

Вінницький національний технічний університет
Факультет машинобудування та транспорту
Кафедра автомобілів та транспортного менеджменту

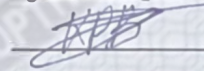
МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

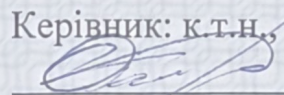
на тему:

«Підвищення пропускної здатності вулично-дорожньої мережі проспекту
Юності міста Вінниці вдосконаленням світлофорного регулювання»

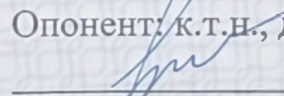
Виконав: студент 2-го курсу, групи 1ТТ-23м
спеціальності 275 – Транспортні технології
(за видами), спеціалізація 275.03 –
Транспортні технології (на автомобільному
транспорті)

Освітньо-професійна програма –
Транспортні технології на автомобільному
транспорті

 Кретюк Р.В.

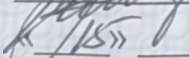
Керівник: к.т.н., доцент каф. АТМ
 Галушак О.О.

« 11 » 12 2024 р.

Опонент: к.т.н., доцент каф. ТАМ
 Сухоруков С.І.

« 15 » 12 2024 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри АТМ
к.т.н., доц. Цимбал С.В.

 « 15 » 12 2024 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет машинобудування та транспорту
Кафедра автомобілів та транспортного менеджменту

Рівень вищої освіти II-й (магістерський)

Галузь знань – 27 – Транспорт

Спеціальність 275 – Транспортні технології (за видами)

Спеціалізація 275.03 – Транспортні технології (на автомобільному транспорті)

Освітньо-професійна програма – Транспортні технології на автомобільному транспорті

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри АТМ
к.т.н., доцент Нимбач С.В.

« 18 » 09 2024 року

**ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ**

Кретюк Ростислав Вадимович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення пропускної здатності вулично-дорожньої мережі проспекту Юності міста Вінниці вдосконаленням світлофорного регулювання,
керівник роботи Галушак Олександр Олександрович, к.т.н., доцент,
затверджені наказом ВНТУ від «17» вересня 2024 року № 310.

2. Строк подання здобувачем роботи: 06.12.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: Законодавство України в галузі безпеки руху, охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях; структура автопарку України; структура світлофорного циклу; предмет дослідження – режими роботи світлофорного регулювання на перехрестях; похибка прогнозування досліджуваних показників не більше – 10%.

4. Зміст текстової частини:

1 Аналіз структури світлофорного циклу та транспортної затримки.

2 Проектування режимів та структури циклу світлофорного регулювання.

3 Оцінка ефективності режиму світлофорного регулювання.

4 Покращення автоматизованого проектування режимів світлофорного регулювання.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1-3 Тема, мета та завдання дослідження.

4 Основні принципи пофазного роз'їзду.

5 Послідовність розрахунку тривалості циклу світлофорного регулювання та його елементів.

6 Формалізація схеми руху на перехресті

7 Формування структури світлофорного циклу та режиму регулювання

8 Алгоритм програмного комплексу.

9-10 Алгоритм координованого регулювання транспортних потоків.

11 Графік координованого світлофорного регулювання для проспекту Юності м. Вінниця.

12 Висновки.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

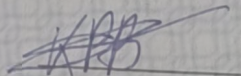
Розділ/підрозділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розв'язання основної задачі	Галушак О.О., доцент кафедри АТМ	18.09.2024	06.12.2024
Визначення ефективності запропонованих рішень	Цимбал С.В. завідувач кафедри АТМ	18.11	1.12

7. Дата видачі завдання «18» вересня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

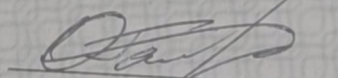
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення об'єкту та предмету дослідження	18.09-22.09.2024	викон
2	Аналіз відомих рішень, постановка задач	23.09-20.10.2024	викон
3	Обґрунтування методів досліджень	23.09-20.10.2024	викон
4	Розв'язання поставлених задач	21.10-03.11.2024	викон
5	Формування висновків по роботі, наукової новизни, практичної цінності результатів	04.11-17.11.2024	викон
6	Виконання розділу/підрозділу «Визначення ефективності запропонованих рішень»	18.11-01.12.2024	викон
7	Нормоконтроль МКР	02.12-06.12.2024	викон
8	Попередній захист МКР	09.12-11.12.2024	викон
9	Рецензування МКР	12.12-16.12.2024	викон
10	Захист МКР	20.12.2024-23.12.2024	викон

Здобувач


(підпис)

Кретюк Р.В.

Керівник роботи


(підпис)

Галушак О.О.

АНОТАЦІЯ

УДК 656.13

Кретюк Р.В. Підвищення пропускної здатності вулично-дорожньої мережі проспекту Юності міста Вінниці вдосконаленням світлофорного регулювання. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 275 – Транспортні технології (за видами), спеціалізація 275.03 – Транспортні технології (на автомобільному транспорті), Освітньо-професійна програма – Транспортні технології на автомобільному транспорті. Вінниця: ВНТУ, 2024. 108 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 18 назв; рис.: 31; табл. 7.

У магістерській кваліфікаційній роботі вирішується науково-практична задача, яка полягає в оптимізації роботи світлофорів і встановлення параметрів їх режиму, що забезпечують узгодженість і цілісність світлофорного циклу для підвищення ефективності регулювання руху.

Графічна частина складається з 12 плакатів.

Ключові слова: світлофорне регулювання, перехрестя, світлофорний цикл, транспортний потік, зелена хвиля.

ABSTRACT

UDC 656.13

Kretyuk R.V. Increasing the capacity of the street and road network of Yunosti Avenue in Vinnytsia by improving traffic light regulation. Master's qualification work in the specialty 275 - Transport technologies (by type), specialization 275.03 - Transport technologies (in road transport), Educational and professional program - Transport technologies in road transport. Vinnytsia: VNTU, 2024. 108 p.

In Ukrainian. Bibliography: 18 titles; fig.: 31; table. 7.

The master's qualification work solves a scientific and practical problem, which is to optimize the operation of traffic lights and establish the parameters of their mode, which ensure the consistency and integrity of the traffic light cycle to increase the efficiency of traffic regulation.

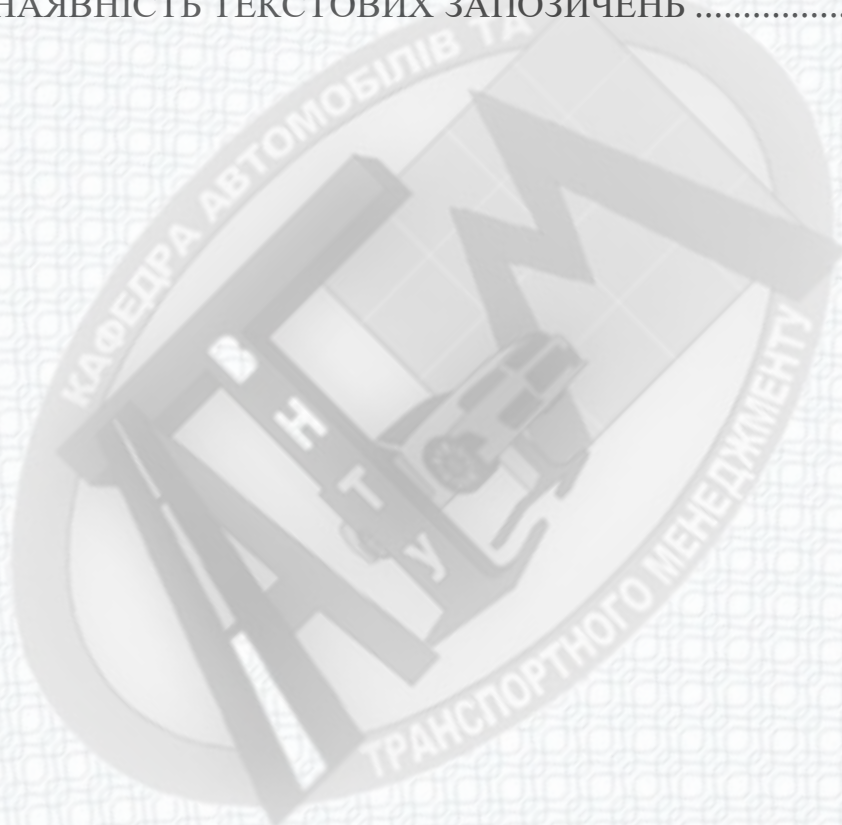
The graphic part consists of 12 posters.

Keywords: traffic light regulation, intersection, traffic light cycle, traffic flow, green wave.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТРУКТУРИ СВІТЛОФОРНОГО ЦИКЛУ ТА ТРАНСПОРТНОЇ ЗАТРИМКИ	8
1.1 Структура світлофорного циклу.....	8
1.2 Втрачений час у фазі та її ефективна тривалість	10
1.3 Потік насичення.....	16
1.4 Транспортна затримка	23
1.5 Висновки до розділу 1	28
РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТУВАННЯ РЕЖИМІВ ТА СТРУКТУРИ ЦИКЛУ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ	29
2.1 Проектування системи фаз регулювання	29
2.2 Перехідний інтервал.....	32
2.3 Розрахунок матриці перехідних інтервалів.....	41
2.4 Розрахунок циклу регулювання та тривалості зеленого часу	45
2.5 Висновки до розділу 2	54
РОЗДІЛ 3 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМУ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ	55
3.1 Рівень обслуговування	55
3.2 Визначення затримок всіх елементів перехрестя	59
3.3 Висновки до розділу 3	73
РОЗДІЛ 4 ПОКРАЩЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ РЕЖИМІВ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ	74
4.1 Визначення режимів координованого управління регулювання транспортними потоками.....	75
4.2 Визначення витрат на виконання науково-дослідної роботи.....	83

4.3 Висновки до розділу 4	90
ВИСНОВКИ	91
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	92
ДОДАТКИ	94
ДОДАТОК А (ОБОВ'ЯЗКОВИЙ) ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА	95
ДОДАТОК Б. ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ	108



ВСТУП

Актуальність теми. Автоматизовані системи регулювання дорожнього руху з використанням світлофорів є важливим інструментом для оптимізації пропускної здатності міської транспортної інфраструктури. Застосування таких систем є економічно ефективним рішенням у порівнянні з будівництвом нових транспортних розв'язок або об'їзних магістралей. Крім того, вони сприяють зменшенню викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище, створюючи більш комфортні та безпечні умови для учасників дорожнього руху.

Методики, що враховують пофазовий розподіл руху, дозволяють визначати оптимальну тривалість світлофорних циклів для кожного напрямку, але їх ефективність може бути обмежена через недоліки у врахуванні різниць у транспортному завантаженні. Неточності в розрахунках часу, необхідного для початку та завершення руху через перехрестя, можуть призводити до утворення фаз із низьким рівнем насичення, що збільшує тривалість циклів і негативно впливає на комфорт та безпеку дорожнього руху.

Ці виклики вимагають ретельного підходу до налаштування режимів роботи світлофорів для забезпечення максимальної ефективності регулювання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась відповідно до науково-дослідної тематики кафедри автомобілів та транспортного менеджменту Вінницького національного технічного університету. Робота виконана відповідно до Закону України «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки» № 2623-14 від 05.12.2012 р.; розпорядження Кабінету Міністрів України з виконання Програми діяльності Кабінету Міністрів України, Стратегії сталого розвитку «Україна-2030» № 722/2019. від 30.09.2019 та Стратегії розвитку Вінницької міської територіальної громади до 2030 року – Стратегії 3.0.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є оптимізація роботи світлофорів і встановлення параметрів їх режиму, що забезпечують узгодженість і цілісність світлофорного циклу для підвищення ефективності регулювання руху.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- аналіз структури світлофорного циклу та транспортної затримки;
- методи управління світлофорами на перехрестях;
- проектування режимів та структури циклу світлофорного регулювання;
- визначення затримок всіх елементів перехрестя;
- удосконалення алгоритму розрахунку параметрів регулювання транспортних потоків;
- покращення автоматизованого проектування режимів світлофорного регулювання.

Об'єкт дослідження – зміна пішохідних та транспортних потоків на перехрестях зі світлофорним регулюванням.

Предмет дослідження – режими роботи світлофорного регулювання на перехрестях.

Новизна одержаних результатів.

Удосконалено алгоритми управління світлофорного регулювання при організації пішохідних та транспортних потоків по окремих напрямкам з оптимізацією тривалості дозволяючих сигналів світлофора.

Апробація результатів роботи. Частина результатів роботи доповідались та обговорювались на Всеукраїнській науково-практичній Інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (Вінниця: ВНТУ, 2024).

Публікації. Основні положення та результати досліджень за участі автора опубліковані в одній публікації [1].

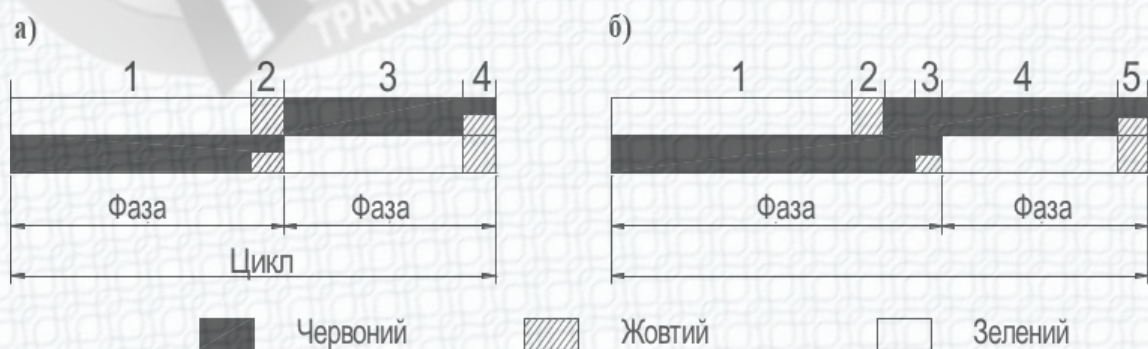
РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТРУКТУРИ СВІТЛОФОРНОГО ЦИКЛУ ТА ТРАНСПОРТНОЇ ЗАТРИМКИ

1.1 Структура світлофорного циклу

Структура світлофорного регулювання визначається такими поняттями, як такт, фаза і цикл регулювання. Такт регулювання — це інтервал, протягом якого діє певна комбінація сигналів світлофора. Такти поділяються на основні та проміжні.

Основний такт забезпечує рух певної групи транспортних і пішохідних потоків, при цьому рух у конфліктних напрямках заборонено. Проміжний такт — це період, під час якого виїзд на перехрестя заборонений. У цей час рухаються транспортні засоби, водії яких не встигли зупинитися біля стоп-лінії. Також у цей період здійснюється підготовка до передачі права руху наступній групі потоків. Це включає звільнення перехрестя від транспорту і пішоходів, які рухалися під час попереднього основного такту.



а - з одним проміжним тактом у кожній фазі; б - із трьома проміжними тактами в першій фазі; 1 - 6 - номери тактів

Рисунок 1.1 – Структура світлофорного циклу

Метою використання проміжних тактів є забезпечення безпеки руху в перехідний період, коли рух попередньої групи потоків уже заборонено, а наступна група ще не отримала дозволу перетинати перехрестя.

Фазою регулювання називається поєднання основного такту та наступних за ним проміжних тактів. Кількість фаз регулювання зазвичай відповідає числу найбільш завантажених конфліктних напрямків руху на перехресті. Мінімальна кількість фаз становить дві; у випадку відсутності конфліктних потоків потреба у світлофорах відпадає.

Циклом регулювання називається сукупність усіх фаз, які періодично повторюються.

Режим світлофорного регулювання визначається тривалістю циклу, а також кількістю, порядком чергування і тривалістю тактів і фаз, що входять до складу циклу. Такий режим можна подати у вигляді суми:

$$C = g_1 + I_1 + g_2 + I_2 + \dots + g_n + I_n, \quad (1.1)$$

де C – тривалість циклу регулювання, с;

I_n – тривалості проміжного такту, с;

$g_1 \dots g_n$ – тривалості основного такту, с;

n – число фаз.

Проміжний такт позначається жовтим сигналом світлофора для напрямку, де раніше здійснювався рух (під час основного такту). У цей період допускається рух транспортних засобів, водії яких не змогли вчасно зупинитися біля стоп-лінії в момент увімкнення жовтого сигналу. Тривалість жовтого сигналу $t_{жс}$ встановлюється в межах від 3 до 4 секунд: менше ніж 3 секунди — недостатньо для безпечного зупинення; понад 4 секунди — може провокувати водіїв зловживати можливістю проїзду на жовтий сигнал.

У ситуаціях, коли транспортним засобам потрібно більше часу для звільнення зони перехрестя (наприклад, через широку проїжджу частину або

низьку швидкість), застосовують два послідовні проміжні такти. У цьому випадку після завершення 4 секунд жовтий сигнал змінюється на червоний у попередньому напрямку. У конфліктному напрямку продовжує діяти червоний сигнал, який перед увімкненням зеленого на 3–4 секунди змінюється на комбінацію червоного та жовтого. Таким чином, може створюватися ситуація, коли на перехресті одночасно в усіх напрямках діє червоний сигнал.

Ці перехідні інтервали, утворені проміжними тактами, забезпечують безпеку та організованість руху. Їх тривалість залежить від особливостей перехрестя, конфігурації транспортних потоків і прийнятої схеми регулювання. Максимальна тривалість таких інтервалів зазвичай не перевищує 8 секунд, щоб уникнути значних затримок руху. Якщо перехідні інтервали є тривалими, доцільно розглянути встановлення проміжних стоп-ліній.

1.2 Втрачений час у фазі та її ефективна тривалість

Під час фази регулювання транспортні засоби рухаються в період горіння дозволяючого сигналу позначається як g (рис. 1.2).

Під час проміжного такту інтенсивність руху у перерізі стоп-ліній поступово знижується до нуля. На початку основного такту транспортні засоби, які очікують дозволяючого сигналу, починають рух із затримкою. Ця затримка зумовлена реакцією водіїв на дозвільний сигнал та розгоном транспортних засобів.

В результаті, інтенсивність руху поступово збільшується і через певний час досягає приблизно постійного значення S , яке відповідає пропускній спроможності цього напрямку.

Стартова затримка l_1 — це втрата часу на початку такту g , коли рух фактично відсутній. Цей період є частиною фази, але його не можна ефективно використовувати для пропуску транспортних засобів.

До втраченого часу слід також включити період проміжного такту, за винятком часу, який витрачається на "прорив" транспортних засобів, що не змогли зупинитися біля стоп-лінії після увімкнення жовтого сигналу.

Таким чином, втрачений час у фазі враховує як стартову затримку l_1 , так і частину проміжного такту, що не використовується для пропуску транспортного потоку.

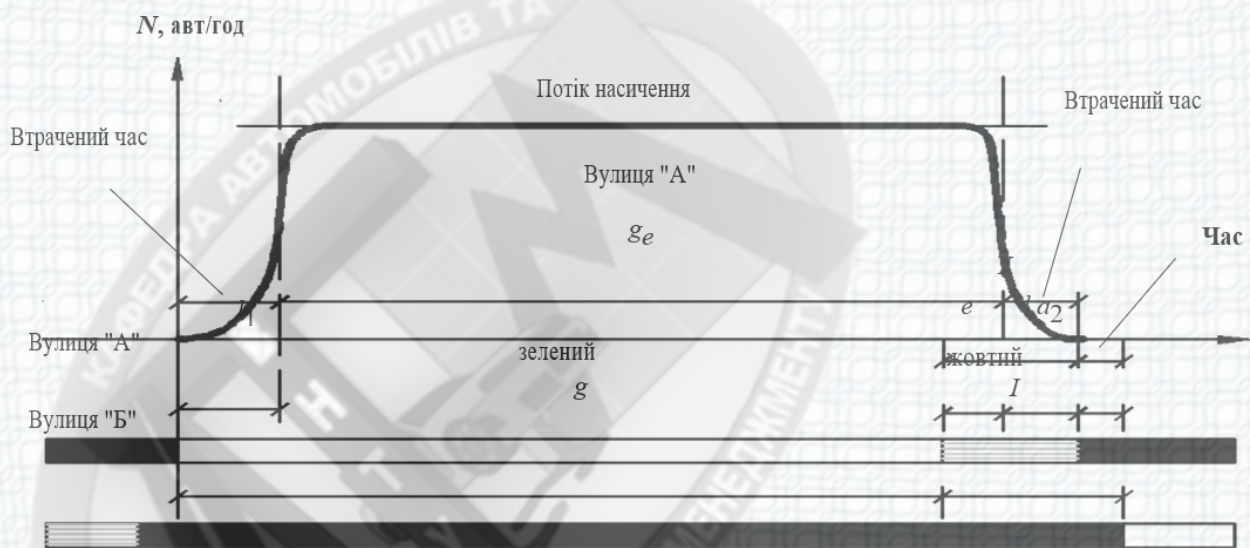


Рисунок 1.2 – Ефективна тривалість фази

Рух транспортних засобів починається із затримкою після увімкнення дозволяючого сигналу і завершується із затримкою після його вимкнення. Час, протягом якого фактично здійснюється рух, називається ефективною тривалістю фази (g_e).

На рис. 1.2 наведено процес роз'їзду черги нескінченної довжини під час повністю насиченої фази регулювання. Кількість транспортних засобів, що залишили перехрестя за час ефективною тривалості фази (g_e), дорівнює загальній кількості транспортних засобів, що пройшли через перехрестя за цю фазу. Інтенсивність руху в перерізі стоп-ліній у даному напрямку можна подати графічно як прямокутник. Висота прямокутника дорівнює пропускній спроможності напрямку (S). Основа прямокутника — це ефективна тривалість фази (g_e).

Таким чином, значення g_e дозволяє оцінити фактичну пропускну здатність напрямку руху протягом однієї фази регулювання.

Втрачений час у фазі $t_L = l_1 + I - e$, а тривалість фази $(g + I)$ дорівнює сумі ефективної її тривалості $(g_e + tL)$.

Показник S є максимальною інтенсивністю роз'їзду черги транспортних засобів під час повністю насиченої фази. У спеціальній літературі цей параметр відомий як потік насичення.

Повністю насичені фази спостерігаються при високій інтенсивності руху, найчастіше у години пік. У таких умовах транспортний потік розпочинається з роз'їзду черги транспортних засобів, які були зупинені заборонним сигналом, а потім рух стає вільним.

Потік насичення визначається як інтенсивність роз'їзду транспортних засобів, які очікували дозволяючого сигналу, і відображає максимальну пропускну здатність перехрестя у таких умовах.

Втрачений час у циклі регулювання (L) складається з втрачених часів у кожній його фазі, включаючи стартову затримку (l_1), що виникає на початку фази через реакцію водіїв і розгін транспортних засобів та частину проміжного такту, яка не використовується для ефективного руху.

Сумарний втрачений час у циклі є важливим параметром для оптимізації режимів роботи світлофорів і підвищення пропускну здатності перехресть:

$$L = \sum_1^n t_{Li} = \sum_1^n (l_{1i} + I_i - e_i), \quad (1.2)$$

де i - номер фази.

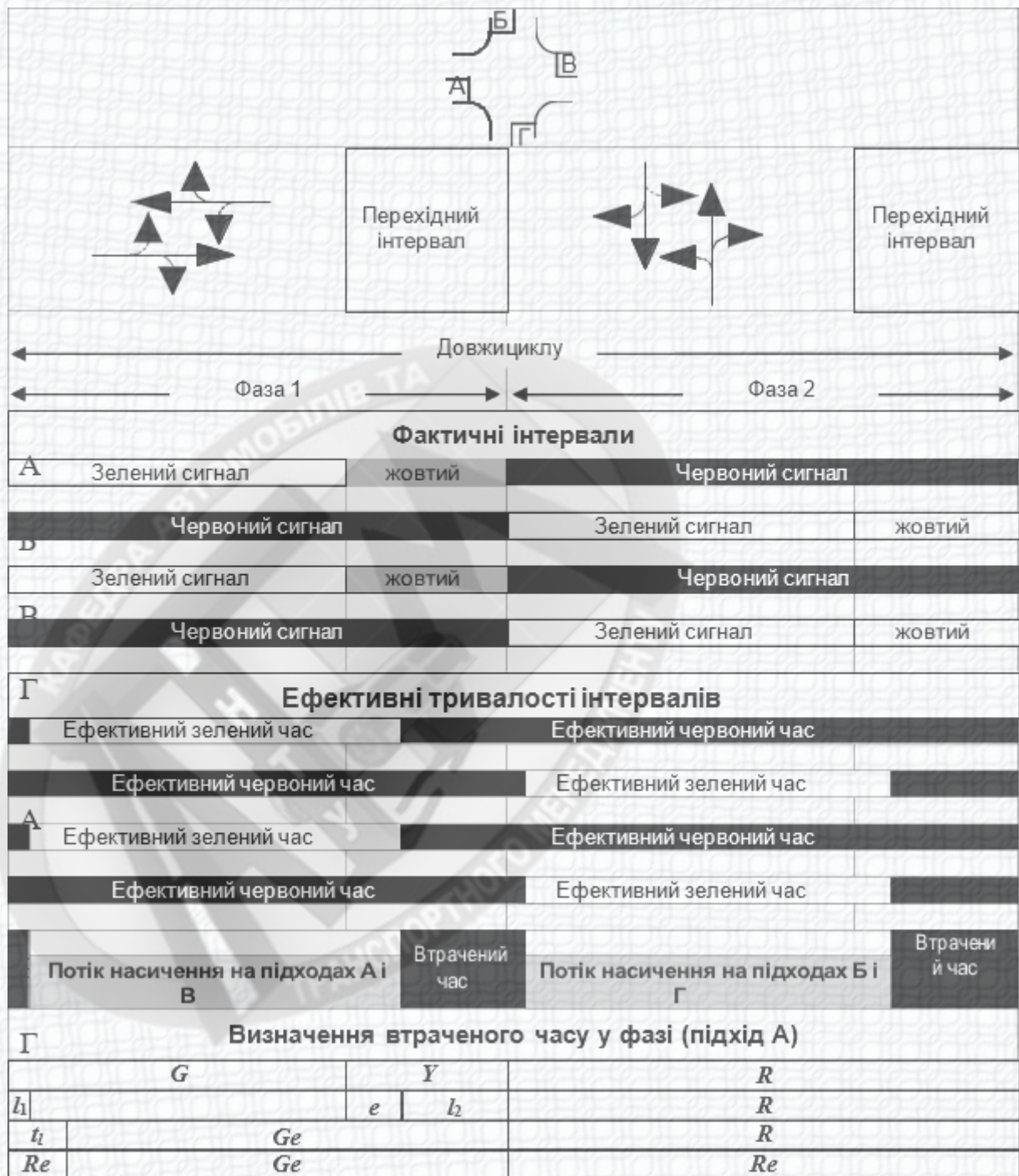


Рисунок 1.3 – Взаємозв'язок між дійсними та ефективними тривалостями тактів регулювання

Експериментальні дослідження засвідчили, що e в середньому більше за l_1 на 1 с, тобто ефективна тривалість фази дещо більша за тривалість роздільного сигналу. Однак, для практичних розрахунків зазвичай приймають $l_1 \approx e$ і, таким чином, $t_L \approx I$. Тому втрачений час у циклі можна наближено вважати таким, що

дорівнює сумі проміжних тактів (перехідних інтервалів), які входять до складу циклу.

На рис. 1.2 показано, що дійсні тривалості основних тактів регулювання (зелений або червоний сигнали) відрізняються від їхніх ефективних тривалостей, упродовж яких фактично здійснюється або не здійснюється рух. На додаток, рис. 1.3 детальніше ілюструє взаємодію між такими параметрами, як ефективні тривалості інтервалів регулювання, а також їхніми дійсними тривалостями та величиною перехідного інтервалу [3].

Важливо правильно розуміти взаємозв'язок між дійсними тривалостями тактів регулювання (зелений, жовтий і червоний сигнали) та ефективними тривалостями зеленого і червоного сигналів. Як показано на рис. 1.3, втрачений час у фазі віднімається з моменту початку дійсного зеленого часу (основного такту). Таким чином, невелика частка зеленого сигналу G_i стає частиною ефективного червоного часу. Ця частка дорівнює величині втраченого часу у фазі t_L . При цьому, продовження ефективного зеленого часу можна змістити до кінця дії перехідного інтервалу (жовтий + повністю червоний), Y_i . Таким чином, для будь-якої групи руху ефективний зелений час обчислюється за формулою (1.4), а ефективний червоний час – за формулою (1.5) [4]:

$$\begin{aligned} g_i &= G_i + Y_i - t_L, \\ r_i &= R_i + t_L. \end{aligned} \tag{1.3}$$

Спрощена концепція використання всіх складових втраченого часу у фазі на початку фази є раціональною під час аналізу працездатності доволі складних режимів регулювання, наприклад, із поєднанням для деяких напрямків конфліктного та безконфліктного рухів. Загальним правилом при цьому є те, що втрачений час у фазі t_L використовується на початку руху кожної групи. Таким чином, у випадках, коли рух в одному напрямі здійснюється з поєднанням конфліктного і безконфліктного рухів, початок руху в цьому напрямі має місце

лише один раз. Отже, втрачений час у фазі в таких випадках враховується відповідно один раз.

На рис. 1.4 представлено моделювання складнішої ситуації з поєднанням таких типів руху: 1) безконфліктний + конфліктний; 2) конфліктний + безконфліктний (класичне визначення таких типів рухів - на рис. 1.8. в зарубіжній літературі відповідно: "рух із випередженням" і "рух із запізненням"). У розглянутому прикладі лівоповоротні рухи з підходів на схід(ЕВ) і на захід (WB) здійснюють без конфлікту відповідно у фазах 1а і 1в, і з конфліктом у загальній фазі - 1б.

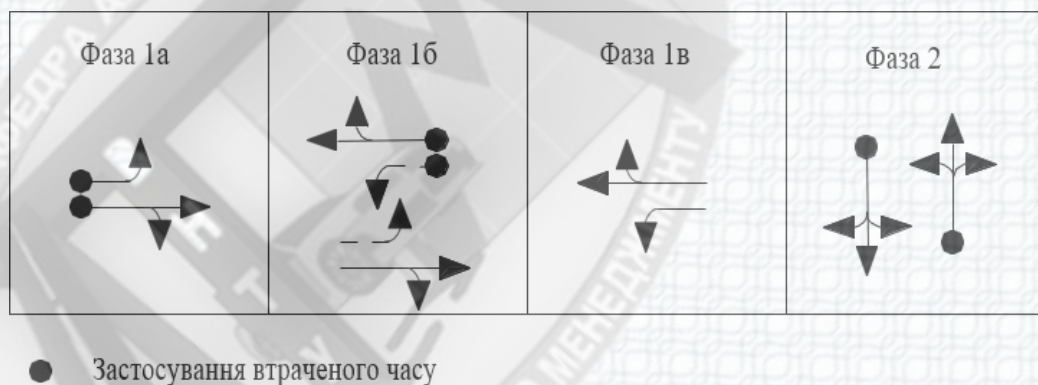


Рисунок 1.4 – Застосування втраченого часу під час регулювання за напрямками з поєднанням рухів із конфліктом і без конфлікту

Питання про те, як багато втраченого часу має бути враховано, для цього прикладу вирішується таким чином:

- У фазі 1а, зі східного (спрямованого на схід) підходу прямий і лівоповоротний потоки починають рух. Втрачений час застосовується до обох рухів.
- У фазі 1б, з підходу триває рух прямого і лівого напрямків - втрачений час не використовується. З підходу, спрямованого на захід (західний підхід), прямий і лівоповоротний потоки починають рух - втрачений час застосовується до обох рухів.
- У фазі 1в тільки прямий і лівоповоротний потоки із західного підходу продовжують рух - втрачений час не застосовується.

У фазі 2, з північного і південного підходів починається рух, і потепління часу використовується для обох напрямків.

1.3 Потік насичення

Протягом багатьох років вивчення транспортних потоків на регульованих перехрещеннях було виділено кілька основних параметрів, одним із яких є потік насичення, що визначає собою пропускну спроможність цієї смуги або походу до регульованого перехрещення.

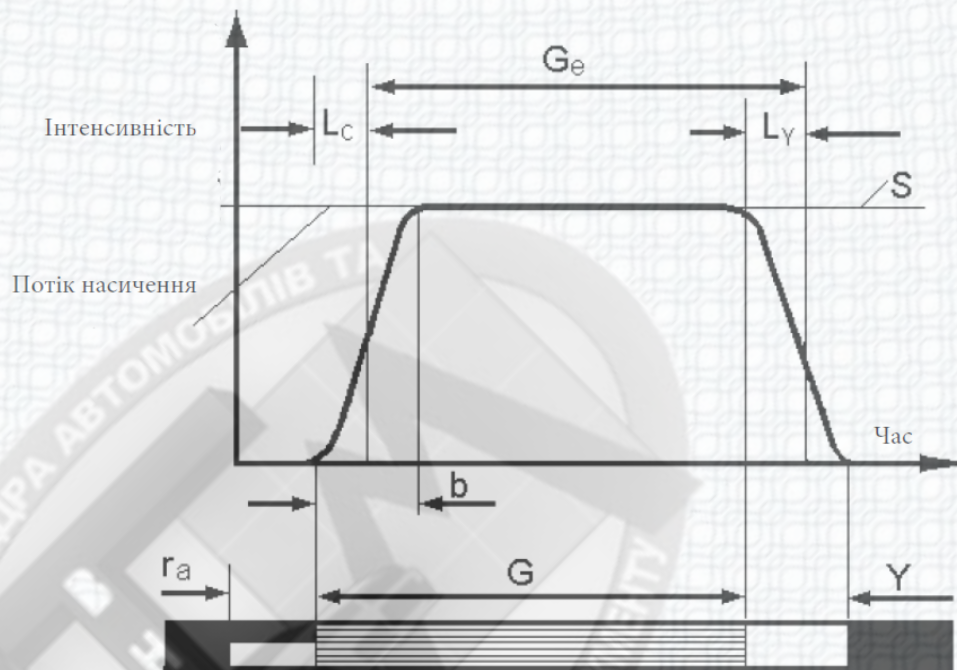
Потік насичення є основоположною характеристикою в процесі аналізу та проектування регульованого перетину.

Аналізуючи роботи дослідників різних країн, можна зробити висновок, що кожен автор формулював поняття потоку насичення по-своєму. Наприклад, Кременець Ю.А. [4] визначає потік насичення як максимальну інтенсивність роз'їзду черги при повністю насиченій фазі. Така оцінка потоку насичення є традиційною. Значна частина фахівців розглядає потік насичення як сталу інтенсивність руху через стоп-лінію з черги великої довжини. Ще Водроп [5] розумів під потоком насичення "потік, що настає, коли транспортні засоби рухаються з мінімально можливими інтервалами".

Разом з тим, можна навести приклади принципово іншого розуміння терміна потік насичення. У керівництві з проектування міських вулиць і доріг [6] потік насичення - це пропускну спроможність смуги за безперервного руху зі швидкістю 15 км/год. Врубель Ю.А. вважає, що потік насичення –це середня за час горіння зеленого сигналу інтенсивність вибуття автомобілів від стоп-лінії за умови розсмоктування доволі довгої черги.

Згідно із запропонованою Вебстером моделлю, потік після увімкнення зеленого сигналу за короткий проміжок часу b (рис. 1.5) приходить до стану, за якого спостерігаються постійні усталені інтервали між транспортними засобами (q). Потік перебуває в такому стані, поки не вмикається жовтий сигнал, після

чого потік стрімко падає до нульового значення. Пропускна здатність фази на основі цього графіка оцінюється площею під кривою.



G - тривалість зеленого сигналу; Y - тривалість жовтого сигналу;
 r_a - тривалість поєднання червоного і жовтого сигналів; G_e - ефективна тривалість зеленого сигналу; L_c - стартові показники часу; L_y - частина жовтого сигналу наприкінці фази, яка використовується для руху; S - потік насичення; b - проміжок часу від ввімкнення сигналу, який дозволяє до настання потоку насичення

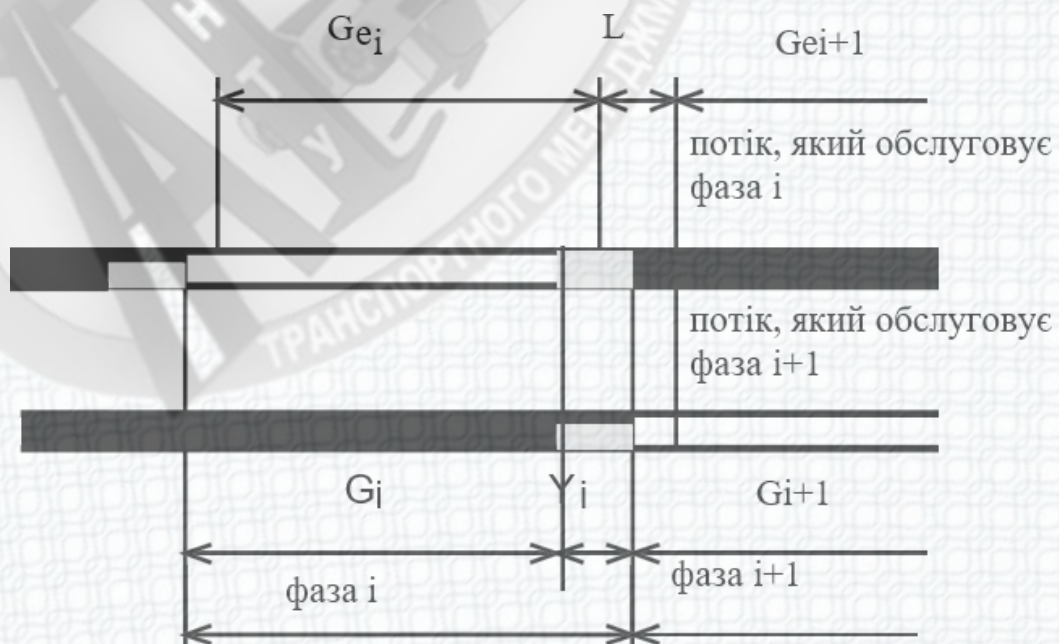
Рисунок 1.5 – Залежність "інтенсивність - час" для підходу до регульованого перехрестя в роботах Вебстера

Завдання оцінювання пропускної спроможності фази (рис.1.4) отримувало просту геометричну інтерпретацію. Припущення сталості інтервалів у потоці насичення давало змогу розділити протяжність циклу для будь-якого напрямку руху на перехресті на дві складові - "ефективну тривалість зеленого сигналу" та "ефективну тривалість червоного сигналу". Площа під кривою (пропускна спроможність) визначається площею прямокутника з висотою, що дорівнює інтенсивності потоку насичення S , і основою – ефективній тривалості зеленого сигналу G_e .

Сумарні втрати часу у фазі L визначають як суму тривалості зеленого G і жовтого сигналів Y мінус ширина прямокутника G_e , що є ефективною тривалістю зеленого сигналу:

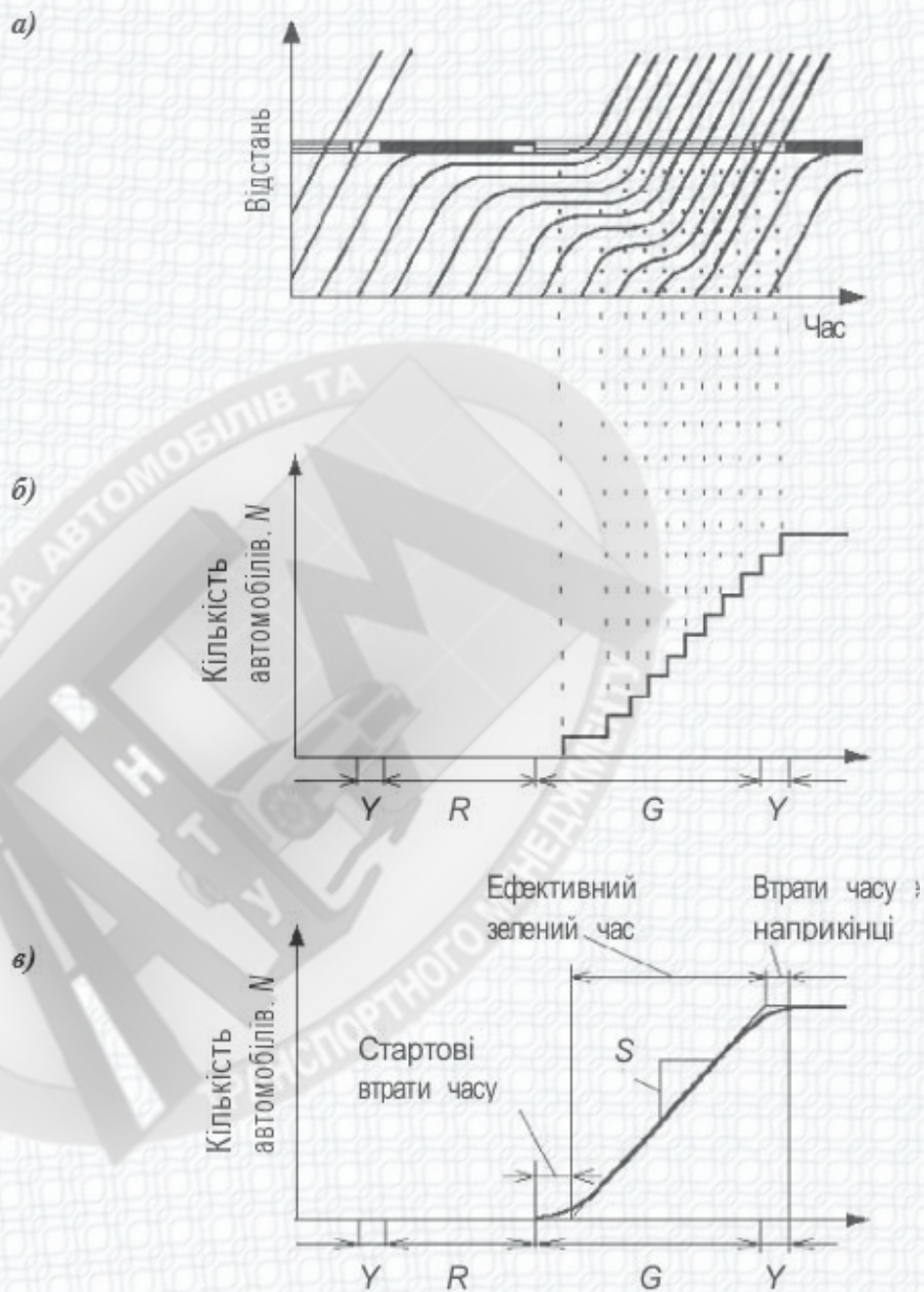
$$L = G + Y - G_e. \quad (1.4)$$

Оскільки втрати часу у фазі відіграють важливу роль, уточненням поняття втрачений час займався чимало фахівців. Дехто з них [7] термін "втрачений час" трактує дещо інакше, ніж у роботах Вебстера. Наприклад, Allsop втрачений час розглядає як проміжок між закінченням ефективної тривалості зеленого сигналу у фазі i і початком ефективної тривалості зеленого сигналу в наступній за нею фазі $i+1$ (рис. 1.6).



G - тривалості зелених сигналів; G_e - ефективні тривалості зелених сигналів;
 Y_i - перехідний інтервал від фази i до фази $i+1$ (у конкретному прикладі він складається з одного допоміжного такту - жовтого сигналу).

Рисунок 1.6 – Втрачений час L під час переходу від фази i до фази $i+1$ - період часу між закінченням ефективної тривалості сигналу в одній фазі (i) і початком ефективної тривалості зеленого сигналу в іншій ($i+1$)



a – діаграма, що показує прибуття і вибуття транспортних засобів; $б$ – ступінчаста кумулятивна крива $N(t)$; $в$ – загальний вигляд кумулятивної кривої та її параметри: втрати часу напочатку та наприкінці фази; ефективні зелений і червоний час; інтенсивність потоку насичення S (нахил кумулятивної кривої)

Рисунок 1.7 – Загальний вигляд кумулятивної кривої та її співвідношення з діаграмою прибуття і вибуття транспортних засобів

Положення Вебстера про постійну величину інтервалів у потоці насичення дозволяє ефективно моделювати кількість транспортних засобів $N(t)$, що перетинають стоп-лінію за час t , за допомогою лінійної функції:

$$N(t) = \frac{(t - L_c)}{q}, \quad (1.5)$$

де q - інтервал між транспортними засобами в потоці насичення, с;
 L_c - стартові втрати часу, с.

Оскільки потік насичення S - величина зворотна усталеному інтервалу q для $N(t)$, то

$$N(t) = S \cdot (t - L_c), \quad (1.6)$$

Ця графічна залежність отримала назву кумулятивної кривої [8]. Загальний вигляд кумулятивної кривої та її співвідношення з діаграмою, що показує прибуття і вибуття транспортних засобів. Згідно з цією залежністю кількість автомобілів, що може бути пропущена в розглянутій фазі в умовах повного насичення, визначається як

$$N \cdot (G + Y) = S \cdot (G + Y - L_c - L_k), \quad (1.7)$$

де Y - тривалість жовтого сигналу, с;

L_k - втрати часу наприкінці фази, тобто невикористовувана ефективно для руху частина жовтого сигналу (рис. 1.5, в), с.

Приймаючи втрати часу у фазі L рівними $L_c + L_k$ отримуємо

$$N \cdot (G + Y) = S \cdot (G + Y - L). \quad (1.8)$$

Усі параметри, що входять до рівняння, отримують чітке геометричне тлумачення та можуть бути визначені за допомогою простої регресійної моделі. Потік насичення (S) визначається як тангенс кута нахилу прямої ділянки графіка до горизонтальної осі, що відповідає швидкості проходження транспортних засобів у стані насичення.

Втрати часу під час старту (L_C) інтерпретуються як інтервал часу від початку зеленого сигналу до точки перетину прямої лінії з віссю абсцис. Втрати часу в допоміжному такті (L_K) — це інтервал часу між точкою перетину продовження похилої прямої лінії з горизонтальною віссю та моментом початку червоного сигналу. У разі визначення L_K (див. рис. 1.5, б), горизонталь проходить через ординату, що відповідає кількості транспортних засобів, пропущених за фазу (у повних умовах насичення).

Особливістю кумулятивної кривої, на відміну від графіка Вебстера (рис. 1.3), є можливість одночасного визначення значень L_C та L_K .

Кумулятивна крива (рис. 1.8) наочно демонструє помилковість розуміння стартових втрат часу як виключно затримки початку руху першого транспортного засобу в черзі після ввімкнення зеленого сигналу. Також слід критично поставитися до визначення ефективної тривалості зеленого сигналу як періоду руху через стоп-лінію та втрат часу як періоду, коли рух відсутній [9].

Твердження, що ефективна тривалість зеленого сигналу може перевищувати фактичну тривалість його горіння [10], є коректним у певних випадках. На основі аналізу публікацій найбільш обґрунтованим є підхід, при якому сумарні втрати часу в циклі визначаються як сума інтервалів між завершенням і початком ефективних тривалостей зеленого сигналу (рис. 1.4), як це запропоновано у роботах [11].

Для порівняння оцінок потоку насичення через одну смугу руху на прямолінійних траєкторіях на перехрестях використано дані за період 1947–1988 років. Основою для таблиці слугує систематизація даних Stokes, яку доповнено

результатами досліджень інших авторів. Простежується вплив змін у складі транспортного парку на потік насичення, тому дані впорядковано хронологічно.

У сучасному американському посібнику з пропускної спроможності доріг (HCM2000) потік насичення визначається як інтенсивність руху транспортних засобів через перехрестя за ідеальних умов, коли зелений сигнал доступний постійно, а втрати часу мінімізовані. Потік насичення зазвичай вимірюється в автомобілях на годину зеленого часу або на годину зеленого часу для однієї смуги руху [12].

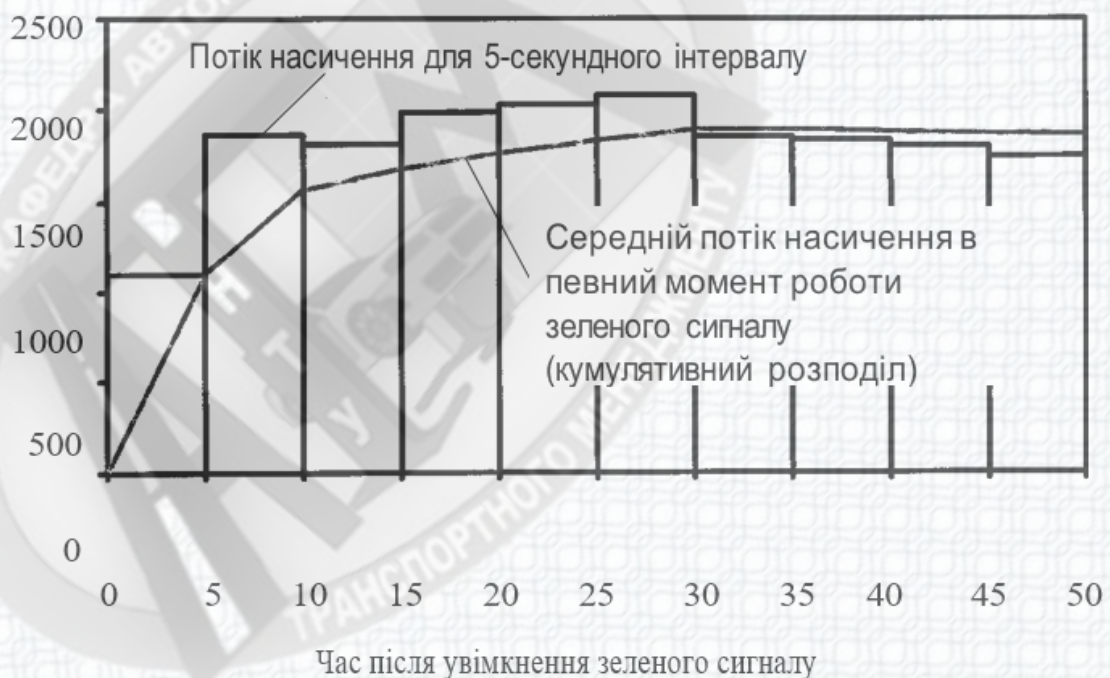


Рисунок 1.8 – Приклад виміряної величини потоку насичення

У сучасному німецькому керівництві з проектування засобів організації дорожнього руху (Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen, 2001) потік насичення визначається як максимальна кількість транспортних засобів, що можуть проїхати через стоп-лінію за період дії дозволяючого сигналу світлофора [13].

У сучасному канадському посібнику з проектування регульованих перехресть (Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections, 1995) потік насичення розглядається як інтенсивність руху, за якої транспортні засоби, що

очікують на дозвільний сигнал, поступово роз'їжджаються протягом періоду зеленого сигналу. У цьому ж посібнику вводиться поняття кумулятивного потоку насичення, що відображає середню величину потоку насичення до певного моменту часу (рис. 2.7).

1.4 Транспортна затримка

Як критерій оптимізації управління на окремому перетині великого поширення набула величина середньої затримки регулювання. Затримка тісно пов'язана з такими параметрами, як довжина черги, інтенсивність руху, пропускна здатність, параметри режиму регулювання.

Під довжиною черги розуміється кількість транспортних засобів у ній або її протяжність у лінійних одиницях. Довжина черги тісно пов'язана з величиною середньої та максимальної затримок, інтенсивністю руху, параметрами режиму регулювання і впливає на такі показники, як швидкість спілкування, кількість рушань і гальмувань у розрахунку на одиницю довжини. Її можна використовувати як показник ступеня насичення, порівнюючи з довгою черги, що пропускається за цикл. У разі досягнення стану насичених потоків, коли завданням управління стає мінімізація ймовірності виникнення затору, довжину черги і засновані на ній показники вважають найбільш прийнятними для управління на регульованому перехресті.

Зарубіжна теорія транспортного регулювання концентрується на оцінках затримок і довжин черг, що є результатом використання стратегії сигнального регулювання, як на окремому елементі, так і на перехресті в цілому. Транспортні затримки та довжина черги транспортних засобів є основними показниками, що вводять поняття рівня обслуговування (Level Of Service) і які використовуються під час оцінки достатньої довжини смуги руху перед перехрестям, під час оцінки споживання пального та викиду відпрацьованих газів. Загалом, нині для перехресть використовуються моделі затримок, які описуються з детермінованої

та стохастичної точок зору, щоб відобразити як сталість, так і випадковість властивостей транспортного потоку.

Моделі, які поєднують у собі як детерміновану, так і стохастичну складові, мають велику популярність, оскільки вони можуть бути використані як для широкого ряду інтенсивностей руху, так і для різних режимів регулювання. Вони є апроксимаціями тих моделей, які є більш обґрунтованими теоретично.

Оцінка стартових втрат часу становить безсумнівний практичний інтерес, особливо у випадках застосування коротких фаз. Величина втрат під час старту за даними різних авторів варіює в межах від 0,8 с до 4,5 с. Такий широкий діапазон значень свідчить про розмаїття умов руху на регульованих перетинах у тих країнах, де проводилися такі дослідження.

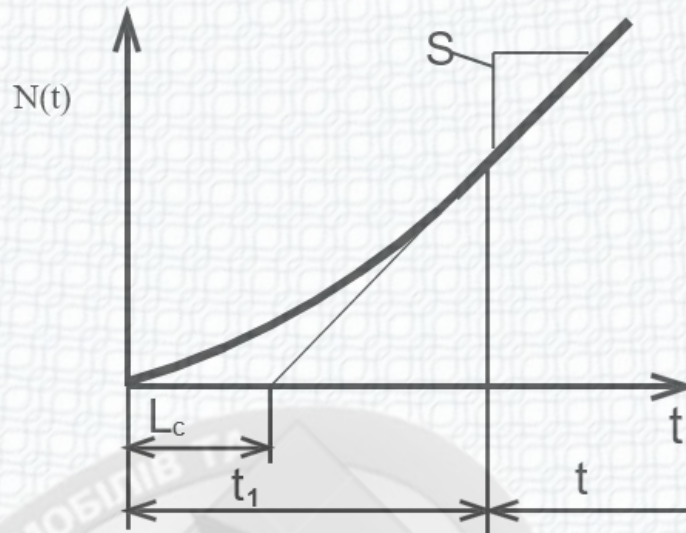
Стартові втрати часу можуть встановлюватися як у результаті спеціалізованих натурних досліджень, так і під час обстеження більш загального характеру в результаті побудови кумулятивної кривої (рис. 1.9).

Branston D. детально вивчав вплив різних чинників на тривалість стартових втрат. Насамперед цим автором відзначено вплив тривалості допоміжного такту (тобто тривалості горіння червоного і жовтого сигналів) r_A . Для стартових втрат часу t_c найкращу апроксимацію даних обстежень дала залежність:

$$t_c = 4,25 - 1,35 \cdot r_A. \quad (1.9)$$

Таким чином, збільшення тривалості допоміжного такту (у разі поєднання червоного і жовтого сигналів) знижувало стартові втрати часу. За цим рівнянням за тривалості r_A понад 3 с стартові втрати отримують від'ємні значення. Виходило, що водії починають рух до зеленого сигналу, що часто спостерігається в наших умовах. Автор визнав це неприпустимим і дещо скоригував залежність:

$$t_c = 3,4 - r_A. \quad (1.10)$$



L_C – стартові виміри часу; t_1 – час від моменту ввімкнення зеленого сигналу до настання моменту насичення; t_2 – період сталих інтервалів руху через стоп-лінію; S – потік насичення (тангенс кута нахилу)

Рисунок 1.9 – Початковий фрагмент кумулятивної кривої

Крім використання кумулятивної кривої, існує ще один підхід до оцінки стартових втрат часу, який базується на статистичному аналізі даних. У цьому методі стартові втрати часу L_C визначаються як вільний член лінійної регресійної моделі:

$$T = L_C + q \cdot N. \quad (1.11)$$

У цьому разі спостережуваними величинами є кількість транспортних засобів N , що пройшли стоп-лінію, і витрачена для їхнього пропуску час T , а оцінюваний коефіцієнт регресії – ustaleni інтервали потоку насичення q . Результати низки авторів наведено в табл. 1.1.

Детермінована складова визначається згідно з такими положеннями:

- а) на початку зеленого сигналу черга дорівнює 0;
- б) транспортні засоби прибувають однаковими пачками з інтенсивністю руху q за цикл;

в) роз'їзд здійснюється однаковими пачками з інтенсивністю, що дорівнює потоку насичення S за наявності черги, та з інтенсивністю, що дорівнює інтенсивності вибуття за умови розсмоктування черги;

г) попит транспортних засобів не перевищує пропускної спроможності елемента перехрестя, яку визначають як відношення потоку насичення S до відношення зеленого сигналу S до відношення зеленого сигналу S ;

д) пропускної здатності перехрестя.

Таблиця 1.1 – Регресійні моделі для оцінки стартових втрат

Автор	Формула
Гріншильдс	$T = 3,7 + 2,1 \cdot N$
Kunzman W.	
Смуга прямого руху	$T = 0,68 + 2,05 \cdot N$
Смуга лівого повороту	$T = 1,91 + 1,85 \cdot N$
Смуга лівого повороту при двосмуговій кишені	$T = 1,04 + 2,18 \cdot N$
Рекомендована формула (для будь-якої смуги)	$T = 1,1 + 2,1 \cdot N$
Sosin J.	$T = 3,8 + 1,9 \cdot N$

Ефективна тривалість зеленого сигналу — це період, протягом якого інтенсивність руху відповідає потоку насичення. Зазвичай вона визначається як фактичний час дії зеленого сигналу за вирахуванням початкової стартової затримки (2–3 с) та кінцевої затримки, необхідної для звільнення перехрестя (2–4 с), залежно від тривалості жовтого сигналу) [14].

Спрощену діаграму процесу затримок представлено на рис. 1.10. Лінія черги, отримана за цим рисунком, показана на рис. 1.11.

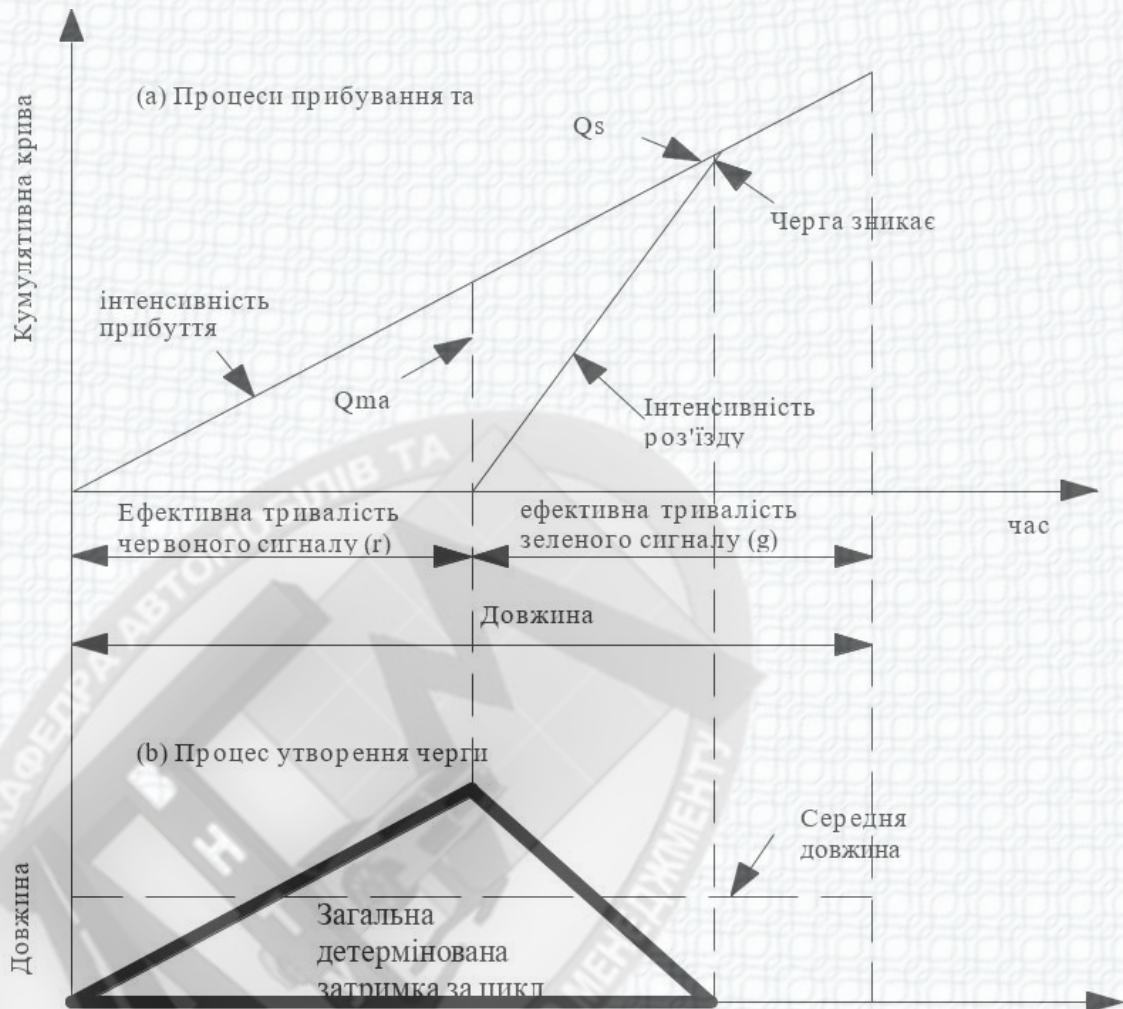


Рисунок 1.10 – Детермінована складова моделі утворення затримок

Область під лінією черги являє собою детерміновану затримку за цикл. Можна виокремити кілька параметрів, що характеризують процес руху, включно із середньою затримкою на один транспортний засіб (загальна затримка, поділена на кількість транспортних засобів, що прибули), кількість транспортних засобів, що зупинилися, Q_s , максимальна кількість транспортних засобів у черзі Q_{max} , середня довжина черги Q_{avg} .

Модель руху цього виду є ефективною за низьких рівнів насиченості (до 0,50), оскільки в таких умовах припущення про відсутність початкової та кінцевої черги здебільшого залишається вірним.

Зі зростанням інтенсивності руху зростає ймовірність виникнення "невдач циклу", коли частина черги не встигає розсмоктатися за один цикл і переноситься

на наступний. Це явище має випадковий характер і залежить від моменту, коли інтенсивність руху перевищує пропускну здатність.

Утворення початкової черги Q_0 спричиняє додаткову затримку, яку необхідно враховувати при аналізі руху. Моделі затримок, що враховують цей ефект, базуються на теорії черг.

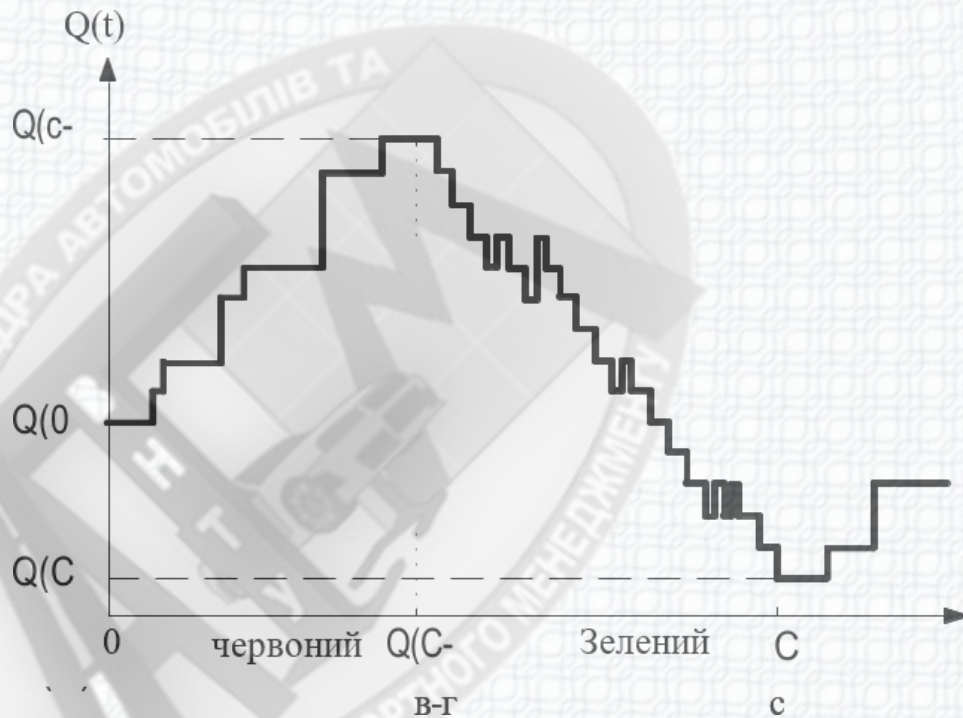


Рисунок 1.11 – Процес утворення черги протягом одного циклу (за дослідженнями МакНейла 1968)

1.5 Висновки до розділу 1

У цьому розділі проаналізовано структуру світлофорного циклу, транспортну затримку та методи управління світлофорами на перехрестях. Установлено, що пофазний метод регулювання світлофорної сигналізації не відповідає вимогам системи автоматизованого управління дорожнім рухом у місті. Основні принципи цього методу не дозволяють змінювати структуру циклу залежно від дорожньо-транспортної ситуації, що призводить до появи ненасичених проміжків у циклах регулювання.

РОЗДІЛ 2

ПРОЕКТУВАННЯ РЕЖИМІВ ТА СТРУКТУРИ ЦИКЛУ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

Під час проектування чи оцінювання ефективності регульованого перехрестя прийнято розглядати окремо кожен підхід до перехрестя, а також окремі групи руху в межах одного підходу.

Розподіл напрямків руху на групи є відносно простим завданням, яке враховує як геометричні особливості перехрестя, так і розподіл транспортних потоків на ньому. Формуючи групи руху, можна дотримуватися таких правил:

- виділені лівоповоротні смуги (або смуги) які формують окрему групу руху. Це саме стосується і виділених правоповоротних смуг.
- Якщо на підході до перехрестя передбачено виділену право- або лівоповоротну смугу (або обидві), усі інші смуги зазвичай об'єднуються в одну групу руху.

Коли кілька смуг об'єднуються в одну групу під час аналізу, у всіх наступних розрахунках вони розглядаються як єдине ціле.

2.1 Проектування системи фаз регулювання

Кількість фаз регулювання та система їхнього розподілу суттєво впливають на ефективність функціонування регульованого перехрестя і на рівень безпеки руху.

На перехресті всі транспортні потоки поділяють на конфліктні та безконфліктні. Безконфліктні потоки — це ті, які, зважаючи на геометричні характеристики перехрестя, не перетинаються під час одночасного руху.

Конфліктні потоки поділяють на допустимі та недопустимі. Основні види допустимих конфліктів для транспортних потоків на регульованому перехресті зображено на рис. 2.1.

Кількість фаз регулювання визначається геометричними особливостями перехрестя, кількістю транспортних потоків (груп руху), напрямками їхнього руху та наявністю конфліктних точок під час одночасного руху.

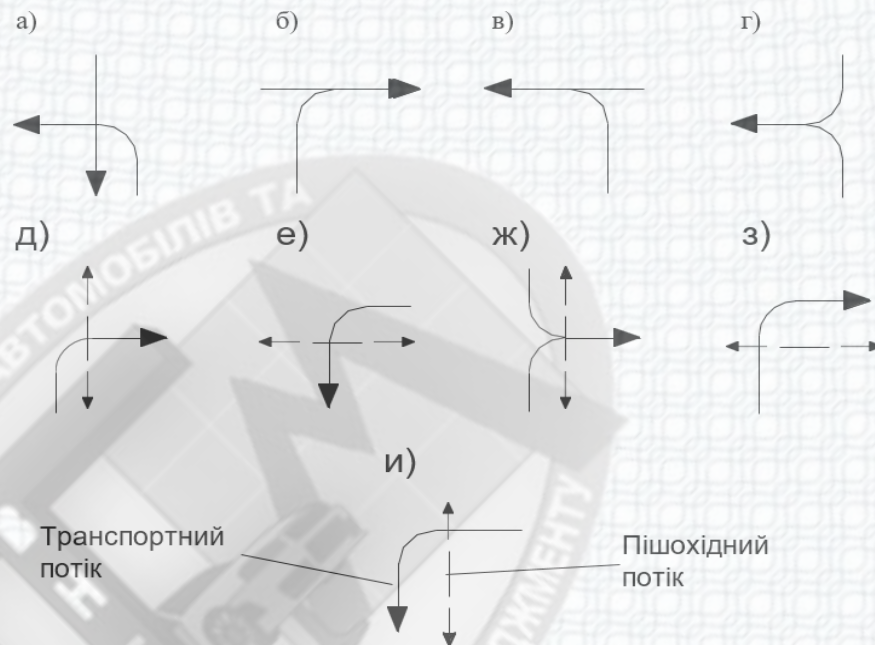


Рисунок 2.1 – Основні можливі схеми конфліктних точок на світлофорному об'єкті

Часто, за умов слабого лівоповоротного потоку, його рух допускається одночасно з протилежним прямоспрямованим потоком, як це ілюструє рис. 2.1 (а). Однак за значної інтенсивності лівоповоротного потоку його зазвичай виділяють в окрему фазу регулювання, що пояснюється впливом інтенсивності потоку. Таке рішення неможливе без наявності виділеної лівоповоротної смуги руху, що демонструє вплив геометричних особливостей перехрестя.

При цьому, кількість фаз регулювання повинна бути мінімальною – зазвичай у межах двох-чотирьох фаз. Приклад побудови системи фаз регулювання представлено на рис. 2.2.

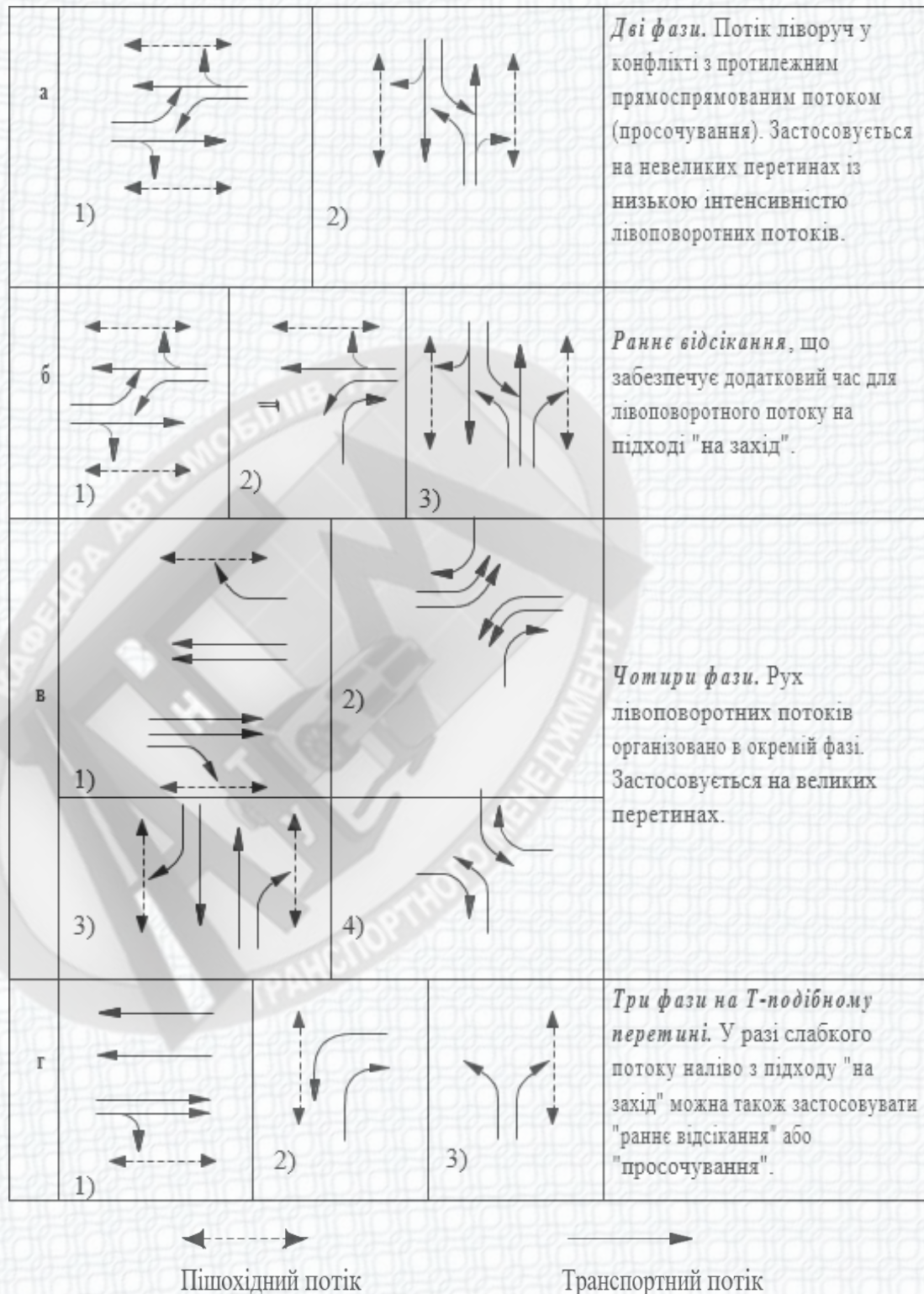


Рисунок 2.2 – Системи фаз регулювання

На рис. 2.2а наведено приклад простої двофазної системи регулювання. У деяких ситуаціях, наприклад, якщо протилежний потік, що конфліктує з розглянутим, має низьку інтенсивність, можливе його дострокове зупинення або

ж ранній дозвіл руху розглянутого потоку. Це забезпечує підвищення пропускної спроможності лівоповоротного потоку, як показано на рис. 2.2б.

У випадках великої інтенсивності лівоповоротних потоків, які потребують безконфліктного руху, або за наявності декількох смуг для поворотних потоків, доцільно застосовувати чотирифазну систему регулювання, зображену на рис. 2.2в.

Для "Т"-подібних перехресть зазвичай рекомендується трьохфазна система регулювання, як показано на рис. 2.2г.

Прості системи фаз, наприклад, як на рис. 2.2а, називають "пофазним регулюванням". Більш складні системи, де один рух дозволено в кількох фазах, характеризуються як "регулювання за напрямками". Приклад такого регулювання наведено на рис. 2.2б. Додатково регулювання на перехрестях поділяють на: регулювання за смугами руху (рис. 2.2в); регулювання за підходами до перехрестя (рис. 2.2а).

2.2 Перехідний інтервал

Перехідний інтервал – це проміжок часу, протягом якого відбувається зміна сигналів між двома суміжними фазами регулювання. Він починається з моменту вимкнення зеленого сигналу для однієї фази і закінчується в момент увімкнення зеленого сигналу для наступної фази.

Перехідний інтервал призначений для забезпечення безпеки руху конфліктних потоків. Як правило, перехідний інтервал складається з жовтого і повністю червоного інтервалу (повністю червоний інтервал - в усіх напрямках діє червоний сигнал).

Тривалість жовтого сигналу

Жовтий сигнал світлофора використовується для попередження водіїв про зміну дозволяючого зеленого сигналу на заборонний червоний і навпаки. На

практиці жовтий сигнал найчастіше застосовується як проміжний між зеленим і червоним сигналами. Згідно з ПДР, після увімкнення жовтого сигналу водій зобов'язаний зупинити транспортний засіб перед стоп-лінією, за винятком ситуацій, коли для цього потрібно вдатися до екстреного гальмування.

Сучасні дослідження показують, що реакція водіїв на жовтий сигнал може суттєво відрізнятись залежно від багатьох чинників:

- Місцевих особливостей руху;
- Тривалості жовтого сигналу;
- Специфіки ПДР у різних містах чи країнах.

Тривалість жовтого сигналу зазвичай розраховується за формулою, що враховує кінематичні принципи ідеального уповільнення транспортного засобу.

Розрахунок тривалості жовтого сигналу, як правило, здійснюється за допомогою формули, заснованої на кінематичних принципах ідеалізованого уповільнення руху транспортного засобу. Тривалість жовтого сигналу, розрахована за цією формулою, забезпечує час, необхідний для реакції водія на зміну світлофорного сигналу, а також час, необхідний для досить комфортабельної зупинки транспортного засобу перед стоп-лінією для випадку умов руху, близьких до ідеальних:

$$\Delta = \frac{t_{pr} + v}{2a + 2gG}, \quad (2.1)$$

де Δ – тривалість жовтого сигналу, с;

t_{pr} – час реакції водія на зміну світлофорного сигналу, с;

v – швидкість, м/с;

a – середнє сповільнення руху, м/с² ;

g – прискорення вільного падіння, м/с² ;

G - середня величина ухилу на підходи у 50-метровій зоні від стоп лінії.

Деякі параметри формули (2.1) варіюються залежно від регіону (країни). Так, наприклад, у м. Онтаріо (Канада) застосовують тривалості жовтого сигналу, представлені в табл. 2.1 [15].

Таблиця 2.1 - Тривалість жовтого сигналу, що використовуються в м. Онтаріо (Канада) за відсутності ухилу на пересіченні

Середня швидкість руху на пересіченні, м/с	Тривалість жовтого сигналу, с
25	3,0
30	3,2
35	3,4
40	3,6
45	3,8
50	4,1
60	4,5
70	5,0
80	5,4
90	5,9

У місті Онтаріо тривалість жовтого сигналу світлофора визначається на основі середньої швидкості руху транспортних засобів. У місті Едмонтон (західна Канада) цей показник залежить від максимально дозволеної швидкості руху, що наведено в табл. 3.2.

Додатково, у дослідженнях, опублікованих у журналі "*TTE Journal*" (видання Інституту транспортної інженерії), розглянуто вплив зміни величини ухилу дороги на перехресті на тривалість жовтого сигналу. Результати цих досліджень представлені в табл. 3.3 [16].

Розрахунки, що враховують такі параметри, забезпечують більш адаптивне регулювання руху, враховуючи локальні умови на перехрестях.

Таблиця 2.2 - Тривалість жовтого сигналу, що використовуються в м. Едмонтон (Канада) за відсутності ухилу на перетині

Максимально допустима швидкість руху ¹ , м/с	Тривалість жовтого сигналу, с
30	3,0
35	3,0
40	3,0
45	3,0
50	3,0 або 4,0 ²
60	4,0
70	4,0 або 5,0 ³
80	5,0***
90	-
Примітки: 1 – якщо середня швидкість руху значно відхиляється від максимально допустимої швидкості, то для розрахунку жовтого сигналу використовується середня швидкість руху; 2 – для перехрещень, що мають по 4 і більше смуг на підході до перехрестя, або за середньої швидкості руху понад 50 (км/год); 3 – для підходів до перехрестя у випадках, коли відстань між перехрестями, що розглядаються, і передостаннім (у напрямку руху) доволі велика.	

Практика показує, що тривалість жовтого сигналу не повинна перевищувати 5 с, оскільки це сприяє більш агресивній поведінці водіїв, може призвести до перевищення водіями обмеження швидкості або надмірного використання жовтого сигналу для руху.

Слід зазначити, що в Україні частіше зустрічаються світлофорні об'єкти з тривалістю жовтого сигналу, що дорівнює 3 - 4 с.

Тривалість червоного сигналу

Під повністю червоним інтервалом розуміється інтервал, протягом якого в усіх напрямках руху діє червоний сигнал. Винятком є лише пішохідні або транспортні потоки, які не мають конфліктних точок з рухом фаз регулювання, що закінчується і починається. Повністю червоний інтервал заповнює той проміжок часу, що має місце між закінченням жовтого сигналу і початком зеленого сигналу в наступній фазі (що починається) і його значення не може бути від'ємним. Так, наприклад, журнал "ITE-Journal" рекомендує мінімальне значення повністю червоного інтервалу для фаз, протягом яких здійснюється прямоспрямований рух, рівне 1 с. Визначення повністю червоного інтервалу ґрунтується на використанні формул (рис. 3.4):

$$r_{all} = I - A \quad (2.2)$$

$$I = i + \frac{W_c + L_{veh}}{v_c}, \quad (2.3)$$

де r_{all} – повністю червоний інтервал, с;

I – перехідний інтервал, с;

i – величина, що представляє період часу від моменту початку жовтого сигналу до моменту проходження стоп-лінії останнім транспортним засобом;

W_c – відстань від стоп-лінії до найвіддаленішої точки конфліктної зони, м;

L_{veh} – довжина автомобіля (частіше легкового автомобіля), який звільняє перехрестя, зазвичай прийнята такою, що дорівнює 6 м), м.

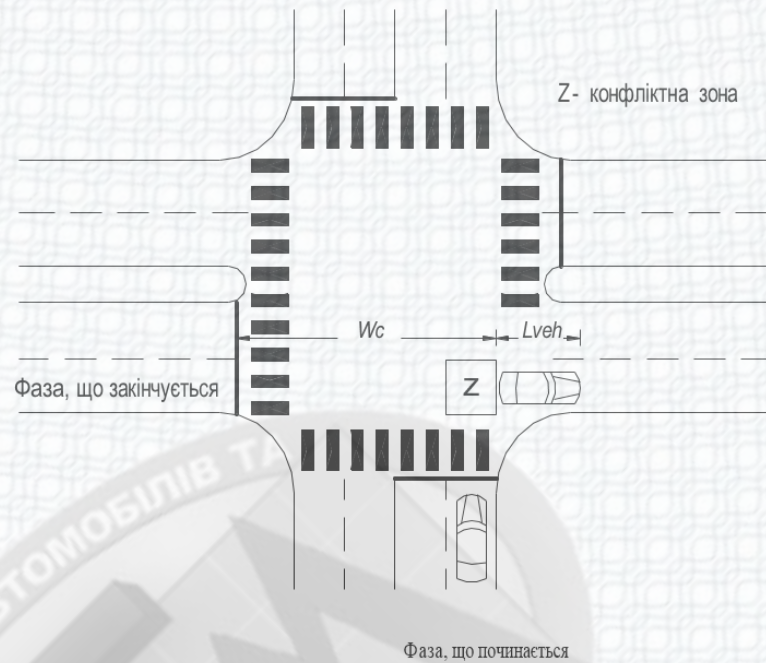


Рисунок 2.3 – Визначення величини перехідного інтервалу

Величина I може бути рівною тривалості жовтого сигналу або меншою на 1 секунду залежно від специфіки місцевих умов руху. У ситуаціях, коли транспортний потік завершує свій рух під час перехідного інтервалу, а пішохідний потік із ним конфліктує та починає свій рух, застосовується наступна формула:

$$I = \frac{W_c}{v_v}, \quad (2.4)$$

де W_c – відстань від стоп-лінії до найвіддаленішої точки конфліктної зони, м;
 v_v – швидкість звільнення конфліктної зони останнім автомобілем у черзі, м/с.

Визначення часового інтервалу за німецькою методикою

Згідно з методикою, представленою в німецькому керівництві з організації дорожнього руху [16], перехідний інтервал складається з таких елементів (рис. 2.4):

$$t_z = t_r + t_u - t - t_e, \quad (2.5)$$

де t_z – перехідний інтервал, с;

t_r – час, необхідний останньому автомобілю в черзідля проходження відстані від стоп-лінії до найвіддаленішої точки конфліктної зони, с;

t_u – час, протягом якого жовтий сигнал використовується водіями для руху, с;

t_e – час, необхідний першому автомобілю у фазі, що починається, для проходження відстані від стоп-лінії до найближчої точки конфліктної зони, с.

Окремі елементи формули (2.5) потрібно вибирати так, щоб забезпечити безпеку під час зміни фаз регулювання. При цьому великі значення перехідного інтервалу не означають забезпечення високої безпеки руху.

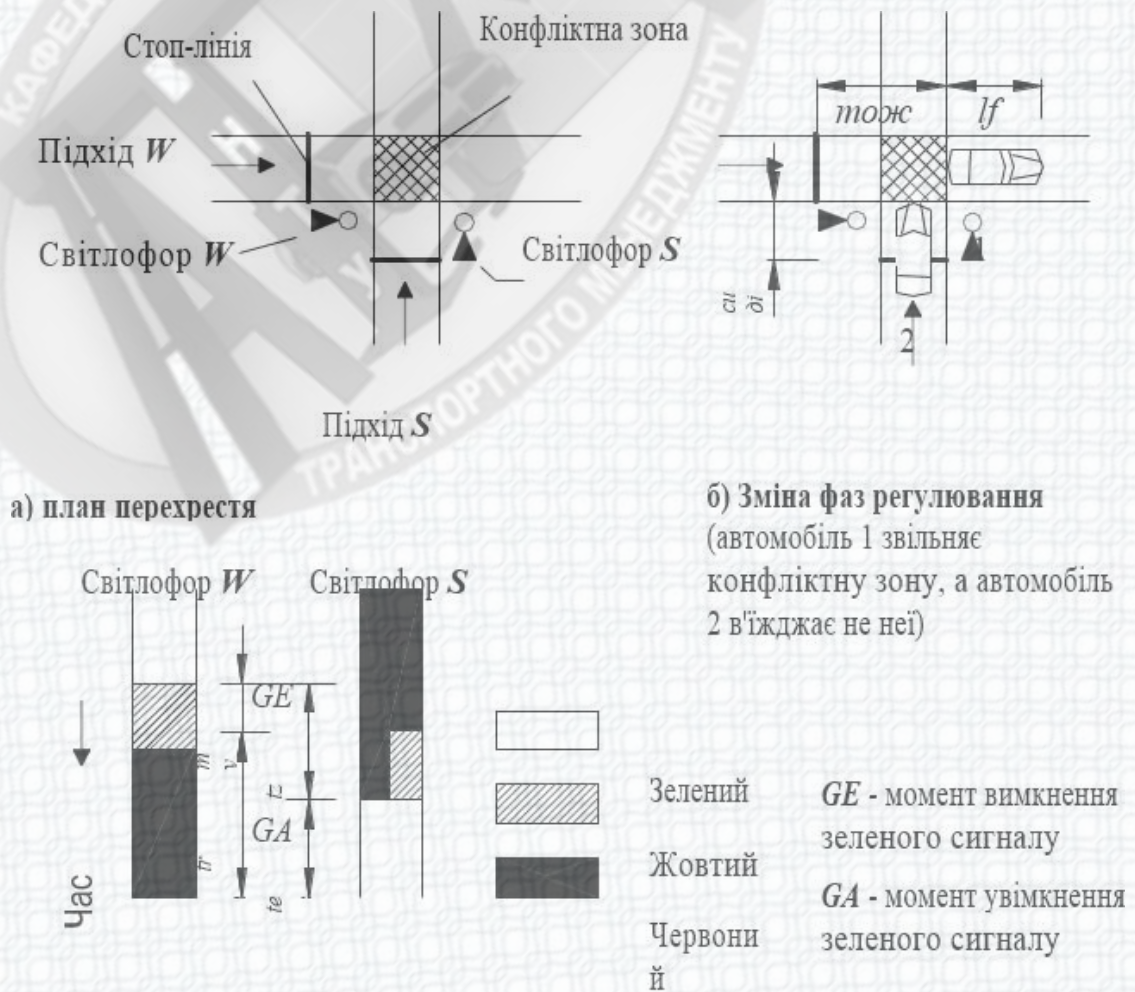


Рисунок 2.4 – Визначення перехідного інтервалу

Параметр t_r для будь-яких елементів регульованого перетину визначається за формулою:

$$t_r = \frac{s_o + l_f}{v_r} = \frac{s_r}{v_r}, \quad (2.6)$$

де v_r – середня швидкість руху, м/с;

s_r – відстань, що долається, м;

s_o – відстань від стоп-лінії до найвіддаленішої точки конфліктної зони, м;

l_f – довжина автомобіля, м.

При визначенні параметра t_r також необхідно проводити розрахунки для велосипедних потоків для випадків, коли такий рух регулюється світлофором.

Під час визначення часу в'їзду (t_e) необхідно враховувати, з якого стану автомобілі починають проходження відстані від стоп-лінії до початкової точки конфліктної зони: зі стану спокою чи вже перебуваючи в русі. У разі, коли автомобілі вже перебували в русі, їм потрібен менший час для досягнення

конфліктної зони. Таке явище має враховуватися в разі організації координованого руху світлофорного регулювання (зелена хвиля). Час в'їзду можна визначити для руху зі стану спокою (2.7) і для автомобілів, які рухаються (2.8) за формулами:

$$t_e = \sqrt{\frac{2s_e}{a}}, \quad (2.7)$$

$$t_e = \frac{s_e}{v_e}, \quad (2.8)$$

Згідно з нормами проектування регульованих перехресть у Німеччині, швидкість автомобілів, які в'їжджають на перехрестя в русі, приймається рівною 40 км/год. Використання короткого інтервалу на початку фази з червоним і жовтим сигналом (до 2 секунд) істотно зменшує ризик передчасних стартів.

У випадках, коли важко точно визначити параметри s_r та s_e , їх значення слід визначати відносно перетину осьових ліній смуг руху, як ілюстровано на рис. 2.4. Розрахункові параметри для визначення перехідного інтервалу можуть бути отримані зі спеціальної діаграми (рис. 2.5).

2.3 Розрахунок матриці перехідних інтервалів

Під час розроблення системи фазового регулювання, що базується на існуючій або прогнозованій транспортній ситуації, ключовим етапом у випадку "жорсткого" регулювання (незмінна тривалість циклів регулювання) є визначення порядку чергування фаз.

Для трьохфазної організації руху на перехресті (рис. 2.6) з фазами a , b і c можливі дві різні послідовності фаз:

a	b	c
a	b	c

Кількість чергувань фаз, для яких необхідно визначити тривалості перехідних інтервалів, у цьому разі становитиме шість:

ab	bc	ca
ba	ac	cb

Оптимальною послідовністю фаз регулювання вважається послідовність із мінімальною сумою перехідних інтервалів у циклі регулювання. При цьому

кількість послідовностей фаз регулювання і кількість їх чергувань визначатиметься за формулами:

$$z = (p - 1)! \quad (2.9)$$

$$w = p(p - 1)! \quad (2.10)$$

де w – кількість чергувань фаз регулювання;
 z – кількість послідовностей фаз регулювання;
 p – кількість фаз регулювання.



Рисунок 2.7 – Приклад трифазного регулювання.

Розглянемо приклад визначення оптимального порядку чергування фаз регулювання для перехрестя, план-схему якого зображено на рис. 2.8. Незалежно від обраної послідовності між фазами, необхідно скласти універсальну матрицю перехідних інтервалів для всіх транспортних і пішохідних потоків (рис. 2.9).

Для потоків, які починають і завершують рух, а також є конфліктними (у випадку одночасного руху всіх потоків), визначають значення перехідних інтервалів, які вносяться до матриці.

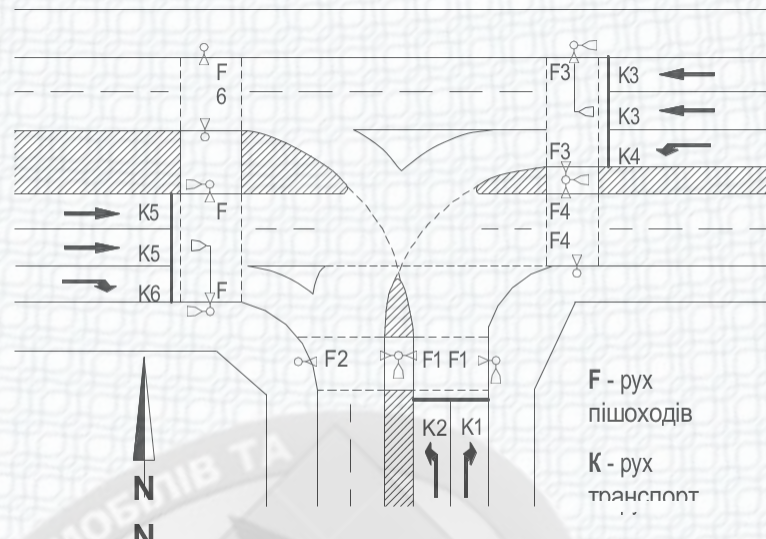


Рисунок 2.8 – План-схема "Т"-подібного регульованого перехрещення

Для визначення перехідних інтервалів на основі плану розглянутого регульованого перехрестя необхідно встановити значення відстаней, які автомобілі долають від стоп-лінії до найвіддаленішої точки конфліктної зони (для завершення фази) та до найближчої точки конфліктної зони (для початку нової фази).

Розрахунок перехідних інтервалів є складним процесом, що потребує особливої точності та науково обґрунтованого підходу, адже саме ці значення впливають на безпеку руху на перехресті. Матриця перехідних інтервалів стає ключовим документом при підготовці проектної документації організації руху на регульованому перехресті.

З використанням матриці перехідних інтервалів можна визначити оптимальний порядок чергування фаз регулювання для перехрестя, зображеного на рис. 2.7, де рух організований у три фази (рис. 2.9).

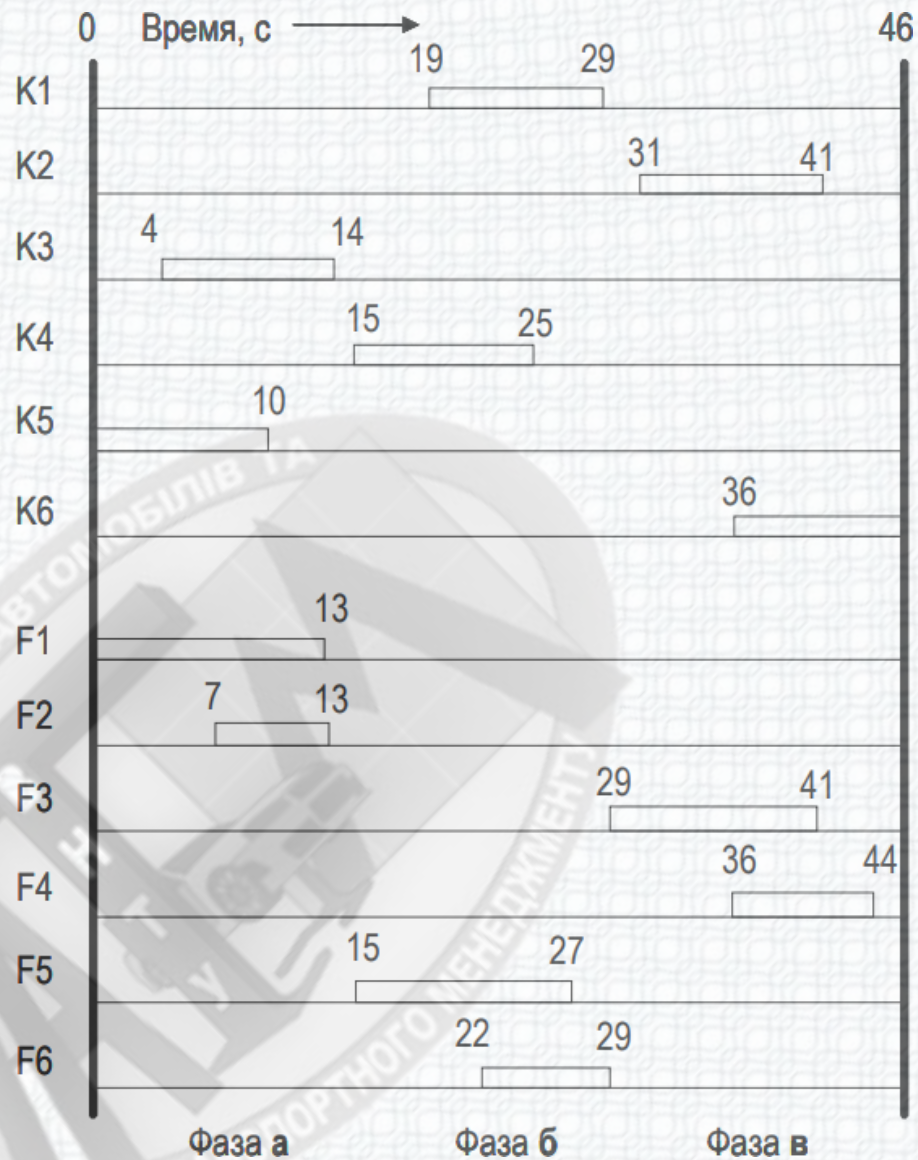


Рисунок 2.9 – План світлофornoї сигналізації для перехрестя

У випадку послідовності фаз *abc*, перехідні інтервали необхідно визначати для транспортних потоків, що чергуються в такій послідовності: $W_g(K5) - O_l(K4) - S_l(K2) - W_g(K5)$. Тут:

- W_g – західний підхід, рух прямо;
- O_l – східний підхід, рух наліво;
- S_l – південний підхід, рух наліво;
- K – секція світлофора для руху транспорту.

При зміні фаз *ab* між потоками $W_g(K5)$ і $S_r(K1)$ потрібен перехідний інтервал тривалістю 9 секунд, але він не входить до суми критичних перехідних

інтервалів для послідовності фаз abc , оскільки перетин цих потоків не є критичним. У даній послідовності критичними є потоки $W_g(K5)$ і $O_l(K4)$, які взаємодіють через мінімальний часовий інтервал після увімкнення зеленого сигналу на початковій фазі.

Критичною парою транспортних потоків вважаються такі протилежні потоки, перетин яких відбувається через найкоротший часовий інтервал після увімкнення зеленого сигналу нової фази. Найменша сума критичних перехідних інтервалів спостерігається при чергуванні фаз abc , що робить цю послідовність оптимальною.

На рис. 2.7 наведено план світлофорної сигналізації, де для кожного транспортного та пішохідного потоку вказано моменти початку і завершення дії дозволяючого сигналу протягом усього циклу регулювання. Моменти роботи жовтого та червоного сигналів можуть бути зазначені додатково, хоча це не є обов'язковим, оскільки тривалість жовтого сигналу є сталою, тривалість червоного сигналу визначається як різниця між тривалістю всього циклу регулювання і сумою тривалостей зеленого та жовтого сигналів.

2.4 Розрахунок циклу регулювання та тривалості зеленого часу

Ефективний розподіл зеленого часу між фазами регулювання є ключовим завданням при проектуванні світлофорної сигналізації на перехрестях. Цей процес важливий як для оптимізації роботи існуючих перехресть, так і для розрахунку режимів регулювання в умовах прогнозованих транспортних ситуацій.

При розробці проектів світлофорної сигналізації на перехресті можуть бути використані наступні види режимів регулювання:

жорсткий режим (тривалість усіх тактів регулювання не змінюється);
адаптивний режим.

У випадках застосування адаптивного режиму регулювання структура світлофорного циклу або тривалість тактів регулювання можуть змінюватися з часом у межах певних обмежень, залежно від наявності чи відсутності транспортних засобів на певній відстані від стоп-лінії в межах певного часового інтервалу. Іншими словами, у тих випадках, коли в певному напрямку черга транспортних засобів встигає розсіюватися раніше встановленого мінімального значення тривалості зеленого сигналу, і протягом певного проміжку часу, достатнього для прибуття чергового транспортного засобу (у разі безкінечної черги), не прибув жоден автомобіль, то для цього напрямку загоряється червоний сигнал і включається наступна фаза регулювання. У такому випадку розрізняють повністю адаптивне регулювання або напівавдаптивне регулювання.

При цьому напівавдаптивним називається таке регулювання, при якому зміна тривалості основного такту (зеленого часу) здійснюється лише для другорядного напрямку. При повністю адаптивному регулюванні зміна тривалості зеленого сигналу має місце як для другорядного, так і для головного напрямку. У цьому випадку, коли зелений сигнал для головного напрямку вже відпрацював протягом розрахункової мінімальної його тривалості, а автомобілі все ще прибувають, тривалість зеленого сигналу для цього напрямку може бути продовжена до певної межі.

У випадку адаптивного регулювання на перехресті може змінюватися не тільки тривалість якогось такту регулювання, але й сама структура режиму регулювання, а саме поєднання і послідовність фаз регулювання.

Існуючі керівництва з проектування регульованих перехресть пропонують різні методики застосування адаптивного регулювання, а також методики визначення основних складових елементів (параметрів), що використовуються при проектуванні адаптивного регулювання. Одним з найбільш переконливих обґрунтувань ефективності використання адаптивного регулювання є те, що таке

регулювання застосовується при організації більш високої швидкості руху громадського транспорту завдяки забезпеченню йому пріоритету руху.

Джерелом інформації для технічних і програмних засобів, що забезпечують адаптивне регулювання на перехрестях, є детектори, встановлені або над проїжджою частиною дороги, або в дорожньому покритті.

На практиці адаптивне регулювання застосовується рідко через високі економічні витрати на придбання і встановлення додаткового обладнання та програмного забезпечення.

При жорсткому регулюванні світлофорної сигналізації розробляється кілька програм, які враховують розрахункові значення інтенсивності руху протягом різних періодів доби. Це дає можливість адаптувати регулювання до транспортних умов залежно від часу доби, дня тижня або сезону.

При цьому може бути розроблений не просто один набір програм регулювання, який буде використовуватися протягом всього року, а ціла група таких наборів для різних місяців року, днів тижня. Найчастіше протягом місяця виділяються наступні транспортні ситуації:

- нічний час (низька інтенсивність руху);
- ранкові години «пік»;
- середня інтенсивність руху (міжпіковий період);
- години «пік» у другій половині дня;
- вечірній час;
- вихідні дні (кінець тижня);
- святкові дні (інші дні з особливою транспортною ситуацією).

Жорстке регулювання використовується досить часто, оскільки при такому регулюванні не вимагається великих витрат на встановлення та обслуговування додаткового спеціального обладнання, як у випадку з адаптивним регулюванням.

Нижче більш детально розглянута методика визначення структури світлофорної сигналізації при жорсткому регулюванні.

Розрахунок режиму регулювання інколи є складним ітераційним процесом, при якому використовуються не тільки методики розрахунку режиму регулювання, але й методики оцінки ефективності роботи всього перехрестя в цілому та окремих смуг (підходів) зокрема.

Процедури визначення таких параметрів, як коефіцієнт приведення потоку насичення (враховує вплив протилежного прямионаправленого потоку з пріоритетом на лівоповоротний потік), мають безпосередній зв'язок із визначеними значеннями циклу регулювання та тривалості зеленого сигналу.

Ключові моменти:

1. Однозначний розрахунок циклу регулювання

- Можливий лише тоді, коли у фазах немає одночасно рухомих конфліктуючих транспортних чи пішохідних потоків.
- У таких випадках розраховується мінімальне або оптимальне значення циклу та тривалостей зеленого сигналу.

2. Конфліктуючі потоки

- У разі наявності конфліктуючих потоків, цикл регулювання та тривалість зеленого сигналу визначаються шляхом перебору можливих значень.
- Оптимальний цикл визначається на основі зменшення транспортних затримок.

3. Оптимізація

- Кінцева структура режиму регулювання забезпечує мінімальні затримки як для окремих напрямків руху, так і для перехрестя в цілому.
- Такий підхід гарантує збалансовану пропускну здатність і ефективність роботи світлофорного регулювання.

Основними обмеженнями під час розрахунку режиму регулювання є мінімально та максимально допустимі тривалості циклу регулювання, а також мінімальна тривалість зеленого сигналу та максимальна тривалість червоного сигналу для пішохідних потоків.

Наприклад, якщо на всіх підходах до перехрестя є не більше двох смуг руху, рекомендована максимальна тривалість циклу регулювання становить 90 секунд. Для великих перехресть цей показник може досягати 120 секунд.

Тривалість червоного сигналу для пішоходів не повинна перевищувати 40 секунд, оскільки це може призвести до значного збільшення кількості порушень правил дорожнього руху через зниження терпіння пішоходів. Оптимальним для зменшення таких порушень вважається червоний сигнал тривалістю менше 10 секунд.

Мінімальну тривалість зеленого сигналу для пішоходів можна визначити за допомогою формули:

$$\begin{aligned} G_p &= 3,2 + \frac{L}{S_p} + \left(0,81 \frac{N_{ped}}{W_E} \right); \text{ для } W_E > 3,0 \text{ м;} \\ G_p &= 3,2 + \frac{L}{S_p} + (0,27 N_{ped}); \text{ для } W_E \leq 3,0 \text{ м,} \end{aligned} \quad (2.11)$$

де G_p – мінімальна тривалість зеленого часу, необхідна для перехрестя пішоходами розглядуваної групи смуг руху, с;

L – довжина пішохідного переходу, м;

S_p – середня швидкість пересування пішохода, м/с;

W_E – ефективна ширина пішохідного переходу, м;

3,2 – час, необхідний пішоходам для реакції на зміну сигналів і початок руху, с;

N_{ped} – кількість пішоходів, які перетнули розглядувану ділянку протягом цього періоду часу.

Середнє значення швидкості руху пішоходів через перехід становить 1,2 м/с. Це значення може змінюватися в залежності від типу району, геометричних особливостей пішохідного переходу, а також від середньостатистичного віку населення в цьому районі.

$$N_{ped} = \frac{v_{ped} (C - G)}{4C}, \quad (2.12)$$

Параметр N_{ped} визначається за формулою:

де v_{ped} — інтенсивність пішоходів на годину, піш/год;

C — тривалість циклу регулювання, с;

G — тривалість ефективного зеленого часу для руху пішоходів, с.

Підкреслимо, що для оцінки якості обслуговування як транспортних та пішохідних потоків використовується критерій «рівень обслуговування», на основі якого визначається якість пішохідних потоків як в цілому на вулично-дорожній мережі, так і на регульованих перехрестях зокрема.

Мінімальне значення тривалості циклу регулювання безпосередньо залежить від інтенсивності прибуття транспортних засобів до перехрестя, величини потоку насичення, а також величини втраченої часу за цикл:

$$C_{min} = \frac{L}{1 - Y_C}, \quad (2.13)$$

де C — тривалість циклу регулювання, с;

L — втрачений час за цикл, с;

Y_C — сума критичних v_{ci}/s_{ci} -співвідношень (фазових коефіцієнтів);

v_{ci} — інтенсивність прибуття транспортних засобів до перехрестя в критичній групі руху в фазі i ;

s_{ci} — потік насичення в критичній групі руху в фазі i .

Критичною групою (смугою) руху називається група (смуга) з максимальним v/s -співвідношенням (фазовим коефіцієнтом) серед усіх груп (смуг), рух яких дозволено в одній і тій же фазі.

Загальний втрачений час за цикл складається з втрат часу в кожній фазі. Наприклад, якщо величина втрат часу приймається рівною тривалості перехідного інтервалу, то для випадку, коли перехідний інтервал складається лише з жовтого часу, рівного 4 с, величина втрат часу за цикл, наприклад, для двофазного режиму регулювання буде рівна $4 \times 2 = 8$ с.

Оптимальне значення тривалості циклу регулювання. У своїй роботі Вебстер зазначив, що при мінімальному значенні тривалості циклу регулювання не вдається досягти оптимальної транспортної затримки на перехресті. За результатами проведеного регресійного аналізу він дійшов висновку, що для досягнення оптимальної транспортної затримки на перехресті слід застосовувати таку формулу:

$$C = \frac{(1,5L + 5)}{1 - Y_C}, \quad (2.14)$$

де C – тривалість циклу регулювання, с;

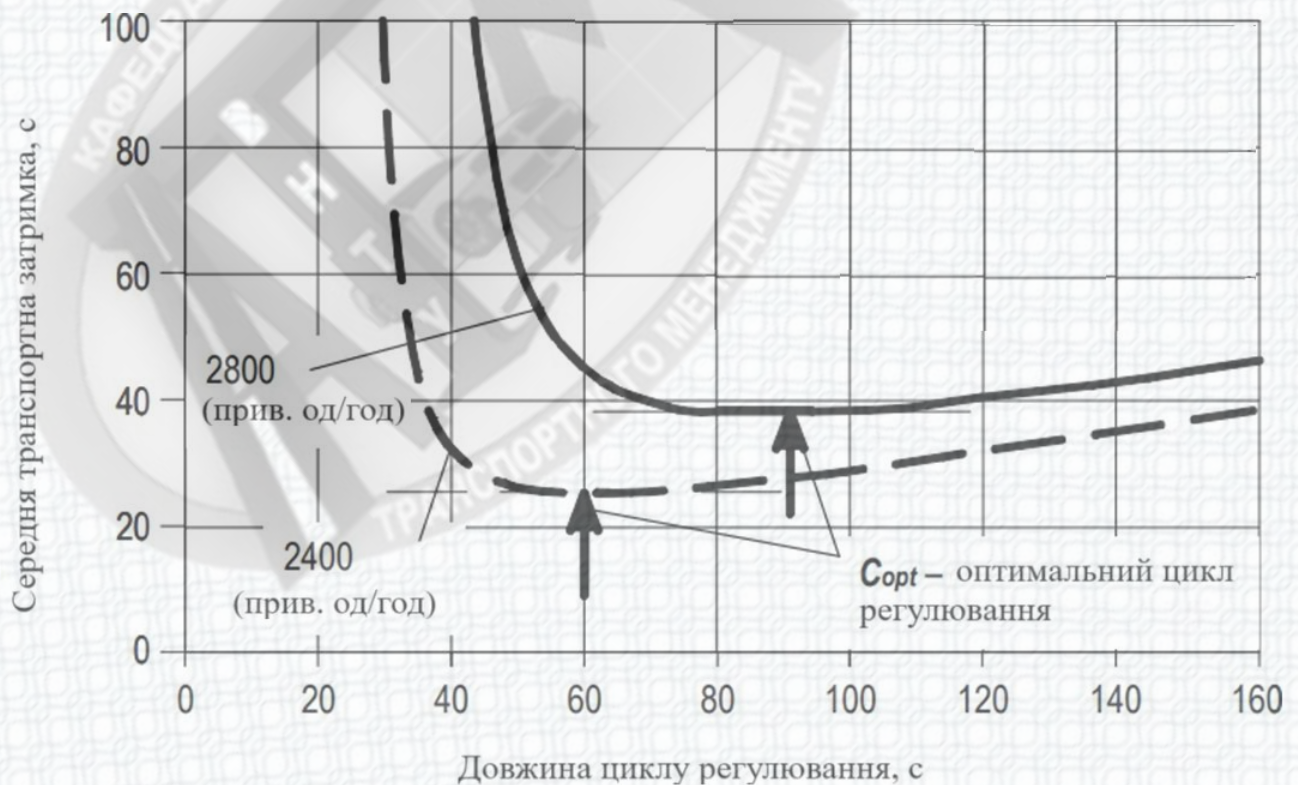
L – втрачений час за цикл, с;

Y_C – сума критичних v/s -співвідношень (фазових коефіцієнтів).

Взаємозв'язок між мінімальною тривалістю циклу, яка забезпечує рівень завантаженості 1,0 (співвідношення інтенсивності руху до пропускної здатності, наприклад, смуги руху), пропускною здатністю, величиною затримки та оптимальною тривалістю циклу регулювання, яку отримав Ф. Вебстер, представлений на рис. 2.10 [17].

Повністю пішохідна фаза застосовується в тих випадках, коли безпечний рух пішоходів можливий лише за умови зупинки всіх транспортних потоків. Таке

явище може виникнути при недостатньо обладнаних об'єктах пішохідного руху. Наприклад, при великій довжині пішохідного переходу або при структурі світлофорного циклу, коли в будь-який момент часу на всіх підходах здійснюється рух (в прямому чи зворотному напрямку), використовується поетапний пропуск пішоходів через перехрестя. При цьому пішохідний перехід повинен бути обладнаний островком безпеки та додатковими світлофорними секціями для пішохідного руху, що мають велике значення з точки зору комфортного руху пішоходів. У разі відсутності перелічених елементів застосовується повністю пішохідна фаза.



Дві фази. Чотири підходи на пересіченні. Всі потоки однакові. Потоки насичення по полосах рівні 188 (прив. од/год). Втрачений час за цикл 10 (с). Загальна інтенсивність на всіх підходах 2400 і 2800 (прив. од/год)

Рисунок 2.10 – Взаємозв'язок між транспортною затримкою, пропускною здатністю та довжиною циклу регулювання

Тривалість циклу регулювання з застосуванням повністю пішохідної фази буде визначатися за формулою:

$$C = \frac{(1,5(L + G_{ped}) + 5)}{1 - Y_C}, \quad (2.15)$$

де G_{ped} — тривалість повністю пішохідної фази, с.

Слід зазначити, що використання повністю пішохідної фази значно знижує ефективність роботи регульованого перехрестя, що пов'язано з збільшенням загального втраченої часу $(L + G_{ped})$ за цикл.

Тривалість зеленого часу в фазі можна визначити за наступною формулою:

$$g_i = [C - (L + G_{ped})] \cdot \frac{\left(\frac{v_{ci}}{s_{ci}}\right)}{\sum \left(\frac{v_{ci}}{s_{ci}}\right)}, \quad (2.16)$$

де v_{ci}/s_{ci} — співвідношення інтенсивності руху до потоку насичення для критичної групи руху в фазі i , с.

При відсутності повністю пішохідної фази в режимі регулювання G_{ped} прирівнюється до нуля.

Слід відмітити, що за наявності конфліктних потоків, рух яких дозволено в межах однієї фази, визначення оптимального режиму регулювання потребує ітеративного підходу. Це означає, що шляхом змін характеристик перехрестя (наприклад, геометричних параметрів, тривалості регульовального циклу або зелених сигналів) необхідно застосовувати методи оцінки ефективності роботи перехрестя. Такий підхід дозволяє обчислити транспортні затримки як для

окремих груп (смуг) руху, так і для окремих підходів та перехрестя в цілому. Процес ітерації завершується тоді, коли вдається знайти оптимальне співвідношення затримок для всіх елементів перехрестя.

2.5 Висновки до розділу 2

Ефективний розподіл зеленого часу між фазами регулювання є ключовим завданням при проектуванні світлофорної сигналізації на перехрестях. Цей процес важливий як для оптимізації роботи існуючих перехресть, так і для розрахунку режимів регулювання в умовах прогнозованих транспортних ситуацій. Для оцінки якості обслуговування як транспортних так і пішохідних потоків використовується критерій «рівень обслуговування», на основі якого визначається якість пішохідних потоків як в цілому на вулично-дорожній мережі, так і на регульованих перехрестях зокрема.

У випадку адаптивного регулювання на перехресті може змінюватися не тільки тривалість якогось такту регулювання, але й сама структура режиму регулювання, а саме поєднання і послідовність фаз регулювання.

На практиці адаптивне регулювання застосовується рідко через високі економічні витрати на придбання і встановлення додаткового обладнання та програмного забезпечення, але це є перспективним напрямком.

РОЗДІЛ 3

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМУ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

3.1 Рівень обслуговування

Оцінка ефективності (обслуговування) транспортно-дорожнього комплексу (ТДК) в цілому та регульованого перехрестя зокрема вимагає наявності якісних показників, що характеризують рівні стану управління транспортним потоком. Рівень обслуговування – це якісна міра, яка пояснює поточну ситуацію в транспортному потоці, використовуючи при цьому такі характеристики, як швидкість транспортування, свобода маневру, переривання транспортного потоку, а також зручність і вигода від використання даної ділянки УДС [18].

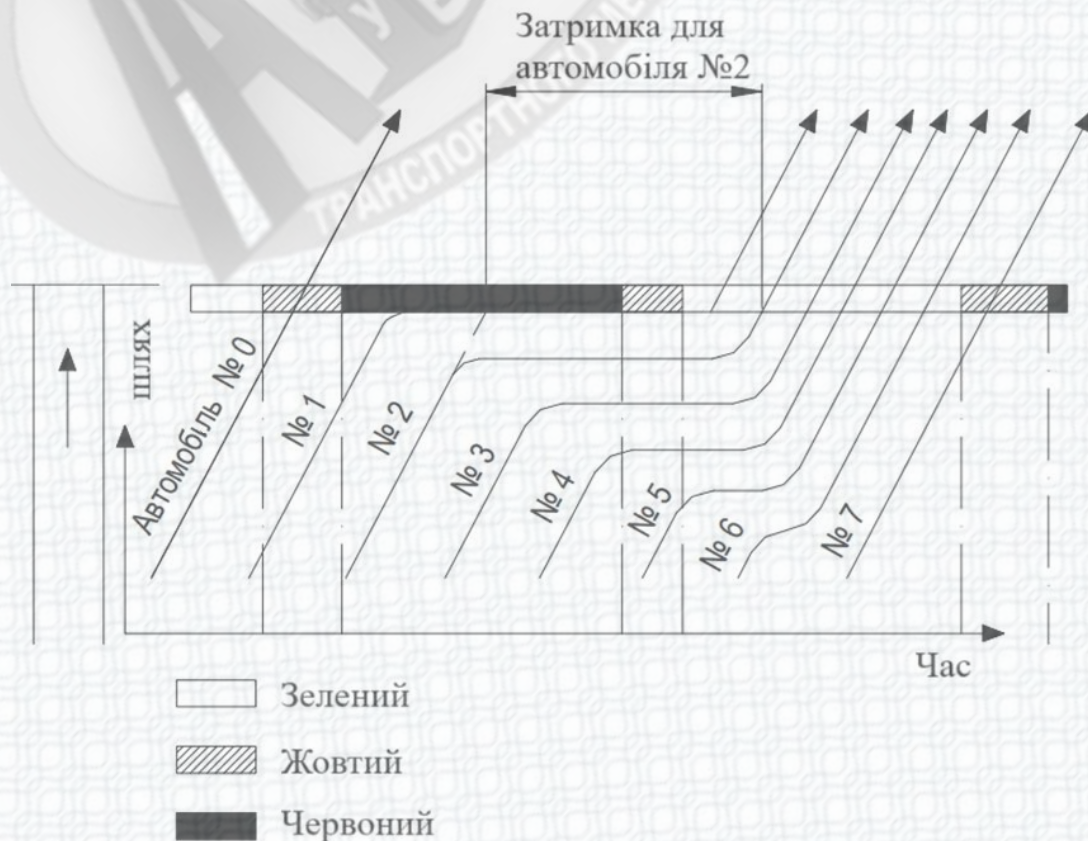


Рисунок 3.1 – Визначення транспортної затримки (затримки регулювання)

На сьогоднішній день для кожного типу елементів вулично-дорожньої мережі (ВДС) визначено кілька рівнів обслуговування, що встановлюються через спеціальні процедури аналізу цих елементів. Кожен рівень обслуговування являє собою діапазон умов управління рухом і включає оцінку, як ці умови сприймаються учасниками дорожнього руху (водіями, пішоходами, велосипедистами).

Наприклад, рівень обслуговування для регульованого перехрестя визначається на основі величини затримки регулювання, яка впливає на дискомфорт водіїв, призводить до підвищених витрат пального та збільшення часу поїздки. Ця затримка обумовлена різними факторами, такими як геометричні характеристики перехрестя, режим роботи світлофорів, а також інтенсивність транспортного потоку, що прибуває до перехрестя.

Затримка регулювання або транспортна затримка — це вид затримки, що виникає внаслідок зниження швидкості руху транспортних засобів через роботу світлофорного регулювання. Величина такої затримки визначається як різниця між часом руху через регульоване перехрестя та часом руху в умовах вільного проїзду тієї ж ділянки дороги без впливу сигналів світлофорів (рис. 3.1).

Середнє значення затримки регулювання на один легковий автомобіль розраховується окремо для кожної групи транспортних засобів, потім узагальнюється до затримки для всього підходу, а далі — для перехрестя загалом.

Кожен з рівнів обслуговування можна охарактеризувати наступним чином:

LOS A: Невелика затримка регулювання — до 10 секунд на приведену одиницю (с/прив.од). Умови, за яких більшість автомобілів проїжджають перехрестя на зелений сигнал світлофора. Низька затримка може бути результатом короткого циклу регулювання.

LOS B: Затримка регулювання становить від 10 до 20 с/прив.од. Умови характеризуються гарною прогресією або коротким циклом регулювання. Кількість зупинок збільшується у порівнянні з LOS A.

LOS C: Затримка регулювання перебуває в діапазоні від 20 до 35 с/прив.од. Виникає при довших циклах регулювання або поганій прогресії. Хоча значна частина автомобілів зупиняється, все ж багато з них проїжджають без зупинок.

LOS D: Затримка регулювання становить від 35 до 55 с/прив.од. Майже всі транспортні засоби змушені зупинятися. Спостерігається високий коефіцієнт інтенсивності руху щодо пропускної здатності. Вплив перенасичених циклів суттєвий.

LOS E: Затримка регулювання становить від 55 до 80 с/прив.од. Спостерігається значне перенасичення циклів регулювання.

LOS F: Затримка регулювання перевищує 80 с/прив.од. Цей рівень обслуговування вважається неприйнятним для більшості водіїв, оскільки спричиняє максимальний дискомфорт та затримки.

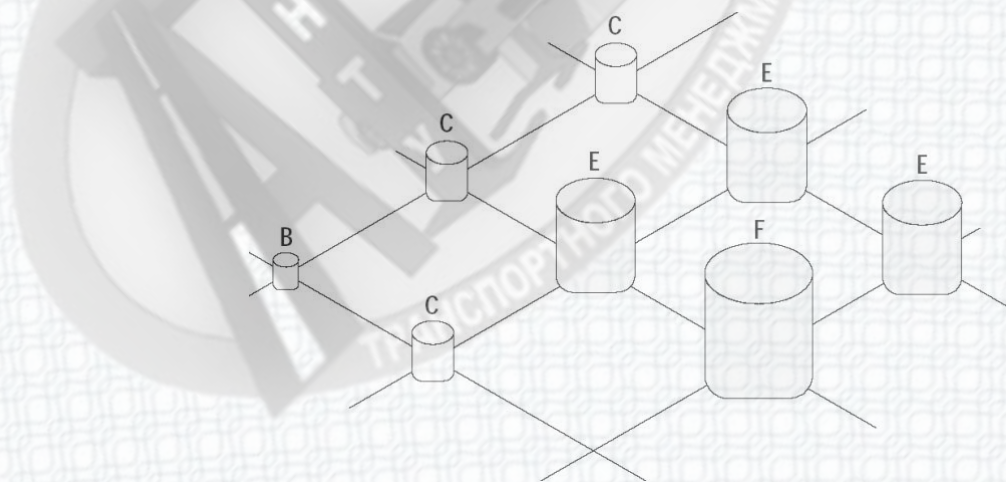


Рисунок 3.2 – Графічне представлення рівнів обслуговування на перехрестях вулично-дорожньої мережі

На рис. 3.2 представлений приклад графічного представлення рівнів обслуговування на кількох перехрестях на певній ділянці УДС. При використанні рівня обслуговування як універсального критерію з'являється можливість оцінювати ефективність роботи не тільки одного розглянутого перехрестя, але й цілої вулично-дорожньої мережі, що складається як з

регульованих, так і нерегульованих перехресть, а також з перегонів, ділянок переплетення транспортних потоків та інших елементів УДС.

Усі існуючі методики базуються на початкових параметрах, якими є геометричні та транспортні особливості, що склалися на розглянутому перехресті, а також на параметрах існуючого або проектного режиму регулювання.

Дуже важливою характеристикою транспортного потоку на регульованому перехресті, що використовується як початковий параметр, є якість прогресії, під якою розуміється, наскільки щільним потоком транспортні засоби прибувають з попереднього регульованого перехрестя до розглянутого. Параметр, за допомогою якого описується якість прогресії, називається тип прибуття (AT – arrival type). Цей параметр визначається для кожної групи смуг руху. Прийнято розрізняти 6 типів прибуття транспортних засобів до регульованого перехрестя.

Тип прибуття найкраще визначається під час проведення польових досліджень. Тип прибуття повинен бути визначений якнайточніше, оскільки він має значний вплив на визначення величини затримки та оцінку рівня обслуговування (LOS). Як параметр, що характеризує тип прибуття, використовують величину відношення групи прибуття:

$$R_p = \frac{P}{\frac{g_i}{C}}, \quad (3.1)$$

де R_p – відношення групи прибуття;

P – частка автомобілів, що прибули на зелений сигнал;

C – цикл регулювання (с);

g_i – тривалість ефективного зеленого сигналу для групи руху.

Параметр P визначається під час натурних досліджень, при цьому його значення не може перевищувати 1,0.

3.2 Визначення затримок всіх елементів перехрестя

Величина, отримана при обчисленні затримок, є середньою затримкою регулювання, яку зазнають усі транспортні засоби, що прибули на перехрестя протягом аналізованого періоду, включаючи транспортні засоби поза цим періодом, що прибувають по смугах руху, що зазнають перенасичення. Затримка регулювання (транспортна) включає як уповільнення та прискорення, так і зупинки транспортних засобів на під'їздах до регульованого перехрестя.

Формула Ф. Вебстера вже протягом багатьох років є основною формулою, з проектування регульованих перехресть. Спрощена форма цієї формули виглядає наступним чином [18]:

$$d = \frac{c(1 - g/c)^2}{2[1 - (g/c)x]} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65\left(\frac{c}{q^2}\right)^{\frac{1}{3}} x^{2+5(g/c)}, \quad (3.2)$$

де d – середня затримка за цикл, с;

c – тривалість циклу регулювання, с;

g – ефективна тривалість зеленого сигналу, с;

x – ступінь насичення (відношення інтенсивності руху до пропускної здатності);

q – інтенсивність прибуття, прив. од/год.

Перша складова рівняння (3.2) описує затримку за умови, що транспортний потік прибуває рівномірно від циклу до циклу. Друга складова враховує випадковість процесу, що відома як «випадкова затримка». При цьому передбачається пуассонівський характер прибуття транспортних засобів та постійна інтенсивність потоку, яка відповідає пропускній здатності. Проте це припущення не повністю відповідає реальності, оскільки обслуговування транспортних засобів відбувається лише під час ефективного зеленого сигналу, коли інтенсивність руху перевищує пропускну здатність.

Третя складова слугує для корекції змодельованої затримки і зазвичай становить близько 10% від отриманого значення затримки за рівнянням (3.2). З урахуванням цих факторів рівняння (3.2) можна записати у скоригованій формі:

Подальша точна формула залежить від контексту:

$$d = 0,9 \left[\frac{c(1 - g/c)^2}{2[1 - (g/c)x]} + \frac{x^2}{2q(1 - x)} \right]. \quad (3.3)$$

Аналіз різних формул для розрахунку затримки показав, що формула Вебстера має значні похибки у порівнянні з більш сучасними формулами, розробленими іншими авторами [12].

Сучасні методи визначення затримки дозволяють враховувати не лише умови на самому перехресті, але й вплив попереднього перехрестя (у напрямку руху транспортного потоку). Крім того, вони враховують вплив адаптивного регулювання на загальну ефективність роботи перехрестя.

Одним із найточніших підходів до визначення затримки на регульованих перехрестях є формула, представлена у Highway Capacity Manual (HCM) 1994. Ця формула враховує безліч факторів, пов'язаних з реальними умовами руху, і стала важливим кроком у вдосконаленні методик оцінки затримок на перехрестях [16].

Далі будуть розглянуті найпоширеніші сучасні формули затримки.

$$d_1 = 0,38C \frac{\left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{\left(1 - \frac{g}{C}X\right)}, \quad (3.4)$$

$$d_2 = 137X^2 \left[(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{m}{c}X} \right], \quad (3.5)$$

де d – транспортна затримка на один автомобіль, с/прив.од;

d_1 – стандартна затримка, що передбачає однакове повторюване прибуття автомобілів до перехрестя, с/прив.од;

d_2 – додаткова затримка, що враховує випадковість прибуття транспортних засобів, при цьому передбачається, що величина початкової черги автомобілів дорівнює нулю, с/прив.од;

C – тривалість циклу регулювання, с;

c – пропускна здатність смуги (групи руху), прив.од/год;

g – ефективний зелений час для розглянутої групи руху, с;

m – коефіцієнт, що враховує тип прибуття та утворення пачок у транспортному потоці (для випадкового прибуття $m = 16$).

Формула затримки по CCG 1995. Ще однією сучасною формулою для визначення затримки перетину є формула, представлена в Канадському керівництві по пропускній спроможності сигналізованих перехресть (CCG).

$$d = d_1 k_f + d_2, \quad (3.7)$$

$$d_1 = 0,5C \frac{\left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{1 - \frac{g}{C} \min(X; 1,0)}, \quad (3.8)$$

$$d_2 = 15t_e \left[(X - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{240}{ct_e}} \right], \quad (3.9)$$

$$k_f = \frac{\left(1 - \frac{q_{gr}}{q}\right) f_p}{1 - \frac{g}{C}}, \quad (3.10)$$

де d – транспортна затримка на один автомобіль, с/прив.од;

d_1 – стандартна затримка, що припускає рівномірне прибуття автомобілів на перехрестя, с/прив.од;

d_2 – додаткова затримка, що враховує випадковість прибуття транспортних засобів, при цьому припускається, що величина початкової черги автомобілів дорівнює нулю, с/прив.од;

k_f – коефіцієнт, що враховує якість прогресії;

C – тривалість циклу регулювання, с;

g – ефективний зелений час для розглянутої групи руху, с;

X – рівень завантаження на смузі (в групі руху);

t_e – період обстеження, хв;

q – загальна інтенсивність прибуття на смугу (в групі руху), прив.од/год;

f_p – коефіцієнт, що враховує тип прибуття та утворення пачок у транспортному потоці.

Формула затримки за НСМ 2000. Детальніше розглянемо формулу затримки, представлену в американському посібнику з пропускнуої здатності доріг 2000 року, яка відповідає сучасним методам проектування та оцінки ефективності роботи регульованих перехресть:

Середня величина затримки визначається наступним чином:

$$d = d_1(PF) + d_2 + d_3, \quad (3.11)$$

PF – коефіцієнт прогресії для стандартної затримки, що враховує прогресію регулювання;

Коефіцієнт прогресії. Добра прогресія регулювання сприяє збільшенню частки транспортних засобів, що прибувають на перехрестя під час зеленого сигналу світлофора. Коефіцієнт прогресії застосовується для всіх координованих груп руху за умови відсутності адаптивного регулювання для розглянутої групи.

Цей коефіцієнт впливає передусім на значення стандартної затримки, тому його використовують переважно для розрахунку саме стандартної затримки. Варто підкреслити, що коефіцієнт прогресії є одним із ключових параметрів,

який застосовується не лише для оцінки величини транспортної затримки, але й для розрахунку довжини черги, яка утворюється через цю затримку.

Формула для визначення коефіцієнта прогресії виглядає так:

$$PF = \frac{(1-P)f_{PA}}{1 - \left(\frac{g}{C}\right)}, \quad (3.12)$$

де PF – коефіцієнт прогресії для стандартної затримки, що враховує прогресію регулювання;

P – частка транспортних засобів, що прибули впродовж зеленого сигналу (формула 3.1; g/C – частка зеленого сигналу);

f_{PA} – коефіцієнт, що враховує тип прибуття транспортних засобів до регульованого перехрестя.

При обчисленні коефіцієнта прогресії за формулою (3.12) його величина може бути більшою за 1,0 для 4-го типу прибуття при дуже низьких відносинах g/C . На практиці доведено, що в таких випадках граничне значення для типів прибуття з 3-го поб-й слід брати рівним 1,0.

Якщо величина затримки розраховується на майбутній період з залученням координованого регулювання, величину коефіцієнта прогресії слід приймати як для 4-го типу прибуття. 3-й тип прибуття слід приймати для всіх видів нескоординованого регулювання.

Ліво-поворотний безконфліктний рух по виділеній смузі (ексклюзивний рух), як правило, відбувається при незначній прогресії, тому для координованого ліво-поворотного руху використовують 3-й тип прибуття. При поєднанні безконфліктного та конфліктного ліво-поворотних рухів коефіцієнт прогресії розраховується для руху без конфлікту.

Стандартна затримка, яка припускає однакове прибуття транспортних засобів до регульованого перехрестя при стабільній інтенсивності руху та відсутності початкової черги на початку аналізованого періоду, визначається за

формулою, що базується на широко відомому понятті затримки, яке сформулював Ф. Вебстер. Необхідно пам'ятати, що величина X при розрахунках стандартної затримки обмежена за величиною і не може перевищувати значення 1,0.

$$d_1 = \frac{0.5C \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{1 - \left[\min(1, X) \frac{g}{C}\right]}, \quad (3.13)$$

де d_1 – стандартна затримка, що припускає однакове повторюване прибуття автомобілів до перехрестя, с/прив.од.;

C – тривалість циклу регулювання, с;

g – ефективний зелений час, с;

X – v/c -відношення або ступінь насичення для групи руху.

Додаткова затримка враховує непостійне прибуття транспортних засобів до регульованого перехрестя (випадкова затримка), а також випадкове виникнення перенасичення в деяких циклах регулювання (затримка перенасичення). Ця величина чутлива до таких параметрів, як: рівень насичення (X), тривалість аналізованого періоду (T), пропускна здатність групи смуг руху (c), а також тип світлового регулювання, що враховується за допомогою спеціального коефіцієнта (k). При розрахунку додаткової затримки передбачається, що черга на початку аналізованого періоду відсутня.

$$d_2 = 900T \left[(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8kIX}{cT}} \right], \quad (3.14)$$

d_2 – додаткова затримка, що припускає випадкове прибуття автомобілів до перехрестя, с/прив.од.;

c_i – пропускна здатність для групи руху, прив.од/ч;

T – тривалість аналізованого періоду, ч;

k – коефіцієнт, що враховує вплив параметрів світлофорного обладнання при адаптивному регулюванні на величину додаткової затримки;

I – коефіцієнт, що враховує відстань попереднього (по напрямку руху) регульованого перехрестя від розглядуваного.

Поправочний коефіцієнт для додаткової затримки (k) включений в рівняння (3.14), щоб врахувати вплив типу контролера системи адаптивного регулювання на величину додаткової затримки. Для жорсткого регулювання параметр $k = 0,5$, що пов'язано з процесом накопичення черги з випадковим прибуттям транспортних засобів і постійним часом обслуговування. При адаптивному регулюванні контролери можуть зменшити тривалість зеленого часу відповідно до інтенсивності руху, що в свою чергу зменшує додаткову (випадкову) затримку. Зниження затримки залежить частково від екіпажного часу (інтервал, що визначає розрив у потоці), на який налаштований цей контролер, а також від переважного на цьому перехресті відношення v/c . Останні дослідження зарубіжних авторів показали, що використання менших значень екіпажного часу призводить до зниження параметрів k і d_2 . Однак при наближенні відношення v/c до 1,0 контролери починають поводитися, як при жорсткому регулюванні. Тому параметр k дорівнює 0,5, коли відношення v/c досягає 1,0.

Для значень екіпажного часу (екіпажний час – інтервал, на який може збільшуватися зелений час, якщо протягом цього інтервалу було зафіксовано хоча б один транспортний засіб), що відрізняються від значень, представлених у таблиці, величина k може бути інтерпольована. У випадку екстраполяції для ситуації, коли екіпажний час контролера перевищує 5,0 (с), величина k не повинна перевищувати значення 0,5.

Коефіцієнт, що враховує відстань попереднього перехрестя I для додаткової затримки в рівнянні (3.14), враховує ефект "фільтрації" транспортного потоку, що прибуває з попереднього (по напрямку руху) перехрестя. У випадку розгляду регульованого перехрестя як ізольованого

приймається значення $I = 1,0$ (за умови, що попередній світлофор розташований на відстані 1,6 км і більше від розглядуваного).

Цей параметр заснований на випадковому прибутті транспортних засобів за цикл регулювання так, що стандартне відхилення дорівнює середньому значенню (див. теорію ймовірностей).

Для неізолюваних перехресть використовується коефіцієнт $I < 1$, який відображає вплив попереднього світлофора на зменшення стандартного відхилення розподілу прибуття транспортних засобів за цикл до аналізованого перехрестя. Це сприяє зниженню затримок завдяки випадковому характеру прибуття транспортного потоку.

Якщо залишкова черга з попереднього циклу створює початкову чергу на початку аналізованого періоду (ТТТ), транспортні засоби зазнають додаткових затримок. Це пов'язано з необхідністю спочатку ліквідувати початкову чергу (залишок з попереднього циклу). За відсутності початкової черги відповідна затримка дорівнює нулю ($d_3 = 0$).

Цей підхід дозволяє визначити загальну величину затримки як для окремого підходу до перехрестя, так і для перехрестя в цілому. Агрегування здійснюється шляхом обчислення зваженого середнього, де затримки кожної групи руху враховуються з урахуванням їх приведених інтенсивностей руху.

Таким чином, сукупна затримка для всього підходу визначається за наступною формулою:

$$d_A = \frac{\sum d_i v_i}{\sum v_i}, \quad (3.15)$$

де d_A – затримка на всьому підході А, с/прив.од;

d_i – затримка для групи руху і (на підході А), с/прив.од;

v_i – приведена інтенсивність руху групи руху і (на підході А), прив.од/год.

Затримка регулювання на всіх підходах може бути далі агрегована в загальну затримку регулювання на всьому перехресті за формулою (3.16).

$$d_I = \frac{\sum d_A v_A}{\sum v_A}, \quad (3.16)$$

де d_I – затримка регулювання на всьому перехресті, с/прив.од;

d_A – затримка на всьому підході А, с/прив.од;

v_i – приведена інтенсивність руху для підходу А, прив.од/ч.

3.3 Удосконалення алгоритму розрахунку параметрів регулювання транспортних потоків

Для пояснення принципу формування циклів використаємо наступні визначення:

- Включені напрями — напрями, для яких у відповідній фазі вмикається дозволяючий сигнал.
- Наявні напрями — напрями, які є включеними хоча б в одній фазі.
- Невключені напрями — напрями, для яких у цій фазі не передбачено ввімкнення дозволяючого сигналу.
- Відсутні напрями — напрями, які не є включеними в жодній фазі.

Результати обчислень за алгоритмом визначення параметрів світлофорного циклу (графічна схема алгоритму наведена на рисунку 3.10) оформлюються у вигляді матриці фаз та матриці конфліктних напрямів.

1. Матриця конфліктних напрямів:

- Кожен елемент відображає мінімально допустимий часовий інтервал (у секундах) між ввімкненням зеленого сигналу для напрямку, що відповідає номеру рядка, та ввімкненням зеленого сигналу для напрямку, що відповідає номеру стовпця.

2. Матриця фаз:

- Кількість рядків дорівнює кількості фаз.
- Перший стовпчик містить номери фаз.
- Другий стовпчик — тривалість основного такту для кожної фази.

- Третій стовпчик — тривалість додаткового зеленого сигналу (визначається під час введення даних за умови, що номер включеного напрямку відповідає номеру напрямку, для якого передбачено додатковий зелений сигнал).
- Стовпчики з четвертого по десятий — номери включених напрямів для кожної фази.

Після заповнення матриць процес введення даних вважається завершеним.

Далі здійснюється перевірка фаз на наявність конфліктних включених напрямів. У циклі програма для кожного рядка матриці фаз аналізує всі включені напрями, перевіряючи їх попарно. Для цього визначаються відповідні елементи матриці конфліктних напрямів, де номер рядка та стовпця відповідає перевірюваному напрямку. Якщо значення елемента дорівнює нулю, це свідчить про відсутність конфлікту між напрямками. Якщо значення додатне, це вказує на наявність конфлікту. У разі виявлення фази, в якій хоча б одна пара включених напрямів є конфліктною, розрахунок припиняється. Якщо ж перевірка проходить успішно, алгоритм продовжує виконання розрахунків. Далі для кожної з фаз проводяться такі операції. Фазу, з якою проводяться операції встановлюють такою, що знімається, а ту, що є наступною – такою, що готується.

Серед включених напрямів обирається базисний напрям, для якого величина перехідного інтервалу є найбільшою. Величина перехідного інтервалу розраховується як сума тривалості мінімального проміжку, тривалості зеленого додаткового сигналу, тривалості зеленого миготливого сигналу базисного напрямку (за умови, що відповідне значення в матриці фаз є додатнім).

Тривалість мінімального проміжку визначається за елементами матриці конфліктних напрямів у рядку, що відповідає номеру фази, яка завершується, шляхом знаходження максимального значення серед усіх стовпців цієї матриці.

Розмітка головного напрямку здійснюється наступним чином:

Від першої мітки послідовно відкладаються часові інтервали для зеленого, зеленого миготливого, жовтого, червоного сигналів. Ці інтервали враховуються як для основного такту, так і для проміжного такту, що забезпечує точне

визначення моментів зміни сигналів для головного напрямку.

Під час відкладання ведеться перевірка останніх інтервалів для кожного каналу з метою пошук співпадання станів попереднього та поточного інтервалів для раціонального використання обмеженої кількості інтервалів.

Для інших включених напрямів враховується, що миготіння зеленого сигналу для напрямів, не включених у фазу, яка готується, починається у момент часу, залежний від мінімального проміжку між вимкненням зеленого сигналу цього напрямку та початком основного такту підготовлюваної фази.

У такому випадку до тривалості зеленого сигналу основного такту додається величина Z_{oa} – зелений додатковий автоматичний такт.

$$Z_{oa} = M2 - M1 - T_{mn} - T_{ocn} - T_{zm}, \quad (3.16)$$

де M_2 та $M1$ – значення відповідно першої та другої міток циклограми;

T_{mn} – значення мінімального часового проміжку для даного включеного напрямку;

T_{ocn} – тривалість основного такту фази, що знімається;

T_{zm} – тривалість зеленого миготливого (приймається рівним 3 с).

У ситуації, коли небазисний напрям включено також у фазу, що готується, мінімальний часовий проміжок між цим напрямом і самим собою дорівнює нулю. Це означає, що для такого напрямку не потрібен додатковий час на перехід між фазами, оскільки він залишається активним і в наступній фазі, отже у формулі $T_{mn}=0$, а T_{zm} у разі присутності одного напрямку у матриці фаз як у рядку фази, що готується, так і у рядку фази, що знімається, автоматично обертається на 0. Отже, очевидно, що зелений сигнал для напрямку, який включено в дві послідовні фази, залишатиметься ввімкненим у перехідному інтервалі між основними тактами цих фаз. Це забезпечує безперервність руху для цього напрямку.

Для базисного напрямку мінімально допустимий проміжок часу дорівнює тривалості проміжного такту без урахування миготіння зеленого сигналу. Оскільки згідно з Правилами дорожнього руху України (введеними в дію

10.10.2001 року) дозволено рух на миготливий зелений сигнал, а отже, і в'їзд на перехрестя, вважається, що звільнення напрямку починається з моменту ввімкнення жовтого сигналу.

Таким чином, розраховане значення мінімально припустимого проміжку відкладається від моменту ввімкнення жовтого сигналу для базисного напрямку або від моменту вимкнення стрілки додаткової секції для напрямку, що відповідає цій стрілці.

Для інших включених напрямів ці моменти можуть відрізнятися, якщо їхні мінімально припустимі проміжки не збігаються із значенням для базисного напрямку.

На основі вищевикладеного визначається час початку миготіння зеленого сигналу для кожного з включених напрямів. Для цього у рядку матриці конфліктних напрямків, номер якого дорівнює номеру напрямку, що прораховується, знаходиться максимальний елемент у одному зі стовпчиків, номери яких дорівнюють елементам матриці фаз (з четвертого по десятий стовпчик) у рядку, що дорівнює номеру фази, що готується (тобто для напрямів, включених у фазу, що готується). На рисунку 3.2 представлені сигнали за номерами каналів:

1, 2, 3 — сигнали для головного (базисного) напрямку, який входить до фази, що завершується;

4, 5, 6 — сигнали для небазисного напрямку, включеного до фази, що готується;

7, 8, 9 — сигнали для неголовного (небазисного) напрямку, який входить до фази, що завершується.

Сигнали для кожного напрямку подано в наступній послідовності: червоний, жовтий, зелений.

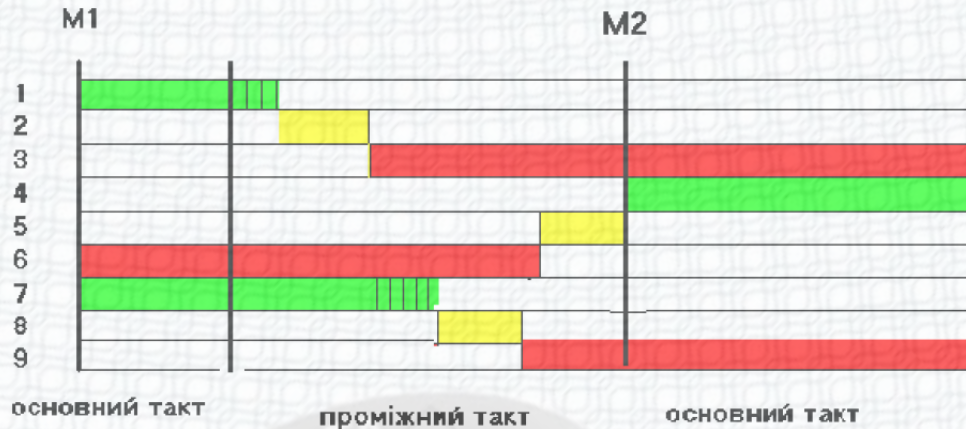


Рисунок 3.3 – Фрагмент графіка роботи світлофорного об'єкту
(M1 – перша головна мітка)

Коли змінюється порядок чергування фаз, збільшується втрачений час на перехресті. Це відбувається через те, що перехід сигналів для кожного напрямку (з червоного на зелений або з зеленого на червоний) є властивістю конкретного напрямку і не залежить від інших напрямків, які входять до фази, що завершується або починається. На основі даних із матриці мінімальних інтервалів програма розраховує проміжні такти для будь-якого порядку чергування фаз та для будь-яких допустимих варіантів (з урахуванням вимог конфліктного тесту) включення напрямків у фази.

Далі проводиться розмітка напрямків, які не входять до фази, що завершується (під час дії основного такту ці напрямки мають на світлофорах червоне світло). Спочатку визначаються номери невиключених напрямків (їх може бути до чотирьох, але деякі можуть бути відсутні). У матриці фаз знаходяться напрямки з номерами, що відрізняються від тих, які включені до фази, що завершується. Для таких напрямків у період від мітки M1 до M2 встановлюється червоний сигнал. Також визначається параметр J, який показує, чи включений цей напрямок до фази, що готується. Якщо J є істинним, то за три секунди до мітки M2 на невиключеному напрямку вмикається жовтий сигнал.

Після проходження головного циклу через матрицю каналів стільки разів, скільки передбачено фаз, матриця заповнюється.

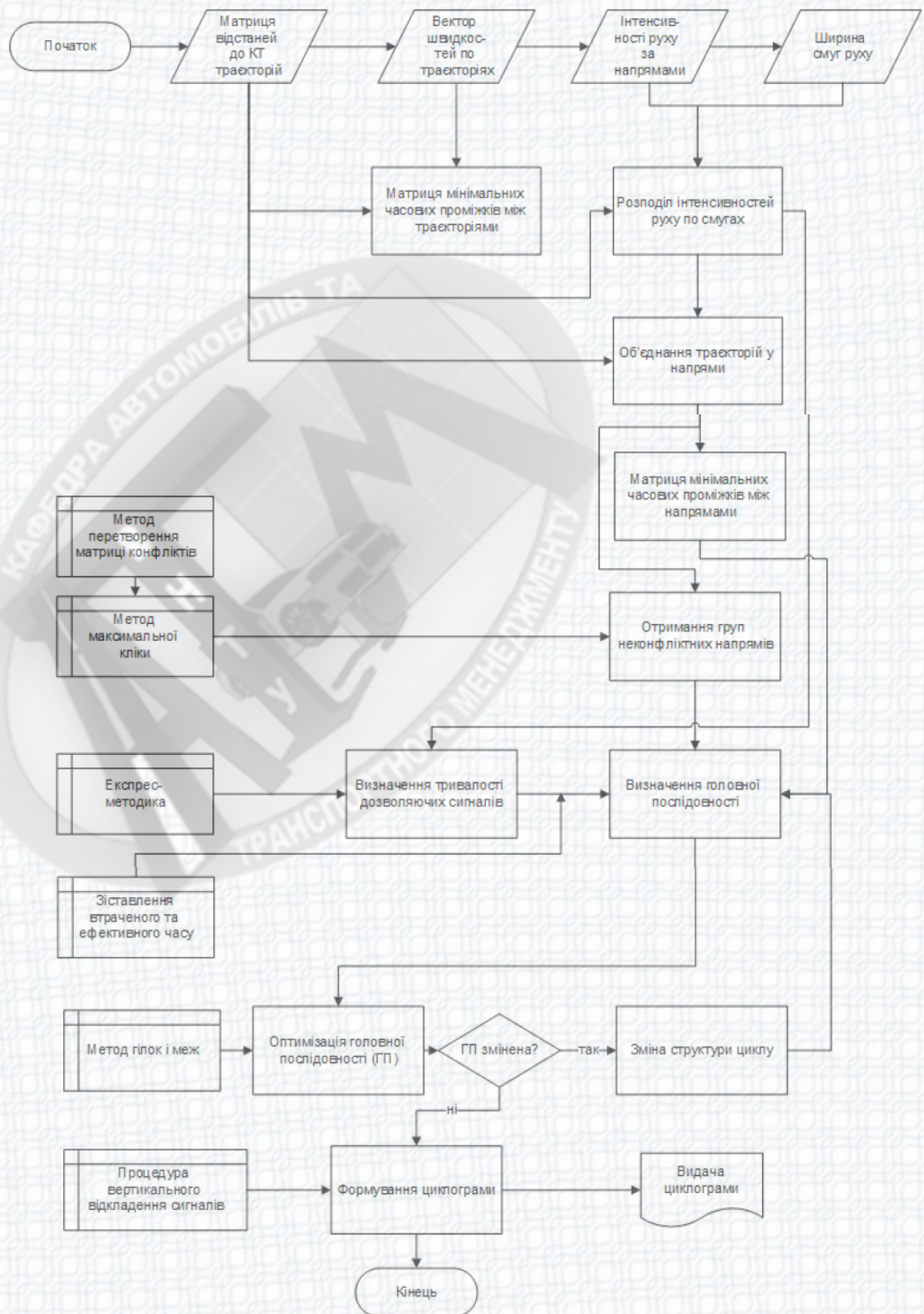


Рисунок 3.4 – Алгоритм програмного комплексу

Висновки до розділу 3

Розроблені у розділі принципи формування режимів світлофорного регулювання за окремими напрямками охоплюють наступні стадії проектування режимів світлофорного регулювання:

- визначення кількості напрямів світлофорного регулювання залежно від геометрії регульованої ділянки та розподілу інтенсивностей дорожнього руху;
- визначення конфліктності між напрямками регулювання;
- встановлення тривалості мінімальних часових проміжків між дозволяючими сигналами конфліктних напрямів регулювання;
- синтез структури світлофорного циклу: групування неконфліктних напрямів регулювання та встановлення оптимальної за критерієм зниження втраченого часу послідовності напрямів під час роз'їзду;
- визначення тривалостей дозволяючих сигналів для транспортних засобів з дотриманням умови рівності тривалостей затримок водіїв, пасажирів та пішоходів за конфліктними напрямками регулювання;
- встановлення співвідношень між дозволяючими сигналами та мінімальними часовими проміжками у циклі регулювання;
- побудова циклограми світлофорного регулювання.

РОЗДІЛ 4

ПОКРАЩЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ РЕЖИМІВ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

4.1 Визначення режимів координованого управління регулювання транспортними потоками

Координоване регулювання передбачає такий режим роботи світлофорів на магістралях або в окремих районах, який дозволяє забезпечити безперервний рух транспортних засобів через усі перехрестя, що входять до маршруту координації, за умови дотримання розрахункової швидкості.

Розрахункова швидкість координованого регулювання мусить визначатися на базі 85%-го забезпечення. Основна мета розрахунків координованого регулювання – визначення зсувів часу початку дії зеленого сигналу для магістральних напрямків на основі циклу координації та режимів роботи світлофорів. Графік координованого регулювання є візуалізацією у двовимірній системі координат, яка відображає траєкторії руху щільних груп транспортних засобів. Він створюється за графоаналітичним методом.

Вихідні дані включають час початку і тривалість фази, викликані координатором. Для спрощення обчислень першу фазу циклу завжди позначають як фазу з номером один. Через циклічність зміни фаз зсув будь-якого циклу можна привести до зсуву в межах одного циклу за допомогою цілочисельного ділення. Операційне значення зсуву O визначається для i -ої фази за формулою:

$$O = \Pi - t_{g(i-1,i)}, \quad (4.1)$$

де Π – номер секунди початку виклику.

Дійсне значення зсуву D , яке використовується для побудови графіка координації, визначається за формулою:

$$D = O + C - \left(\frac{O}{C} \right) \times C, \quad (4.2)$$

де C – тривалість циклу координованого регулювання, с.

Цикл регулювання дорівнює 81 секунді. Якщо отримане значення зсуву 87с, тоді дійсне його значення 6 с, а якщо – 10 с, це значить 71 с.

На графіку координованого регулювання лінії часу проходять через смуги, які відповідають перехрестям. Відстані між цими смугами на графіку відповідають фактичним відстаням між стоп-лініями на магістралях. У програмі координації ці відстані задаються окремо для прямого і зворотного напрямків.

За фіксованих значень швидкості та циклу регулювання основним завданням є "закриття" зеленим сигналом ділянки графіка, де лінія часу входить до смуги перехрестя. Ця графічна область, що перекриває необхідні точки, називається калькою. Далі застосовується графічний метод для магістральної координації, із врахуванням уточнень та особливостей роботи автоматизованої програми координації.

З початкової точки координат проводять похилу пряму, що відповідає швидкості координації. Для кожного напрямку і перегону швидкість може відрізнятися, але її значення повинно відповідати тим, які використовувалися під час розрахунку перехідних інтервалів циклу. За потреби швидкість може змінюватися для кожного перехрестя за допомогою спеціального обробника. Паралельно до основної прямої праворуч будується ще одна лінія, на відстані, що відповідає тривалості циклу регулювання у масштабі графіка.

Оскільки світлофори працюють циклічно, всі отримані стрічки часу є рівномірними для кожної побудови. Аналогічна сітка створюється і для зворотного напрямку. Початок першої лінії зсувається на значення в межах тривалості циклу регулювання. Це значення називається зміщенням зворотної стрічки або просто зміщенням і використовується для формування графіка координації.

Програма автоматизації аналізує різні варіанти побудови графіка та обирає оптимальний варіант, за якого всі кальки перекривають точки входження стрічок часу до смуг перехресть. Для цього контрольна стрічка повинна бути максимально близькою до стрічок часу зустрічного напрямку. Однак для зручності побудови контрольна стрічка не може бути першою зліва.

Точки входження контрольної стрічки до смуг перехресть позначаються як А і В. Зміщена стрічка утворює по дві точки перетину з верхніми межами смуг. Далі на верхніх межах кожної смуги знаходять пари точок, розташованих на відстані, що дорівнює тривалості циклу регулювання. Через ці пари проводять лінії, які утворюють паралельні штрих-пунктирні стрічки, зсунуті праворуч.

Із побудованої сітки методом цілочисельного ділення обираються дві стрічки, які розташовані найближче до контрольної (див. рис. 4.1).

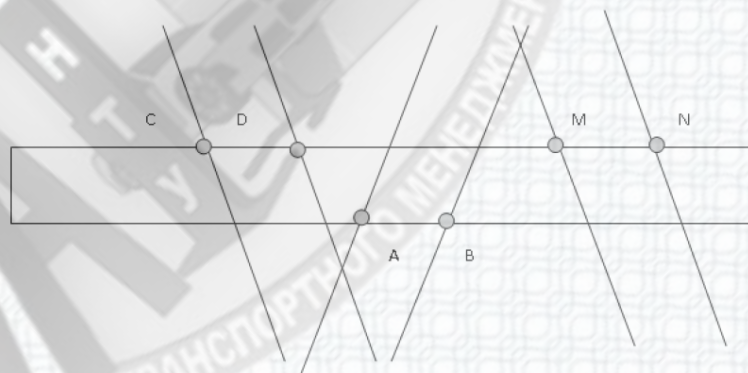


Рисунок 4.1 – Визначення стрічок оточення

Кальки є частинами циклограм для магістральних напрямків, що включають зелені сигнали разом із зеленим миготінням. Проте стрічки часу, які відображають рух щільних груп транспорту, мають бути повністю перекриті калькою. Через наявність позагрупових транспортних засобів не весь зелений сигнал можна використовувати для руху щільної групи. Тому тривалість кальки скорочується на 5 секунд, які необхідні для проїзду позагрупових автомобілів через стоп-лінію.

На трифазних перехрестях кальки враховують не лише тривалість фаз магістральних напрямків, але й перехідні інтервали між фазами, які змінюються залежно від порядку їх чергування.

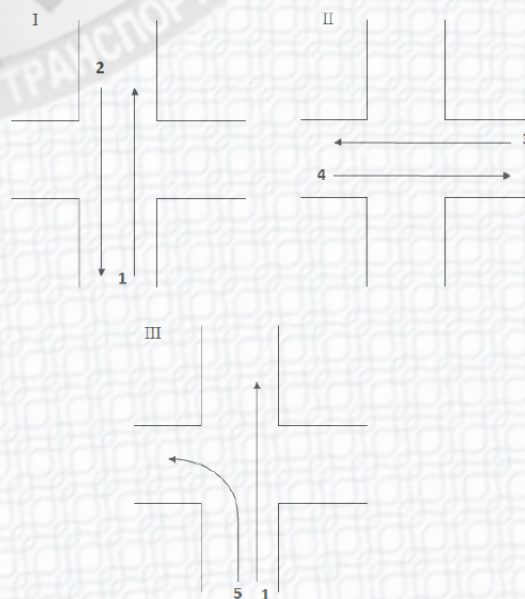
Цикл світлофорного регулювання для трифазного перехрестя складається з двох можливих послідовностей фаз: 1 – 2 – 3 або 1 – 3 – 2. Для спрощення позначень перша фаза визначається як початкова, оскільки саме вона активується при переході до координованого режиму. У першій фазі передбачено включення обох магістральних напрямків (прямого та зворотного), тоді як псевдонапряма або стрілка додаткової секції, якщо вони присутні, включаються до третьої фази. Друга фаза забезпечує рух у прямому та зворотному напрямках на вулицях, що перетинають магістраль (рис. 4.2).

На рисунку представлено можливі варіанти перетину стрічок часу з перехрестями, на які накладені кальки. Показано чотири основні конфігурації, що описують вирішення задачі переходу кожного перехрестя в координований режим (рис. 4.2).

Довжина кальок визначається за допомогою відповідних формул.

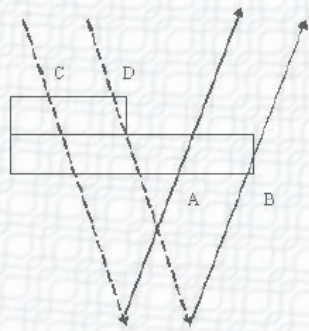
$$Z_{el} = f_1 + f_3 + t_{\partial 1-3} - 5; \quad (4.3)$$

$$Z_{el} = f_1 + f_3 + t_{\partial 3-1} - 5. \quad (4.4)$$

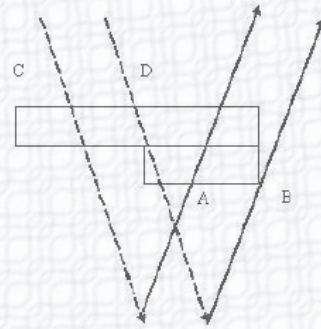


(1,2,5 – магістральні напрямки; 3,4 – другорядні напрямки)

Рисунок 4.2 – Типова схема пофазового роз'їзду на трифазному перехресті



Твірна стрічка ліва, фази: 1-3-2



Твірна стрічка ліва, фази 1-2-3 (3-1-2)

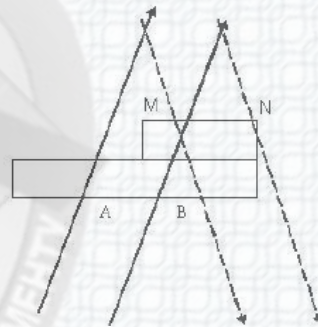


Рисунок 4.3 – Варіанти розташування кальок на стрічках часу

Операційне значення абсолютного зсуву від початку першої фази для варіантів, представлених на рис. 4.3, розраховується за такими формулами:
Твірна стрічка ліва, фази 1-3-2:

$$O = \max(d, b - f_3 - t_{\partial 1-3}). \quad (4.5)$$

Твірна стрічка ліва, фази 1-2-3:

$$O = \max(n, b). \quad (4.6)$$

Твірна стрічка права, фази 1-3-2:

$$O = \max(b, n - f_3 - t_{\partial 1-3}). \quad (4.7)$$

Твірна стрічка права, фази 1-2-3:

$$O = \max(n, b). \quad (4.8)$$

Операційне значення зсуву O необхідно поділити націло на тривалість циклу координованого регулювання, а залишок від ділення використовувати як фактичне значення зсуву:

$$Д = \frac{O - f1}{Ц}, \quad (4.9)$$

Дійсне значення вводиться в дорожній контролер для роботи з безцентровою схемою координації. Налаштування координатора полягає в розрахунку моментів початку виклику наступних фаз координатором. Для автоматизації цих розрахунків використовується програма, згадана на початку розділу.

Зелений додатковий сигнал або ранній старт на перехресті, оформлені як псевдофаза, включаються в графік координованого регулювання. У разі виконання повороту із застосуванням зеленого додаткового сигналу або раннього старту, псевдонапрямок отримує номер 5 або 6, щоб врахувати збільшення тривалості зеленого сигналу за рахунок додаткового сигналу.

Третя фаза може бути додана в послідовність після першої та другої. У цьому випадку псевдонапрямок з'являється перед або після зустрічного та конфліктного магістрального напрямку.

Під час координації зелений додатковий сигнал і ранній старт можуть взаємозамінюватися залежно від розрахунків графіка координованого регулювання. Однак, враховуючи вимоги безпеки руху, на деяких ділянках зміна додаткового сигналу може бути заборонена. У таких випадках розглядається можливість використання лише зеленого додаткового сигналу, без врахування раннього старту.

Таким чином, зелений додатковий сигнал і ранній старт є різними способами подачі зеленого сигналу під час перехідного інтервалу або у вигляді псевдофази.

У роботі було розглянуто такі вхідні дані:

- відстані між стоп-лініями сусідніх перехресть, включених до плану координації;
- розрахункові швидкості руху транспортних потоків у координованому режимі в прямому та зворотному напрямках. Прямий напрямок визначається як рух транспортних засобів уздовж маршруту координації від перехрестя з меншим номером на магістралі до перехрестя з більшим номером;
- номери локальних ідентифікаторів перехресть, під'їзди яких беруть участь у координуванні за заданим маршрутом.

Результатом виконаних розрахунків за алгоритмом, представленим на рис. 4.4 і 4.5, є створений графік координації, що відображає параметри плану координованого регулювання для окремих перехресть і всього маршруту. Для кожного перехрестя зазначено порядок слідування груп безконфліктних напрямків, який забезпечує проходження компактної групи транспортних засобів у межах стрічки безперервного часу відповідно до розрахункових параметрів плану координації.

Варто підкреслити, що запропоновані структури циклів у координованому режимі слід ретельно аналізувати з точки зору забезпечення безпеки руху.

На графіку координації для перехресть із рознесеними стоп-лініями відображаються лише зовнішні стоп-лінії, оскільки локальна координація здійснюється через перехідні інтервали. Якщо ж координація забезпечується зміною чергування фаз, програмою повинна бути введена заборона на зміну порядку їх чергування.

На рис. 4.6 наведено приклад автоматизованої побудови графіка координованого регулювання для вулиці Келецької в м. Вінниця.

Жовтим кольором позначено межі смуг перехресть, які відповідають розташуванню вхідних стоп-ліній на виїздах до перехресть.

Синім кольором показані стрічки часу прямого напрямку, що відображають рух транспортних засобів від початкового до кінцевого перехрестя на маршруті координованого регулювання.

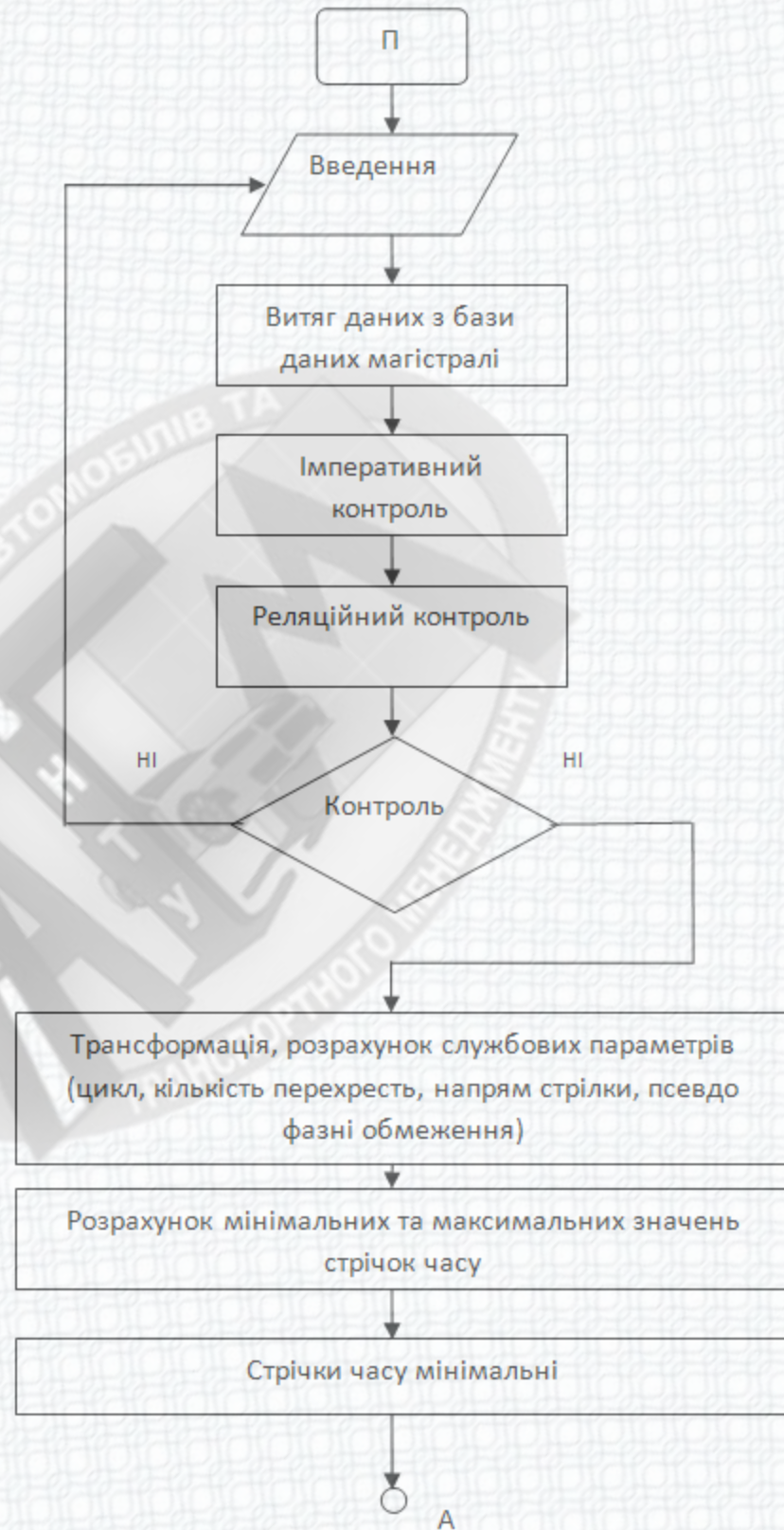


Рисунок 4.4 – Алгоритм координації (частина 1)

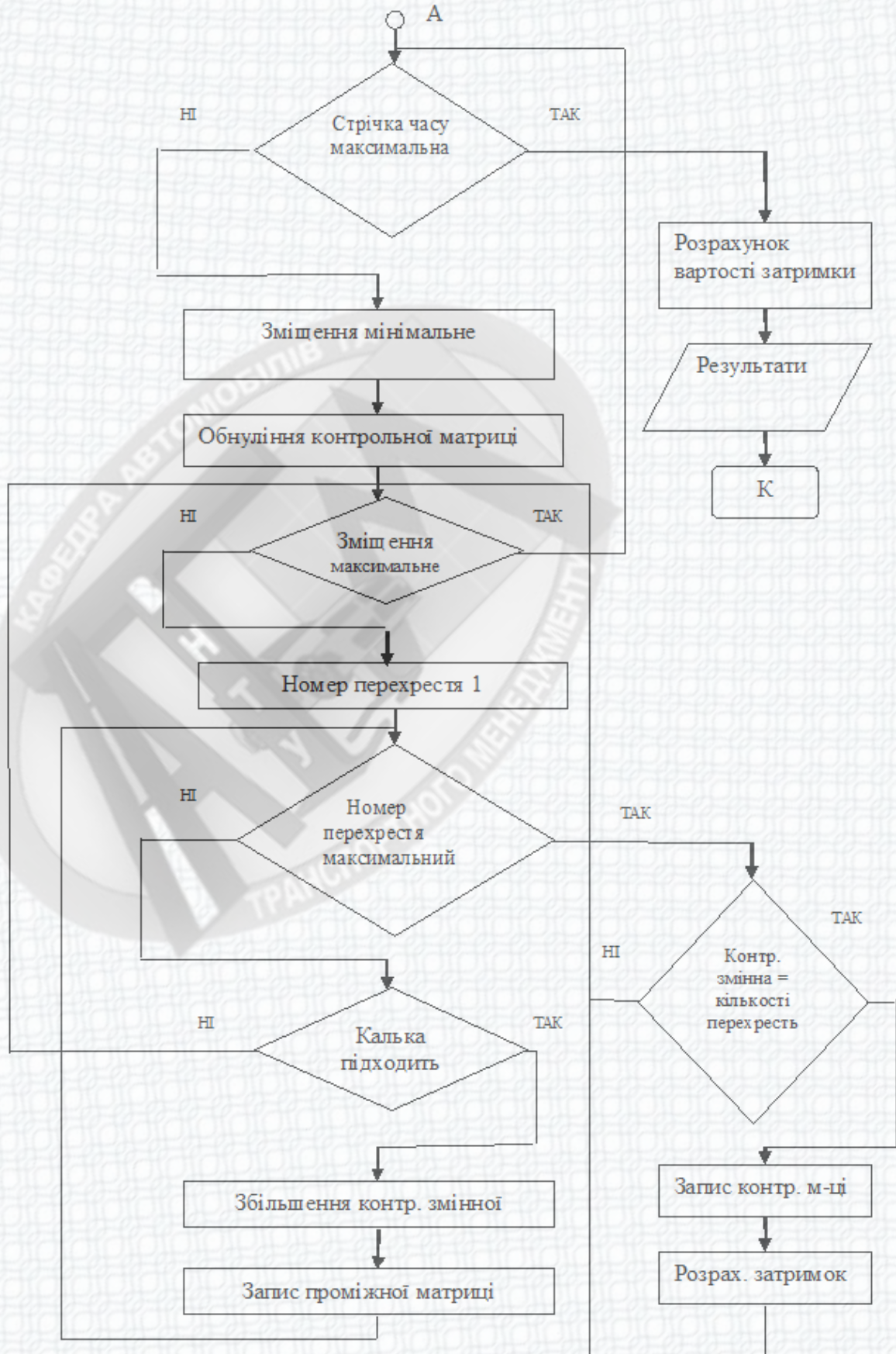


Рисунок 4.5 – Алгоритм координації (частина 2)

Стрічки часу зворотного напрямку позначені червоним кольором.

Зеленим кольором відображені кальки – ділянки циклограм магістральних напрямків регулювання, що містять зелений і зелений миготливий сигнали.

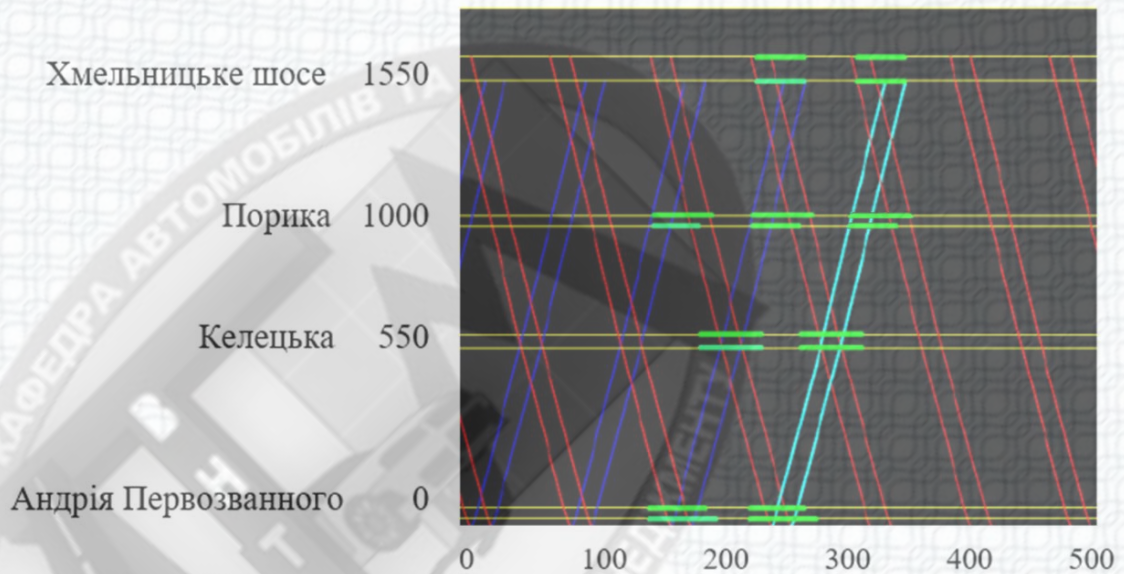


Рисунок 4.6 – Проектний графік координованого регулювання

4.2 Визначення витрат на виконання науково-дослідної роботи

Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи (НДР) може включати такі етапи:

- 1) Розрахунок витрат, які безпосередньо пов'язані з виконавцями конкретного розділу НДР.
- 2) Визначення загальних витрат на виконання всієї НДР.
- 3) Прогнозування сукупних витрат на реалізацію та впровадження результатів НДР.
- 4) Повторний розрахунок витрат, що стосуються виконавців окремого розділу НДР.

Основна заробітна плата кожного розробника визначається за формулою:

$$З_0 = \frac{M}{T_p} \cdot t,$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника, грн. T_p – число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21...23$ дні; t – число днів роботи розробника.

Основна заробітна плата розробників становить, грн:

$$З_{01} = \frac{19400}{23} \cdot 7 = 5904,35 \text{ грн};$$

$$З_{02} = \frac{10600}{23} \cdot 250 = 115217,39 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки занесені до табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Розрахунки витрат на основну заробітну плату розробників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
Керівник проекту	19400	843,48	7	5904,35
Інженер	10600	460,87	250	115217,39
Всього				121121,74

5) Основна заробітна плата робітників, що виконують роботу за робочими професіями, у випадку, коли вони працюють в наукових установах бюджетної сфери, розраховується за формулою, грн.:

$$З_p = \sum_1^n t_i \cdot C_i \cdot K_c ,$$

де n – число робіт за видами та розрядами;

t_i – норма часу на виконання конкретної роботи, годин;

K_c – коефіцієнт співвідношень, який установлений генеральною тарифною угодою між урядом і профспілками, $K_c = 1 \dots 5$;

C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, який виконує дану роботу, яка визначається за формулою, грн./год.:

$$C_i = \frac{M_m \cdot K_i}{T_p \cdot T_{зм}},$$

де M_m – мінімальна місячна оплата праці, грн. З 01.01.2021 року становить 6000 грн;

K_i – тарифний коефіцієнт робітника відповідного розряду;

T_p – число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21 \dots 23$ дні;

$T_{зм}$ – тривалість зміни, зазвичай $T_{зм} = 8$ годин.

$$C_{i1} = \frac{8000 \cdot 1,27}{23 \cdot 8} = 55,22 \text{ грн};$$

$$C_{i2} = \frac{8000 \cdot 1,54}{23 \cdot 8} = 66,96 \text{ грн};$$

$$З_p = \sum_1^2 0,5 \cdot 55,22 \cdot 1 + 1 \cdot 66,96 \cdot 1 = 94,57 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки занесені до таблиці 4.2

Таблиця 4.2 – Розрахунки витрат

Найменування робіт	Трудовісткість, н. - годин	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка, грн.	Величина оплати, грн.
Встановлення додаткового обладнання	0,5	4	55,22	27,61
Налаштування та тестування роботи об'єкта світлофорної сигналізації.	1	7	66,96	66,96
Всього				94,57

3) Додаткова заробітна плата Z_o (грн.) всіх розробників та робітників, які приймали участь в розробці вдосконаленого алгоритму управління світлофорною сигналізацією на перехресті при організації руху транспортних та пішохідних потоків за окремими напрямками з врахуванням оптимальних співвідношень між дозволяючими світлофорними сигналами розраховується як 10...12% від основної заробітної плати всіх розробників та робітників

$$Z_o = 0,11 \cdot (5904,35 + 115217,39) = 13323,39 \text{ грн.}$$

4) Нарахування на заробітну плату H_{zn} (грн.) розробників та робітників, які приймали участь в розробці нового технічного рішення розраховується як 0,363% від суми основної та додаткової заробітної плати всіх розробників та робітників

$$H_{zn} = (Z_o + Z_p + Z_d) \cdot \frac{\beta}{100},$$

де Z_o – основна заробітна плата розробників, грн.;

Z_p – основна заробітна плата робітників, грн.;

Z_0 – додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.;

β – ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування, %

$$H_{zn} = (5904,35 + 115217,39 + 13323,39) \cdot 0,363 = 48803,58 \text{ грн.}$$

5) Амортизація обладнання, комп'ютерів та приміщень, які використовувались для розробки нового технічного рішення, грн:

$$A = \frac{Ц \cdot H_a}{100} \cdot \frac{T}{12},$$

де $Ц$ – балансова вартість обладнання, приміщень, грн.;

H_a – річна норма амортизаційних відрахувань для даного виду обладнання, %, $H_a = 10\%$;

$H_a = 10\%$;

T – термін використання обладнання, приміщень, місяці.

$$A = \frac{75000 \cdot 10}{100} \cdot \frac{12}{12} = 7500.$$

Проведені розрахунки занесені до таблиці 4.3

Таблиця 4.3 – Розрахунки амортизаційних витрат на обладнання

Найменування обладнання, приміщень	Балансова вартість, грн.	Норма амортизації, %	Термін використання, міс.	Величина амортизаційних відрахувань, грн.
Комп'ютер	75000	10%	12	7500
Всього				7500

6) Витрати на комплектуючі та матеріали K , що були використані на розробку нового технічного рішення, розраховуються за формулою, грн.:

$$K = \sum_{i=1}^n H_i \cdot C_i \cdot K_i ,$$

де n – кількість видів комплектуючих;

H_i – кількість комплектуючих i -го виду, шт.;

C_i – покупна ціна комплектуючих i -го виду, грн.;

K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = 1,1 \dots 1,15$

$$K = \sum_i^1 1 \cdot 510 \cdot 1,1 + 1 \cdot 210 \cdot 1,1 = 792.$$

Проведені розрахунки занесені до таблиці 4.4

Таблиця 4.4 – Розрахунки витрат на комплектуючі та матеріали

Найменування комплектуючих	Кількість	Ціна за штуку, грн.	Сума, грн.
Картридж	1	510	561
Бумага А4	1	210	231
Всього			792

6) Витрати на силову електроенергію B_e визначається за формулою, грн.:

$$B_e = B \cdot P \cdot \Phi \cdot K_n ,$$

де B – вартість однієї кіловат-години електроенергії, $B = 10$ грн./кВт;

P – установлена потужність обладнання, кВт;

Φ – фактична кількість годин роботи обладнання, годин;

K_n – коефіцієнт використання потужності встановленого обладнання, $K_n < 1$

$$B_e = 10 \cdot 0,7 \cdot 250 \cdot 0,6 = 261,3 \text{ грн.}$$

Загальні витрати на розробку нового програмного продукту.

9) Інші витрати охоплюють: витрати на управління організацією, оплата службових відряджень, витрати на утримання, ремонт та експлуатацію основних засобів, витрати на опалення, освітлення, водопостачання, охорону праці тощо.

Інші витрати доцільно прийняти як 100...300% від суми основної заробітної плати розробників та робітників, які були зайняті розробкою нового технічного рішення, тобто $(Z_o + Z_p)$, грн.:

$$I_b = (5904,35 + 115217,39) \cdot 1 = 121121,74 \text{ грн.}$$

Загальні витрати на розробку нового програмного продукту складають, грн.:

$$B = Z_o + Z_p + Z_d + H_{zn} + A + O + K + B_e + I_b,$$

$$B = 5904,35 + 115217,39 + 13323,39 + 48803,58 + 7500 + 792 + 261,3 + 121121,74 = 269003,75 \text{ грн.}$$

3. Прогнозування загальних витрат на виконання та впровадження результатів НДР. Прогнозування здійснюється за формулою, грн.:

$$3B = \frac{B}{\beta},$$

де β - коефіцієнт, характеризує етап виконання даної НДР

$$3B = \frac{269003,75}{0,9} = 298893,06 \text{ грн.}$$

Прогнозовані загальні витрати на виконання та впровадження результатів НДР склали 298893,06 грн.

4.3 Висновки до розділу 4

Розроблено алгоритм для визначення керуючих параметрів світлофорного регулювання на основі масиву вхідних даних:

- номери локальних ідентифікаторів перехресть, під'їзди яких підлягають координуванню за заданим маршрутом.
- відстані між стоп-лініями сусідніх перехресть, включених до плану координації;
- розрахункові швидкості руху транспортних потоків у координованому режимі для прямого та зворотного напрямків (прямим напрямком вважається рух транспортних засобів уздовж маршруту координації від перехрестя з меншим номером на магістралі до перехрестя з більшим номером);

Цей алгоритм дозволяє виконувати розрахунки та побудову систем координованого регулювання, застосовуючи графоаналітичний метод у формалізованій формі.

Розроблений алгоритм забезпечують автоматизацію всього процесу розрахунку режимів роботи світлофорів — від етапу введення вихідних даних до отримання циклограм для світлофорних об'єктів.

Прогнозовані витрати на проведення науково-дослідної роботи по вдосконаленню світлофорного регулювання на ділянці між перехрестями проспект Юності – вул. Андрія Первозванного та проспект Юності – Хмельницьке шосе. Загальні витрати становлять 298893,06 грн.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі отримані такі основні результати:

1. Проведено аналіз існуючих методів синтезу структури циклу світлофорного регулювання, виявлено необхідність їх вдосконалення та перегляду основних підходів до реалізації. Запропоновано покращений підхід до розрахунку режимів роботи світлофорів для окремих напрямків, що дозволяє повністю автоматизувати процес визначення параметрів світлофорного режиму як для локальних, так і для координованих перехресть.

2. Розроблено адаптивний механізм формалізації схем руху транспортних засобів і пішоходів, який дозволяє у формальному вигляді описати весь набір характеристик, що надалі використовуються для зручної комп'ютерної обробки під час визначення структури та параметрів оптимізованого режиму світлофорного регулювання.

3. Сформульовано принципи оптимізації структури циклу обслуговування напрямків регулювання, засновані на графовій моделі, побудованій з матриці формалізації руху на перехресті. Порядок чергування напрямків, що забезпечує мінімальну тривалість циклу, визначено шляхом розв'язання задачі комівояжера. Встановлено оптимальну структуру світлофорного циклу, уточнено параметри режиму регулювання, а також вдосконалено метод визначення тривалості перехідних інтервалів, що дозволило скоротити реальні часові інтервали між дозволяючими сигналами світлофорів.

4. Спрогнозовані витрати на проведення науково-дослідної роботи по вдосконаленню світлофорного регулювання на ділянці між перехрестями проспект Юності – вул. Андрія Первозванного та проспект Юності – Хмельницьке шосе. Загальні витрати становлять 298893,06 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Галушак О.О. Підвищення пропускної здатності вулично-дорожньої мережі проспекту Юності міста Вінниці // О.О. Галушак, С.В. Кердун / Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)» – ВНТУ, 2024. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/22861/18910>
2. Методичні вказівки до виконання магістерських кваліфікаційних робіт для здобувачів спеціальності 75 «Транспортні технології (за видами) спеціалізації 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті) [Електронний ресурс] / уклад.: В. В. Біліченко, С. В. Цимбал, В. П. Кужель. – Вінниця : ВНТУ, 2024. – 82 с..
4. Полозенко П. М. Комплексна оцінка режимів світлофорного регулювання на перехрестях : дис. – ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22. 01 «Транспортні системи» / П.М. Полозенко, 1999. – 160 с.
5. Прокудін Г.С. Оптимізація структур циклів світлофорного регулювання на ізольованих перехрестях / Г.С. Прокудін, Б.М. Четверухін, Л.А. Пономаренко // Безпека дорожнього руху України, № 1–2 (17), вид. НДЦ БДР МВС України, 2004. – С. 120–128.
6. Енглезі І. П. Ефективність координованого управління транспортними потоками: дис. – (05.22. 01) / І.П. Енглезі. – К.– 2004. – 120 с.
7. Kim W. Improved transit signal priority system for networks with nearside bus stops / W. Kim, L. Rilett //Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2005. – Т. 1925. – №. 1. – С. 205–214.
8. Abrams C. Selection of Pedestrian Signal Phasing / C. Abrams //Transportation Research Record. – 1977. – №. 629.
9. Guo H. Reliability analysis of pedestrian safety crossing in urban traffic environment / H. Guo // Safety Science. – 2012. – Vol. 50, Issue 4. – P. 968–973. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2011.12.027>

10. Noland R. Pedestrian travel times and motor vehicle traffic signals / R. Noland // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 1996. – Т. 1553. – №. 1. – С. 28–33. <http://dx.doi.org/10.3141/1553-04>.

11. Кузькін О.Ф. Пошук шляхів у маршрутних мережах міст методом відгалужень і меж / О.Ф. Кузькін. – Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/29538/1/32.pdf>

12. Правила дорожнього руху України. – Введ. 2001–10–10. – К.: Моноліт, 2002. – 57 с.

13. Трушевський В.Е. Формалізація відпрацювання переходів між режимом жовтого миготіння та основними програми світлофорного регулювання / С.В. Грицай, В.Е. Трушевський // *Вісник ЖДТУ*. – 2010. – № 2 (53). – С. 36–40.

14. Трушевський В.Е. Оцінки змін та пропозиції щодо вдосконалення нормативних актів України в галузі безпеки дорожнього руху / В.Е. Трушевський // *Матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми підвищення рівню безпеки, комфорту та культури дорожнього руху»*. – Харків. – ФОП Попов, 2013. – С. 72–73.

15. Славич В.П. Модель автоматизованої системи управління потоками транспортних засобів / В.П. Славич // *Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні системи та комплекси*. – 2008. – № 1(21). – С. 20–23.

16. Поліщук В.П. Організація та регулювання дорожнього руху: Підручник. / за заг. ред. В.П. Поліщука; О.О. Бакуліч, О.П. Дзюба, В.І. Єресов, О.В. Красільнікова, О.В. Христенко. – К.: Знання України, 2012. – 467 с.

17. Maini P. Discharge Characteristics of Heterogeneous Traffic at Signalized Intersections. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Highway Capacity*, Maui, Hawaii, June 27 – July 1, 2000, pp. 258-270. <http://gulliver.trb.org/publications/circulars/ec018/ec018toc.pdf>

18. Powell T. *The Transport System: Markets, Modes and Policies*. // PTRCEducation and Research Services Ltd., 2001, 302 p.



ДОДАТКИ

Додаток А (обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

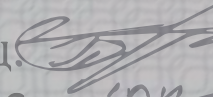
ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ВУЛИЧНО-ДОРОЖНЬОЇ
МЕРЕЖІ ПРОСПЕКТУ ЮНОСТІ МІСТА ВІННИЦІ ВДОСКОНАЛЕННЯМ
СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

(Назва магістерської кваліфікаційної роботи)

ІЛЮСТРАТИВНІ МАТЕРІАЛИ ДО МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

**ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ВУЛИЧНО-ДОРОЖНЬОЇ
МЕРЕЖІ ПРОСПЕКТУ ЮНОСТІ МІСТА ВІННИЦІ
ВДОСКОНАЛЕННЯМ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ**

зі спеціальності 275 – Транспортні технології (за видами)
за спеціалізацією 275.03 – Транспортні технології
(на автомобільному транспорті)

Керівник роботи к.т.н., доц.  Галушак О.О.
Розробив студент гр. 1ТТ-23  Кретюк Р.В.

Мета і завдання дослідження

Мета роботи – оптимізація роботи світлофорів і встановлення параметрів їх режиму, що забезпечують узгодженість і цілісність світлофорного циклу для підвищення ефективності регулювання руху.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

- аналіз структури світлофорного циклу та транспортної затримки;
- методи управління світлофорами на перехрестях;
- проектування режимів та структури циклу світлофорного регулювання;
- визначення затримок всіх елементів перехрестя;
- удосконалення алгоритму розрахунку параметрів регулювання транспортних потоків;
- покращення автоматизованого проектування режимів світлофорного регулювання.

Об’єкт дослідження – пішохідні та транспортні потоки на перехрестях зі світлофорним регулюванням.

Предмет дослідження – режими роботи світлофорного регулювання на перехрестях.

Новизна одержаних результатів:

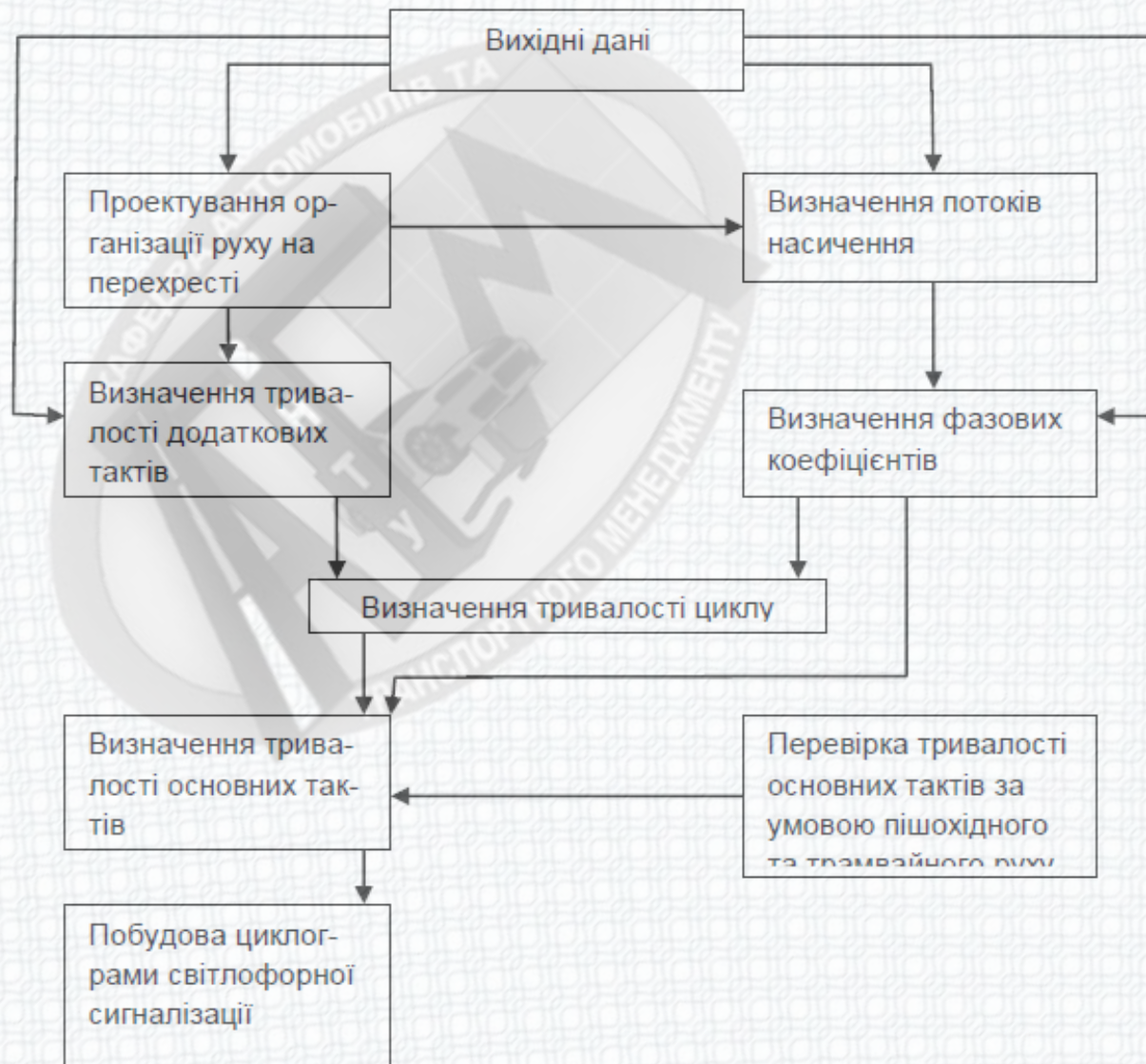
- Удосконалено алгоритми управління світлофорного регулювання при організації пішохідних та транспортних потоків по окремих напрямкам з оптимізацією тривалості дозволяючих сигналів світлофора.

Частина результатів роботи доповідались та обговорювались на Всеукраїнській науково-практичній Інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (Вінниця: ВНТУ, 2024).

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ПОФАЗНОГО РОЗ'ЇЗДУ

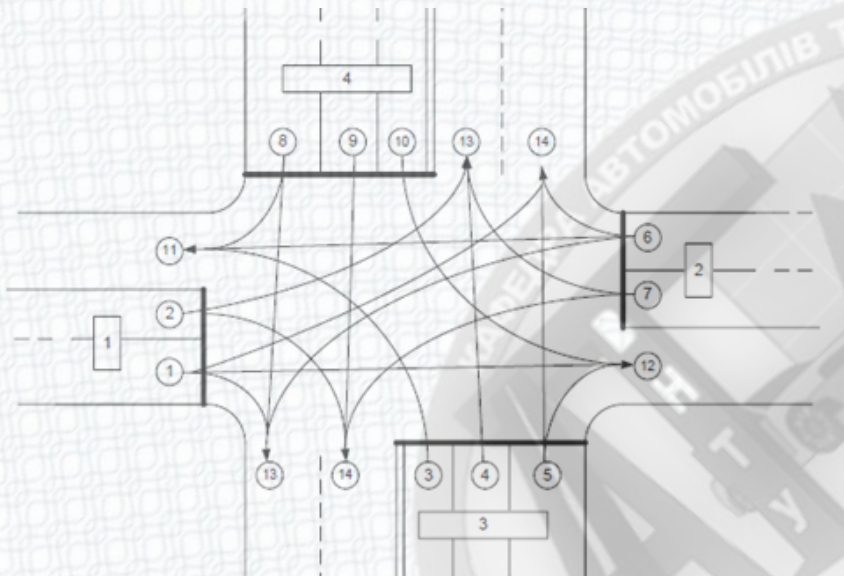
1. Прагнути до мінімального числа фаз у циклі регулювання.
2. Враховувати, що допускається сполучати в одній фазі лівоповоротний потік, що конфліктує з зустрічним потоком прямого напрямку, якщо інтенсивність лівоповоротного потоку не перевищує 120 авт/год.
3. Забезпечувати безконфліктний пропуск пішоходів; у крайньому випадку пішохідний і конфліктуючий з ними транспортні потоки, що повертають, можна пропускати в одній фазі, якщо інтенсивність пішохідного потоку не перевищує 900 чол/год., а транспортних потоків, що повертають – не перевищують 120 авт/год.
4. Не випускати з однієї і тієї ж смуги транспортні засоби, рух яких передбачено в різних фазах, тобто смуги руху закріплюють за певними фазами.
5. Прагнути до рівномірного завантаження смуг. Інтенсивність руху, у середньому, яка приходить на одну смугу, не має перевищувати 700 авт/год.
6. При широкій проїзній частині і наявності островців безпеки варто розглядати можливість поетапного переходу пішоходами вулиці протягом двох наступних один за одним фаз регулювання.

ПОСЛІДОВНІСТЬ РОЗРАХУНКУ ТРИВАЛОСТІ ЦИКЛУ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЙОГО ЕЛЕМЕНТІВ

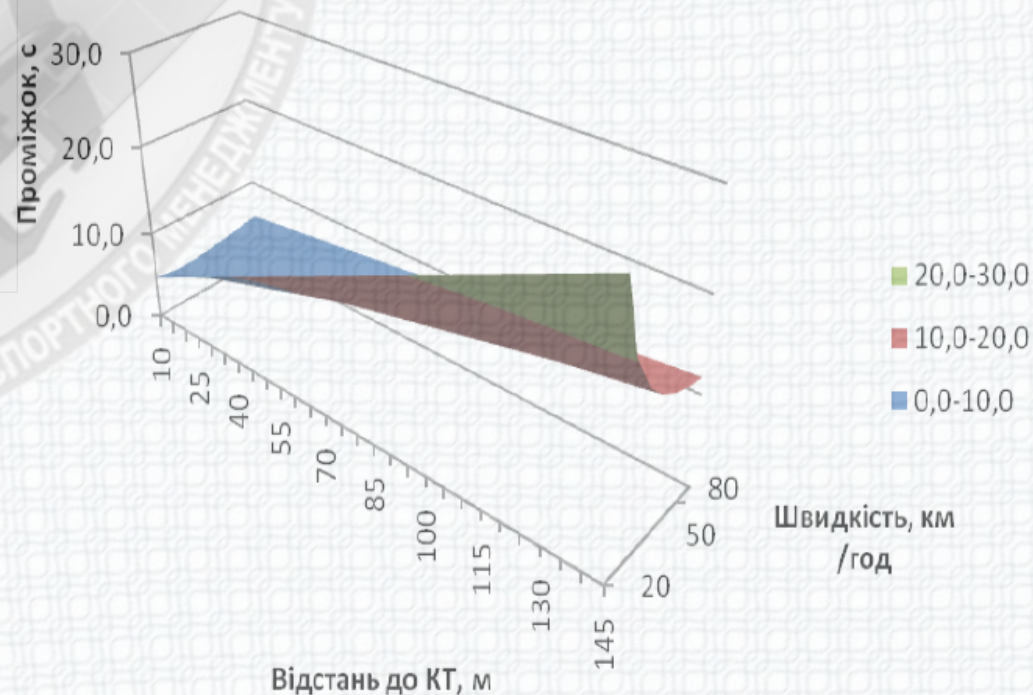


ФОРМАЛІЗАЦІЯ СХЕМИ РУХУ НА ПЕРЕХРЕСТІ

Схема можливих траєкторій



Графік залежності тривалості мінімального часового проміжку від відстані до конфліктної точки та швидкості руху



Розташування смуг на під'їздах і виїздах у двомірній матриці (приклад)

	1	2	3
1	1	2	
2	6	7	
3	5	4	3
4	8	9	10

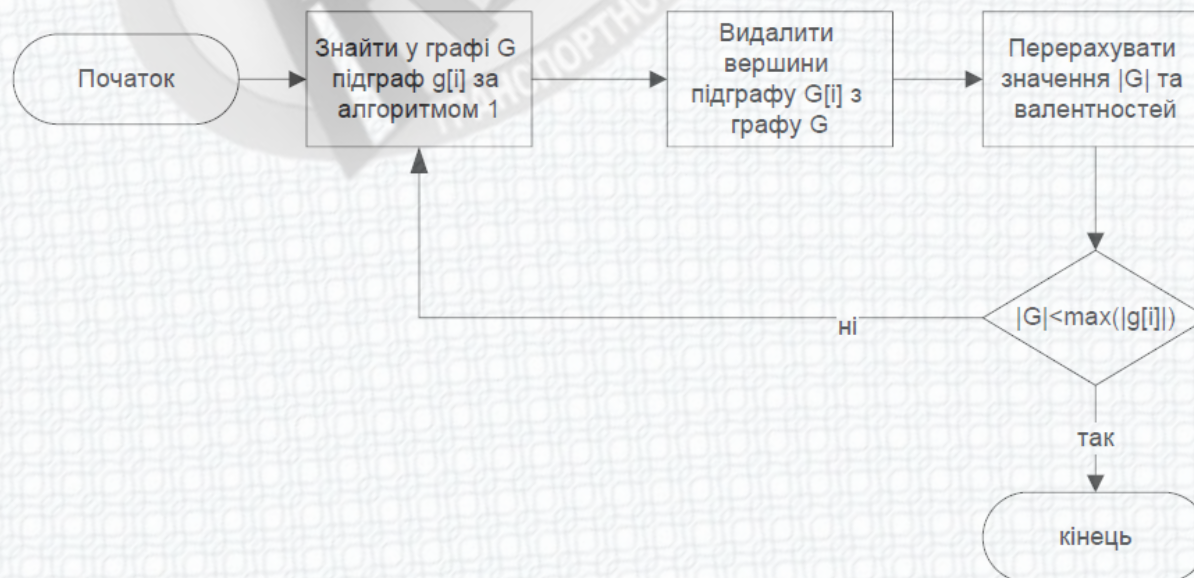
ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ СВІТЛОФОРНОГО ЦИКЛУ ТА РЕЖИМУ РЕГУЛЮВАННЯ

7

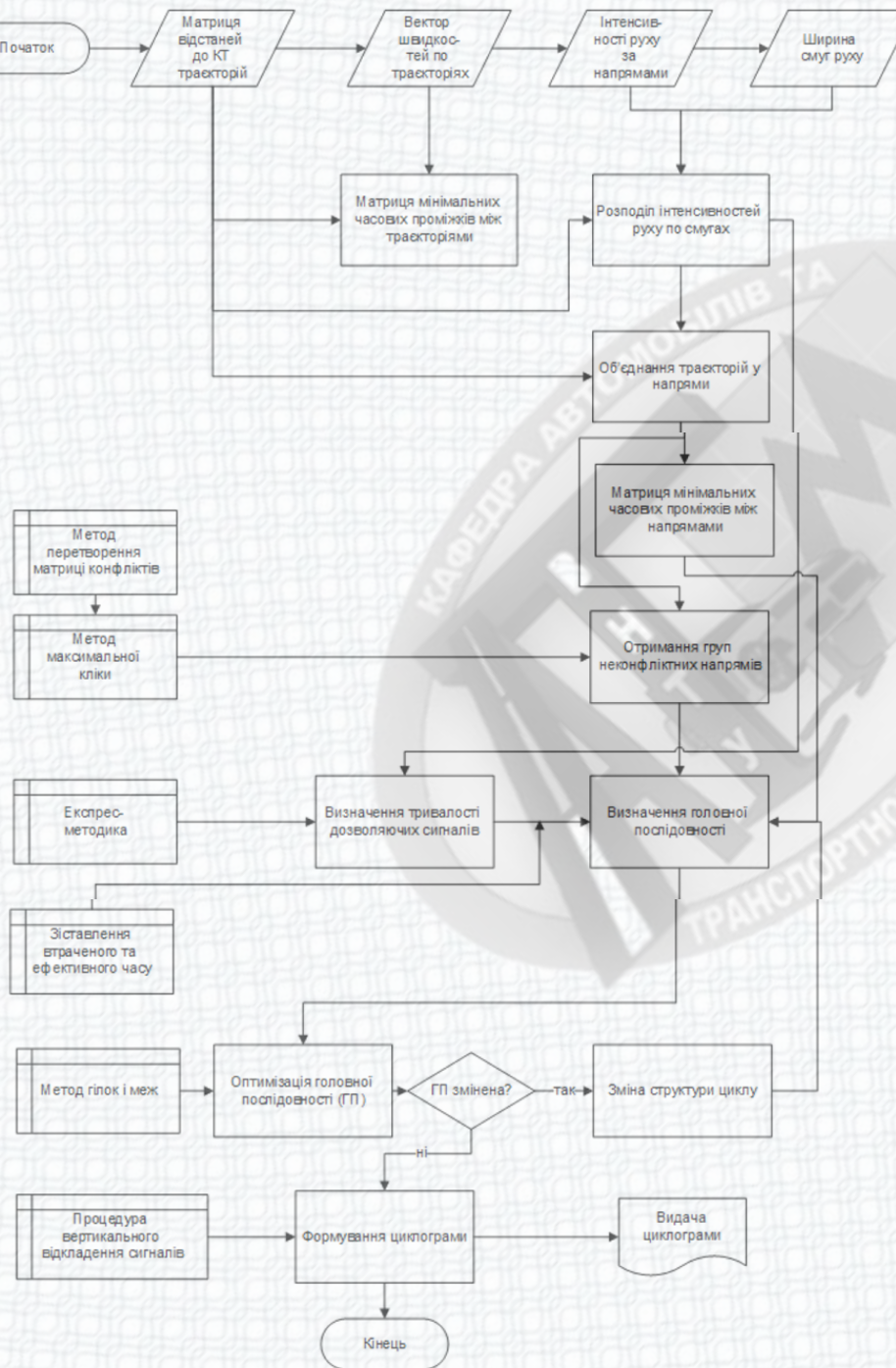
Матриця мінімальних часових проміжків

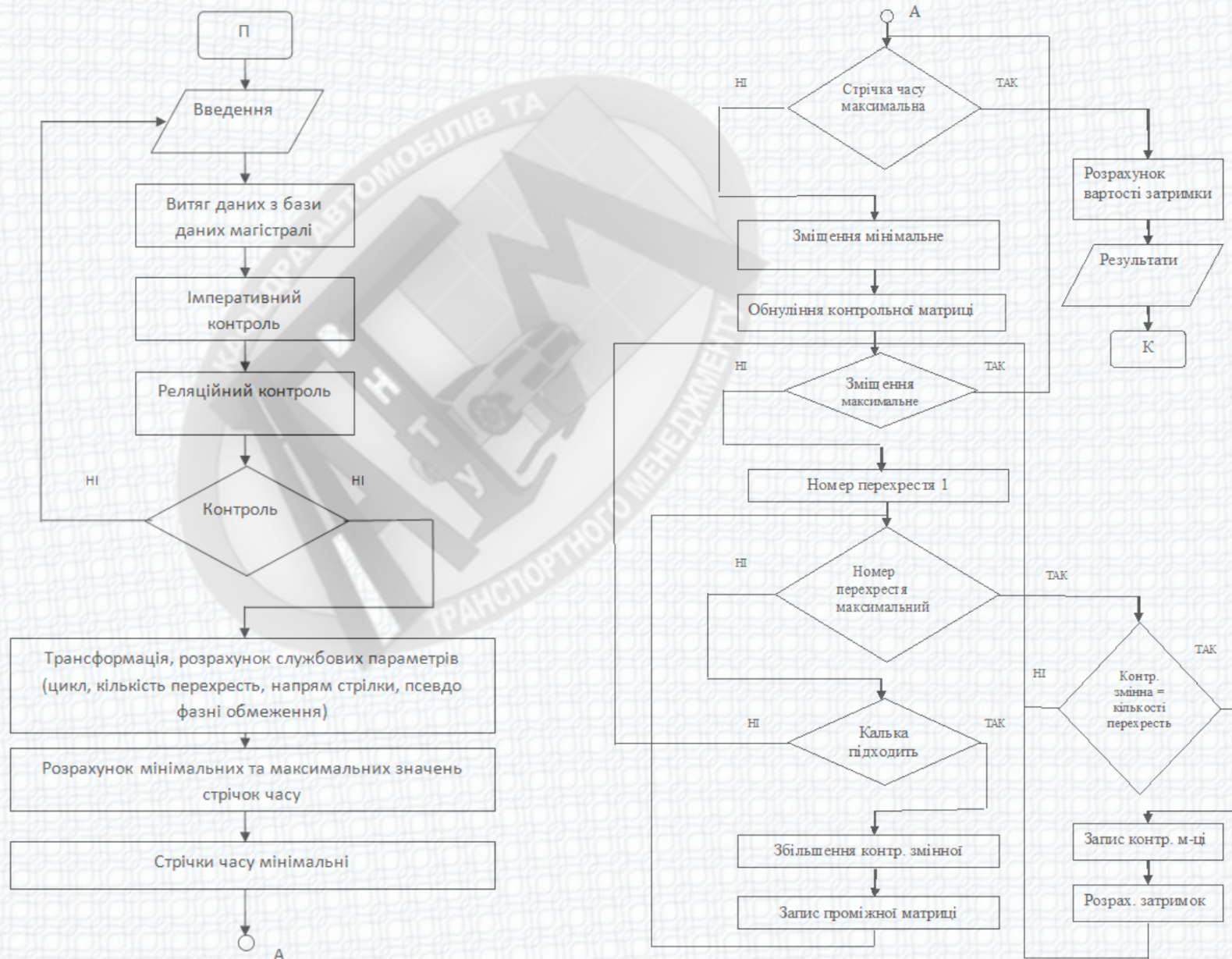
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	9	10	0	6	7
2	0	0	11	11	7	0	7
3	10	7	0	0	7	9	9
4	7	10	0	0	6	8	6
5	0	7	8	7	0	0	9
6	7	0	10	9	0	0	9
7	12	8	8	9	6	8	0

Алгоритм розширеної ітерації з видаленням



АЛГОРИТМ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ



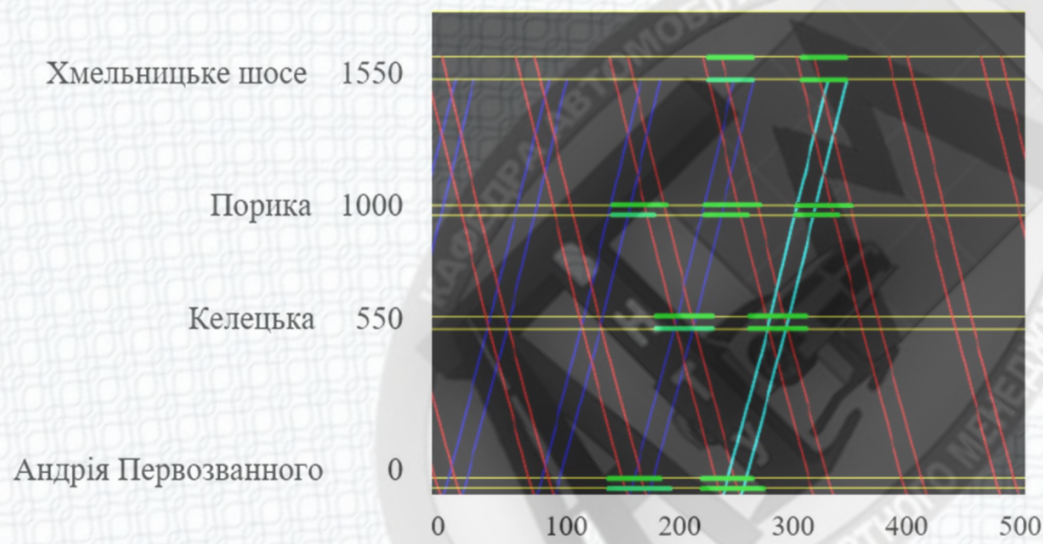


АЛГОРИТМ КООРДИНОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ

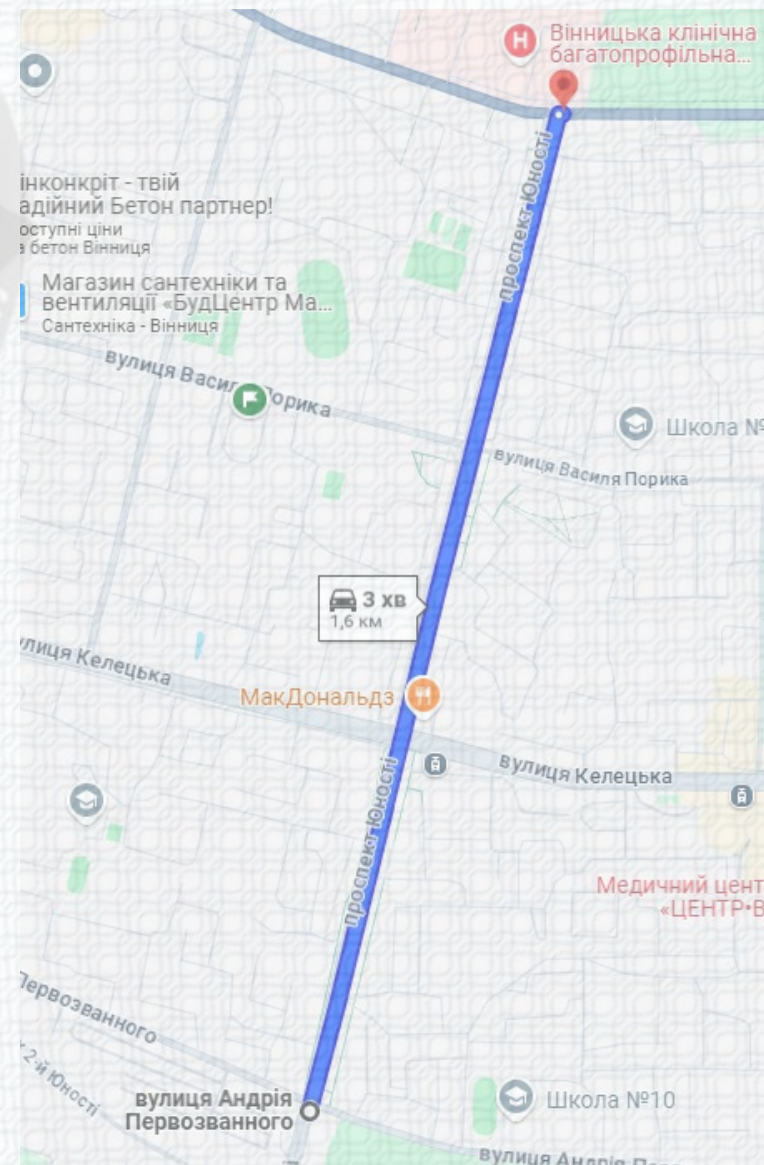
Результатом проведених розрахунків за алгоритмом координованого регулювання транспортних потоків, є накреслений графік координації, що містить параметри плану координованого регулювання

- Для кожного перехрестя наводиться порядок слідування груп безконфліктних напрямів, що забезпечує проходження щільної групи транспортних засобів у межах часового коридору.
- Як результат зменшується час руху транспортного засобу, його витрата палива та кількість шкідливих викидів відпрацьованих газів, а саме головне покращується безпека руху на автомобільних дорогах.

ГРАФІК КООРДИНОВАНОГО СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПО ПРОСПЕКТУ ЮНОСТІ М. ВІННИЦЯ



Прогнозовані загальні витрати на виконання та впровадження результатів науково-дослідної роботи склали 298893,06 грн.



У магістерській кваліфікаційній роботі отримані такі основні результати:

1. Проведено аналіз існуючих методів синтезу структури циклу світлофорного регулювання, виявлено необхідність їх вдосконалення та перегляду основних підходів до реалізації. Запропоновано покращений підхід до розрахунку режимів роботи світлофорів для окремих напрямків, що дозволяє повністю автоматизувати процес визначення параметрів світлофорного режиму як для локальних, так і для координованих перехресть.

2. Розроблено адаптивний механізм формалізації схем руху транспортних засобів і пішоходів, який дозволяє у формальному вигляді описати весь набір характеристик, що надалі використовуються для зручної комп'ютерної обробки під час визначення структури та параметрів оптимізованого режиму світлофорного регулювання.

3. Сформульовано принципи оптимізації структури циклу обслуговування напрямків регулювання, засновані на графовій моделі, побудованій з матриці формалізації руху на перехресті. Порядок чергування напрямків, що забезпечує мінімальну тривалість циклу, визначено шляхом розв'язання задачі комівояжера. Встановлено оптимальну структуру світлофорного циклу, уточнено параметри режиму регулювання, а також вдосконалено метод визначення тривалості перехідних інтервалів, що дозволило скоротити реальні часові інтервали між дозволяючими сигналами світлофорів.

4. Спрогнозовані витрати на проведення науково-дослідної роботи по вдосконаленню світлофорного регулювання на ділянці між перехрестями проспект Юності – вул. Андрія Первозванного та проспект Юності – Хмельницьке шосе. Загальні витрати становлять 298893,06 грн.

Додаток Б (обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА
НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ**

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Підвищення пропускної здатності вулично-дорожньої мережі проспекту Юності міста Вінниці вдосконаленням світлофорного регулювання

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра автомобілів та транспортного менеджменту
(кафедра, факультет)

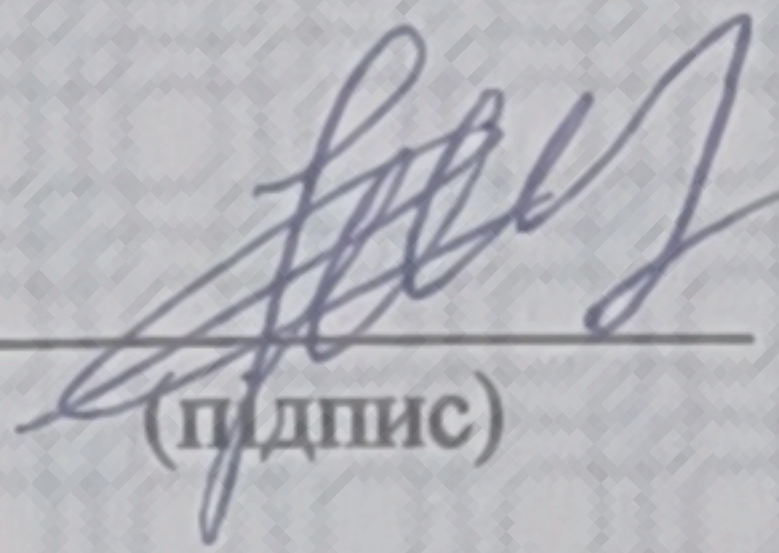
Показники звіту подібності Turnitin

Оригінальність 84% Схожість 16%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- ☒ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
- ☐ 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

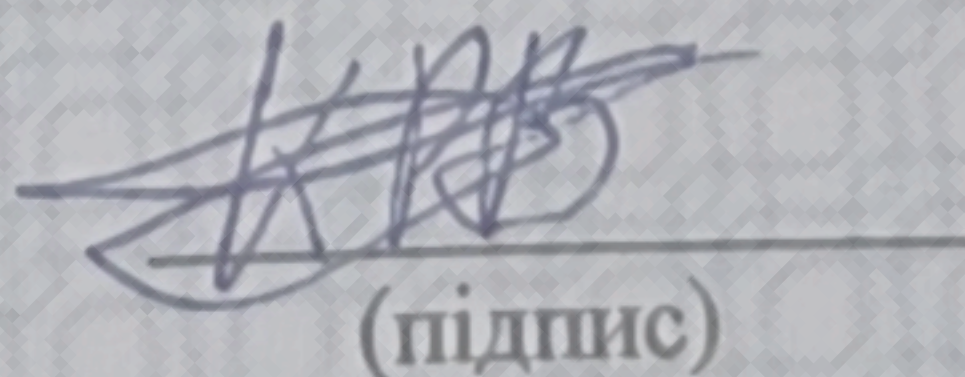
Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Цимбал О.В.
(прізвище, ініціали)

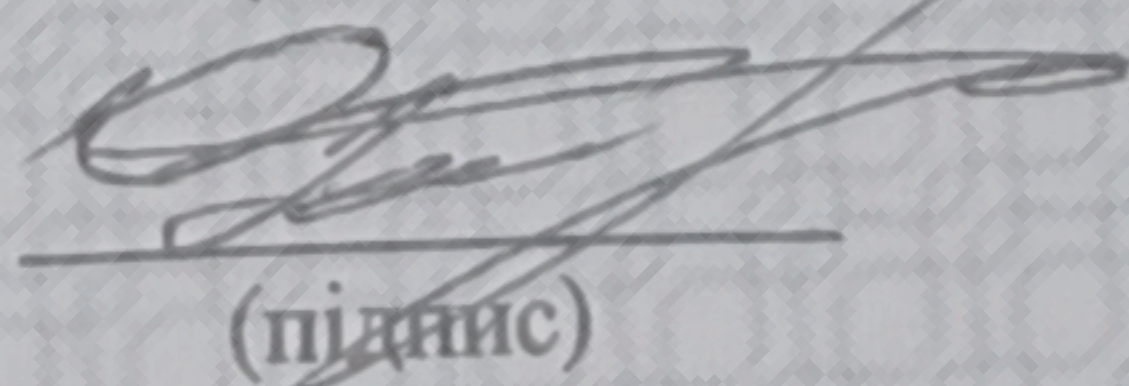
Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Turnitin щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Кретюк Р.В.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Галушак О.О.
(прізвище, ініціали)