальний час дії заборонного сигналу майже в 2 хвилини пов'язаний з тим, що в разі більш тривалого сигналу водії вважають світлофор несправним і починають рух за правилами нерегульованого перехрестя.

Виходячи з цього, основними принципами (алгоритмом, оптимізатором) роботи інтелектуального світлофора при русі безпосередньо за сигналами від датчиків зайнятості дорожнього полотна є:

– Для рівнозначних перехресть - з однаковою кількістю смуг на дорогах, що перетинаються.

- Якщо на перехрещеній дорозі немає транспортних засобів (рисунок 3.3), сигнал світлофора на головній дорозі залишається в останньому стані



(якщо він був зеленим) або переходить на нього як пріоритетний для головної (головної) дороги.

Дозвільний сигнал може бути перерваний тільки появою транспортного засобу на перехресті дороги, але не раніше, ніж через 2 хвилини. При наближенні транспортних засобів на головну дорогу в прямому або зворотному напрямках (рис. 3.4) з чергою або без неї (один або кілька датчиків спрацьовують на відстані 30, 60, 90 і 150 м від перехрестя) світлофор переходить в зелену фазу, якщо він деякий час не перебував в ній

$$t = 12 \cdot k \quad (3.1)$$

де  $T$  - час, необхідний автомобілям в черзі для проїзду перехрестя, сек;  $k$  - коефіцієнт зайнятості смуги, приймає наступні значення:

$k = 1$  для датчика на відстані 30 м від стоп-лінії (6 машин);

$k = 2$  для датчика на відстані 60 м від стоп-лінії (12 машин);

$k = 3$  для датчика на відстані 90 м від стоп-лінії (18 машин);

$k = 5$  для датчика на відстані 150 м від стоп-лінії (30 машин)

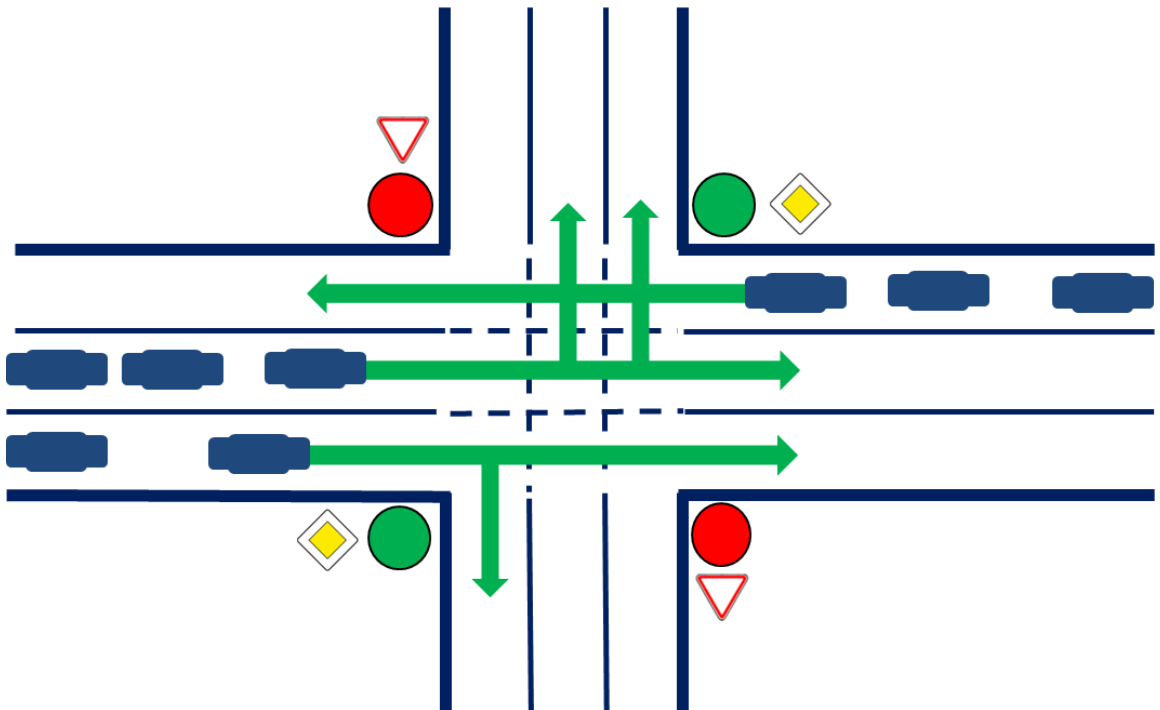


Рисунок 3.3 – Рівноцінне перехрестя без транспортного засобу на перехрещеній дорозі

Таким чином, при надходженні сигналу від датчика на рівні 30 м включається зелене світло на проїзд шести автомобілів, його тривалість становить 12 секунд (для старту з черги: 3-4 секунди на розгін і 8-9 секунд на прохід). Для інших рівнів час відповідно збільшується.

Після закінчення проїзду транспортних засобів (останній сигнал надійшов від датчика на стоп-лінії при відсутності сигналів від інших датчиків, тобто сигналів від усіх сповіщувачів немає або пройшло 2 хвилини) на світлофорі встановлюється червоний сигнал.

-Якщо при цьому на смугах дороги, що перетинається, є транспортні засоби в прямому або зворотному напрямках (є сигнали датчиків 30 та/або 60 та/або 90 та/або 150 м у найбільш жвавій смузі), то після проїзду автомобілем перехрестя в головному напрямку включається також зелений сигнал для напрямку перетину на час  $t = 12$  секунд, пропорційний коефіцієнту зайнятості найбільш завантаженої смуги  $k$  (рисунок 3.5).

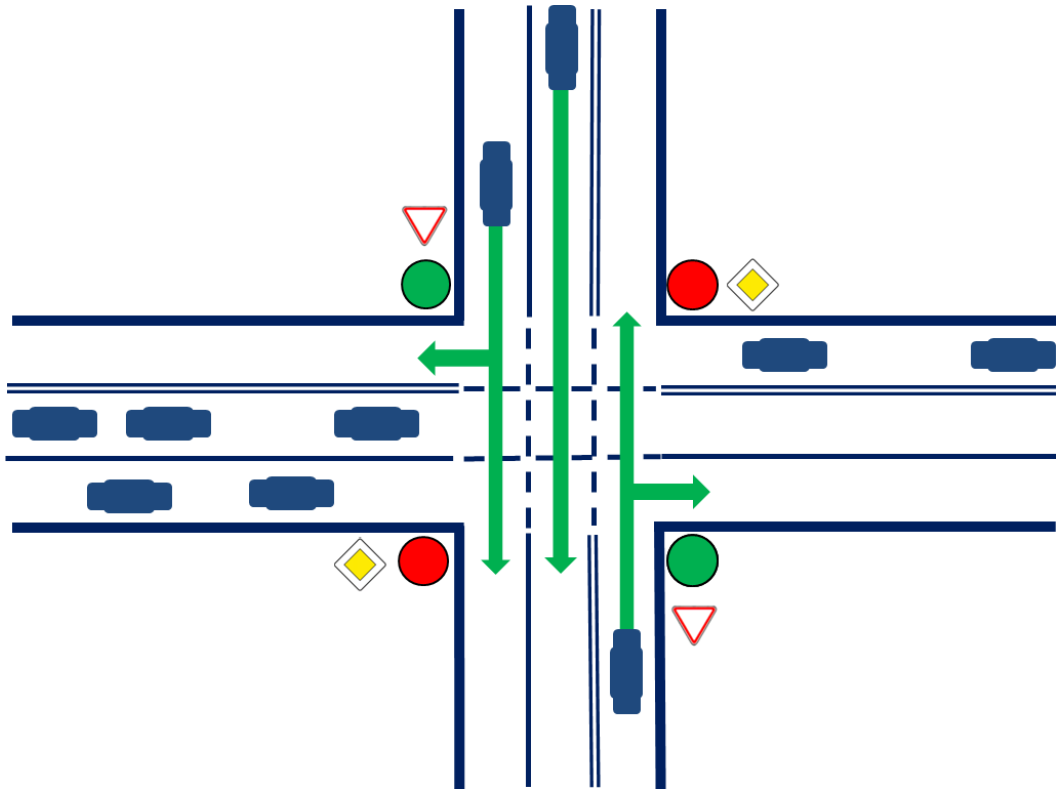


Рисунок 3.5 – Рівноцінне перехрестя з транспортним засобом на перехрещеній дорозі

Після закінчення проїзду транспортних засобів (останній сигнал надійшов від датчика на стоп-лінії при відсутності сигналів від інших датчиків, тобто сигналів від усіх сповіщувачів немає або пройшло 2 хвилини) на світлофорі встановлюється червоний сигнал.

Для нерівних перехресть – при різній кількості смуг руху на пересічних дорогах (рисунок 3.6) перемикання світлофорних сигналів проводиться відповідно до п. 1, але час подачі зеленого сигналу для напрямку з меншим числом смуг пропорційно зменшується на відношення меншого числа смуг перехресного напрямку до більшого числа смуг основного напрямку:

$$t = 12 \cdot k \cdot \frac{m}{n}, \quad (3.2)$$

де:  $m$  - кількість смуг на дорозі, що перетинається;  $n$  - кількість смуг руху на головній дорозі.

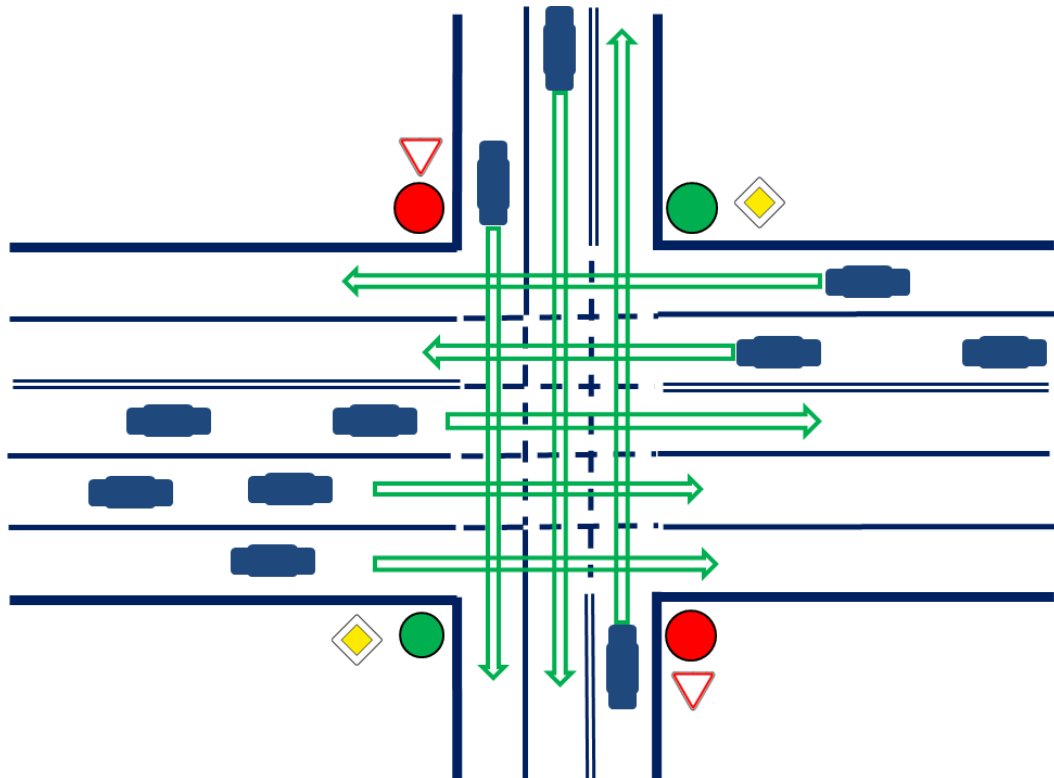


Рисунок 3.6 – Нерівний перетин з транспортним засобом на перехрещуваній дорозі

Наприклад, для рисунка 3.6 мінімальний час дії дозвільного сигналу для

пересічної дороги з транспортним засобом на рівні 150 м від перехрестя становитиме  $t = 12 \times 5 \times 3/5 = 36$  сек. При появі нових транспортних засобів у цьому напрямку (вперед або заднім ходом) тривалість зеленого сигналу збільшується, але не більше ніж до 2 хвилин. Сигнал від датчика може бути відсутнім на рівні 150 м, а на рівні 90 м він може бути присутнім, якщо автомобіль з'являється з допоміжної дороги або виїжджає за межі двору.

Якщо на одній з пересічних доріг є затори (пробки), на датчиках 30, 60, 90 м і 150 м від перехрестя в самій жвавій смузі є транспортні засоби, світлофор в цьому напрямку перемикається на зелене світло максимум на максимальний час 120 секунд. На іншій дорозі з меншою завантаженістю світлофор перемикається на дозвільний сигнал за рівнянням (3.1) або (3.2), тобто на час, необхідний для проїзду цих транспортних засобів (рисунок 3.7), і переходить на червоний сигнал в кінці їх проїзду.

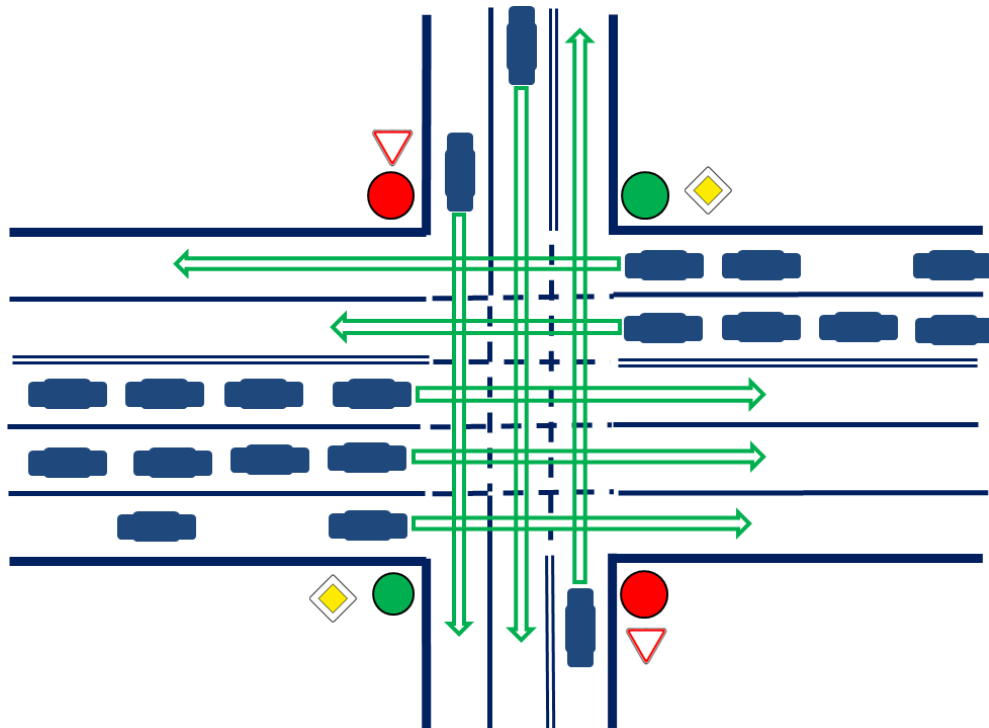


Рисунок 3.7 – Перехрестя заторів на головній дорозі

При наявності заторів (пробок) на обох пересічних дорогах, на найбільш жвавих смугах руху є автотранспорт на датчиках 30, 60, 90 і 150 м від

перехрестя (рис. 3.8), світлофор перемикає дозвільні і заборонні сигнали на час, пропорційний числу смуг на пересічних дорогах. При цьому для головної дороги з великою кількістю смуг максимальна тривалість зеленого сигналу становить 120 секунд, для пересічної дороги з меншою кількістю смуг час вибирається пропорційно відношенню числа смуг пересічних доріг:

$$t = 120 \cdot \frac{m}{n} \quad (3.3)$$

В кінці пробки, що проходить в будь-якому напрямку, для неї встановлюється червоний сигнал і, відповідно, збільшується тривалість зеленого сигналу для напрямку переходу.

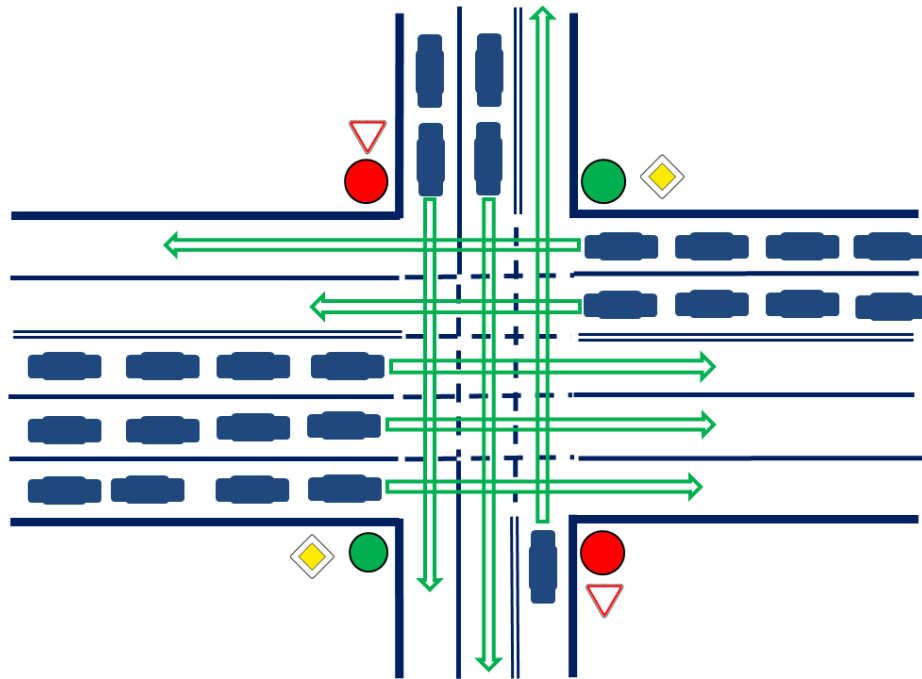


Рисунок 3.8 – Нерівне перехрестя із заторами на обох дорогах

Для Т-подібного перехрестя в правій смузі прямого напрямку і поворотів вправо з прямого і пересічного напрямків завжди може бути включено зелене світло, яке переривається тільки сигналом відповідного пішохідного детектора на час переходу пішоходів дорогу (суцільні зелені лінії на рисунку 3.9).

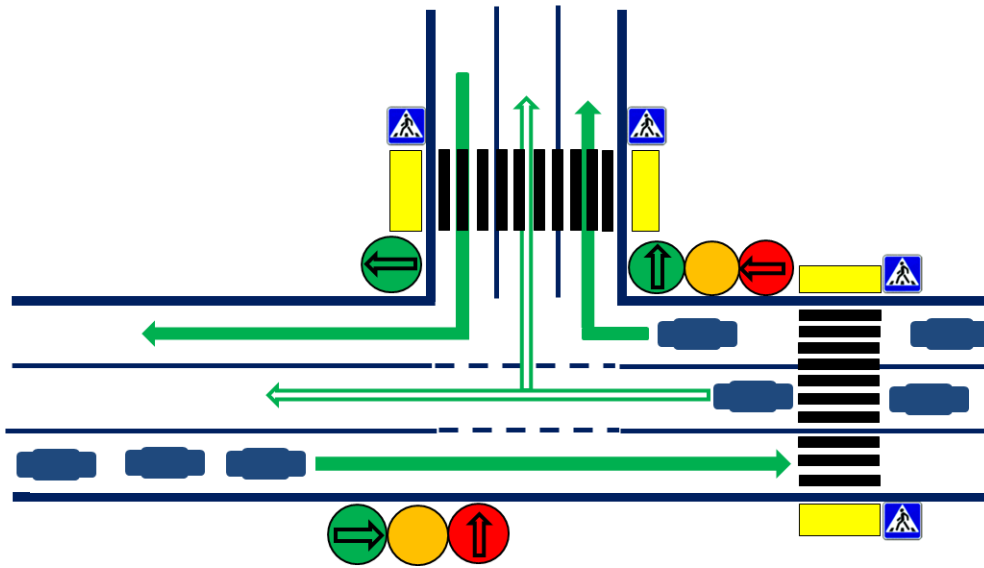


Рисунок 3.9 – Т-подібне перетин

Відповідно до вищезазначених принципів у середовищі VisualStudio на мові С# розроблена комп'ютерна програма, в якій реалізовано інтелектуальне керування роботою світлофорів на Т-подібному перехресті (рисунок 3.10).

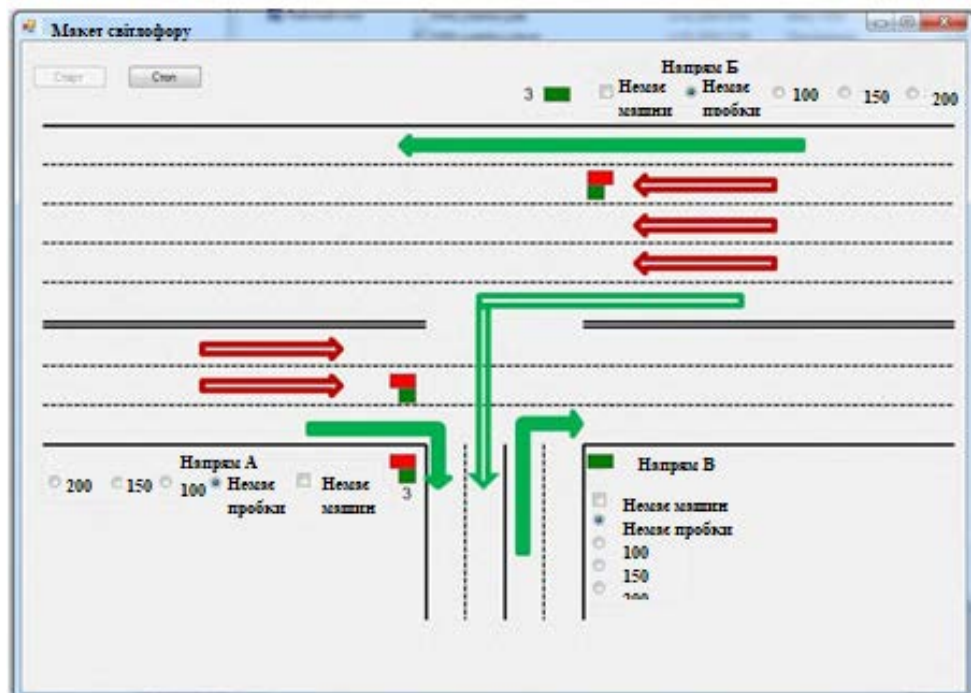


Рисунок 3.10 – Вікно моделювання Т-подібного перехрестя

*Пішохідний перехід.* Якщо пішохід займає сигнальний майданчик, то через 5 сек. (час гальмування транспортного потоку від 60 км/год до повної

зупинки) для нього включається зелений сигнал переходу, а для автомобілів - червоний. На швидкісних ділянках (за містом) зелений сигнал подається через більш тривалий час до 10-15 секунд. (щоб потік машин встигав гальмувати на більшій швидкості).

*Контролер ІСУСП* постійно опитує датчики і визначає тривалість дії дозвільних і забороняючих сигналів під час попереджувального сигналу світлофора (2-5 секунд). Час заданого значення частоти опитування датчика може становити від 0,1 до 0,5 с.

При дискретно-керованому управлінні подіями сигнали від системи датчиків на дорогах, що перетинаються, є імітаційною моделлю перехрестя, а алгоритм регулювання його роботи (алгоритм пунктів 1-7 з рівняннями (3.1) – (3.3)) – оптимізатором, який за критерієм оптимальності формує довжини фаз світлофора залежно від дорожньої обстановки.

Для кожного конкретного перехрестя повинен розроблятися алгоритм перемикання фаз його світлофорів з урахуванням індивідуальних особливостей дорожнього перехрестя.

### 3.3 Управління моделлю затримки транспорту

Модель затримки використовує сигнали детекторів на 30, 60, 90, 150 метрів і стоп-лінії, які не тільки визначають наявність або відсутність автомобілів на цій позиції, але і служать для підрахунку проїзду машин через ці датчики:

- Сигнали детектора на 30, 60, 90 і 150 метрів використовуються для лічильника з поетапним підрахунком кількості автомобілів, що прибули на заборонний сигнал світлофора для визначення інтенсивності заїзду  $q$ : при перетині датчика на рівні 30 м значення лічильника збільшується, наприклад, з 1 до 6, якщо сигнали від цього датчика припинилися, то ІСУСП продовжує подальший відлік за сигналами від датчика на рівні 60 м (приблизно від 7 до

12), Потім датчик опилується на 90 м і так далі.

- Сигнали детектора на стоп-лінії (або безпосередньо перед нею) беруть участь в підрахунку автомобілів, що виїжджають, за дозвільним сигналом світлофора: при перетині автомобілем світлового потоку датчиків лічильник підсумовує автомобілі, що пройшли через стоп-лінію, для визначення інтенсивності виїзду  $S$ .

Таким чином, сигнали датчиків використовуються як для підрахунку автомобілів, що прибувають з інтервалом 0-150 метрів від світлофора і транспортних засобів, що виїжджають через перехрестя, так і для визначення довжини черги.

У ІСУСП модель затримки дозволяє розрахувати тривалість фаз сигналів світлофора на наступний цикл циклу під час попереджувального сигналу на підставі підсумкових даних (сигналів) від датчиків поточного циклу. Основною і нормативною [5, 9] моделлю є модель Вебстера В.Ф. [9], але вона не працює в умовах інтенсивного руху транспорту і не враховує довжину заторів і черг, тому в дисертації пропонується нова модель, позбавлена цих недоліків [5, 6]. Вона заснована на фізичному сенсі дорожніх процесів при проходженні перехрестя, відповідає теорії розмірності і має вигляд:

$$d = \frac{(c - g)q}{gs} + \frac{q_0}{s} + kg \quad (3.4)$$

де:  $d$  - середня затримка одного транспортного засобу за цикл, с;  $c$  - довжина контрольного циклу, с;  $g$  - ефективна тривалість зеленого сигналу, с;  $q$  - інтенсивність прибуття транспортного засобу, авто/с;  $q_0$  - черга транспортного засобу, автор;  $s$  - інтенсивність виїзду транспортного засобу, авто/с.  $k = 0 - 0,5$  - коефіцієнт, що враховує випадкові затримки.

Критерії управління:

$d = \min$ , тобто – мінімальний час затримки транспортного засобу при проїзді перехрестя



$$d = \frac{(c - g)q}{gs} + \frac{q_0}{s} + kg = \min$$

і  $q_0 = \min$  - мінімальна черга на перехресті

$$q_{0\min} = \frac{2dcq(s - q) - scq(c - 2g) - gs(c + qg + q)}{2s(c - g)} = \min \quad (3.5)$$

Для адаптивного управління роботою світлофора з критерієм, наприклад,  $q_0 = \min$ , модель може бути використана наступним чином (тривалість попереджувального сигналу у-yellow заздалегідь визначена для розмірів конкретного перехрестя і умов пішохідного переходу ):

п. 1. На підставі даних світлофорів на перехресті в попередньому циклі  $c$  записуються значення параметрів  $c$ ,  $g$ ,  $q$ ,  $s$  і  $q_0$ . Сигнали для  $q$ ,  $s$  і  $q_0$  знімаються з детекторів зайнятості дорожнього полотна.

п. 2. Модель обчислює час затримки  $d$ .

п. 3. Критерій  $d = \min$  або  $q_0 = \min$  використовується для розрахунку часу циклу  $c$ , тривалості дозвільного сигналу світлофора  $g$ , тривалості заборонного сигналу  $r$  як  $r = c - g - y$ .

п. 4. На світлофорах перехрестя встановлюються сигнали для роботи в наступному циклі і точках. 1 – 4 повторюються.

Таким чином, модель постійно підлаштовується під поточну ситуацію на дорозі і дозволяє розрахувати тривалість дозвільних і заборонних сигналів в наступному циклі за результатами роботи світлофорів в попередньому циклі.

Функція (3.5) залежить від безлічі аргументів, тому доцільно шукати екстремум  $q_0 = \min$  за допомогою одного з методів математичного програмування, наприклад, методу координатного спуску, або інтелектуальних методів (метод сірих вовків, генетичні алгоритми і т.д.).

Таблиця 3.1 – Затримка часу

$d, c$	$c, c$	$g, c$	$s, авто/c$	$q, авто/c$	$q_0, авт$
0,00	120	120	2	3	1
0,17	120	108	2	3	2
0,56	120	96	2	3	3
1,29	120	84	2	3	4
2,50	120	72	2	3	5
4,50	120	60	2	3	6
7,88	120	48	2	3	7
14,00	120	36	2	3	8
27,00	120	24	2	3	9
67,50	120	12	2	3	10
189,75	120	5	2	3	11

Згідно з таблицею на рисунку 3.11 побудовані графіки зміни затримки транспортного засобу, сигналів світлофора, інтенсивності прибуття та виїзду, а також черг перед лінією зупинки у функції часу. З графіка випливає, що затримка транспортного засобу носить поступовий характер, а затримка різко зростає, коли інтенсивність заїзду перевищує пропускну здатність перехрестя і утворюється черга з транспортних засобів.

Розрахунок тривалості фаз сигналів за допомогою моделі затримки транспортного засобу (3.5) є достовірним, тому що описує фізичні закони руху транспортного засобу через перехрестя, але контроль на основі сигналів від дорожніх детекторів є більш оперативним і оптимальним, тому що за допомогою датчиків представляється поточна ситуація в напрямках перехрестя, що дає можливість перемикає фази в міру очищення доріг від транспортних засобів, не чекаючи закінчення фаз. розраховується за зразком або встановлюється пропорційно завантаженості напрямків.

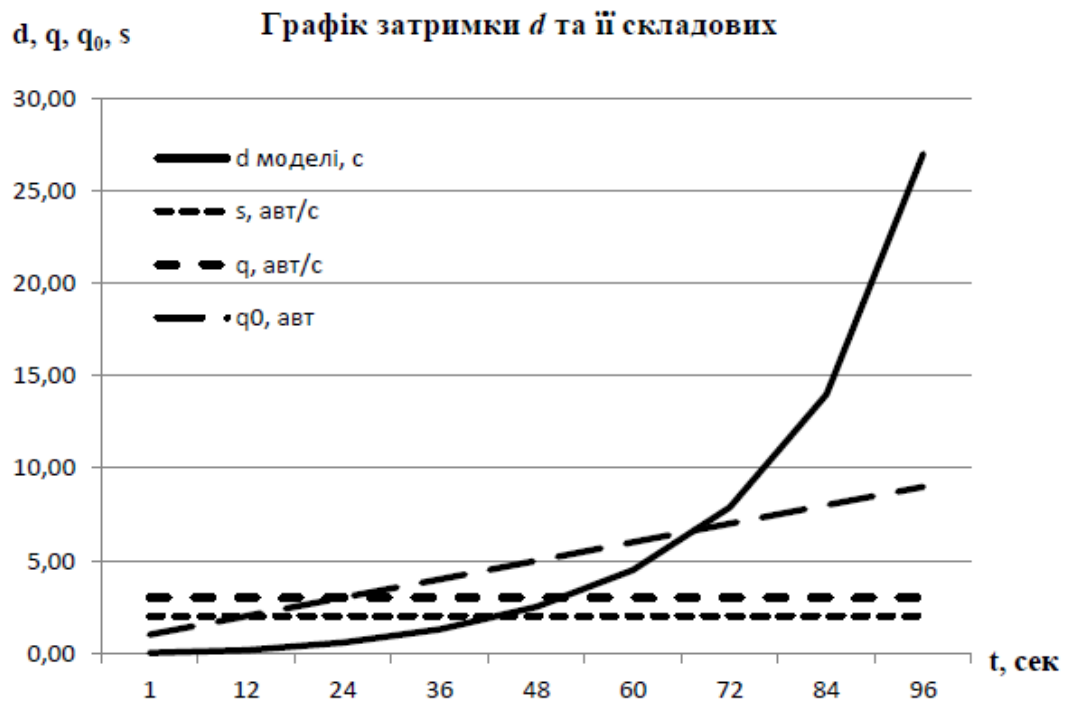


Рисунок 3.11 – Залежність часу затримки автомобіля від параметрів моделі

### 3.4 Структура інтелектуальної системи управління дорожнього руху

В даний час в більшості міст на всіх світлофорах здійснюється календарний контроль, який заснований на тому, що зміни від тижня до тижня в одні і ті ж дні не такі великі, а відхилення мають невеликий період.

Проте, практика показує, що адаптивне управління необхідно і доцільно впроваджувати його на 20-30% перехресть, а комбінуючи різні методи організації дорожнього руху, можна досягти максимально ефективних результатів [4, 8, 15, 21].

Інтелектуальна система управління дорожнього руху (ІСУДР) є сукупністю програмних та апаратних засобів, що спрямовані на зниження затримок руху, забезпечення безпеки, поліпшення параметрів дорожньої мережі й поліпшення екологічної обстановки [18, 23]. Вони покликані забезпечити ефективне регулювання транспортних потоків на районному та міському рівнях за допомогою світлової сигналізації та радіоповіщення водіїв

транспортних засобів про ситуації на дорогах.

Конструктивно ІСУДР представлена чотирма основними елементами (рисунок 3.12):

1. Центральний центр управління системою (МСС, ІКТС);
2. Контролери транспорту;
3. Периферійне обладнання (зовнішні датчики);
4. Дротові та радіоканали зв'язку.

Функції ІСУДР ЦУП:

- диспетчерська зміна режимів світлофора з ЦУП при необхідності;
- режим «зелена вулиця» для основних магістралей міста - при «стандартній» відстані між перехрестями в 200 м і русі транспортних засобів зі швидкістю 60 км/год світлофори на трасі послідовно переходять на зелений сигнал зі зсувом в 12 секунд;

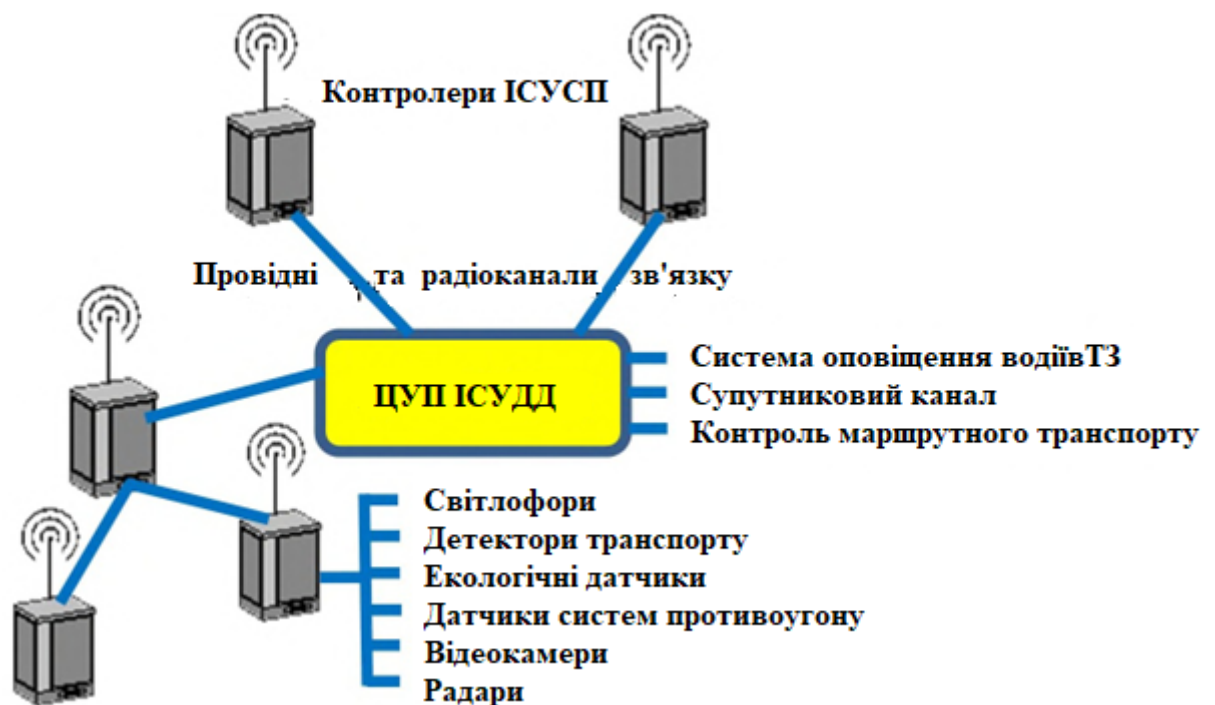


Рисунок 3.12 – Структурна схема ІСУДР

- координується жорсткий контроль трафіку відповідно до команд ЦУП за допомогою заданих програм, програма вибирається автоматично або

оператором (в залежності від часу доби);

- Скоординоване гнучке управління дорожнім рухом, яке залежить від параметрів транспортних потоків - вимірюється дорожніми детекторами, які враховують реальну дорожню ситуацію.

- координація контрольних дій, що надходять від усіх контролерів;

- структурування, аналіз та обробка поточних даних, що надходять від контролерів;

- аналіз та обробка супутникової інформації про завантаженість міських автомагістралей;

- оповіщення водіїв про завантаженість міських магістралей з пропозицією варіантів об'їзду доріг;

- реєстрація сигналів міської протиугінної системи з прив'язкою до карти та оповіщенням власників транспортних засобів (використовується супутниковий канал);

- оповіщення водіїв про неправильне паркування (використовується супутниковий канал) та евакуацію транспортних засобів з адресою штрафмайданчика;

- контроль за роботою громадського транспорту – для оповіщення автопарку про скупчення пасажирів на зупинках та необхідність в'їзду в чергу додаткових транспортних засобів, про аварії за участю громадського транспорту тощо;

- контроль загазованості міських магістралей;

- фіксація порушень ПДР за допомогою відеокамер та радарів;

- моніторинг працездатності вузлів і елементів ІСУСП.

- Супутниковий канал використовується для отримання даних про завантаженість міських магістралей, об'їзних доріг, місцях неправильної стоянки транспортних засобів, місцях ДТП, русі маршрутних транспортних засобів, сигналів протиугінних систем автомобілів.

Контролери перетину виконують:

- збір актуальної інформації з детекторів транспортних засобів та пішохідних майданчиків;
- розрахунок фаз тривалості роботи світлофорів;
- здійснення контрольних впливів.

Основне периферійне обладнання автоматизованих систем управління представлено світлофорами, датчиками доріг і тротуарів - детекторами транспортних засобів і пішоходів, газоаналізаторами навколишнього середовища, датчиками протиугінних систем транспортних засобів, відеокамерами, радарми і т.д.

Канали зв'язку. Периферійні датчики і пристрої підключаються до контролерів, а контролери - до ІСУДР за допомогою бездротового зв'язку, представленого CDMA, GPRS, GSM, дротового зв'язку представленого xDSL, Ethernet або комбінованим методом, що поєднує в собі елементи бездротового і дротового зв'язку. Канали зв'язку необхідні для передачі даних між банкоматним центром, контролерами та периферійними пристроями.

### 3.5 Технічне забезпечення пропонуємої системи

Устаткування ІСУДР включає в себе дорожні детектори, засоби зв'язку між детекторами і контролером, радіомодеми або дротові і власне контролери. Ідентифікація транспортного засобу є однією з ключових складових в системах інтелектуального управління дорожнім рухом. Вона дозволяє отримувати точну інформацію про транспортні потоки, що допомагає організовувати ефективне управління на всіх етапах руху — від моніторингу до впливу на регулювання руху через світлофори, сигналізацію або зміни в маршрутах.

Ідентифікація транспортних засобів і зворотний зв'язок з ЦУП є необхідною умовою для ефективного функціонування інтелектуальних транспортних систем. Вони дозволяють покращити організацію дорожнього руху, забезпечити безпеку та зменшити затримки, а також сприяють

збереженню навколишнього середовища завдяки оптимізації транспортних потоків.

*Індуктивні детектори.* Серед датчиків, що встановлюються безпосередньо на дорожнє полотно, найбільш поширеними є індуктивні датчики, які відрізняються від інших типів датчиків простотою конструкції, надійністю роботи і більш низькою вартістю. Індуктивні датчики широко використовуються для надання пріоритету громадському транспорту. Накладні датчики простіше в установці, але дорожче індуктивного детектора, а точність їх показань в більшій мірі залежить від погодних умов.

*Радар-детектори.* Найбільшою популярністю користуються радар-детектори ТЗ. Детектор може використовуватися для роботи в АСУ, контролю інтенсивності руху, контролю на в'їздах і виїздах з автомагістралей, проведення обстежень транспорту, автоматичного виявлення аварій і т.д. Він може охоплювати кілька смуг одночасно.

*Комбіновані детектори.* Вони використовуються в тому випадку, коли використання більш простих приладів не дозволяє з задовільною точністю визначити всі параметри транспортних потоків. Над кожною смугою руху встановлюються комбіновані сповіщувачі.

*Відеодетектори.* Система складається з однієї або декількох відеокамер, сигнали від яких обробляються спеціальним високошвидкісним програмним забезпеченням. Одна відеокамера дозволяє одночасно зчитувати дані з чотирьох смуг руху.

*Дорожні контролери* призначені для управління сигналами світлофорів і знаків на перехрестях і магістралях. Сучасні регулювальники для світлофорів виготовляються як універсальні з фіксованою кількістю каналів.

#### *Висновки за розділом*

Адаптивна система управління ІСУСП дозволяє швидко перемикає сигнали світлофора в залежності від наявності і довжини черги автомобілів в

пересічних напрямках перехрестя, без фіксації довжини фаз, як в світлофорах з фіксованим добовим графіком.

Робота АСУ ТП може бути реалізована двома способами: за допомогою сигналів від інфрачервоних датчиків, вбудованих в дорожнє полотно і за допомогою математичної моделі затримки транспортного засобу на перехресті.

Дискретно-управління подіями на основі сигналів від дорожніх детекторів є більш точним і робочим, тому що відображає поточну ситуацію в напрямках перехрестя і перемикає фази світлофорів в залежності від наявності транспортних засобів на дорогах.

Для кожного реального перехрестя алгоритм перемикання фаз його світлофорів повинен розроблятися з урахуванням індивідуальних особливостей перехрестя.

Запропонована модель затримки та зміна її параметрів протягом світлофорного циклу відповідають реальним умовам дорожнього руху, враховує режим перевантаження пропускнує спроможності перехрестя у вигляді черг та заторів.

Контроль на основі моделі затримки заснований на фізичних законах руху транспортного засобу через перехрестя, по суті, він перспективний, так як за результатами попереднього циклу світлофора визначає тривалість його фаз на наступний цикл.



## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Результати, отримані в роботі, можуть бути представлені у вигляді наступних положень:

1. Транспортні засоби долають перехрестя у фазі розгону із середньою швидкістю близько 43 км/год, мінімальний час дії дозвільного сигналу світлофора має становити не менше 4 секунд.

2. Модель Дж. Бекмана відрізняється статечним характером, його основними недоліками є:

– інтенсивність проходження завжди повинна бути більше, ніж інтенсивність прибуття транспорту, інакше модель втрачає свій фізичний сенс;

– розмір черги практично не впливає на значення затримки транспортування.

3. Найбільший вплив на латентність має модель Дж. Бекмана наводить час пропускового сигналу світлофора - близько 44%, на другому місці - час заборонного сигналу - близько 31%, інтенсивність прибуття і виїзду вносить по 12-13%, і практично не впливає на затримку черги транспортних засобів - менше 1%.

4. Основними критеріями контролю за роботою світлофора є «мінімальна затримка  $d = xv$ » і «мінімальна черга  $q_0 = xv$ ». У цьому випадку сигнали світлофора в наступному циклі розраховуються за допомогою моделі за результатами попереднього циклу.

5. Нормативна модель Ф. Вебстера має і силову форму, за важливістю параметри розташовуються в наступному порядку: щільність наближення транспортного засобу (44%), час фази зеленого сигналу (29%), час всього циклу (21%) і інтенсивність прибуття транспортних засобів на перехрестя (6%).

6. Моделі затримки Бекмана і Вебстера для черги і заторів не підходять для управління дорожнім рухом.

7. Запропонована модель затримки враховує режим перевантаження пропускної спроможності перехрестя у вигляді черг і заторів, має прозорий фізичний зміст, є ближчим до реального стану трафіку, найбільш значущими параметрами є тривалість заборонного сигналу -33,5% і дозвільного сигналу світлофора - 25,63%, далі йде інтенсивність заїзду - 14,16%, черги - 14,13% і інтенсивність проїзду - 12,58%.

8. Результати калібрування і валідації показують, що нова модель підходить для управління сигналами світлофорів і описує процеси управління світлофорами більш точно, ніж модель Вебстера.

9. Інтелектуальна система управління дозволяє швидко перемикає сигнали світлофора в залежності від наявності і довжини черги автомобілів в пересічних напрямках перехрестя без фіксації довжини фаз, як в світлофорах з фіксованим добовим графіком.

10. Робота системи може бути реалізована двома способами: за допомогою сигналів від інфрачервоних датчиків, вбудованих в дорожнє полотно і за допомогою математичної моделі затримки транспортного засобу на перехресті.

11. Дискретне-управління подіями на основі сигналів від дорожніх детекторів є більш точним і робочим, тому що відображає поточну ситуацію в напрямках перехрестя і перемикає фази світлофорів в залежності від наявності транспортних засобів на дорогах.

12. Для кожного реального перехрестя алгоритм перемикання фаз його світлофорів повинен розроблятися з урахуванням індивідуальних особливостей перехрестя.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Антоніаді Г.Д., Архипов В.О., Цупріков А.А. Аналіз моделі затримки транспортного засобу //Транспорт: наука, технологія, менеджмент, 2019. № 2, с. 61-66
2. Антоніаді Г.Д., Архипов В.О., Цупріков А.А. Визначення мінімального часу сигналу світлофора. Щомісячний науковий журнал «Євразійський союз вчених», № 11(56)/2018, Ч. 9, с. 13-18.
3. Андронов Р.В., Леверенець Є.А. Розрахунок за методом Монте-Карло затримок транспортного засобу на ізольованому регульованому перехресті при його роботі при високих рівнях навантаження //Вісник СумДГУ 2017. №1(60). С.221- 226.
4. Бродський Г.С., Айвазов А.Р. Автоматизоване управління дорожнім рухом в міському середовищі. 2007. №26. З 2-3.
5. Буре, В. М., Єлфімов А. Н., Карелін В. В. Стаціонарні цикли в детермінованій системі обслуговування. Прикладна математика. Інформатика. Управлінські процеси. 2018. Т. 14. сс. 40–50.
6. Воробйов Є. Автоматизація системи управління дорожнім рухом у місті //Системна інтеграція.Міський транспорт. 2000, №3, с.24-32
7. Крилатов А. Ю. Оптимальні стратегії управління пропускною спроможністю маршрутів транспортної мережі. Прикладна математика. Інформатика. Управлінські процеси. 2017. Т.13, с. 182–192.
8. Ахмадінуров М. М. Оптимізація світлофорного регулювання за допомогою програми моделювання транспортних потоків // Комп'ютер. Технол., пр., Радіоелектрон. 2010. № 12. с. 26-30.
9. Скульбеденко Н.А. Методика розрахунку пішохідних затримок при регулюванні пішохідних переходів. Вісник ВНТУ №3 (39) 2009. с.76-79

10. Khamitova, A. D. Characteristic polynomials for a cycle of non-linear discrete systems with time delays. Vestnik of SPU Series 10. Applied mathematics. Computer science. Control processes, 2016, issue 4, pp. 104–115
11. Aimsun. The integrated transport modeling software. URL: <http://www.aimsun.com> (Дата звернення: 20.09.2024).
12. Beckmann M. J., McGuire C. B. and Winsten C. B., Studies in the Economics of Transportation, Yale University Press, 1956.
13. Darroch, J. N. On the Traffic-Light Queue. Ann. Math. Statist., 35, 1964.
14. Darroch, J. N., G. F. Newell, and R. W. J. Morris., Queues for a Vehicle- Actuated Traffic Light. Operational Research, 12, 1964.
15. McNeil, D. R. A Solution to the Fixed-Cycle Traffic Light Problem for Compound Poisson Arrivals. J. Appl. Prob. 5, 1968.
16. Miller, A. J. Settings for Fixed-Cycle Traffic Signals. Operational Research Quarterly, Vol. 14, 1963.
17. Newell, G. F. Queues for a Fixed-Cycle Traffic Light. The Annals of Mathematical Statistics, Vol.31, No.3, 1960.
18. Quadstone Paramics. Traffic Simulation Solutions, URL: <http://www.para-mics-online.com> (Дата звернення: 20.09.2024).
19. SATURN Software Web Site. URL: <https://saturnsoftware.co.uk> (Дата звернення: 20.09.2024).
20. TransModeler Traffic Simulation Software. URL: <http://www.caliper.com/transmodeler> (Дата звернення: 20.09.2024).
21. Webster, F. V. Traffic Signal Settings. Road Research Laboratory Technical Paper No. 39, HMSO, London, 1958.
22. Wardrop J.G. Some theoretical aspects of road traffic research // Proc. of the Inst. of Civil. Eng, Part II, 1952, 1, pp. 325-378.
23. Маринич І. А., Тронь В. В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 151 “Автоматизація

та комп'ютерно-інтегровані технології". Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2022. 50 с.

24. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

25. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

26. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація)

27. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація).

## ДОДАТОК А

Програмне забезпечення для оптимального керування світлофорами на  
перехресті з круговим рухом

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows;
using System.Windows.Controls;
using System.Windows.Data;
using System.Windows.Documents;
using System.Windows.Input;
using System.Windows.Media;
using System.Windows.Media.Imaging;
using System.Windows.Navigation;
using System.Windows.Shapes;
using System.Windows.Threading;
namespace Traffic_Lightspp1
{
    public partial class MainWindow : Window
    {
        int[][] ConnectTable = {new[] {-1}, new[] {-1}, new[] {-1},/*3*/new[] {18,28},
/*4*/new[] {26},/*5*/new[] {-1},/*6*/new[] {-1},/*7*/new[] {22},/*8*/new[]
{22,20},/*9*/new[] {20},/*10*/new[] {-1},/*11*/new[] {-1},/*12*/new[] {-1},
/*13*/new[] {25},/*14*/new[] {29},/*15*/new[] {16},/*16*/new[] {12,17},
/*17*/new[] {1},/*18*/new[] {5,6},/*19*/new[] {21},/*20*/new[] {10,11},
/*21*/new[] {10,11},/*22*/new[] {23,24},/*23*/new[] {16},/*24*/new[] {25},
/*25*/new[] {26,29},/*26*/new[] {21,22},/*27*/new[] {21},/*28*/new[]
{19,27},/*29*/new[] {28,18} };
        if (pass)
        {
            Carlist[i].phase++;
            Carlist[i].place[0] = Ways[Carlist[i].FullPath[Carlist[i].phase]].X[Car-
list[i].index];
            Carlist[i].place[1] = Ways[Carlist[i].FullPath[Carlist[i].phase]].Y[Car-
list[i].index];
            Canvas.SetLeft(Carlist[i].el, Carlist[i].place[0] - 6);

```

```
Canvas.SetTop(Carlist[i].el, Carlist[i].place[1] - 6);
sensors.CountIfIsSensorsPlace(Carlist[i].place, SensorsPlace, TL,
canvas, TrafficLights, sensors, Timers, TL_0, LightsBrush);
decrement(TP, sensors, TL, Timers, TL_0);
    }
  }
else
  {
i--;
  }
}
}
}
}
canvas.Children.RemoveAt(i + 80);
Carlist.RemoveAt(i);
```

## ДОДАТОК Б

Програмне забезпечення для оптимального керування світлофорами на T-  
подібному перехресті

```

mainForm:
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
namespace EVM_svetofor
{
    public partial class MainForm : Form
    {
        int def_green_1 = 50; int def_green_2 = 30;
        System.Timers.Timer timSft1 = null;
int interval_sft_1 = 5;//Час зеленого сигналу на великій дорозі в секундах
int interval_sft_2 = 3;//Час зеленого сигналу на невеликій дорозі в секундах
        int count_sec_sft = 0;
        int diff_1_3_1 = 10;
        int diff_1_3_2 = 20;
        int diff_1_3_3 = 30;
        int diff_2_1 = 10;
        int diff_2_2 = 15;
        int diff_2_3 = 20;
    }

        MessageBox.Show("Неправильне значення часу світлофора
\n Значення першого світлофора має бути більшим, ніж значення другого");
return;
    }
    def_settings["diff_1_3_1"] = Convert.ToInt32(tbTD1_3_1.Text);
    def_settings["diff_1_3_2"] = Convert.ToInt32(tbTD1_3_2.Text);
    def_settings["diff_1_3_3"] = Convert.ToInt32(tbTD1_3_3.Text);
    def_settings["diff_2_1"] = Convert.ToInt32(tbTD2_1.Text);
    def_settings["diff_2_2"] = Convert.ToInt32(tbTD2_2.Text);

```



```
    def_settings["diff_2_3"] = Convert.ToInt32(tbTD2_3.Text);  
    Form main_form = new MainForm(def_settings); main_form.ShowDialog();  
  }  
}  
}
```