

**Міністерство освіти і науки України  
Національний транспортний університет**

**На правах рукопису**

**Трушевський Вячеслав Едуардович**

**УДК 656.13**

**УДОСКОНАЛЕННЯ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПРИ  
ОРГАНІЗАЦІЇ РУХУ ЗА ОКРЕМИМИ НАПРЯМКАМИ**

**05.22.01 – транспортні системи**

**дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Київ - 2015**

## ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	4
Вступ.....	5
1 Сучасні методи управління світлофорними об'єктами.....	10
Висновки за розділом 1 .....	30
2 Синтез структури та визначення елементів циклу при управлінні за окремими напрямками .....	31
2.1 Формалізація схеми руху на перехресті .....	31
2.2 Визначення перехідних інтервалів.....	34
2.3 Зв'язок між основними тактами та перехідними інтервалами .....	39
2.4 Синтез структури світлофорного циклу.....	41
2.4.1 Розподіл базисних напрямів.....	41
2.4.2 Доповнення груп неконфліктних напрямів.....	54
2.5 Формування режиму регулювання.....	55
2.6 Визначення тривалостей елементів світлофорного циклу за наявнос- ті пішохідних напрямів .....	57
2.7 Приклад формування режиму регулювання при управлінні світло- форним об'єктом за окремими напрямками.....	63
Висновки за розділом 2 .....	69
3 Управління світлофорною сигналізацією за окремими напрямками.....	70
3.1 Застосування підходу до управління за окремими напрямками в осо- бливих умовах дорожнього руху.....	70
3.1.1 Застосування фазоподібних інтервалів .....	70
3.1.2 Застосування <u>переходоподібних</u> інтервалів.....	76
3.1.3 Визначення тривалостей елементів циклу для гарантованого пе- репуску пішоходів.....	83

3.2 Адаптація підходу до управління за окремими напрямками до сучасних програмно-апаратних засобів АСУДР .....	89
3.2.1 Забезпечення перепуску тролейбусів.....	89
3.2.2 Забезпечення перепуску трамваїв .....	93
3.2.3 Перехідні алгоритми між «жовтим миготінням» та режимом зміни сигналів .....	98
Висновки за розділом 3.....	105
4 Програмний комплекс (САПР) для автоматизованого проектування режимів світлофорного регулювання при управлінні за окремими напрямками .....	106
4.1 Програмний засіб «Кросроуд».....	106
4.2 Використання програмного комплексу для конфігурування СБПСС при управлінні рухом за окремими напрямками.....	113
4.3 Алгоритм програмного комплексу при визначенні параметрів регулювання .....	117
4.4 Розрахунок режимів координованого регулювання за допомогою програмного комплексу «курс-13» .....	118
Висновки за розділом 4.....	130
Висновки по роботі.....	131
Перелік посилань .....	133
Додаток А – Характеристики світлофорних режимів на перехрестях, де запроваджено результати досліджень.....	143
Додаток Б – Копія акту про запровадження результатів наукового дослідження.....	145
Додаток В – Копія свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір	147
Додаток Г – Копія патенту на корисну модель.....	149

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АСУДР** – автоматизована система управління дорожнім рухом;
- ВДММ** – вулично-дорожна мережа міста;
- КТ** – конфліктна точка;
- ММТ** – матриця можливих траєкторій;
- ММЧП** – матриця мінімальних часових проміжків;
- МЧП** – мінімальний часовий проміжок;
- НКТ** – найвіддаленіша конфліктна точка;
- ОДР** - організація дорожнього руху;
- ОТ** – основний такт;
- ІІ** – перехідний інтервал;
- САПР** – система автоматизованого проектування;
- СБПСС** – спеціальний блок перемикання світлофорних сигналів;
- СФР** – світлофорне регулювання;
- ТЗ** – технічний засіб.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Вдосконалення світлофорного регулювання дорожнього руху за допомогою автоматизованих систем – перспективний напрям до більш повного використання пропускну́ї спроможності вулично-дорожньої мережі у містах та зменшення аварійності через коригування режимів руху транспортних засобів і пішоходів.

Цей напрям є значно менш витратним порівняно із будівництвом транспортних розв'язок та об'їзних магістралей, дозволяє зменшувати затримки учасників дорожнього руху, зменшувати кількість викидів відпрацьованих речовин від двигунів внутрішнього згоряння у навколишнє природне середовище, а також позитивно впливає на кількість і важкість дорожньо-транспортних пригод за рахунок забезпечення руху в конфліктних зонах.

Найбільш розповсюдженою методикою розрахунку режимів світлофорного регулювання є пофазовий роз'їзд транспортних засобів та пішоходів з подальшим визначенням тривалостей елементів світлофорного циклу для всіх напрямів, що входять до однієї фази регулювання.

При цьому допускається ряд умовностей, що знижують ефективність світлофорного регулювання, оскільки не враховуються резерви часу, які виникають через різницю рівнів завантаження дорожнім рухом різних напрямів регулювання та негативно впливають на безпеку руху через неточне визначення часових проміжків, протягом яких транспортні засоби та пішоходи завершують рух через перехрестя та готуються його розпочати.

Внаслідок цих недоліків утворюються ненасичені фази регулювання, а корекція тривалостей дозволяючих сигналів призводить до значного зростання тривалості циклу регулювання, що, в свою чергу, провокує передзатоворі стани та погіршення рівня зручності дорожнього руху.

Отримані в дисертації результати системних досліджень, які спрямовані

на підвищення ефективності світлофорного регулювання руху автомобілів і пішоходів, а також маршрутних транспортних засобів, дали можливість вдосконалити підхід до управління дорожнім рухом при його організації за окремими напрямками.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконувалась відповідно до Програми науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України за пріоритетними напрямками «Транспортні технології», «Безпека дорожнього руху» за темою «Методологія управління процесами перевезень і безпекою дорожнього руху в транспортних системах України» (номер державної реєстрації 0111U000099) на кафедрі «Транспортні системи та безпека дорожнього руху» НТУ; «Концепції розвитку транспортно-дорожнього комплексу України на середньостроковий період та до 2020 року» Міністерства інфраструктури України; «Державною цільовою програмою підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2016 року».

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є підвищення ефективності світлофорного регулювання на основі розробки і впровадження управління транспортними та пішохідними потоками за окремими напрямками та визначення параметрів світлофорного режиму за умови утворення цілісної структури світлофорного циклу, оптимальної з точки зору безпеки дорожнього руху та зменшення непродуктивної затримки його учасників перед регульованою ділянкою вулично-дорожньої мережі.

Задачі дослідження:

- провести аналіз прогресивних методів синтезу структури циклу світлофорного регулювання і визначення його складових;
- провести адаптивну формалізацію схеми руху транспортних засобів та пішоходів на регульованому перехресті;
- розробити принципи оптимізації структури світлофорного циклу з уточненням параметрів режиму регулювання і порядку визначення тривалості пе-

рехідних інтервалів;

- провести адаптацію управління світлофорними об'єктами до сучасних програмно-апаратних засобів АСУДР;

- розробити алгоритм визначення керуючих параметрів світлофорного регулювання на основі масиву вихідних даних.

*Об'єктом дослідження є рух транспортних і пішохідних потоків на регульованих перехрестях.*

*Предметом дослідження є закономірності зв'язку між характеристиками дорожнього руху, дорожніми умовами і параметрами світлофорного регулювання на перехрестях.*

*Методи дослідження:* системний аналіз, системотехніка, а також методи математичного програмування.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

Вдосконалений підхід до визначення мінімальних часових проміжків між дозволяючими світлофорними сигналами на основі розробленої траєктно-матричної схеми формалізації руху транспортних засобів та пішоходів на регульованому перехресті, що дозволяє більш повно відображати вхідні характеристики і мінімізувати часові проміжки між перепуском конфліктних напрямків, внаслідок чого підвищується безпека руху та зменшується втрачений час у циклі регулювання.

Розроблені принципи оптимізації структури циклу обслуговування напрямків, яка здійснюється на основі графу, утвореного з матриці формалізації руху на перехресті, при цьому визначення порядку чергування напрямків, що визначає мінімальну тривалість циклу, зводиться до розв'язання «задачі комівояжера».

Вдосконалені алгоритми управління світлофорною сигналізацією на перехресті при організації руху транспортних та пішохідних потоків за окремими напрямками з врахуванням оптимальних співвідношень між дозволяючими світлофорними сигналами та мінімальними часовими проміжками кон-

фліктних напрямів регулювання.

Формалізовані умови визначення параметрів режиму світлофорного регулювання з розщепленими фазами і корекції елементів світлофорних циклів з метою гарантування безпеки руху пішоходів.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Вдосконалено підхід до розрахунку режимів світлофорної сигналізації за окремими напрямками, що дозволяє повністю автоматизувати процес визначення параметрів світлофорного режиму для локальних та координованих перехресть від введення початкових даних до програмування дорожнього контролера (САПР).

З метою оптимізації параметрів світлофорного регулювання на об'єктах, де наявний рух електричного транспорту, запропоновано моделі транспортних детекторів на основі стрілочних переводів.

Проведено впровадження результатів дослідження на 15 перехрестях у м. Запоріжжі, що підтверджується актом впровадження на базі ПрАТ «СМЕП «Символ» (додаток Б).

**Особистий внесок здобувача.** Одержані автором результати є самостійним внеском у розробку задачі управління дорожнім рухом за окремими напрямками. Ідеї та думки, що належать співавторам публікацій, не використовуються у матеріалах дисертації.

Особисто автором опубліковано дві роботи в наукових фахових виданнях [80, 84]. Автору належать усі наукові результати, що виносяться на захист. У публікаціях у співавторстві [78, 79, 82, 85, 86] особистий внесок здобувача полягає в наступному:

- визначенні основних напрямів вдосконалення існуючих підходів до управління світлофорною сигналізацією [78];

- визначенні кількісних співвідношень між характеристиками руху пішоходів та елементами світлофорного циклу, що безпосередньо впливають на безпеку їх руху [79];



- формалізації представлення дорожньо-транспортної ситуації на перехресті та способів узгодження пофазового способу управління та організації руху за окремими напрямками [82];

- визначенні підходу до корекції основних тактів регулювання [85];

- аналізі дорожньо-транспортної ситуації, що виникає при зміні режимів (програм) світлофорного регулювання [86].

### **Апробація результатів дисертації.**

Основні положення дисертації доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях Національного транспортного університету (2013 р.) [83], Запорізького національного технічного університету (2014 р.) [81], на III міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми підвищення рівня безпеки, комфорту та культури дорожнього руху» (2013 р., Харків) [87]. Розроблені підходи апробовані у проектах організації дорожнього руху у м. Запоріжжі, застосовуються у навчальному процесі в Запорізькому національному технічному університеті в дисципліні «автоматизовані системи управління дорожнім рухом».

**Публікації.** По темі дисертації опубліковано 7 статей в спеціалізованих наукових журналах, тези міжнародної конференції (у тому числі 3 – у журналах, що входять до наукометричних баз), 5 тез науково-технічних конференцій, отримано свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір - комп'ютерну програму «Курс-13» додаток В), патент на корисну модель пристрою автоматичного регулювання руху трамваїв (додаток Г).

## РОЗДІЛ 1

### СУЧАСНІ МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ СВІТЛОФОРНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

У зв'язку зі зростанням рівня автомобілізації у великих і значних містах набуває важливості проблема недостатньої пропускної здатності здатності вулично–дорожньої мережі, що призводить до утворення дорожніх заторів та є побічною причиною багатьох дорожньо-транспортних пригод.

Передусім, проблеми виникають в місцях перетину і злиття транспортних потоків в одному рівні, а також у місцях взаємодії транспортних і пішохідних потоків. Відповідно до існуючої практики, у випадках, коли на перехресті або пішохідному переході інтенсивності руху конфлікуючих транспортних та (чи) пішохідних потоків досягають певних значень, на ньому вводиться світлофорне регулювання [26, 51,55]. Однак, введення регулювання не виключає застосування інших заходів організації дорожнього руху, що мають оперативний та архітектурно-планувальний характер. Зокрема, до таких належить зміна кількості смуг та напрямку руху ними, заборона та віднесення окремих маневрів, спеціалізація смуг та каналізування руху, будівництво островців безпеки, введення однобічного руху та інші.

Ефективність використання цих прийомів суттєво зростає, якщо супроводжується адекватною і своєчасною зміною режимів світлофорного регулювання. Однак, зважаючи на розміри сучасних міст, застосування мережевих систем координації та велику кількість світлофорних об'єктів, необхідність автоматизації розрахунку параметрів світлофорного регулювання та програмування дорожніх контролерів є нагальною потребою.

Однією з основних переваг світлофорної сигналізації над іншими засобами регулювання дорожнього руху є можливість постійної зміни світлофорного режиму відповідно до дорожньо-транспортної ситуації в зоні регулювання.

Отже, виникає потреба автоматизованого визначення параметрів світлофорного регулювання шляхом комп'ютеризації розрахунків з метою їх безпомилкового проведення та отримання результатів протягом короткого часу.

Питання оптимізації режимів світлофорного регулювання розглядали вітчизняні та іноземні науковці, зокрема Ф. Вебстер, Х. Іносе, В. Поліщук, В. Єресов, О. Дзюба, В. Кременець, М. Печерський, Д. Самойлов, М. Фішельсон, Б. Четверухін, В. Капітанов, Є. Рейцен [6, 12, 25, 29, 34, 43, 44, 54, 62, 69, 75, 77] та інші.

На рисунку 1.1 наведено скрін одного з вікон програми конфігурації дорожнього контролера ДК-01. Програма дозволяє програмувати контролер шляхом перезапису інформації у флеш-пам'яті електронного чіпа, тобто сам процес перепрограмування є дуже швидким. Проблема полягає у тому, що конфігурація світлофорного режиму задається вручну шляхом введення параметрів для кожної фази та кожного напрямку регулювання. Велика кількість значень, що вводяться вручну, збільшує імовірність виникнення помилок.

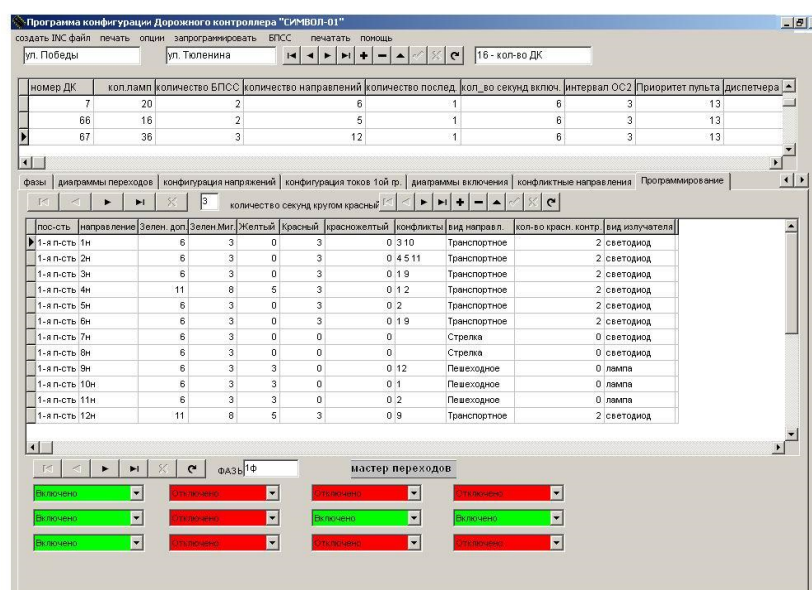


Рисунок 1.1 – Вигляд робочого вікна програми конфігурації дорожнього контролера

На рис. 1.2 наведено діаграму перехідних інтервалів, від якої відрізняється від рекомендованих схем зображення циклограм та містить лише фрагмент зображення структури циклу.

фаза	номер секунды	1 БПСС 1-е пол секунды	1 БПСС 2-е пол секунды	2 БПСС 1-е пол секунды	2 БПСС 2-е пол секунды
1ф	0	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8
1ф	1	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8
1ф	2	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8
1ф	3	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8
1ф	4	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8
1ф	5	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8
1ф	6	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8
2ф	0	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8
2ф	1	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8
2ф	2	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8
2ф	3	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8
2ф	4	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8
2ф	5	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8
2ф	6	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8
2ф	7	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8
2ф	8	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8
2ф	9	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8
2ф	10	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8
2ф	11	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8
3ф	0	1 1 2 2 3 3 4 4	1 1 2 2 3 3 4 4	5 5 6 6	7 7 8 8

Рисунок 1.2 – Вигляд діаграми перехідних інтервалів програми конфігурації дорожнього контролера

Можна констатувати, що для ефективного використання можливостей світлофорного регулювання як оперативного засобу для управління дорожнім рухом у великих містах, програмно-апаратні можливості технічних засобів АСУДР повинні забезпечувати максимальну автоматизацію всіх операцій.

Сучасне обладнання автоматизованих систем управління дорожнім рухом дозволяє здійснювати управління світлофорними сигнальними пристроями за пофазовим методом та за окремими напрямками регулювання [44]. Головним фактором, що визначає технічну можливість здійснювати управління світлофорними пристроями є функціональність дорожнього контролера. Дорожній контролер – це електронний або електромеханічний пристрій, що забезпечує відповідно за заданого режиму (режимів) перемикання світлофор-

них сигналів шляхом подання електричної напруги на лінії живлення випромінювачів світла у світлофорах.

Зазвичай сучасний контролер має функціональну схему, що її зображено на рис. 1.3. Мікропроцесорний блок управління програмується за допомогою ЕОМ таким чином, аби контролер виконував команди, що надходять по лініях зв'язку, перетворюючи їх в електричні сигнали для світлофорів, передавав необхідну телеметричну інформацію. Також програмно та апаратно виконується багаторівневий контроль відповідності послідовності світлофорних сигналів нормативним вимогам безпеки дорожнього руху, реалізується принцип пріоритетності управління на локальному та вищих рівнях з урахуванням можливості ручного управління, виклику фаз детекторами та пішоходами через табло.

При цьому програмна та апаратна частина контролера повинні становити єдину стійку та збурюючих факторів надійну структуру. В такому випадку застосування пофазного принципу управління роботою світлофорного об'єкту є простішим за управління окремими напрямками регулювання, хоча останній спосіб не вимагає жодних змін в апаратній частині. Фазове управління спрощує процедуру програмно-апаратного контролю відсутності одночасного ввімкнення дозволяючи сигналів різних напрямів регулювання та спрощує відпрацювання перехідних інтервалів.

Розрахунок локальних режимів світлофорної сигналізації при пофазному принципі управління включає в себе визначення структури світлофорного циклу (введення напрямів у фази регулювання та встановлення порядку чергування фаз) та розрахунок тривалостей елементів світлофорного циклу (основних тактів та перехідних інтервалів).

Визначення тривалості циклу та основних тактів регулювання засноване на зіставленні фактичної інтенсивності рухові на підходах до перехрестя й пропускної спроможності (потокам насичення) цих підходів. Тому ці параметри необхідно розглядати у якості основних вихідних даних розрахунку. По-

слідовність розрахунку тривалості циклу та його елементів показано на рисунку 1.4.

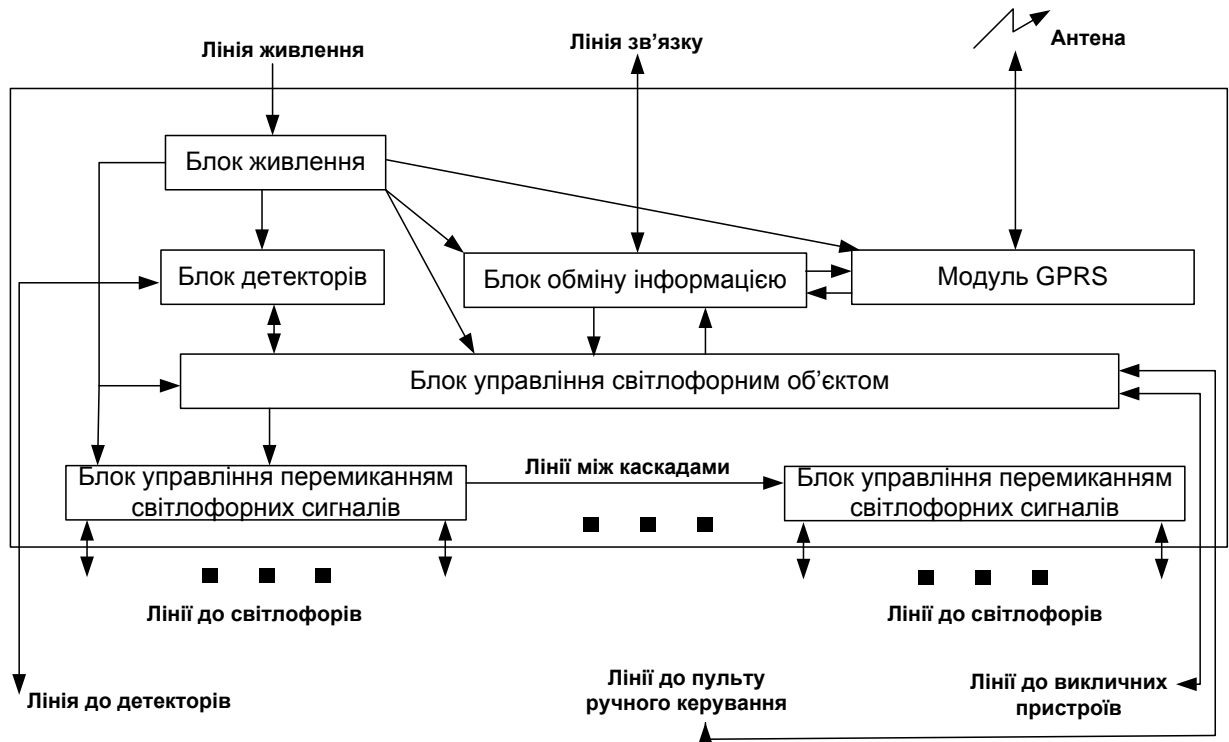


Рисунок 1.3 – функціональна схема дорожнього контролера

Основні принципи пофазного роз'їзду [44]:

1. Прагнути до мінімального числа фаз у циклі регулювання.
2. Враховувати, що допускається сполучати в одній фазі лівоповоротний потік, що конфліктує з визначальним тривалість фази зустрічним потоком прямого напрямку, якщо інтенсивність лівоповоротного потоку не перевищує 120 авт/год.
3. Забезпечувати безконфліктний пропуск пішоходів; у крайньому випадку пішохідний і конфлікуючий з ними транспортні потоки, що повертають, можна пропускати в одній фазі, якщо інтенсивність пішохідного потоку не перевищує 900 чіл/год., а транспортних потоків, що повертають – не перевищують 120 авт/год.

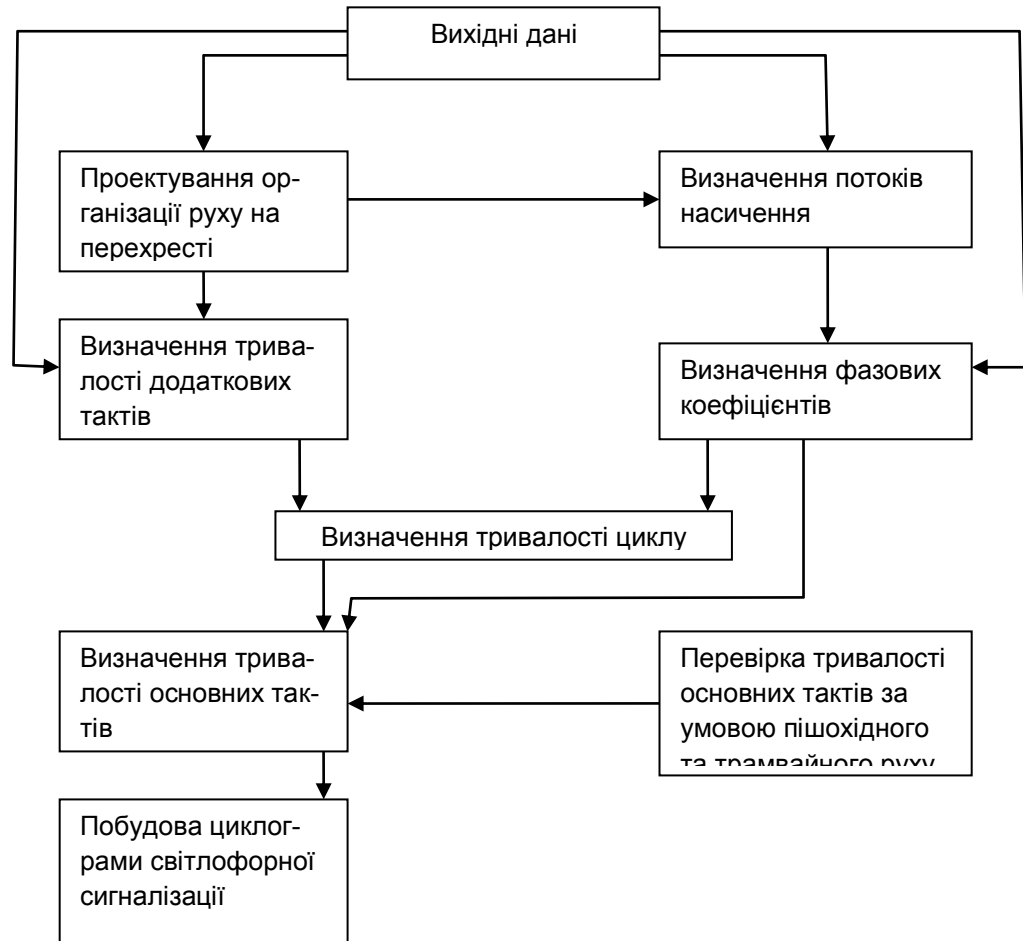


Рисунок 1.4 – Послідовність розрахунку тривалості циклу та його елементів

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 од/год.

6. При широкій проїзній частині і наявності острівців безпеки варто розглядати можливість поетапного переходу пішоходами вулиці протягом двох наступних друг за другом фаз регулювання.

Основний такт є частиною циклу регулювання, пропорційної фазовому коефіцієнту, розрахункове значення якого відповідає максимальному відношенню інтенсивності до потоку насичення для різних підходів до перехрестя

в даній фазі. Перехідний інтервал, з огляду на його призначення, залежить від довжини транспортного засобу, визначається планувальною характеристикою перехрестя й швидкістю руху транспортних засобів у його зоні. Дані про перехідні інтервали (втраченому часі) і розрахункових фазових коефіцієнтах лежать в основі розрахунку тривалості циклу регулювання, що може бути скоректована з урахуванням вимог пішохідного або трамвайного руху. Завершальним етапом роботи є побудова циклограми світлофornoї сигналізації, на якій відображаються тривалість і порядок чергування сигналів.

Однак, деякі процедурні моменти при застосуванні такого методу не визначені чітко, внаслідок чого виникають практичні проблеми, зокрема, на етапі визначення структури циклу світлофornoго регулювання.

Наприклад, П.А. Полозенко у своїй роботі «Комплексна оцінка режимів світлофornoго регулювання на перехрестях» [66] визначає кілька принципів, що можуть бути застосовані при визначенні структури циклу світлофornoго регулювання.

В процесі проведення числових експериментів було виявлено, що при певних умовах, які визначаються способом розрахунку додаткових тактів (перехідних інтервалів) циклу СФР, такий параметр режиму СФР, як втрачений у циклі час ( $L$ ) залежить не лише від загальної кількості фаз (тактів), а також від черговості цих фаз (тактів) у циклі. Так при врахуванні часу руху транспортного засобу до найдалшої конфліктної точки (НКТ) перетинання в кожному з додаткових тактів, величина  $L$  змінюється на 15-20% у залежності від загального числа фаз (тактів) регулювання та їх черговості.

Експериментально було доведено, що:

- існує оптимальна черговість фаз (тактів), при якій значення втраченого часу у циклі регулювання є мінімальним;
- при збільшенні кількості фаз (тактів), і як наслідок - кількості варіантів черговості фаз, діапазон  $\Delta L = L_{max} - L_{min}$  збільшується;
- втрачений час досягає свого мінімального значення при черговості



фаз, при якій сума відстаней до НКТ мінімальна [66].

Останнє твердження можна заперечити на такому прикладі. Напрями 1 та 2 конфліктні між собою та неконфліктні лише з напрямом 3. Тривалість дозволяючого сигналу за напрямом 3 значно більша, ніж за напрямками 1 та 2. При цьому, якщо мінімальний проміжок між напрямками 1 та 2 менше різниці тривалості напрямку 3 та суми тривалостей напрямів 1 та 2, його тривалість не впливає на оптимальну тривалість циклу регулювання (рис. 1.5).

Також, в [66] наводяться методи, на основі яких можливо оптимізувати структуру циклу світлофорного регулювання за критерієм мінімізації тривалості втраченого часу.

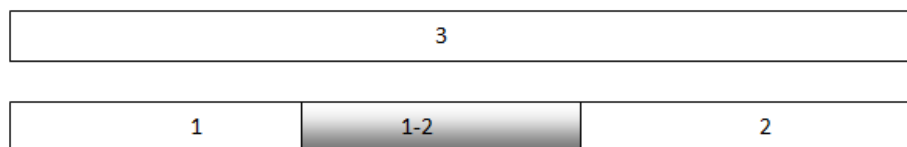


Рисунок 1.5 - Фрагмент структури циклу світлофорного регулювання

Умови оптимізації режиму СФР за критерієм мінімального втраченого часу у циклі регулювання записуються як:

$$L(P_m) = \min, \quad (1.1)$$

$$\text{де } P_m = (m-1)!. \quad (1.2)$$

- кількість можливих варіантів черговості та сигнальних груп (фаз) регулювання при обмеженнях:

$$2 \leq m \leq m_{max}. \quad (1.3)$$

При цьому вираз для визначення втраченого часу у циклі має вигляд:

$$L = \sum_{i=1}^m (t_{ni} - 1), \quad (1.4)$$

де  $t_{ni}$  – значення додаткових тактів (перехідних інтервалів) для відпові-

дних основних тактів, що беруть участь у даному циклі регулювання, с.

У свою чергу, тривалості додаткових тактів (перехідних інтервалів)  $t_{ni}$  є функціями параметрів транспортних потоків і дорожніх умов:

$$t_{.i} = \delta + \frac{V}{2d} + \frac{(l_a + l'_{HKT})}{V} - \left( \frac{2l''_{HKT}}{a} + 3 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.5)$$

де  $\delta$  – термін реакції водія, с;

$V$  – швидкість на напрямку перехрестя, м/с;

$d$  – комфортне уповільнення, м/с<sup>2</sup>;

$l_a$  – довжина автомобіля, м;

$l'_{HKT}, l''_{HKT}$  – відповідно дистанції від стоп-лінії до НКТ у фазі, м;

$a$  – максимальне прискорення при розгоні автомобіля, м/с<sup>2</sup>.

Це також накладає обмеження на вираз (1.1). У третьому розділі доведено, що умова оптимізації (1.1) виконується при черговості фаз (сигнальних груп) для якої:

$$\sum_{i=1}^m l_{HKTi} = \min. \quad (1.6)$$

Взагалі, визначення відстані до НКТ (1) виконується експериментально через те, що значення  $l_{HKTi}$  залежить від траєкторії руху транспортних засобів. На траєкторію руху впливають геометричні параметри перехрестя, такі як кут перетину доріг, ширина та кількість смуг руху. Для кожного перехрестя геометричні параметри є індивідуальними і визначити аналітичні закономірності обчислення  $l_{HKTi}$ , які б охоплювали всі види перехресть, досить важко. Проте сучасні комп'ютерні графічні технології дозволяють змодельовати траєкторії руху і визначити  $l_{HKTi}, \sum l_{HKTi}$ . Черговість, що відповідає виразу (1.6) приймається за оптимальну.

Можна зауважити, що у формулі (1.5) не враховано можливість включення до одного напрямку регулювання прямих та поворотних траєкторій руху. Під час руху поворотними траєкторіями швидкість руху зменшується на 30%, але не нижче, ніж до 30 км/год, тому лінійний зв'язок між зменшенням відстаней до НКТ та тривалостей перехідних інтервалів можна заперечити. Крім того, при зміні порядку чергування сигнальних груп за рахунок зміни втраченого часу відбувається зміна тривалостей дозволяючих сигналів, яка накладається на нову структуру перехідних інтервалів, утворюючи рекурсивну залежність.

У [51] йдеться, що для оптимізації структури циклу за критерієм мінімізації втраченого часу слід розглядати лише певні перехідні інтервали з усіх можливих комбінацій напрямів світлофорного регулювання, наведено визначення поняття критичного перехідного інтервалу як такого, що утворився для відрахування часу, необхідного для роз'їзду критичних конфліктних напрямів регулювання. Критичними напрямками названо конфліктні напрями, перетин яких буде досягнуто через найменший проміжок часу після ввімкнення дозволяючого сигналу в наступній фазі регулювання. Вказано також, що оптимальною з точки зору втраченого часу є послідовність чергування фаз, в якій критичні перехідні інтервали є найменшими за часом.

До недоліків слід віднести те, що визначення критичних перехідних інтервалів відбувається шляхом перебору можливих послідовностей вже сформованих фаз регулювання. У випадку значної кількості напрямів і фаз кількість варіантів збільшується (формула 3.9), тому на перебір витрачається багато часу. Крім того, не враховано, що на складних перехрестях існує кілька варіантів включення напрямів регулювання до фаз. В залежності від вибору цих варіантів змінюються пари критичних напрямів, що, в свою чергу, змінює тривалість критичних перехідних інтервалів.

Слід також розглянути літературні джерела, що наводять математичні методи для визначення оптимальної структури циклу світлофорного регулювання.

У [68] зазначено, що існуюча матрична модель конфліктів між напрямками світлофорного регулювання у циклі достатньо адаптована лише для жорсткого регулювання при обмеженій кількості напрямів у циклі. Проте, в реальних умовах кількість напрямів регулювання визначається для перехрестя одноразово і не змінюється залежно від режимів регулювання, оскільки ця кількість визначає наявність та розташування світлофорних пристроїв на перехресті. Можливо припустити, що в деяких режимах певні напрями будуть змінювати сигнали одночасно (тобто належатимуть до однієї сигнальної групи), проте за рахунок цього розрахункова кількість напрямів може лише зменшуватися, проте не може перевищити кількість смуг на всіх підходах до перехрестя, оскільки для кожного напрямку регулювання повинна виділятися хоча б одна смуга [72].

В статті також запропоновано практичний та наочний метод представлення конфліктності напрямів регулювання за допомогою графа, що відкриває можливість застосування елементів теорії графів для розв'язання поставленої задачі.

Ставиться задача мінімізувати кількість розбивок вихідної множини напрямів на групи (мінімізація кількості фаз світлофорного регулювання) та визначити послідовність руху транспортних засобів у зазначених напрямках. Щодо наведеної аналогії між сигнальними групами та фазами регулювання, то її застосування може бути припустимим лише при визначенні кількості розбивок вихідної множини, оскільки при оптимізації порядку зміни напрямів у циклі, що сформований за принципом сигнальних груп, слід враховувати співвідношення між тривалостями дозволяючих сигналів кожного напрямку та мінімальних часових проміжків від завершення дозволяючого сигналу за одним з конфліктних напрямків до його початку за іншим з напрямів.

Для поділу напрямів регулювання не неконфліктні групи пропонується використати модифікований «жадібний» алгоритм розфарбування графу[46]. Підмножини, що зафарбовані одним кольором насправді відповідають групам неконфліктних напрямків регулювання, тобто можуть бути включені до однієї фази.

Крім запропонованого у [46] методу розфарбування графу, існує більш пристосований для застосування в рамках комп'ютерної програми метод поділу графа на підграфи.

В статті [22] пропонується підхід до розв'язку задачі пошуку максимального повного підграфа в графі. Сама задача, як відомо, є NP-повною, тобто в загальному випадку отримати розв'язок можливо лише перебиранням всіх варіантів. Запропоновані у статті алгоритми дозволяють отримати значення кількості підграфів, наближене до оптимального, при цьому кожен підграф характеризуватиметься максимально високою для даних початкових умов потужністю.

Проблема підвищення ефективності світлофорного регулювання загострюється і за кордоном у містах, що мають транспортні проблеми схожого характеру. За повідомленнями центру організації дорожнього руху Уряду Москви [73] встановлено, що високими темпами у складі АСУДР Москви запроваджуються системи автоматизованого управління рухом, що містять, серед іншого, програмно-апаратні комплекси для забезпечення одно- та двосмугового реверсивного руху зі зміною напрямів пропуску транспорту та кількості задіяних смуг залежно від дорожніх умов та інтенсивності руху, а також застосовується практика переведення двосмугових та трисмугових вулиць, провулків у режим одностороннього руху зі зміною напрямку руху протягом доби залежно від дорожніх умов.

Також широкого застосування набули табло зворотного відліку часу, вмонтовані у секції транспортних та пішохідних світлофорів, а також в окремому виконанні (останні застосовуються у Санкт-Петербурзі, Києві, Москві).

Означені відомості дозволяють стверджувати, що навіть при здійсненні адаптивного регулювання дорожнього руху, встановлена системою тривалість червоного та зеленого сигналів не може коригуватися протягом дії самих сигналів, з чого, за умови застосування методу управління за сигнальними групами, фактично впливає технічна можливість зміни тривалості зеленого та червоного сигналів *лише один раз у циклі регулювання*.

Означений висновок підтверджується тим, що у міських умовах складні перехрестя працюють, як правило, у складі систем координованого регулювання, тому кількаразова зміна параметрів циклу призведе до зміни тривалостей сигналів на інших перехрестях системи і режиму координації.

Задача оптимізації режиму роботи світлофорного об'єкту навіть на локальному рівні є багатокomпонентною, що і підтверджується у [27]: завдання розрахунку керуючих впливів на локальному перехресті є багатоетапною і містить у собі підзавдання: розрахунок перехідних інтервалів; об'єднання напрямків у фази; розрахунок тривалостей сигналів, що дозволяють і забороняють руху; формування циклу управління (стикування що дозволяють і забороняють руху сигналів, перехідних інтервалів).

У роботі [27] вказується, що оперативність автоматизованих систем управління дорожнім рухом забезпечується шляхом зміни тривалості дозволяючого сигналу на основі даних про рух (в основному в системах використовується алгоритм пошуку розриву у потоці); збільшення тривалості дозволяючого сигналу із урахуванням інтересів громадського транспорту; збільшення тривалості дозволяючого сигналу для пішоходів (якщо від них надходить відповідний запит).

Тут слід зазначити, що в умовах координованого регулювання алгоритм пошуку розриву може застосовуватись лише протягом проміжків у циклі регулювання, через які не проходить стрічка безперервного часу, а також потужні потоки позагрупових транспортних засобів. Крім того, всі перераховані дії спрямовуються лише на тривалості дозволяючі і заборонні сигнали.

лів, оминаючи структуру циклу регулювання, У той-же час тривалості перехідних інтервалів на перехрестях з багатосмуговими проїзними частинами досягають мінімальних значень тривалостей основних тактів регулювання, крім того, порядок чергування дозволяючи сигналів впливає на графік координованого регулювання, тому можна зробити висновок, що оптимізаційна робота з параметрами світлофорного регулювання повинна супроводжуватися паралельною оптимізацією структури циклу.

Вказані недоліки у постановці задач оперативного регулювання дорожнього руху на перехресті у роботі [27] відображаються і у математичних моделях для АСУДР, зокрема не вирішується задача оптимального розподілу напрямів регулювання між фазами, визначення фазових коефіцієнтів з урахуванням розділення інтенсивностей руху між частинами дозволяючих сигналів, включених у різні фази та перехідними інтервалами цих фаз.

І.П. Енглезі у [27] зазначає, що одним з напрямів оперативного регулювання дорожнього руху на перехресті є врахування пріоритетів транспорту громадського користування.

Це питання розвивається у роботі [8] Зокрема, йдеться про систему автобусного пріоритету сигналу (АПС), що була впроваджена в багатьох містах світу, транспортну стратегію пріоритету сигналу, що забезпечує ефективний рух автобусів через регульовані перехрестя. Більшість систем АПС не працюють ефективно при русі в мережі з близько розташованою автобусною зупинкою через невизначеність у реальному часі. Більшість автобусних зупинок на магістральних вулицях США має цей тип. Робота [8] показала, що реальний час під'їзду до лінії регулювання від близько розташованих зупинок може бути змодельований із застосуванням методу регресії найменших квадратів. Більш важливим є те, що були розраховані інтервали передбачення, що пов'язані з оцінкою реального часу. Ці інтервали далі були використані в покращеному алгоритмі, що спрямовувався на зменшення негативних ефектів близько розташованих автобусних зупинок на операції АПС.

Поняття автобусного пріоритету сигналу (АПС) було встановлено експериментально на початку 60-х. Дослідження, виконане до 1990 р. забезпечило більшу частину бази для сучасних автобусних систем пріоритету. Мета автобусного пріоритету сигналу полягає в тому, щоб зменшити затримку автобусів на регульованих перехрестях. У поясненнях для спеціального опрацювання автобусів є обґрунтування високого завантаження цих транспортних засобів. Одна з цілей у виборі часу транспортного сигналу полягає у мінімізації повної затримки усіх транспортних засобів на перехресті. Однак, визначення пріоритету у русі з метою зменшення сумарних затримок учасників дорожнього руху буде більш ефективним, якщо враховувати завантаження транспортних засобів пасажирами. Тому надання пріоритету автобусам більш імовірно мінімізує повну затримку людини та максимізує пропускну спроможність, виражену в людино-годинах

Системи АПС можуть бути класифіковані за трьома стратегіями: пасивна, активна та адаптивно-оперативна. Пасивні стратегії працюють безперервно незалежно від того, чи наявний автобус чи ні та не вимагають автобусної системи виявлення. Активні стратегії використовують автобусну систему виявлення для того, щоб виявити автобуси, які підлягають пріоритету. Адаптивно-оперативна стратегія забезпечує пріоритет, одночасно випробовуючи та оптимізуючи задані критерії роботи.

Пасивні стратегії АПС – це спроба покращити автобусні маневри на перехрестях, забезпечення сигналу, вибір часу. Пасивний пріоритет працює незалежно від того, чи наявний автобус, чи ні та не вимагає виявлення автобуса проти напрямку руху, зв'язку регульованих перехресть. Таким чином, пасивні стратегії пріоритету незалежно впливають на автобуси. Одна з пасивних стратегій АПС, що її можна розглянути за сприятливих для автобуса обставинах – це подовження дозволяючого сигналу для автобусів.

Оскільки вибір часу сигналу пристосований для магістральної координації автобусного потоку, рух на другорядних вулицях може зазнавати непотрібної



затримки та зупинки. Відомо, що пасивні стратегії АПС загалом викликають непродуктивні затримки у русі на другорядних напрямках через пріоритетний пропуск автобусів у кожному циклі незалежно від того, чи вони наявні. Інші пасивні стратегії пріоритету:

- регулювання тривалості циклу (за певних обставин, зменшення тривалості циклу для транспортних засобів, що рухаються транзитом приводить до того, що вони обслуговуються частіше, таким чином зменшуючи затримку);

- розщеплення фаз (розщеплення фази пріоритету на багатократні фази, що можуть бути ввімкнені кілька разів впродовж кожного циклу, обов'язково не зменшуючи його тривалість);

- збільшення тривалості фази (збільшення часу зеленого сигналу для напрямку, що призначений для транзитного руху транспортних засобів збільшує імовірність, що транзитні транспортні засоби проїдуть лінію регулювання без зупинки);

- вимірювання кількості транспортних засобів (обмежує число транспортних засобів, що дозволено в системі, в той-же час забезпечує перевагу для автобусів, дозволяючи їм пройти у відведений для них час дозволяючого сигналу).

Активні стратегії АПС надають більшої гнучкості системі управління сигналом, оскільки вони покладаються на певну інформацію відносно місцезнаходження автобуса. Взагалі активні стратегії ПАС краще пасивних тим, що пріоритет надається тільки за наявності автобуса. Ці стратегії – великі інфраструктури, інтенсивніші, ніж пасивні стратегії, тому вони вимагають: 1) пристроїв виявлення, що можуть визначити автобуси, які наближаються на попередньому за напрямом руху перехресті та 2) сучасних дорожніх контролерів, щоб активізувати стратегії пріоритету для надання пріоритету.

Загальні активні стратегії, що їх контролер може виконувати у відповідь на виявлення автобуса: 1) збільшувати тривалість зеленого сигналу в поточній фазі, 2) завершення іншої фази раніше, щоб дати ранній старт автобусу

та 3) вставку додаткової автобусної фази, що дозволить автобусу проходити раніше, ніж відбудеться повернення до регулярного вибору тривалостей. Вибір стратегії, що відповідає вимозі, залежить від того, в який момент циклу виявлено транспортний засіб.

Зелена стратегія збільшення. У цій стратегії тривалість зеленої фази збільшується для автобусів, які наближаються до перехрестя під час зеленого сигналу. Якщо автобус наближається до перетину ближче до завершення інтервалу зеленого для його проходу, поточний інтервал може бути збільшений, поки транспортний засіб не мине перехрестя. Без збільшення тривалості сигналу транспортному засобу довелося б чекати зеленого в наступному циклі, таким чином збільшувалася б його затримка.

Рання зелена стратегія. Коли автобуси виявлені під час червоного сигналу, неперіоритетна фаза скорочується на вимогу прискорити стартову фазу для руху автобусів. Якщо транспортний засіб досягне світлофора близько кінця червоного інтервалу для його підходу, поточна фаза може бути закінчена раніше, щоб дозволити зеленій фазі для автобуса початися раніше. Ця стратегія часто використовується в чергах, що зменшуються на автобусному підході таким чином, щоб автобус не чекав зникнення черг перед проходженням через перехрестя

Стратегія вставки фази. За стратегією вставки фази надається спеціальна фаза, коли автобус виявлено на попередньому за рухом перехресті. Якщо автобус дістанеться до лінії регулювання всередині червоного періоду його підходу, автобусна фаза вставляється в межах нормальної послідовності сигналу, контролер повертається до нормальної роботи, як тільки автобус минув перехрестя. Рисунок 2-4 ілюструє цю стратегію, де спеціальна фаза вставлена і призначена для автобусів.

Активна стратегія АПС при великому потоці показує, що контроль часто досягається резервуванням нормального режиму в контролерах, що може викликати руйнування системи, якщо вона працює в координованому режи-

мі. Небагато дослідницьких зусиль було зосереджено на стратегіях, що розвиваються, які можуть підтримувати транспортний контролер в прогресивному стані і в той же час забезпечувати пріоритет сигналу автобусам. Стратегії, запропоновані попередніми дослідженнями, регулюють сигнал, параметри якого розраховуються в межах другорядної тривалості циклу, і таким чином підтримується координація сигналу. Це обмеження тривалості циклу обмежує час, що може бути виділений пріоритетній фазі та вимагає більш складного контролю логіки для сигналу, що пристосовується, при розрахунку параметрів в межах циклу.

Описане дослідження вказує на необхідність зміни структури світлофорного циклу у разі застосування активних стратегій у системах пріоритетного пропуску маршрутних транспортних засобів. Сигнал про наближення до лінії регулювання маршрутного транспортного засобу може надійти у будь-який момент, тому прийняття рішення про зміну структури циклу повинно бути автоматизовано.

Окрім зазначених вище параметрів, необхідно також визначати тип транспортного засобу, що наближується та напрям його руху. За цих умов транспортні засоби електричного транспорту суттєво відрізняються від інших, призначених для громадського користування. Тролейбуси та трамваї мають меншу технічну швидкість поблизу перехресть та на перехрестях, що пов'язано із необхідністю проходження кривих ділянок колії і контактного дроту, стрілок, секційних роз'єднувачів та інших спеціальних частин. Таке зменшення швидкості з урахуванням також значних габаритів цих транспортних засобів (особливо при застосуванні зчленованих троллейбусів і трамваїв, трамвайних систем), призводить до необхідності збільшення тривалостей елементів циклу, призначених для пропуску цих транспортних засобів. Найбільш суттєво це позначається на перехідних інтервалах циклу. Тому важливою задачею є виявлення цих транспортних засобів на підходах до перехрес-

тя, визначення заздалегідь напрямів їх подальшого руху та забезпечення пріоритетного пропуску, зважаючи на їх високу пасажиромісткість.

За наявності на перехресті пішохідних напрямів світлофорного регулювання, вони також впливають на параметри світлофорного циклу, оскільки час, що відводиться для перетину проїзної частини пішоходами розраховується з інших міркувань, ніж ті, на основі яких встановлюються значення тривалостей дозволяючи сигналів для руху транспортних засобів.

Невідповідність тривалостей включених в одній фазі дозволяючих сигналів для транспортних засобів та для пішоходів призводять до необхідності проведення корекції тривалостей елементів циклу світлофорного регулювання [1, 4, 10]. Корекція проводиться трьома способами[44]: шляхом збільшення тривалості певного елемента циклу регулювання; шляхом збільшення тривалості групи елементів циклу регулювання та шляхом визначення нових співвідношень між елементами циклу.

Суть першого способу полягає у тому, що тривалість основного такту регулювання збільшується до величини, необхідної для гарантування пішоходам можливості перейти проїзну частину протягом фази регулювання, що є вимогою державного стандарту [26]. Недолік цього способу: у разі наявності широкої проїзної частини з одnobічним рухом тривалість мінімального часового проміжку для пішохідного напрямку може перевищувати нормативне значення, а також ставати визначальною при розрахунку тривалості перехідного інтервалу. Також при застосуванні цього способу не враховується час, необхідний для сходження на проїзну частину кількох рядів пішоходів, немає зв'язку між збільшенням основного такту та перехідного інтервалу для гарантування безпеки пішоходів, відсутня диференціація мінімального часу залежно від тривалості червоного сигналу в кінці перехідного інтервалу.

При застосуванні другого способу корекції тривалості всіх основних тактів регулювання збільшуються пропорційно таким чином, щоб тривалість коригованого основного такту забезпечувала необхідний мінімум часу для

пішоходів. Недоліком цього способу є те, що при значній відмінності визначених для пропуску транспортних засобів тривалостей основних тактів регулювання і при включенні пішохідного напрямку зі значною шириною проїзної частини до фази, для якої розраховану невелику тривалість основного такту відповідно до транспортного завантаження, значення основного такту іншої фази після проведення корекції. Оскільки корекція тривалостей основних тактів регулювання відбувається шляхом їх пропорційного збільшення, то після її проведення сумарна тривалість скоригованих тактів може перевищити 120с.

При проведенні корекції шляхом пошуку нових співвідношень, розв'язується система рівнянь:

$$\begin{cases} T_{\text{ц}}^* = (1,5T_n + 5) / [1 - (y + y^*)] \\ T_o^* = [(T_{\text{ц}} - T_n)y^*] / (y + y^*) \end{cases} \quad (1.7)$$

де  $T_{\text{ц}}$  та  $T_{\text{ц}}^*$  – тривалість циклу регулювання до та після корекції відповідно, с;

$y$  та  $y^*$  – суми максимальних фазових коефіцієнтів фаз, в яких тривалості основних тактів не коригуються та коригуються відповідно;

$T_o^*$  – сума скоригованих тривалостей основних тактів, с;

$T_n$  – втрачений час у циклі регулювання, с.

Розв'язавши її, визначають нову, кориговану тривалість циклу світлофорного регулювання за такою формулою:

$$T_{\text{ц}}^* = B / 2A + \sqrt{B^2 / (4A^2) - C / A}. \quad (1.8)$$

Принцип полягає у розрахунку нового фазового коефіцієнту для фази, до якої включено пішохідний напрям регулювання, таким чином, щоб його значення відповідало збільшеній за рахунок дозволяю чого сигналу для пішоходів три-

валості основного такту світлофорного регулювання. Недолік: процедура визначення коригованих фазових коефіцієнтів еквівалентна введенню псевдо-напрямку регулювання з рівнем завантаження рухом, що відповідає мінімальній тривалості зеленого сигналу для пішоходів.

## **Висновки за розділом 1**

Управління світлофорною сигналізацією за пофазним методом повністю не відповідає задачі оптимізації як головній функції систем автоматизованого управління дорожнім рухом у містах. Чинні принципи групування напрямів у фази призводять до утворення ненасичених проміжків у циклі регулювання і не дозволяє варіювати структуру циклу відповідно до швидкої динаміки дорожньо-транспортної обстановки.

Принципи управління світлофорною сигналізацією за окремими напрямками наразі не мають цілісної структури і обґрунтування, складно формалізуються, є незручними для практичного для програмування обладнання АСУДР, містять формальні недоліки, що суттєво зменшує кількість перехресть, де вони можуть бути ефективно впроваджені.

Усі розглянуті способи корекції елементів світлофорного циклу для гарантування безпеки пішоходів мають такі недоліки:

- спосіб корекції з пошуком нових фазових коефіцієнтів для напрямів, що коригуються, не враховує необхідність оптимального співвідношення затримок транспортних засобів та пішоходів за конфліктними напрямками регулювання;

- спосіб пропорційного збільшення тривалостей основних тактів призводить до утворення ненасичених фаз регулювання через завеликі тривалості основних тактів, які до корекції перевищували 7 с.

## РОЗДІЛ 2

### СИНТЕЗ СТРУКТУРИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЦИКЛУ ПРИ УПРАВЛІННІ ЗА ОКРЕМИМИ НАПРЯМКАМИ

#### 2.1 Формалізація схеми руху на перехресті

Після ухвалення рішення про введення світлофорного регулювання постає питання про кількість регульованих напрямів руху на перехресті. В існуючих методиках зазвичай на першому етапі встановлюється, що кількість напрямів регулювання дорівнює кількості під'їздів до перехрестя та регульованих пішохідних переходів [51, 44, 72, 53]. У випадку наявності інтенсивних поворотних транспортних потоків, для яких виділяються смуги руху, можуть вводитися додаткові напрями регулювання, у вигляді додаткових секцій світлофорів або світлофорів типу 2 [49]. Також додаткові напрями регулювання руху можуть вводитися, як впливає із принципів пофазового роз'їзду [45] при організації пішохідного переходу по частинах за наявності розділової смуги або острівця безпеки.

Пропоновані рекомендації є дуже загальними, тому зумовлюють багатоваріантність підходу до визначення кількості напрямів регулювання. Порівняти ці варіанти з метою вибору більш оптимального на етапі, що передуює розрахункам параметрів циклу регулювання, не є можливим, тому виключається і автоматизація цього етапу при проектуванні регульованого перехрестя.

Пропонується схему руху на перехресті формалізувати за допомогою матриці можливих траєкторій (ММТ), що складається на основі схеми можливих траєкторій (СМТ) – рис. 2.1.

СМТ накреслюється на плані перехрестя, при цьому до уваги беруться вимоги Правил дорожнього руху та наявний розділ під'їздів до перехрестя

на смуги руху. ММТ чотиримірна. Її порядок визначається сумою кількостей смуг руху на всіх під'їздах до перехрестя та виїздах з перехрестя. Елементи ММТ – це відстані від стоп-ліній на проїзних частинах під'їздів до перехрестя до конфліктних точок перетину або злиття траєкторій руху. За схемою (рис. 2.1) можна визначити, що будь-які дві траєкторії можуть мати одну конфліктну точку перетину або злиття чи не мати конфліктних точок. У випадку, коли траєкторії не мають конфліктних точок, елемент ММТ дорівнює нулю.

Для більш точного визначення тривалостей мінімальних часових проміжків між дозволяючими світлофорними сигналами конфліктних траєкторій необхідно знати відстань від стоп-лінії до конфліктної точки злиття або перетину траєкторій по кожній з двох траєкторій, що перетинаються або зливаються. Таким чином, елемент  $ММТ[i, j, m, n]$  дорівнює відстані від стоп-лінії траєкторії  $i - j$  до її конфліктної точки перетину або злиття з траєкторією  $m - n$ .

Для зменшення кількості даних виникає пропозиція за наявності елемента  $ММТ[i, j, m, n]$  виключати елемент  $ММТ[j, i, m, n]$ , що відповідає за зворотний напрямок руху цією ж траєкторією. Проте, задля можливості формалізації схем руху на перехрестях з реверсивними траєкторіями, ця пропозиція відхиляється, і частина даних ММТ, що відповідає зворотним напрямкам руху траєкторіями не визнається надмірністю.

Дані про інтенсивність дорожнього руху за напрямками руху (відрізняти від *напрямків регулювання*) формалізуються у вигляді квадратної матриці, порядок якої визначається кількістю проїзних частин на під'їздах до перехрестя та на виїздах з нього. Елемент матриці  $N[i, j]$  дорівнює зведеній інтенсивності руху з під'їзду  $i$  до виїзду  $j$ . У випадку, якщо  $N[i, j] > 0$ , то  $N[j, i] = 0$ , окрім ситуацій, якщо на під'їздах наявні реверсивні смуги.



Дані про розташування смуг на під'їздах і виїздах знаходяться у двовірній матриці PS. У рядках цієї матриці записані номери смуг, які знаходяться на під'їздах чи виїздах. Номери смуг записуються у рядочки матриці починаючи з крайньої правої смуги під'їзду чи виїзду. Наприклад, для СМТ, що її зображено на рис. 2.1, матриця PS буде мати вигляд таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Матриця PS

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

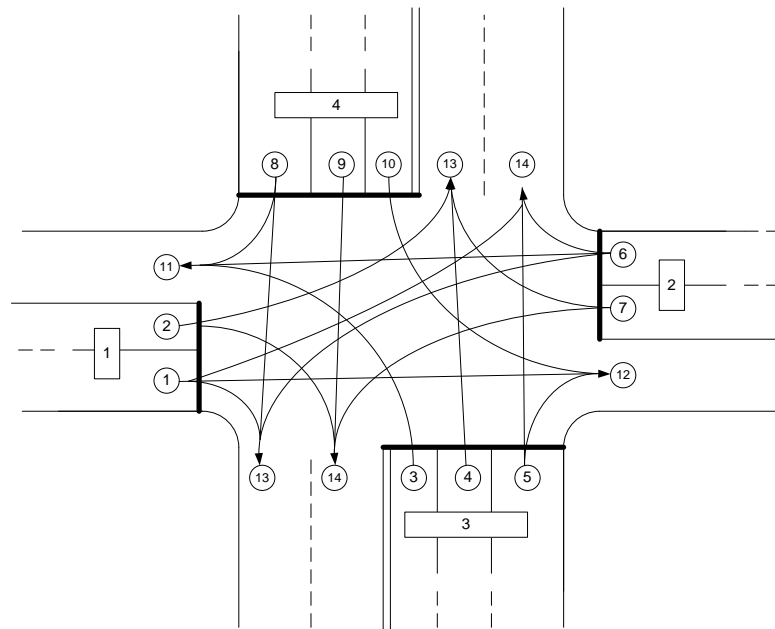


Рисунок 2.1 – Схема можливих траєкторій

Розрахункова швидкість руху по траєкторіях задається у квадратній матриці V. Формалізація схеми організації дорожнього руху на перехресті за допомогою запропонованої схеми дозволить проводити автоматизовану се-

лекцію напрямів світлофорного регулювання за конфліктністю та визначати мінімальні часові проміжки, що необхідні між дозволяючими світлофорними сигналами конфліктних напрямів регулювання.

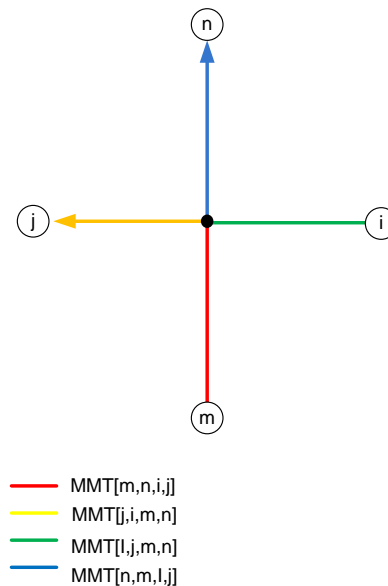


Рисунок 2.2 – Фізичний зміст елементів матриці відстаней до конфліктних точок (ММТ)

Крім того, таких способів формалізації дозволяє визначати мінімальні часові проміжки між дозволяючими сигналами конфліктних напрямів регулювання з урахуванням більшості факторів, що впливають на тривалість цих проміжків: швидкості руху (для кожної траєкторії окремо), типів транспортних засобів, наявності реверсивного та трамвайного руху, а не лише відстаней від стоп-ліній напрямів регулювання до дальніх конфліктних точок, як це пропонує існуюча методика [44].

## 2.2 Визначення перехідних інтервалів

При застосуванні принципу визначення тривалості перехідних інтервалів, що враховує мінімальні часові проміжки на доїзд до дальніх конфліктних точок при виборі означених точок виходять з принципу, що найвіддаленіша

від стоп-лінії конфліктна точка дає максимальну тривалість мінімального часового проміжку до проїзду її автомобілем.

Проте, при дослідженні формули (1.5) [44], отримуємо, що залежність між відстанню до найдалшої точки та тривалістю часового проміжку не є прямою. Крім того, як видно з рис. 2.3, отримані тривалості часових проміжків суттєво змінюються залежно від швидкості руху.

Крім того, відповідно до [44], у випадку, якщо траєкторія руху транспортного засобу до дальньої конфліктної точки криволінійна, значення швидкості руху необхідно зменшити на 30%, але не менше, ніж до 30 км/год.

Неточність у визначенні справжнього значення тривалості мінімального часового проміжку збільшується при врахуванні, як того вимагає методика [72], також і часу, необхідного на доїзд до цієї самої точки транспортного засобу, що розпочинає рух на дозволяючий сигнал далі за структурою світлофорного циклу.

Таким чином, оперування при визначенні «дальніх конфліктних точок» відстанями, а не часом, необхідним на проїзд цих відстаней від критичної точки та від стоп-лінії, вносить суттєву неточність у розрахунок тривалостей перехідних інтервалів. Задля її уникнення запропоновано при визначенні конфліктних точок пропонуватися оперувати не напрямками регулювання, а траєкторіями руху на перехресті.

Застосування цієї методики дозволить: формалізувати об'єднання траєкторії у напрямки; точно визначати тривалості перехідних інтервалів і, як наслідок, отримати можливість оптимізувати структуру світлофорного циклу за параметром мінімізації втраченого часу, напряду впливаючи на значення мінімальних часових проміжків із застосуванням більшого числа регульованих параметрів; обґрунтовано робити висновки про розподіл смуг між напрямками регулювання, каналізування руху.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку тривалості мінімальних часових проміжків

Швидкість, км/год	Відстань, м																											
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145
20	4,75	5,66	6,57	7,48	8,39	9,210	10,11	11,011	11,912	12,813	13,714	14,615	15,516	16,417	17,318	18,219	19,120	20,021	20,922	21,823	22,724	23,625	24,526	25,427	26,328	27,229	28,130	29,031
30	4,34	4,95	5,56	6,17	6,77	7,38	7,99	8,510	9,111	9,712	10,313	10,914	11,515	12,116	12,717	13,318	13,919	14,520	15,121	15,722	16,323	16,924	17,525	18,126	18,727	19,328	19,929	20,530
40	4,44	4,85	5,35	5,76	6,26	6,67	7,18	7,59	8,010	8,411	8,912	9,313	9,814	10,215	10,716	11,117	11,618	12,019	12,520	12,921	13,422	13,823	14,324	14,725	15,226	15,627	16,128	16,529
50	4,65	5,05	5,35	5,76	6,06	6,47	6,88	7,19	7,510	7,811	8,212	8,613	8,914	9,315	9,616	10,017	10,418	10,719	11,120	11,421	11,822	12,223	12,524	12,925	13,226	13,627	14,028	14,329
60	4,95	5,25	5,55	5,86	6,16	6,47	6,78	7,09	7,310	7,611	7,912	8,213	8,514	8,815	9,116	9,417	9,718	10,019	10,320	10,621	10,922	11,223	11,524	11,825	12,126	12,427	12,728	13,029
70	5,35	5,65	5,86	6,16	6,36	6,67	6,88	7,19	7,410	7,611	7,912	8,113	8,414	8,615	8,916	9,217	9,418	9,719	9,920	10,221	10,422	10,723	11,024	11,225	11,526	11,727	12,028	12,229
80	5,75	5,96	6,26	6,46	6,66	6,87	7,18	7,39	7,510	7,711	8,012	8,213	8,414	8,615	8,916	9,117	9,318	9,519	9,820	10,021	10,222	10,423	10,724	10,925	11,126	11,327	11,628	11,829

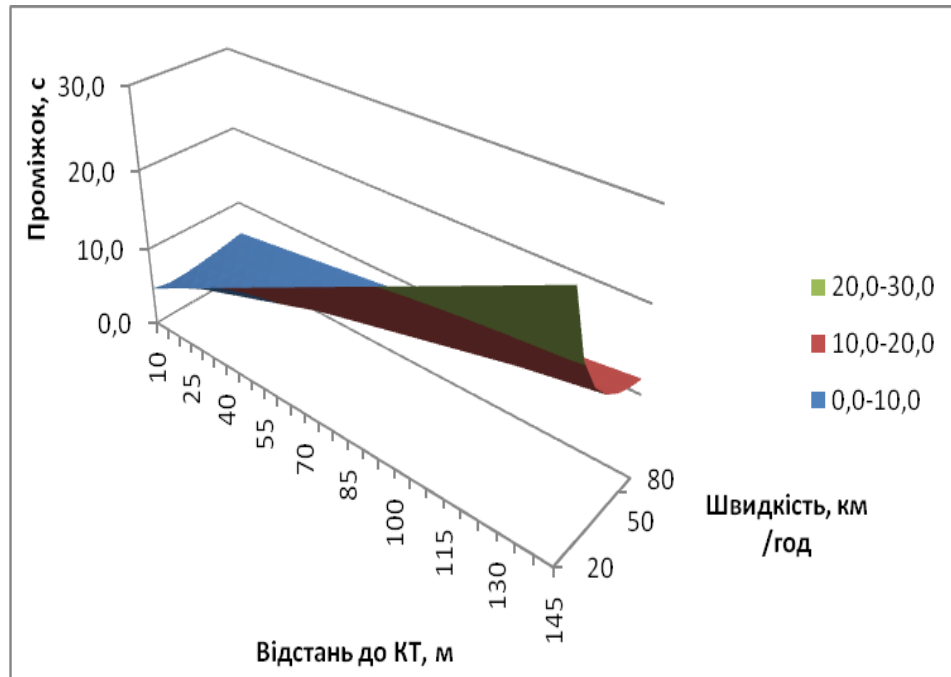


Рисунок 2.3 – Графік залежності тривалості мінімального часового проміжку від відстані до конфліктної точки та швидкості руху

Для визначення мінімальних часових проміжків між дозволяючими сигналами на основі методу дальніх конфліктних точок пропонується діяти в такій послідовності.

1. Визначення часу, необхідного для проїзду автомобіля, що завершує рух від критичної точки до конфліктної точки [75]

$$t_3 = t_p + \frac{V_3}{2a^k} + \frac{B_3 + l_a}{V_3}, \quad (2.1)$$

де  $t_p$  – термін реакції водія, с (0,8., .1.2 с),

$V_3$  – швидкість руху транспортного засобу, що завершує рух, м/с

$a^k$  – прискорення уповільнення,  $a^k = 2,5 \dots 3,0$  м/с<sup>2</sup>;

$B_3$  – відстань від стоп-лінії до дальньої конфліктної точки, м

$l_a$  – довжина зведеного автомобіля, м ( $l_a = 5$  м).

2. Визначення часу, необхідного для проїзду автомобіля, що розпочинає рух від стоп-лінії до конфліктної точки

$$t_{pn} = \frac{B_{pn}}{V_{pn}}, \quad (2.2)$$

де  $B_{pn}$  – відстань від стоп-лінії до ближньої точки, м;

$V_{pn}$  – швидкість руху транспортного засобу, що розпочинає рух, м/с

При визначенні часу за останньою формулою розглядаються найбільш несприятливі умови, коли транспортний засіб під'їхав до стоп-лінії з розрахунковою швидкістю в момент ввімкнення дозволяючого сигналу (черга по даній смузі в цей момент була повністю відсутня):

$$t = t_p + \frac{V_3}{2a^k} + \frac{B_3 + l_a}{V_3} - \frac{B_{pn}}{V_{pn}}. \quad (2.3)$$

При застосуванні цієї формули для переведення матриці можливих траєкторій ММТ у матрицю мінімальних часових проміжків ММП отримаємо:

$$ММП[i, j, m, n] = t_p + \frac{V[i, j]}{2a^k} + \frac{ММТ[i, j, m, n] + l_a}{V[i, j]} - \frac{ММТ[m, n, i, j]}{V[m, n]}. \quad (2.4)$$

Таким чином, отримане за формулою значення мінімального часового проміжку враховує всі характеристики руху транспортних засобів.

### 2.3 Зв'язок між основними тактами та перехідними інтервалами

Тривалість світлофорного циклу визначається тривалістю головної послідовності.

Тривалість головної послідовності складається з відносного часу дозволяючих сигналів та абсолютного часу мінімальних проміжків.

Тривалість абсолютного часу дозволяючих сигналів прямо пропорційна значенням коефіцієнтів завантаження рухом смуг напрямів регулювання [77], що утворюють головну послідовність.

Відносний час дозволяючих сигналів можна перевести в абсолютний час шляхом помноження на часовий коефіцієнт.

$$T_u = \sum (y_i K + t[i, j]). \quad (2.5)$$

Оптимальні тривалості дозволяючих сигналів повинні бути такими, аби за час дозволяючого сигналу встигала роз'їхатися черга, що накопичилася протягом циклу регулювання.

Якщо  $N_i$  - інтенсивність руху в од/год, а  $M_i$  - потік насичення в од/год, то для роз'їзду цієї інтенсивності потрібен час

$$T = \frac{N_i}{M_i}, \text{ год.} \quad (2.6)$$

Якщо значення  $N_i$  та  $M_i$  перевести в од/с, то

$$t = \frac{n_i}{m_i}, \text{ с.} \quad (2.7)$$

При цьому тривалість дозволяючого сигналу буде такою:

$$t_i = y_i K = \frac{n_i \cdot T_u}{m_i}. \quad (2.8)$$

Або

$$t_i = y_i K = \frac{n_i \cdot \sum (y_i K + t[i, i + 1])}{m_i}, \quad (2.9)$$

$$\frac{n_i}{m_i} K = \frac{n_i \cdot \sum \left( \frac{n_i}{m_i} K + t[i, i + 1] \right)}{m_i}. \quad (2.10)$$

Слід врахувати, що при роз'їзді черги кожен наступний автомобіль за-тримується перед початком руху на певний інтервал. Таким чином, при роз'їзді черги часові інтервали між автомобілями зростають з плином дозволяючого сигналу [68]. Тому для мінімізації цих непродуктивних інтервалів необхідно мінімізувати значення тривалості дозволяючих сигналів, що дозволять роз'їхатися черзі, яка накопичилася протягом циклу регулювання.

Мінімальним значенням тривалості зеленого світлофорного сигналу є 7с [34]. Таким чином, можна стверджувати:

$$t_{i\_min} = y_{i\_min} K = 7, \quad (2.11)$$

$$t_{i\_min} = y_{i\_min} K = \frac{n_{i\_min} \cdot \sum (y_i K + t[i, i + 1])}{m_{i\_min}}, \quad (2.12)$$

$$y_{i\_min} K = \frac{n_{i\_min} \cdot (YK + \sum t[i, i + 1])}{m_{i\_min}}, \quad (2.13)$$

$$y_{i\_min} K = \frac{n_{i\_min} \cdot YK + n_{i\_min} \sum t[i, i + 1]}{m_{i\_min}}, \quad (2.14)$$

$$K = \frac{n_{i\_min} \cdot YK + n_{i\_min} \sum t[i, i + 1]}{m_{i\_min} y_{i\_min}}, \quad (2.15)$$



$$K = \frac{n_{i\_min} \times YK + n_{i\_min} \sum t[i, i+1]}{m_{i\_min} y_{i\_min}}, \quad (2.16)$$

$$n_{i\_min} \times YK + n_{i\_min} \sum t[i, i+1] = Km_{i\_min} y_{i\_min}, \quad (2.17)$$

$$K = \frac{n_{i\_min} \times YK + n_{i\_min} \sum t[i, i+1]}{m_{i\_min} y_{i\_min} - n_{i\_min} \times Y}, \quad (2.18)$$

$$K = \frac{\sum t[i, i+1]}{\frac{m_{i\_min}}{n_{i\_min}} y_{i\_min} - Y}, \quad (2.19)$$

$$K = \frac{\sum t[i, i+1]}{1 - Y}. \quad (2.20)$$

Виведений коефіцієнт дозволяє співставляти тривалості мінімальних часових проміжків і дозволяючих сигналів при визначенні головної послідовності світлофорного циклу.

У існуючій методиці пофазного управління світлофорного сигналізацією [44, 51, 61], співставляються лише значення основних тактів і перехідних інтервалів, а тривалості дозволяючих сигналів в межах перехідних інтервалів не враховуються.

Зважаючи на зазначене, можна зробити висновок, що для більш ефективного розподілу часу в світлофорному циклі необхідно співставляти значення тривалостей дозволяючих сигналів світлофорного регулювання, що мають максимальне значення

## 2.4 Синтез структури світлофорного циклу

### 2.4.1 Розподіл базисних напрямів

Далі необхідно визначити структуру світлофорного циклу, тобто згрупувати напрями світлофорного регулювання таким чином, щоб рух транспорту і пішоходів за неконфліктними напрямками відбувався одночасно, а за конфліктними – лише після того, як минають мінімальні часові проміжки, визначені матричним способом у попередньому розділі.

Вихідними даними виступають матриця тривалостей зелених сигналів за напрямками  $M$  та матриця мінімальних проміжків  $t$ .

Під час врахування тривалостей перехідних інтервалів слід зважати на те, що матриця мінімальних проміжків може бути несиметричною, тривалості мінімальних проміжків між різними напрямками можуть не співпадати. Таким чином, залежно від порядку чергування напрямів у циклі регулювання, тривалість проміжків між ними збільшується, збільшуючи тривалість циклу.

Структуру циклу пропонується визначати за наступним алгоритмом.

1. Матриця  $M$  змінюється так, щоб елементи другого рядка (тривалості) чергувалися від максимального до мінімального. Це робиться задля того, щоб напрями з максимальною тривалістю дозволяючого сигналу опинялися на початку групи неконфліктних напрямів. Розраховується сумарна тривалість дозволяючих сигналів всіх напрямів регулювання. Таким чином, отримуємо матрицю  $M1$ .

2. Формується двомірна матриця структури світлофорного циклу  $S$ . У цій матриці в рядки записуються послідовності конфліктних напрямів регулювання, для яких дозволяючі сигнали не можуть вмикатися одночасно, натомість вмикаються один за одним, збільшуючи тривалість циклу регулювання.

Формування структури відбувається шляхом запису до матриці  $S$  номерів напрямів регулювання у тому порядку, в якому вони знаходяться у матриці  $M1$ . Заповнення матриці  $S$  починається з того, що до комірки  $[1,1]$  записується номер напрямку, що першим вказаний у матриці  $M1$  (цей напрям має найбільшу тривалість дозволяючого сигналу).

3. У циклі доти, поки до матриці  $S$  не будуть внесені всі номери напрямів регулювання, вписуємо на матриці  $S$  номери напрямів починаючи з комірки  $[1,1]$ . У випадку, якщо ця комірка зайнята та напрям регулювання конфліктний з тим, номер якого вже записаний до комірки, зсуваємося праворуч по матриці на 1 стовпчик (рис. 2.4 червона стрілка); якщо напрям регулювання неконфліктний з тим, номер якого вже записаний до комірки, зсуваємося вниз по матриці на 1 рядок (рис. 2.4 синя стрілка).

Таким чином, коли запис номерів напрямів до матриці  $S$  буде завершено, у кожному з рядочків буде записана послідовність конфліктних напрямів, сумарна тривалість якої буде не менше, ніж сума тривалостей дозволяючих сигналів напрямів, що складаються послідовність. Оскільки всі напрями одного рядка є конфліктними між собою, то тривалість циклу регулювання буде не менше, ніж тривалість послідовності, оскільки «стиснути» її у часі неможливо.

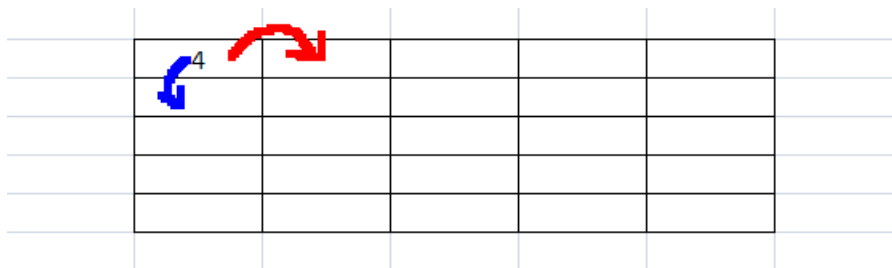


Рисунок 2.4 – Утворення матриці структури циклу

Оскільки напрями регулювання, що входять до одного стовпчику матриці  $S$  є попарно неконфліктними, то задачу формування груп неконфліктних напрямів можна вважати задачею на розбиття множини напрямів регулюван-

ня на підмножини. При цьому матрицю мінімальних проміжків можна представити у вигляді графу, вершинами якого є напрями регулювання, а дугами – мінімальні часові проміжки. З метою застосування в процесі розв’язку елементів теорії графів, слід провести трансформацію матриці мінімальних проміжків. З матриці  $t$  отримаємо матрицю  $t'$ . Для цього всі додатні елементи у матриці  $t$  замінюємо нулями, а всі нульові – одиницями. Таким чином, матриця  $t'$  є протилежністю матрицю інциденцій графу, створеного на основі матриці  $t$ . Якщо представити матрицю  $t'$  у вигляді графу, то у ній неконфліктні напрями регулювання будуть поєднані ребрами.

Підмножини, що складаються з попарно неконфліктних напрямів можна представити у вигляді повних підграфів графу на основі матриці  $t'$ . Таким чином, формування матриці  $S$  зводиться до розбиття графу  $t'$  на мінімальну кількість повних підграфів.

Розбиття відбувається за допомогою алгоритму, що складається з трьох блоків [22].

Блок 1.

На кожному кроці алгоритму знаходиться вершина  $i$  з найменшим числом  $V(i)$  суміжних ребер (з меншою валентністю), і, якщо виконується наступна умова, ця вершина видаляється.

$$V(i) < G - 1, \quad (2.21)$$

де  $G$  – потужність графу на поточному кроці алгоритму.

Коли всі вершини матимуть однакову кількість суміжних ребер, вершини, що залишаться, утворять повний підграф початкового графа.

Можна визначити клас ситуацій, в яких розв’язок знаходиться гарантовано. Якщо існує одна масивна кліка (повний підграф), то алгоритм обов’язково її знайде. Якщо існує кілька масивних клік, то алгоритм знайде одну з них.

Більш універсальним є алгоритм ітерації з видаленням. На кожному кроці цей алгоритм здійснює пошук повного підграфу за алгоритмом простої ітерації. При переході до наступного кроку з графа видаляються всі вершини, що належать вже знайденому повному підграфу. Таким чином, кожного разу пошук проводиться у тій частині графу, що не належить жодному з вже знайдених підграфів.

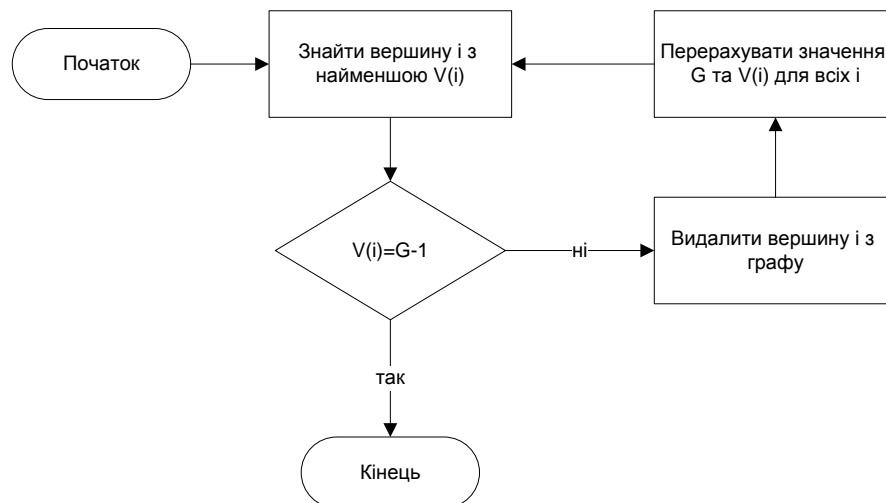


Рисунок 2.5 - Алгоритм простої ітерації (1)

Алгоритм зупиняється, коли потужність графу, що залишився після видалення є менше максимальної з потужностей вже знайдених повних підграфів. Цей підграф вважається останнім.

Зходимість алгоритму обумовлюється обмеженою кількістю вершин початкового графу, що видаляються.

На третьому кроці відбувається пошук підграфів за алгоритмом розширеної ітерації з видаленням. Для кожного знайденого підграфу  $g$  на початковому графі здійснюється перебір вершин, які алгоритм розширеної ітерації до графу  $g$  не включив. Для кожної такої вершини проводиться перевірка, чи не можна включити її до графу  $g$  на умовах початкового графу (чи існують реб-

ра, що поєднують цю вершину з усіма вершинами, що входять до  $g$  за умови розгляду графу, з якого вершини не видалялися).



Рисунок 2.6 – Алгоритм розширеної ітерації з видаленням

Якщо включити вершину можна, то вона включається до  $g$ .

Зходимість алгоритму доводиться на основі раніше викладених міркувань: обмеження кількості вершин та знайдених початковими алгоритмами підграфів в будь-якому випадку робить кінечним число видалень та перевірок на включення.

Далі необхідно елементи у стовпчиках матриці  $S$  сортувати за зменшенням значень (елемент у першому рядку повинен мати максимальне значення).

Запропонований алгоритм заповнення матриці  $S$  дозволяє одразу включити до груп неконфліктних напрямів також і ті напрями, що включалися до попередніх груп, тобто повністю визначити склад груп неконфліктних напрямів.

4. Для кожної послідовності визначаємо сумарну тривалість дозволяючи сигналів усіх включених до неї напрямів, тобто тривалість послідовності. Послі-

довність з максимальним значенням суми тривалостей сигналів називаємо головною.

5. Окрім дозволяючи сигналів, до послідовності також будуть входити проміжки між конфліктними напрямками. Тривалість циклу регулювання буде визначатися тривалістю головної послідовності, тому для неї слід вирішити оптимізаційну задачу для перехідних інтервалів – «задачу комівояжера» на основі матриці  $t_1$ , до якої включаються лише ті напрямки, що їх містить головна послідовність [46].

Аналогія між задачею чергування елементів головної послідовності циклу світлофорного регулювання та задачею об'їзду кількох пунктів за найкоротшим шляхом пояснюється тим, що в обох задачах розглядається циклічний процес, який складається з кількох під процесів, що їх можна довільно чергувати. Тривалості переходів між процесами є аналогією до відстаней між вершинами мережі, якої рухається комівояжер.

Проте слід зазначити, що у випадку врахування тривалостей перехідних інтервалів послідовність, для якої сумарна тривалість всіх дозволяючи сигналів є максимальною, буде головною. Випадки, коли тривалості перехідних інтервалів не дуже відрізняються від тривалостей основних тактів (наприклад, на незавантажених напрямках перехресть, що мають широкі проїзні частини або бульвари), можуть становити виняток з поданого вище алгоритму і на поточному кроці призвести до неповної оптимізації структури.

З метою уникнення цієї помилки слід проаналізувати можливі послідовності, одна з яких може бути головною. Для цього пропонується використати граф структури циклу регулювання. Кожній вершині цього графу присвоюється вага, значення якої дорівнює тривалості сигналу, що дозволяє руху за напрямом регулювання, що його позначає вершина. Дуги графу позначають мінімальні часові проміжки між напрямками регулювання. Граф на рисунку 2.7 вже поділений на повні підграфи за алгоритмом «перекриття». Вершини, що становлять повні підграфи знаходяться одна під одною.

Зважаючи на те, що в стовпчиках знаходяться повні підграфи, кожна вершина з будь якого стовпчика інцидентна хоча б одній вершині з іншого стовпчика, інакше ця вершина могла б належати до даного стовпчика.

Для визначення головної послідовності у цьому графі необхідно знайти найбільший замкнений контур, що починається та завершується з будь-якого напрямку та містить у собі по одному напрямку з усіх фаз регулювання.

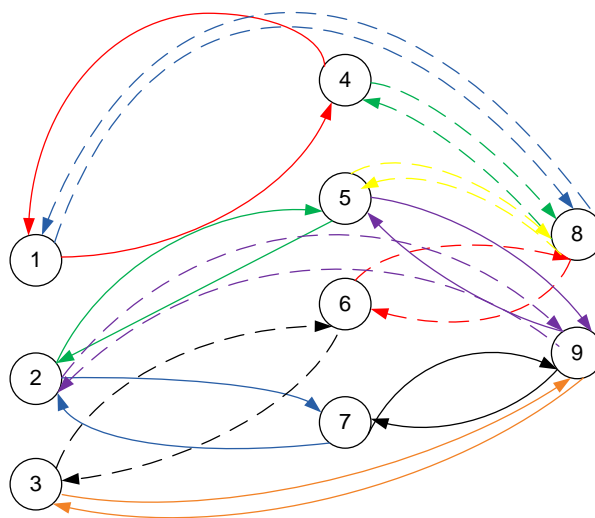


Рисунок 2.7 - Граф структури циклу регулювання

Визначення порядку виклику напрямів головної послідовності зводиться до задачі комівояжера. Класична постановка задачі комівояжера полягає у наступному[46, 48]. Задана транспортна мережа, що з'єднує  $n$  пунктів. Комівояжеру необхідно, виїхавши з деякого пункту, побувати у інших пунктах один раз та повернутися до вихідного пункту, тобто слід знайти найкоротший маршрут руху, якщо задана матриця найкоротших відстаней між пунктами мережі.

Під час формування структури циклу регулювання нашою метою є включення всіх напрямків регулювання до циклу та повернення до початку циклу.

Позначивши:



$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо комівояжер переїжджає з пункту } i \text{ до пункту } j; \\ 0, & \text{у протилежному разі.} \end{cases} \quad (2.22)$$

Тоді математична постановка задачі має вигляд:  
мінімізувати довжину маршруту комівояжера

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \Rightarrow \min, \quad (2.23)$$

де  $c_{ij}$  – відстань між пунктами  $i$  та  $j$ ;

за обмеженнях:

- одноразового в'їзду до кожного пункту

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad (j = \overline{1, n}; i \neq j); \quad (2.24)$$

- одноразового виїзду з кожного пункту

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (i = \overline{1, n}; i \neq j); \quad (2.25)$$

- заборони розриву маршрутів на декілька замкнених підмаршрутів

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1 \quad (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n}; i \neq j; u_i \geq 0; u_j \geq 0). \quad (2.26)$$

Поставлена задача є задачею цілочислового програмування. Найбільш ефективним з методів її рішення є метод «гілок і меж». Загальна ідея методу «гілок і меж» полягає у такому.

Спочатку для всієї множини припустимих розв'язків задачі визначається *нижня* межа довжини будь-якого з маршрутів. Ця межа є числом, менше яко-

го значення довжини маршруту (цільової функції) заздалегідь бути не може. Потім вся множина припустимих розв'язків задачі розбивається на декілька непустих підмножин, для кожної з них знову визначається нижня межа довжини маршрутів. Серед всіх підмножин вибирається підмножина з найменшим значенням нижньої межі і знову розбивається на дві непусти підмножини, для яких знову визначається нижня межа і так далі.

Оскільки множина припустимих розв'язків задачі є скінченою, такий процес послідовного розбиття приводить до множини з одного єдиного розв'язку, нижня межа для якого співпадає зі значенням цільової функції для цього розв'язку. Якщо це значення не більше ніжніх меж всіх нерозбитих підмножин, то маємо один з кращих розв'язків, а якщо значення цільової функції для знайденого розв'язку строго менше за нижню межу нерозбитих підмножин, то матимемо єдиний оптимальний розв'язок.

Розв'язання задачі включає ряд послідовних операцій [46].

1. Зведення матриці найкоротших відстаней. Послідовно проглядають рядки матриці і в кожному з них відшуковують мінімальний елемент. Цей елемент називається константою зведення. Потім з усіх елементів рядка віднімається константа зведення даного рядка. В отриманій після цього матриці аналогічно проглядаються стовпці, в яких також відшукується константа зведення. Ці константи віднімаються від всіх елементів відповідних стовпців. Отримана після цієї операції матриця називається зведеною і набуває наступної властивості: у будь-якому рядку і будь-якому стовпці матриці міститься не менше одного нульового елемента.

2. Визначення нижньої межі характеристики (довжина, час) для всіх маршрутів – кореня «дерева». Оскільки маршрут повинен пройти через всі пункти, то до кожного пункту входять і з кожного пункту виходять якнайменше один раз (маршрут кільцевий). Це твердження рівнозначне такому: до кожного пункту входять точно один раз і один раз залишають його, тобто з кожного рядка і кожного стовпця матриці буде вибраний точно один елемент.

Звідси витікає, що будь-який маршрут не може бути меншим, ніж сума найменших елементів у всіх рядках і стовпцях матриці найкоротших відстаней, тобто значення нижньої межі для всіх маршрутів дорівнює

$$W(u) = \sum_{i=1}^n h_i + \sum_{j=1}^n h_j, \text{ де } h_i \text{ і } h_j - \text{ константи зведення відповідно рядків і стов-}$$

пців.

3. Визначення оцінок для всіх нульових елементів. Спочатку проглядають рядок, в якому знаходиться оцінюваний нульовий елемент, і серед його елементів (за виключенням оцінюваного) відшуковують елемент з мінімальним значенням  $a_{\min i}$ . Потім аналогічним чином проглядають стовпець, в якому знаходиться оцінюваний елемент. У цьому стовпці серед елементів (за виключенням оцінюваного) відшуковують мінімальний  $b_{\min j}$ . Оцінка елемента, що розглядається, дорівнює  $\alpha_{ij} = a_{\min i} + b_{\min j}$ .

4. Вибір пари пунктів для включення до маршруту. До маршруту включається пара пунктів  $(k, l)$  з максимальною оцінкою нульового елемента.

5. Блокування елементів матриці. Під блокуванням розуміється заборона вибору деякого елемента (пари), який може призвести до передчасного зациклювання маршруту. Блокування проводиться на кожному етапі розв'язування задачі. При виборі пари  $(q, r)$ , яку необхідно заблокувати (заборонити включення до маршруту), можливі такі характерні випадки (рис. 2.8).

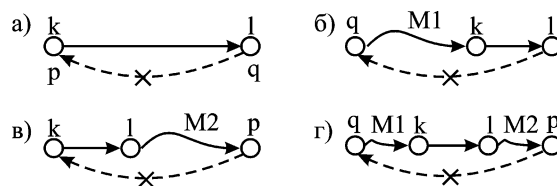


Рисунок 2.8 – Варіанти блокування пар пунктів

На рис. 2.8 заблоковані пари пунктів, які не включаються до маршруту на наступному етапі розрахунків, позначені пунктиром і перекреслені.

У випадку рис. 1, *a* пара  $(q, p)$  має зворотну схему нумерації по відношенню до пари  $(k, l)$ . Наприклад, пари  $(1, 2)$  і  $(2, 1)$  утворюють циклічний маршрут  $(1-2-1)$ . Пара  $(q, p)$  блокується.

У випадку рис. 2.8, *б* обрана на даному кроці розв'язування пара  $(k, l)$  є продовженням фрагменту маршруту  $M1$  з початковим пунктом  $q$  і кінцевим  $k$ . Тут пара  $(k, l)$  продовжує цей фрагмент маршруту до пункту  $l$ . Для виключення передчасного зациклювання маршруту у подальшому необхідно заблокувати пару  $(l, q)$ . Наприклад, до поточного кроку у розв'язок вже була введена пара  $(2, 3)$  і на даному кроці в розв'язок вводиться пара  $(3, 5)$ . Тоді в проміжній зведеній матриці при переході до наступного кроку необхідно заблокувати пару  $(5, 2)$ , так як у подальшому це призведе до замкненого маршруту  $(2-3-5-2)$ , що є неприпустимим.

У випадку рис. 2.8, *в* пара  $(k, l)$  додається до початку деякого вже вибраного раніше фрагмента маршруту  $M2$ , що починається в пункті  $l$  і закінчується в пункті  $p$ . На цьому кроці блокується пара  $(k, l)$ , а номер пункту  $k$  буде відповідати номеру  $q$  заблокованої пари. Наприклад, нехай до даного кроку в розв'язок вже введено пару  $(2, 4)$ . На цьому етапі до розв'язку вводиться пара  $(1, 2)$ . Для попередження передчасного зациклювання маршруту у подальшому слід заблокувати пару  $(4, 1)$ , введення якої призводить до утворення замкненого маршруту  $(1-2-4-1)$ .

У випадку рис. 2.8, *г* пара  $(k, l)$  з'єднує два фрагменти  $M1$  і  $M2$  деякого маршруту. Наприклад, нехай до даного кроку до розв'язку вже включені пари  $(3, 4)$  і  $(5, 6)$ . До розв'язку на даному кроці вводиться пара  $(4, 5)$ . Для виключення утворення замкненого маршруту за схемою  $(3-4-5-6-3)$  слід заблокувати пару  $(6, 3)$ .

Специфіка методу комівояжера вимагає відсутності нульових значень у матриці  $|T|$ , окрім головної діагоналі, оскільки, наприклад, наявність значення  $T[1,2] = 0$  вказує на співпадання координат вузлів 1 та 2, в той час, як значення  $T[1,3] \neq 0$  та  $T[3,2] \neq 0$  виключають таку можливість, хоча вказана комбінація значень цілком можлива на практиці. Пропонується заміна нульових елементів матриці завідомо мінімальними, що дорівнюють 0,001.

Враховуючи порядок програмування циклу, замінені нами значення забезпечать пріоритет можливих переходів між напрямками (розв'язується задача на мінімум) таким чином: спочатку будуть розглядатися переходи між напрямками, що не мають конфліктних точок (значення елементів  $T[i, j] = 0,01$ ), потім переходи між напрямками, що не мають небезпечних конфліктів (значення елементів  $T[i, j] \leq 2,25$  за формулою 1), і в останню чергу – напрями, для яких мінімальні проміжки розраховані до дальніх конфліктних точок ( $T[i, j] \geq 6$ ).

Таким чином, отриманий під час вирішення задачі комівояжера для матриці мінімальних проміжків  $|T|$  «маршрут» буде позначати структуру (послідовність) світлофорного циклу, тобто оптимальний з точки зору мінімізації перехідних інтервалів порядок виклику напрямів регулювання.

6. Отримавши оптимальний порядок чергування сигналів головної послідовності, змінюємо рядок матриці  $S$ , що містить головну послідовність таким чином, щоб напрями чергувалися у визначеному оптимальному порядку. Рядок, що містить головну послідовність, робимо першим у матриці  $S$ .

7. Заносимо номери напрямів до матриці  $M1$  з матриці  $S$  по рядках зліва направо. Тривалості дозволяючи сигналів беремо з матриці  $M$  відповідно до номерів напрямів регулювання.

8. Циклограма проявляється у вигляді двомірної матриці, номери рядочків в якій відповідають номерам напрямів регулювання, номери стовпчиків – секундам циклу регулювання.

У циклі, що триває доти, поки не відкладено сумарну тривалість всіх напрямів регулювання посекундно заповнюються комірки матриці структури відповідного стовпчика. При цьому номери рядочків змінюються відповідно зміні номерів напрямів у матриці M1 зліва направо.

Після переходу на наступний рядок виконується перевірка, чи не є напрям регулювання, що відповідає номеру рядка конфліктним з будь-яким із тих, що їх вже відкладено на поточній секунді циклу. У випадку виявлення конфліктності цей напрям не відкладається на поточній секунді.

#### **2.4.2 Доповнення груп неконфліктних напрямів**

Оскільки запропонований для розділення масиву напрямів регулювання на неконфліктні групи алгоритм передбачає видалення з графу неконфліктних напрямів під графів, що відповідають групам неконфліктних напрямів, то кожен напрям включається до структури циклу лише одного разу.

Такий результат не повністю відповідає задачі зменшення затримок учасників дорожнього руху, оскільки, кожної секунди у циклі регулювання слід дозволяти рух за всіма неконфліктними напрямками, тому може виникати можливість неодноразового введення напрямку регулювання до структури циклу, тобто *доповнення повних підграфів груп неконфліктних напрямів до максимальної потужності*.

З цією метою для кожного отриманого за допомогою алгоритму розширеної ітерації з видаленням підграфу необхідно повторно застосувати цей алгоритм, доповнюючи вже сформований підграф.

В результаті роботи алгоритму до групи буде включено всі напрями регулювання, що не є попарно конфліктними з тими, що їх вже було включено під час роботи алгоритму простої ітерації з видаленням.

Після обробки таким чином всіх початкових підграфів груп неконфліктних напрямів повний склад цих груп буде визначено остаточно.

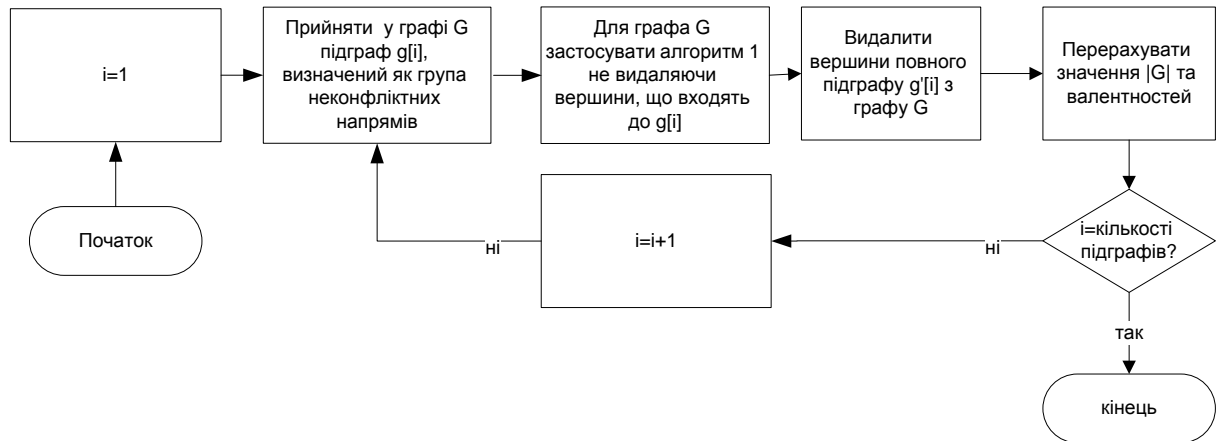


Рисунок 2.9 – Алгоритм доповнення групи неконфліктних напрямів

У п. 2.4.1 доведено, що утворені таким чином графи будуть мати максимально можливу потужність, отже поставлена задача щодо складання мінімальної кількості груп неконфліктних напрямів з максимальним числом елементів у групі може бути виконана програмним способом.

## 2.5 Формування режиму регулювання

У випадку, коли перехідні інтервали не враховуються, структуру циклу пропонується визначати за наступним алгоритмом.

1. Матриця  $M$  змінюється так, щоб елементи другого рядка (тривалості) чергувалися від мінімального до максимального. Це робиться задля того, щоб напрями найменшої тривалості відкладалися спочатку утворення структури та розривалися меншу кількість разів. Розраховується сумарна тривалість дозволяючих сигналів всіх напрямів регулювання. Таким чином, отримуємо матрицю  $M1$ .

2. Структура циклу проявляється у вигляді двомірної матриці, номери рядків в якій відповідають номерам напрямів регулювання, номери стовпчиків – секундам циклу регулювання.

У циклі, що триває доти, поки не відкладено сумарну тривалість всіх напрямів регулювання посекундно заповнюються комірки матриці структури відповідного стовпчика. При цьому номери рядочків змінюються відповідно зміні номерів напрямів у матриці М1 зліва направо.

Після переходу на наступний рядок виконується перевірка, чи не є напрям регулювання, що відповідає номеру рядка конфліктним з будь-яким із тих, що їх вже відкладено на поточній секунді циклу. У випадку виявлення конфліктності цей напрям не відкладається на поточній секунді.

Ця перевірка є необхідною для того, аби між дозволяючи ми сигналами напрямів, що відкладаються по комірках матриці, були дотримані мінімальні часові проміжки, тривалість яких для кожної пари напрямів регулювання дорівнює елементу матриці ММП.

Аналізуючи структуру світлофорного циклу у вигляді матриці, можна сказати, що кількість комірок матриці (площа циклограми) є заданою на початку і являє собою суму тривалостей усіх напрямів. Розглядаючи площу циклограми як суму прямокутників, слід зазначити, що їх ширина дорівнює  $1c$  та висота визначається кількістю напрямів регулювання, за якими одночасно дозволяються рух. Ця кількість наперед визначається матрицею мінімальних проміжків для кожної комбінації напрямів, проте сума цих кількостей у всіх прямокутниках є сталою величиною і дорівнює сумарному ефективному часу у циклі світлофорного регулювання. Таким чином можна стверджувати, що без урахування перехідних інтервалів зміна порядку включення до структури циклу напрямів регулювання не приводить до зміни тривалості циклу. Головним принципом формування структури циклу в такому випадку є включення до набору напрямів на кожній секунді всіх попарно неконфліктних напрямів.



## 2.6 Визначення тривалостей елементів світлофорного циклу за наявності пішохідних напрямів

Середню затримку одного автомобіля при ізольованому регулюванні обчислюють за формулою Вебстера, с:

$$\bar{t}_m = 0,9(AT_u + \frac{1}{N_m}B), \quad (2.28)$$

$$\text{де } A = \frac{(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)}, \quad B = \frac{x^2}{2(1-x)}, \quad \lambda = \frac{t_{om}^m + 1}{T_u}; \quad x = \frac{y}{\lambda};$$

$T_u$  – тривалість світлофорного циклу, с;

$N_m$  – інтенсивність руху транспорту, од/год;

$t_{om}^m$  – фазовий коефіцієнт транспортної фази.

Припустимо, що цикл складається з транспортною та пішохідної фаз.

$$T_u = t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n, \quad (2.29)$$

де  $t_{OT}^m, t_{III}^m, t_{OT}^n, t_{III}^n$  – тривалості відповідно основних тактів і перехідних інтервалів транспортної та пішохідної фаз, с.

Середня затримка одного пішохода складає таким чином [75]:

$$\bar{t}_n = \frac{t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{III}^n}{2}. \quad (2.30)$$

Загальна затримка пішоходів за годину складатиме:

$$T_n = N_n \frac{t_{or}^m + t_{III}^m + t_{III}^n}{2}, \quad (2.31)$$

де  $N_n$  – інтенсивність руху пішоходів, чол./год.

Загальна затримка транспортних засобів за годину складатиме:

$$T_m = 0,9N_m \left( AT_{\psi} + \frac{1}{N_m} B \right). \quad (2.32)$$

Затримка всіх пасажирів транспортних засобів за годину складатиме:

$$T_{nac} = \sum_{i=1}^m \left( \frac{\alpha^i T_m}{k_{np}^i} P_i k_{n-m}^i \right), \quad (2.33)$$

де  $P_i$  – пасажиромісткість транспортного засобу даного типу;

$\alpha^i$  – частка в потоці транспортних засобів  $i$ -го типу;

$k_{n-m}^i$  – коефіцієнт використання пасажиромісткості для даного типу транспортного засобу;

$k_{np}^i$  – коефіцієнт зведення даного типу транспортного засобу до легкового автомобіля;

$m$  – загальна кількість типів транспортних засобів.

Умова рівності тривалостей затримок пасажирів, водіїв транспортних засобів та пішоходів виглядає таким чином:

$$N_n \frac{t_{or}^m + t_{III}^m + t_{III}^n}{2} = \sum_{i=1}^m \left( \frac{\alpha^i T_m}{k_{np}^i} P_i k_{n-m}^i \right), \quad (2.34)$$

де  $P_i$  – пасажиромісткість транспортного засобу даного типу;

$\alpha^i$  – частка в потоці транспортних засобів  $i$ -го типу;

$k_{n-m}^i$  – коефіцієнт використання пасажиромісткості для даного типу транспортного засобу;

$k_{np}^i$  – коефіцієнт зведення даного типу транспортного засобу до легкового автомобіля;

$m$  – загальна кількість типів транспортних засобів.

Умова рівності тривалостей затримок пасажирів, водіїв транспортних засобів та пішоходів виглядає таким чином:

$$N_n \frac{t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{III}^n}{2} = T_m \sum_{i=1}^m \left( \frac{\alpha^i}{k_{np}^i} P_i k_{n-m}^i \right). \quad (2.35)$$

Складові цього виразу, в свою чергу, дорівнюють:

$$K = \sum_{i=1}^m \left( \frac{\alpha^i}{k_{np}^i} P_i k_{n-m}^i \right), \quad (2.36)$$

$$\bar{t}_m = 0,9(A \times (t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n) + \frac{1}{N_m} B), \quad (2.37)$$

$$\lambda = \frac{t_{om}^m + 1}{t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n}, \quad (2.38)$$

$$x = \frac{y \cdot (t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n)}{t_{om}^m + 1}, \quad (2.39)$$

$$B = \frac{(y \times (t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n))^2}{2 \left( 1 - \frac{y \times (t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n)}{t_{om}^m + 1} \right) (t_{om}^m + 1)^2}, \quad (2.40)$$

$$A = \frac{\left( 1 - \frac{t_{om}^m + 1}{t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n} \right)^2}{2 \left( 1 - \frac{t_{om}^m + 1}{t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n} \times \frac{y \times (t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n)}{t_{om}^m + 1} \right)}. \quad (2.41)$$

Виконуємо заміну:

$$\Delta = t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n. \quad (2.42)$$

В результаті отримуємо:

$$N_n \frac{t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{III}^n}{2} = 0,9 N_m K \left[ \frac{\left( 1 - \frac{t_{OT}^m + 1}{t_{OT}^m + \Delta} \right)^2}{2(1-y)} \cdot (t_{OT}^m + \Delta) + \right. \\ \left. + \frac{1}{N_m} \cdot \frac{(y \times (t_{OT}^m + \Delta))^2}{2 \left( 1 - \frac{y \times (t_{OT}^m + \Delta)}{t_{OT}^m + 1} \right) (t_{OT}^m + 1)^2} \right]. \quad (2.43)$$

Перетворюючи це співвідношення, переходимо до повного рівняння 4-го ступеня, коренями якого є тривалості основного такту світлофорного циклу, до якого включено транспортні напрями. Перед перетворенням зробимо декілька замін:

$$N_n = a; t_{om}^m = x; t_n^m = b; t_n^n = c; \Delta = d; K = e; \Delta = f; y = g. \quad (2.44)$$

Отримане рівняння має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
& x^4 \cdot ad \cdot (1-g)^2 + x^3 [ad(1-g) \cdot ((2-g(1+f)) + (b+c+f)(1-g)) - \\
& - 0,9dge^2(1-g)] + x^2 [ad(1-g)((1-gf^2) + (b+c+f)(2-g(1+f))) + \\
& + f(b+c)(1-g) - 0,9d^2e(f-1)^2(1-g) - 0,9deg^2(1-g) \cdot 3f] + \\
& + x [ad(1-g)((b+c+f)(1-gf) + f(b+c)(2-g(1+f))) - \quad (2.45) \\
& - 0,9d^2e(f-1)^2(2-g(1+f)) - 0,9de(1-g)g^2 \cdot 3f^2] + \\
& + [ad(1-g)f(b+c)(1-gf) - 0,9d^2e(f-1)^2(1-gf) - \\
& - 0,9deg^2(1-g)f^3] = 0.
\end{aligned}$$

Отримане рівняння розв'язуємо за методом Феррарі [21]. Ця процедура автоматизована за допомогою програми МайКрософт Ексель. При підставці до листа Ексель значень аргументів, корені рівняння визначаються автоматично. Слід зазначити, що, оскільки йдеться про основний такт транспортної фази, то мінімальне припустиме значення дорівнює 7с, а максимальне визначається з урахуванням часу терплячого очікування дозволяючого сигналу пішоходами, отже не може перевищувати 54с. Серед отриманих коренів обирається мінімальний, що дозволить мінімізувати тривалість циклу [69].

У табл. 2.4 наведено деякі результати розв'язку рівняння (2.43), що потрапляють до припустимого діапазону.

Таблиця 2.4 – Деякі результати розв'язку рівняння (2.43)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$N_n$ , піш/год	300	500	400	650	200	100	1000	700	800
$t_n^m$ , с	7	10	12	6	12	8	13	15	20
$t_n^n$ , с	7	8	7	6	7	6	7	6	8
$N_m$ , од/год	200	800	500	900	400	700	500	700	500

Продовження таблиці 2.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K	4	2	3	2,1	3,6	10	2	2	3,5
$\Delta$	40	28	36	20	39	25	41	40	41
y	0,04	0,2	0,3	0,15	0,4	0,5	0,6	0,6	0,45
$t_{om}^m, c$	36	28	14	18	24	23	31	53	41

Отриману вибірку піддано статистичному дослідженню, в результаті якого отримано лінійну регресійну залежність, що дозволяє встановити міру впливу кожного з аргументів на корені рівняння:

$$t_{om}^m = -111,92 - 0,06N_n - 0,25t_n^m - 0,87t_n^n + 0,04N_m + 7,96K + 1,8\Delta + 306,12y. \quad (2.46)$$

Адекватність отриманої моделі підтверджується значеннями кількох характеристик. Коефіцієнт кореляції дорівнює 0,66, коефіцієнт детермінації 0,44, розрахункове значення критерію Фішера 175,09 (при теоретичному значення 2,51). Статистичну оцінку значимості коефіцієнтів регресійного рівняння виконано за критерієм Стюдента. Розрахункові значення критерію для вільного члена регресійного рівняння та коефіцієнтів при сімох змінних відповідно дорівнюють: -2,7; -13,26; -0,54; -0,17; 11,57; 8,65; 16,52; 26,51 при табличному значенні 2,446. Таким чином встановлено, що тривалості перехідних інтервалів дуже слабо впливають на значення основного такту транспортної фази.

Таким чином встановлено співвідношення між дозволяючими сигналами для конфліктних напрямів регулювання руху транспортних засобів і пішоходів, що дозволить забезпечити рівність витрат часу пішоходами та пасажирями транспортних засобів.

## 2.7 Приклад формування режиму регулювання при управлінні світлофорним об'єктом за окремими напрямками

З метою формалізації схеми руху на перехресті складаються схеми траєкторій та напрямів регулювання (рис. 2.11 та 2.12).

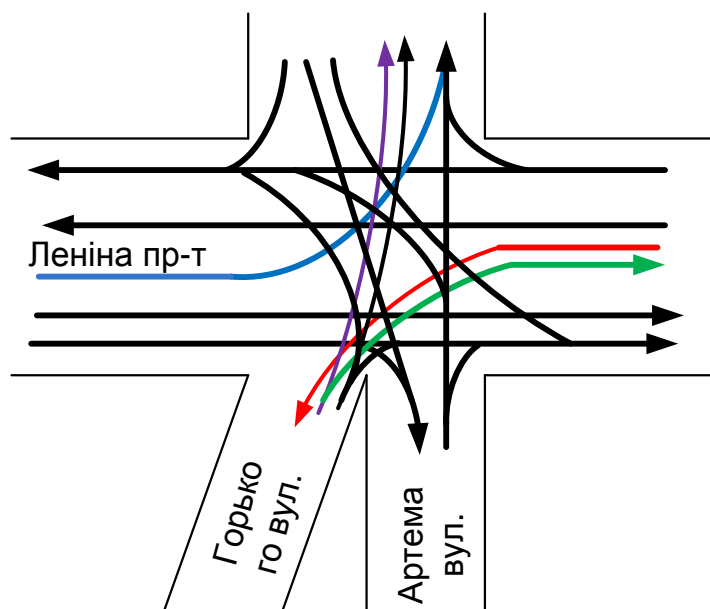


Рисунок 2.11 – Схема траєкторій

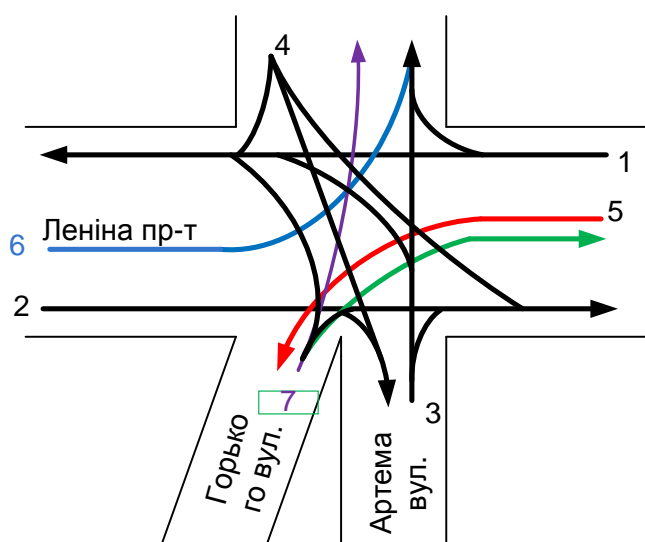


Рисунок 2.12 – Схема напрямів регулювання

Таблиця 2.4 – 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

## 1) Визначення груп неконфліктних напрямів

Утворюється матриця сумісності напрямів регулювання. Для цього в матриці мінімальних проміжків (табл. 1) всі числа, окрім нулів, замінюються на 1. Отримуємо матрицю сумісності (табл.2.5).

Таблиця 2.5 – Матриця сумісності

	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	1	1	0	1	1
2	0	0	1	1	1	0	1
3	1	1	0	0	1	1	1
4	1	1	0	0	1	1	1
5	0	1	1	1	0	0	1
6	1	0	1	9	0	0	1
7	1	1	1	1	1	1	0

Виконується обернення матриці сумісності (табл. 2.6).



Таблиця 2.6 – Обернена матриця сумісності

	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	0	0	1	0	0
2	1	1	0	0	0	1	0
3	0	0	1	1	0	0	0
4	0	0	1	1	0	0	0
5	1	0	0	0	1	1	0
6	0	1	0	0	1	1	0
7	0	0	0	0	0	0	1

Формуються групи неконфліктних напрямів за алгоритмом розширеної ітерації з видаленням. При цьому обернена матриця сумісності вважається матричним представленням графу структури світлофорного режиму. Групи неконфліктних напрямів будуть складати повні підграфи у цьому графі, пошук яких виконується шляхом застосування алгоритму визначення найбільшої кліки. Отримані підграфи (групи неконфліктних напрямів) наведено в табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Групи неконфліктних напрямів

Номер групи	1	2	3	4
Напрями	4	1	6	7
	3	2	5	

Для отриманої структури визначаються тривалості дозволяючі сигналів регулювання за експрес-методикою або за розрахунком на мінімальний час (для трамваїв) – таблиця 2.8. З кожної групи обирається напрям з максимальною тривалістю дозволяючого сигналу. З напрямів регулювання, що

маються максимальні тривалості в кожній групі утворюється головна послідовність (табл. 2.9).

Таблиця 2.8 – Результати застосування експрес-методики

Номер напрямку	1	2	3	4	5	6	7
Тривалість сигналу, с	33	24	10	18	11	7	15

Таблиця 2.9 – Головна послідовність

4	1	5	7
---	---	---	---

Для головної послідовності розв'язується задача комівояжера з урахуваннями тривалості мінімальних проміжків (табл. 2.10).

Таблиця 2.10 – Оптимізована головна послідовність

1	4	7	5	1
---	---	---	---	---

Чергування груп змінюється відповідно до зміни чергування напрямів, що входять в ці групи, у головній послідовності. Заповнюється циклограма відповідно до алгоритму (напрямок 6 – псевдонапрямок для раннього старту напрямку 2.)

Таблиця 2.10 – Групи неконфліктних напрямів

Номер групи	2	1	4	3	2
Напрями	1	4	7	6	1
	2	3		5	2

Оптимальність вибору чергування напрямів головної послідовності за критерієм мінімізації часових проміжків між зеленими сигналами підтверджується перебором варіантів чергування у табл. 2.11.

Мінімізація тривалостей часових проміжків між дозволяючими сигналами світлофорної сигналізації, що утворюють головну послідовність структури світлофорного циклу призведе до зменшення втраченого часу у циклі світлофорного регулювання, і, таким чином, відповідно до викладок, що розглядалися у першому розділі та наведені у [66], може бути критерієм оптимізації структури світлофорного циклу.

Отриману відповідно до п. 2.5 циклограму світлофорного регулювання наведено на рис. 2.13. Наведений приклад підтверджує, що підхід до управління світлофорною сигналізацією за окремими напрямками може бути реалізована на практиці на всіх етапах визначення режиму регулювання

Таблиця 2.11 – Визначення оптимальної структури циклу

Елементи головної послідовності				Втрачений час. С	Мін. проміжки			
4	1	5	7	25	7	0	9	9
4	1	7	5	27	7	7	6	7
4	5	1	7	22	6	0	7	9
4	5	7	1	37	6	9	12	10
4	7	5	1	22	6	6	0	10
4	7	1	5	25	6	12	0	7
1	4	7	5	22	10	6	6	0
1	4	5	7	37	10	6	9	12
1	7	4	5	22	7	9	6	0
1	7	5	4	27	7	6	7	7
1	5	4	7	25	0	7	6	12
1	5	7	4	25	0	9	9	7



## Висновки за розділом 2

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 3**

### **3 УПРАВЛІННЯ СВІТЛОФОРНОЮ СИГНАЛІЗАЦІЄЮ ЗА ОКРЕМИМИ НАПРЯМКАМИ**

#### **3.1 Застосування підходу до управління за окремими напрямками в особливих умовах дорожнього руху**

##### **3.1.1. Застосування фазоподібних інтервалів**

Збільшення інтенсивності дорожнього руху і, як наслідок, зростання ступенів завантаженості рухом підходів до регульованих перехресть вимагає більш повної адаптації режимів світлофорного регулювання до дорожньо-транспортної ситуації. Апаратура автоматизованих систем управління дорожнім рухом на сучасному етапі розвитку здатна забезпечити підвищення гнучкості світлофорного регулювання без суттєвого здороження обладнання [73]. Сучасні дорожні контролери дозволяють керувати сигнальними групами світлофорних об'єктів незалежно одна від одної, реалізуючи принцип відповідності тривалості дозволяючого сигналу регулювання ступеню завантаження підходу до перехрестя за цим напрямом регулювання. Крім того, на практиці набувають широкого застосування транспортні детектори, підключення яких до працюючих в автоматичному режимі дорожніх контролерів дозволяє принципово визначати тривалості сигналів регулювання виходячи з реальної дорожньо-транспортної ситуації [47]. Проведені дослідження [42] дозволяють зробити висновок, що небезпека виконання певних маневрів транспортними засобами на регульованих перехрестях є високою, оскільки ці маневри пов'язані із виникненням небезпечних конфліктів між пішоходами і транспортними засобами, а також транспортних засобів між собою. До таких маневрів належить, зокрема, виконання повороту ліворуч. У [72] рекоменду-

ється при інтенсивності лівоповоротного маневру більшій за 120 приєдених транспортних одиниць на годину забезпечити безконфліктність лівоповоротної траєкторії із зустрічним потоком.

Виконання цієї вимоги призводить, як правило, при формуванні структури світлофорного циклу методом поєднання неконфліктних напрямів регулювання [34], до введення в структуру циклу додаткової фази регулювання. У випадку, коли інтенсивність лівоповоротного транспортного потоку незначно перевищує величину 120 одиниць за годину, величина фазового коефіцієнту додаткової фази регулювання, призначеної для пропуску лівоповоротного потоку, буде невеликою. Це приведе до того, що при розрахунку тривалості циклу світлофорного регулювання за формулою Вебстера [12, 13], значення тривалості основного такту фази, що включає лівоповоротний напрям, буде менше за 7с. При виконанні корекції основних тактів необхідно буде пропорційно збільшити всі тривалості основних тактів, що призведе до невідповідного збільшення тривалості циклу світлофорного регулювання та, як наслідок, збільшення тривалості затримок транспортних засобів перед лініями регулювання.

Для уникнення такої ситуації пропонується перевірити можливість заміни фази регулювання, що містить лівоповоротний напрям *фазоподібним інтервалом*, наявність якого в структурі світлофорного циклу забезпечить збільшення тривалості дозволяючого світлофорного сигналу з того підходу, з якого виконується поворот ліворуч по відношенню до тривалості дозволяючого сигналу зустрічного напрямку.

З метою забезпечення можливості застосування такого методу при пофазному принципі управління світлофорною сигналізацією при розрахунку тривалостей елементів циклу регулювання за формулою Вебстера пропонується кілька формальних ходів.

Припустимо, що лівоповоротний потік з інтенсивністю руху  $N_{\text{л}}$  більше 120 одиниць за годину рухається з першого напрямку регулювання. При фор-

муванні першої фази регулювання будемо вважати, що інтенсивність лівого повороту за першим напрямом регулювання складає 120 приведених одиниць за годину. Таке припущення дає нам можливість включити зустрічні напрями 1 та 2 в першу фазу регулювання, а разом із ними додати до цієї фази пішохідні напрями, за якими рухаються пішоходи, що переходять проїзні частини, на які транспортні засоби виконують повороти. Частина потоку лівоповоротних транспортних засобів, що за годину наблизиться до 120 зведених одиниць зможе виконати поворот ліворуч впродовж першої фази регулювання. Частина потоку, що складає надмірну над 120 одиниць за годину інтенсивність  $N_{над}$ , буде залишатися перед стоп-лінією напрямом 1 в очікуванні наступного дозволяючого сигналу. Значення цієї інтенсивності можна встановити за формулою:

$$N_{над} = N_l - 120, \text{ од/год.} \quad (3.1)$$

Для пропуску цієї інтенсивності пропонується виділити *псевдонапрямок регулювання 5*, що може входити до структури світлофорного циклу, проте не відповідає жодному зеленому сигналу на світлофорах перехрестя. Цей псевдонапрямок лівого повороту пропонується безконфліктно ввести у наступну фазу регулювання для забезпечення максимальної пропускної спроможності для надмірної інтенсивності. Таким чином, складається формальна схема пофазового роз'їзду, в другу фазу якої включається безконфліктний псевдонапрямок 5 та повністю неконфліктні з ним напрями 1 та 12 (конфліктні точки з напрямом 5 відсутні). В третю фазу включаються транспортні та пішохідні напрями з підходів іншої вулиці (рис. 3.1). Потік насичення для напрямом 1 в першій фазі регулювання пропонується визначати з урахуванням наявності повороту ліворуч з крайньої лівої смуги. У другій фазі регулювання напрямом регулювання 1 вже не буде рухатися крайньою лівою смугою, оскільки для кожного напрямом регулювання слід виділяти як мінімум одну смугу руху



[61], і крайня ліва смуга буде виділена для напрямку 5. З цієї смуги поворот буде виконуватися безконфліктно і лише в одному напрямку, тому відповідно до [35], потік насичення цього напрямку буде визначатися в залежності від радіуса поворотної траєкторії.

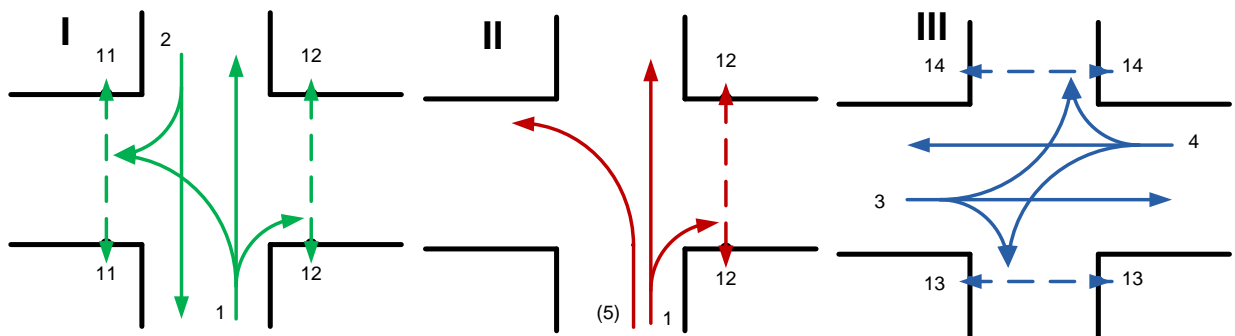


Рисунок 3.1 – Формальна схема пофазового роз'їзду

Зважаючи на те, що псевдонапрямок регулювання не має відповідного йому зеленого сигналу на світлофорі, реальна схема пофазового роз'їзду буде мати вигляд, наведений на рис. 3.2. Розглядаючи цю схему, можна зробити висновок, що фаза I<sup>1</sup> не містить напрямів регулювання, що включені лише до неї. Таким чином, її застосування призводить до збільшення тривалості дозволяючого сигналу у напрямі 1 відносно дозволяючого сигналу у зустрічному напрямі регулювання 2. Це збільшення складатиметься з часу, необхідного для виїзду з перехрестя транспортних засобів, що завершують рух у першій фазі за напрямом 2 (напрями 2 і 5 конфліктні, отже між їх включенням необхідна наявність додаткового такту), а також часу, протягом якого лівоповоротний потік надмірної інтенсивності, що в середньому доводиться на один цикл регулювання, минає стоп-лінію та виїздить з перехрестя. Крім того, немає необхідності у проведенні перевірки тривалості основного такту цієї фази на мінімум 7с. При проведенні такої перевірки для напрямку 1 слід

враховувати, що тривалість дозволяючого сигналу цього напрямку складається з тривалості першої фази регулювання та основного такту другої фази регулювання [85].

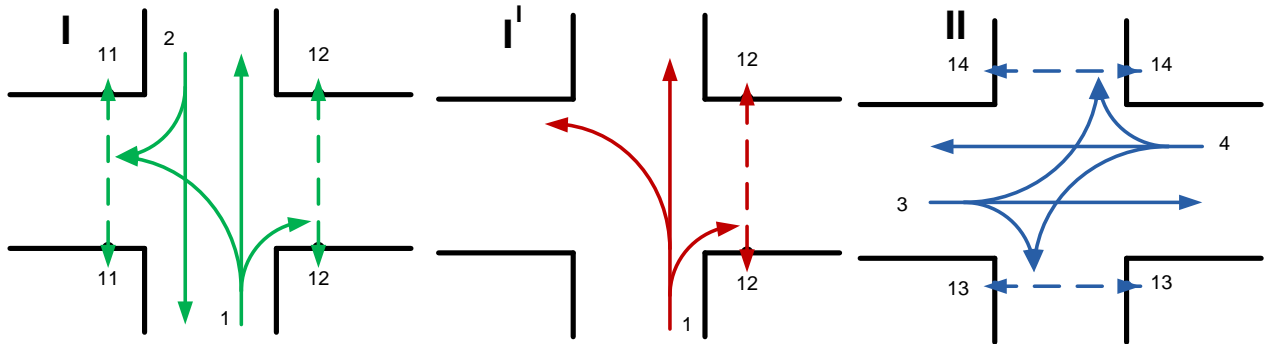


Рисунок 3.2 – Реальна схема пофазового роз'їзду

При зміні порядку чергування фаз регулювання у світлофорному циклі можливе переміщення у часі фазоподібного інтервалу, призначеного для виконання повороту ліворуч відносно фази регулювання, до якої включено прямий і зустрічний напрями по вулиці, з якої виконується поворот ліворуч з інтенсивністю транспортного потоку, більшою за 120 приєдених одиниць за годину. При цьому можливі два варіанти розташування фазоподібного інтервалу: зелений додатковий та ранній старт, що показано на рис. 3.2 і 3.3 відповідно. Зміна структури циклу в такому випадку, як і звичайно, може призводити до зміни значення його тривалості за рахунок оптимізації перехідних інтервалів, а також до зміни параметрів графіків координованого регулювання за рахунок переміщення стрічок безперервного часу. Однак, на практиці застосування раннього старту є менш розповсюдженим, ніж зеленого додаткового, оскільки небезпечним моментом є час переходу з фази  $I^I$  на фазу  $I$ , про який водії, що повертають ліворуч за напрямом 1 ніяк не інформуються, хоча з моменту початку першої фази регулювання втрачають перевагу у русі.

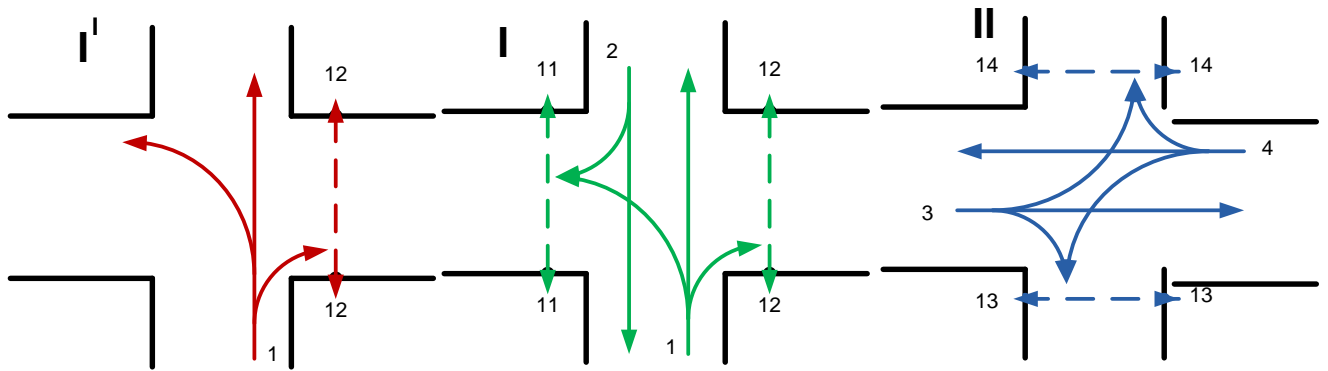


Рисунок 3.3 – Схема пофазового роз'їзду з введенням раннього старту

Оскільки, відповідно до наведених вище принципів, надмірна лівоповоротна інтенсивність відноситься до псевдонапряму, то

$$N_{5(l)}^{II} = N_l - 120, \quad (3.2)$$

де  $N_{j(nm)}^i, N_{j(np)}^i, N_{j(l)}^i, N_j^i$  – інтенсивність руху у фазі  $i$  за напрямом  $j$  відповідно прямо, ліворуч та праворуч та сумарна, од./год.

Завантаження смуг напрямів регулювання, що включені до однієї фази повинно бути однаковим, отже:

$$\frac{N_{5(l)}^{II}}{M_5^{II}} = \frac{N_1^{II}}{M_1^{II}}, \quad (3.3)$$

де  $M_j^i$  – коригований потік насичення за напрямом  $j$  у фазі  $i$ , од./год.

Розв'язавши пропорцію відносно  $N_1^{II}$ , знаходимо інтенсивності правоповоротного та прямого руху як частки від загальної інтенсивності за напря-

мом регулювання, оскільки співвідношення між прямими та поворотними інтенсивностями не залежить від номеру фази:

$$N_{1(nм)}^{II} = \frac{N_{нм}}{N_{нм} + N_{нв}} \cdot \frac{N_5^{II} \cdot M_1^{II}}{M_5^{II}}; N_{1(нв)}^{II} = \frac{N_{нв}}{N_{нм} + N_{нв}} \cdot \frac{N_5^{II} \cdot M_1^{II}}{M_5^{II}}, \quad (3.4)$$

де  $N_{нм}, N_{нв}, N_{л}$  – інтенсивність руху на під'їзді до стоп-лінії, з якої виходять напрями 1 та 5, відповідно прямо, праворуч, ліворуч, од./год.

Залишкові значення інтенсивностей відносяться до першої фази для забезпечення мінімальної тривалості фазоподібного інтервалу:

$$N_{1(л)}^I = 120; N_{1(нм)}^I = N_{нм} - N_{1(нм)}^{II}; N_{1(нв)}^I = N_{нв} - N_{1(нв)}^{II}. \quad (3.5)$$

Рішення про виділення крайньої лівої (лівих) смуг для руху тільки ліворуч за допомогою дорожньої розмітки та (або) дорожніх знаків, в тому числі зі змінною інформацією, ухвалюється на основі отриманого розподілу інтенсивностей за смугами руху у першій фазі регулювання.

Застосування означених формальних кроків дозволить у разі можливості замінити введення додаткової фази до структури світлофорного циклу з метою пропуску лівого повороту *фазоподібним інтервалом* і визначити тривалість цього інтервалу з урахуванням надлишкової інтенсивності лівого повороту, що створює небезпечний конфлікт із зустрічним потоком а також мінімального часу, необхідного для виїзду з перехрестя зустрічного потоку перед початком руху лівоповоротного потоку з надмірною інтенсивністю.

### 3.1.2 Застосування переходоподібних інтервалів

Перехрестя з рознесеними стоп-лініями утворюються при перетинанні вулиць бульварами та при віднесенні пішохідних переходів, коли пішохідні

потоки перетинають проїзну частину у віддаленні від перехрестя або у випадках організації віднесених поворотів ліворуч.

З точки зору принципу конфігурації перехрестя з рознесеними стоп-лініями можна поділити на 2 групи:

- з синхронним відпрацюванням циклограм сигнальними групами в перерізах рознесених стоп-ліній;
- із затримкою зеленого сигналу на вихідних стоп-лініях;

з іншими схемами регулювання (наприклад, затримками в одному з напрямів).

Розглянемо особливості конфігурування та запису до програми схем пофазових роз'їздів перехресть означених типів. На рис. 3.4 наведено схему пофазового роз'їзду типового перехрестя з бульваром. Напрями, що розпочинають рух від рознесених стоп ліній в одному напрямку мають різні номери для забезпечення можливості відпрацювання різних циклограм сигнальними групами одного напрямку, що працюють на рознесених стоп-лініях. Через це до першої фази включено 4 напрями, які попарно складають прямий та зворотній напрямки для магістралі загалом. До другої фази включено напрями з проїзних частин бульвару. Водії, що рухаються цими напрямками, на виконання вимоги Правил дорожнього руху, зупиняються перед стоп-лініями напрямів 5 та 6. Ця вимога розповсюджується і на водіїв, що прямують за напрямками 1 та 2.

Якщо перехрестя відноситься до першої з означених вище груп за схемою організації роботи світлофорного об'єкту, то для введення даних по ньому до програми треба користуватися звичайними принципами утворення конфліктної матриці. Геометричне визначення напрямів до дальших конфліктних точок (ДКТ) наведено на рис. 3.5. У випадку, якщо бульварні проїзди матимуть однакову ширину, відстані до дальніх точок для напрямів 1, 2, 5, 6 будуть однакові, або попарно однакові відповідно розташуванню рознесених стоп-ліній. Тому мінімальні проміжки для означених напрямів будуть одна-

кові, а відпрацювання переходів «зелений – червоний» в перехідному інтервалі з першої на другу фазу також однаковим.

У випадку, коли інтенсивність руху ліворуч на напрямках 3 та 4 буде високою, на виконання вимоги ДСТУ 4092 – 2002 [26] про обов’язкову локальну координацію світлофорів на лініях регулювання необхідно буде забезпечити відсутність сталої черги в перехідному інтервалі з першої на другу фазу перед лініями регулювання напрямів 5 та 6, а при подальшому зростанні інтенсивності і змінити схему пофазового роз’їзду.

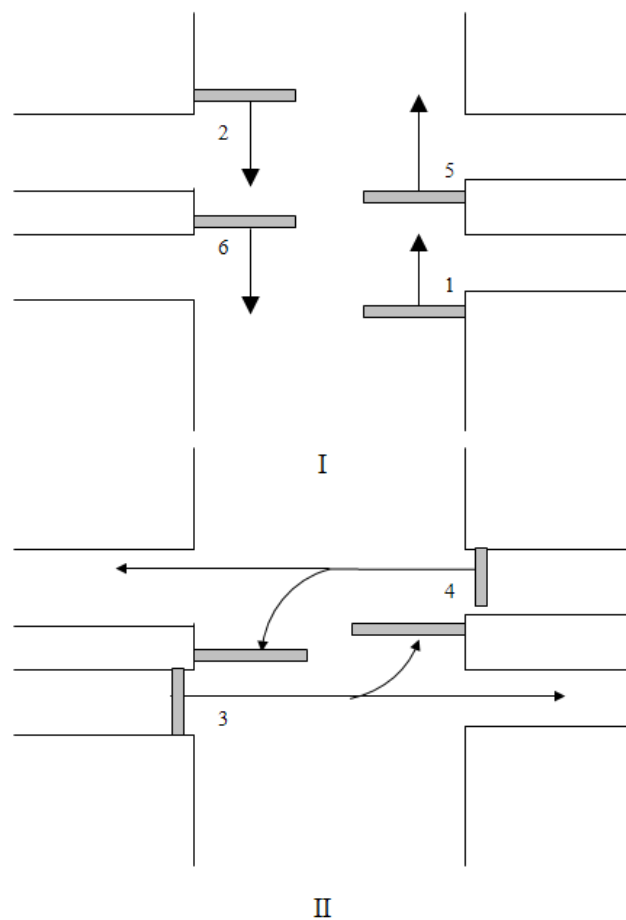


Рисунок 3.4 – Групи неконфліктних напрямів на перехресті з рознесеними стоп-лініями

Для забезпечення відсутності залишкової черги необхідно, аби транспортні засоби першого та другого напрямків не зупинялися перед стоп-лініями напрямів 5 та 6, а значить проїздили перехрестя повністю.

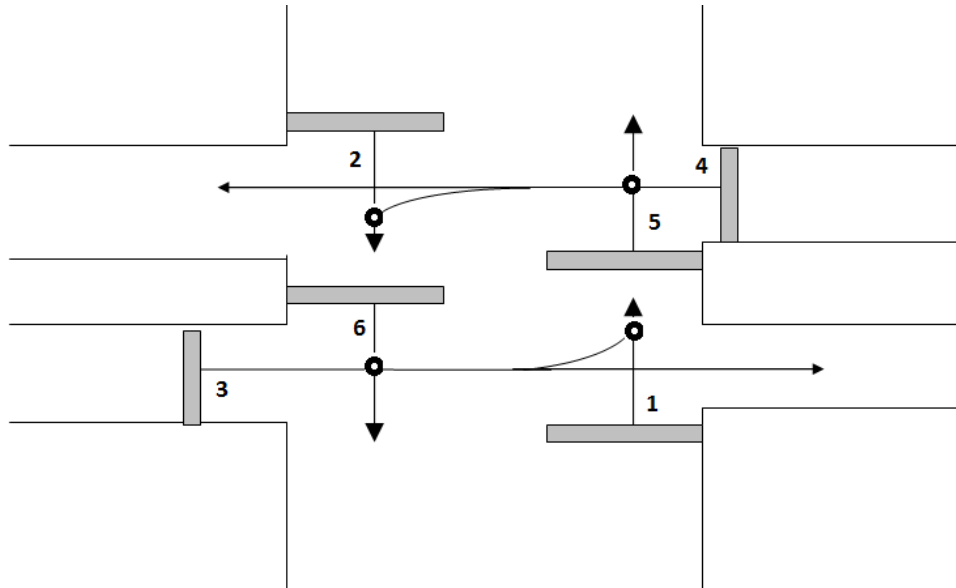


Рисунок 3.5 – Схема для визначення відстаней до дальніх конфліктних точок

Таким чином, найвіддаленіші конфліктні точки цих напрямів змінять своє положення та постануть на місцях дальніх конфліктів відповідно п'ятого та шостого напрямів. Таким чином, особливістю програмування режимів для перехресть другого виду з рознесеними стоп-лініями є зміна відстаней до ДКТ для напрямів перших стоп-ліній. На перехрестях з іншими схемами регулювання розрахунок відстаней до ДКТ провадиться в залежності від розташування місць на складному перехресті, де необхідна зупинка на заборонний сигнал, або виходячи з припущення, що в певних напрямках транспортних потік мусить проходити перехрестя без зупинки (метод локальної координації «Турбіна» [75]).

Таким чином, введення додаткових стоп-ліній дозволяє гарантувати безпечний проїзд транспортними засобами перехрестя у напрямі регулювання, за яким відстань до дальньої конфліктної точки є великою.

На основі матриці відстаней до дальніх конфліктних точок напрямів регулювання розраховується матриці мінімальних часових проміж-

ків, елементи якої, окрім елементів головної діагоналі, що дорівнюють нулю, визначаються за формулою:

$$t[i, j] = t_p + \frac{V_i}{2a} + \frac{B[i, j] + l_a}{V_i} - \frac{B'[j, i]}{V'_j}, \quad (3.6)$$

де  $t_p$  – термін реакції водія, с (0,8., .1.2 с),

$V$  – швидкість руху, м/с

$V'$  – максимально дозволена швидкість руху, м/с

$a$  – прискорення уповільнення,  $a^k = 2,5 \dots 3,0$  м/с<sup>2</sup>;

$B[i, j]$  – елемент матриці відстаней до ДКТ, м;

$B'[i, j]$  – елемент матриці відстаней до БКТ, м;

$l_a$  – довжина зведеного автомобіля, м ( $l_a = 5$  м).

При цьому за швидкість руху приймається швидкість 85-% забезпечення, а в реальних умовах швидкість залежить від складу потоку [70]. У випадку, якщо транспортний засіб рухається з іншою швидкістю, він може не встигнути доїхати від критичної точки до дальньої конфліктної точки до моменту приїзду туди транспортного засобу з конфлікуючого напрямку. Назвемо швидкість, рухаючись з якою, автомобіль не встигне досягти конфліктної точки, критичною швидкістю  $V_{кр}$ .

$$t_p + \frac{V_{кр.i}}{2a} + \frac{B[i, j] + l_a}{V_{кр.i}} - \frac{B'[j, i]}{V'_j} > t_p + \frac{V_i}{2a} + \frac{B[i, j] + l_a}{V_i} - \frac{B'[j, i]}{V'_j}; \quad (3.7)$$

$$\frac{V_{кр.i}}{2a} + \frac{B[i, j] + l_a}{V_{кр.i}} > \frac{V_i}{2a} + \frac{B[i, j] + l_a}{V_i}. \quad (3.8)$$

Після перетворень отримуємо:

$$V_i V_{кр}^2 - (V_i^2 + 2a(B[i, j] + l_a))V_{кр} + 2aV_i (B[i, j] + l_a) > 0; \quad (3.9)$$



$$V_{кр}^2 - \left( V_i + \frac{2a(B[i, j] + l_a)}{V_i} \right) V_{кр} + 2a(B[i, j] + l_a) > 0. \quad (3.10)$$

Оскільки всі швидкості додатні, та рівняння зведене, то, за теоремою Вієта:

$$(V_{кр} - V_i) \left( V_{кр} - \frac{2a(B[i, j] + l_a)}{V_i} \right) > 0. \quad (3.11)$$

Отже, якщо  $V_i^2 > 2a(B[i, j] + l_a)$ , то  $V_{кр} \in \left( -\infty; \frac{2a(B[i, j] + l_a)}{V_i} \right) \cup (V_i; +\infty)$ ;

якщо  $V_i^2 < 2a(B[i, j] + l_a)$ , то  $V_{кр} \in (-\infty; V_i) \cup \left( \frac{2a(B[i, j] + l_a)}{V_i}; +\infty \right)$ .

Оскільки миттєві швидкості руху транспортних засобів розподіляються за нормальним законом, то можливо визначити імовірність того, що миттєва швидкість будь-якого транспортного засобу не буде критичною, тобто не потрапить до наведених вище інтервалів [18].

$$P(\alpha \leq V \leq \beta) = \Phi\left(\frac{\beta - \bar{V}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - \bar{V}}{\sigma}\right), \quad (3.12)$$

де  $\alpha$  та  $\beta$  – межі інтервалу;

$\bar{V}$  – середнє значення швидкості, м/с;

$\Phi$  – функція Лапласа;

$\sigma$  – стандартне відхилення швидкості руху, м/с.

В нашому випадку, якщо  $V_i^2 > 2a(B[i, j] + L_a)$ , то  $\alpha = \frac{2a(B[i, j] + L_a)}{V_i}$ ;  $\beta = V_i$  та навпаки: якщо  $V_i^2 < 2a(B[i, j] + L_a)$ , то

$$\alpha = V_i; \beta = \frac{2a(B[i, j] + L_a)}{V_i}.$$

Крім того, за наявності додаткових стоп-ліній, перед ними протягом часу дії заборонного сигналу накопичується транспорт, що виїхав з другорядних напрямів (на рис. 3.5 це напрями з і 4) ліворуч. Ширина бульвару та кількість смуг за напрямками 5 і 6 повинні відповідати довжині черги, що утворюється, інакше вказані транспортні засоби заблокують перехрестя. Крім того, у випадку, якщо перехрестя відноситься до першої групи за наведеною вище класифікацією, то між вхідними та додатковими стоп-лініями буде накопичуватися черга із числа тих транспортних засобів, що в'їхали на перехрестя в кінці дозволяючих сигналів за напрямками 1 та 2.

Зважаючи на зазначене, віднесення перехрестя до однієї з груп за режимом роботи напрямів регулювання вхідних і додаткових стоп-ліній слід виконувати в тому числі із урахуванням розміщення черги транспортних засобів перед додатковими стоп-лініями.

У випадку повністю насиченої фази транспортні засоби проїздять переріз стоп-лінії з інтенсивністю, що дорівнює потоку насичення під'їзду до перехрестя.

Оскільки черга перед додатковою стоп-лінією формується з числа транспортних засобів, що проїхали вхідну на дозволяючий сигнал та зупинилися перед додатковою на заборонний, то її довжина становитиме:

$$l_q = \frac{\frac{B}{V} \sum_{e=1}^f M_e - \Delta t \sum_{j=1}^n M_j + \sum_{k=1}^h t_{\text{зел.к}} M_k}{3600n} \sum_{i=1}^r \frac{\alpha_i (l_{ai} + \Delta l)}{k_{\text{нпi}}}, \quad (3.13)$$

де  $B$  – відстань між вхідною та вихідною стоп-лініями, м;

$V$  – швидкість руху 85-% забезпечення за вхідним напрямом, м/с;

$f, n, h$  – кількість смуг руху відповідно через вхідну магістральну, вихідну та вхідну другорядну стоп-лінії;

$M_e$  – потік насичення  $e$ -ої смуги на магістральному в'їзді, од./год.;

$M_j$  – потік насичення  $p$ -ої смуги на виїзді, од./год.;

$\Delta t$  – різниця тривалостей дозволяючих сигналів світлофорів за напрямками магістральної вхідної та вихідної стоп-ліній, с;

$h$  – загальна кількість смуг на другорядних виїздах;

$M_k$  – потік насичення  $k$ -ої смуги на другорядному виїзді, од./год.;

$t_{зел.k}$  – ефективна тривалість дозволяючого сигналу за вхідним другорядним напрямом, яким слідує транспорт  $k$ -ою смугою руху, с;

$r$  – кількість груп транспортних засобів у потоці через вихідну стоп-лінію;

$\alpha_i$  – частка транспортних засобів  $i$ -го типу у вихідному потоці;

$k_{npi}$  – коефіцієнт зведення транспортного засобу до легкового автомобіля;

$l_{ai}$  – габаритна довжина автомобіля  $i$ -го типу, м;

$\Delta l$  – мінімальна дистанція між автомобілями, що зупинилися один за одним, м.

$$\alpha_i = \sum_{v=1}^t \beta_{iv} \chi_v, \quad (3.14)$$

де  $t$  – кількість виїздів;

$\beta_v$  – частка транспортних засобів  $i$ -го типу у  $v$ -му вхідному потоці;

$\chi_v$  – частка  $v$ -го вхідного потоку у вихідному потоці.

Фактична довжина ділянки проїзної частини, на якій буде розташовуватись черга, повинна перевищувати розрахункове значення довжини черги.

### 3.1.3 Визначення тривалостей елементів циклу для гарантованого перепуску пішоходів

З урахуванням фіксованої у [26] тривалості зеленого миготливого сигналу (3 с), а також фіксованого діапазону тривалості червоного пішохідного

сигналу у перехідному інтервалі (3-5 с) , тривалість мінімального проміжку пішохідного напрямку складатиме:

$$t[i, j] = 3 + (3...5) = 6...8 \text{ с.} \quad (3.14)$$

Тривалість мінімального проміжку повинна відповідати часу, необхідному для перетину проїзної частини останнім пішоходом, який вийшов на неї до ввімкнення зеленого миготливого сигналу. Тривалість цього часу розраховується за формулою:

$$t'[i, j] = \frac{B}{V_n}, \quad (3.15)$$

де  $B$  – ширина проїзної частини, м;

$V_n$  – швидкість руху пішохода, м/с (за [26] приймається 1,3 м/с).

Отримане значення слід округлити в більший бік до цілого числа та перевірити його входження до діапазону (3.14).

Відповідно до [26], мінімальний час, що відводиться пішоходам для перетину проїзної частини у світлофорному циклі визначається за формулою:

$$t_{niu} = \frac{B}{V_n} + 5. \quad (3.16)$$

Число 5 в цій формулі враховує час червоного пішохідного сигналу (3.15). Проте, у вказаній формулі не враховано час, необхідний для сходження на проїзну частину декількох рядів пішоходів, що можуть накопичуватися перед переходом в очікуванні дозволяючого сигналу.

Тривалість часу, необхідного для перетину проїзної частини групою пішоходів, визначено у [88].

$$T_{niu} = \frac{B}{V_{niu}} + t_{zn} + \frac{d_{niu} \cdot (n-1)}{V_{niu}}, \quad (3.17)$$

де  $B$  – довжина пішохідного переходу, м;

$V_{niu}$  – швидкість пішохода, м/с;

$t_{zn}$  – час реакції і затримки першого ряду пішоходів (приймається 2,5 с);

$d_{niu}$  – дистанція між рядами пішоходів (приймається 2м);

$n$  – кількість рядів пішоходів.

Врахувавши це, отримаємо формулу (3.18):

$$t_{niu} = \frac{B}{V_n} + t_{zn} + \frac{d_{niu}(n-1)}{V_n} + 5. \quad (3.18)$$

Кількість рядів пішоходів визначається за формулою (отриманий результат округляється в бік більшого цілого числа) [88]:

$$n = \frac{n_{gp}}{H/2}, \quad (3.19)$$

де  $n_{gp}$  – число пішоходів у групі, чол.;

$H$  – ширина пішохідного переходу, м.

Число пішоходів у групі визначається за формулою (отриманий результат округляється в бік більшого цілого числа) [88]:

$$n_{zp} = \frac{N_{пш}}{3600} (T_{ц} - (t_{OT}^k + t_{III}^k - t_{max}[i, j])). \quad (3.20)$$

де  $N_{пш}$  – інтенсивність пішохідного руху, чол./год;

$T_{ц}$  – тривалість світлофорного циклу, с;

$t_{OT}^k$  – тривалість основного такту фази, до якої включено пішохідний напрям, с.

З урахуванням входження до перехідних інтервалів мінімальних проміжків пішохідних напрямів, формула (3.21) [84], що застосовується для визначення тривалості втраченого часу підлягає заміні на формулу (3.22):

$$\bar{L} = \sum_{k=1}^m (t_{III}^k - 1); \quad (3.21)$$

$$L = \sum_{k=1}^m (t_{max}^k [i, j] - 1). \quad (3.22)$$

У випадку, якщо розрахована тривалість основних тактів регулювання менше часу, що потрібен для гарантування безпечного перетину проїзної частини пішоходами, тривалості основних тактів підлягають коригуванню. Крім того, тривалості інших основних тактів, тривалості яких не коригувалися, слід пропорційно збільшити [43, 44].

Для формалізації вказаних процедур пропонується застосовувати коефіцієнти корекції основних тактів регулювання  $\bar{k}''$ , що визначаються для кожного пішохідного напрямку регулювання за формулою:

$$\bar{k}'' = \frac{t_{niu}^i}{t_{om}^k}. \quad (3.23)$$

При підстановці до формули (3.23) формули (3.16) отримаємо:

$$\bar{k}'' = \frac{\frac{B}{V_n} + 5 - t_{ni}^k}{t_{om}^k}; \quad (3.24)$$

$$k'' = \frac{t_{niu}^i - t_{ni}^k}{t_{om}^k}. \quad (3.25)$$

Формула (3.24) з урахуванням виразів (3.17) – (3.22) матиме вигляд:

$$k'' = \frac{B + d_{niu} \frac{N_{niu} (T_y - (t_{om}^k + t_{ni}^k - t[i, j]))}{1800 \cdot H} - 1}{V_{niu}} + t_{zn} + 5 - t_{ni}^k}{t_{om}^k}. \quad (3.26)$$

Після перетворення отримуємо:

$$k'' = \frac{d_{niu} \cdot N_{niu} (T_y - (t_{om}^k + t_{ni}^k - t[i, j])) - 1}{1800 \cdot H \cdot V_{niu}} + \frac{B - 1}{V_{niu}} + t_{zn} - t_{ni}^k + 5}{t_{om}^k}. \quad (3.27)$$

Якщо розрахункове значення  $t'[i, j]$  перевищує 8, то треба на цьому перехресті вводити табло зворотного відліку часу. Якщо не перевищує або дорівнює то на перехресті немає необхідності вводити табло, тому що останньому пішоходу який вийшов на проїзну частину до ввімкнення зеленого мигливого сигналу вистачить часу для переходу проїжджої частини.

На рисунку 3.5 наведено залежності часу, необхідного пішоходу для подолання всієї проїзної частини та її половини з нормативною швидкістю

[26], а також максимальні і мінімальні значення часу, що відводяться для цього відповідно до формули (3.1).

У випадку, якщо значення часу, необхідного для залишення проїзної частини пішоходами перевищує максимальне нормативне значення, рекомендується застосування табло зворотного відліку часу дозволяючого сигналу для пішоходів. При вирішенні питання про доцільність застосування табло слід також зважати на динаміку аварійності на досліджуваному пішохідному переході та на формулювання п. 8.7.3(в) [67], що визначає зелений миготливий сигнал (в тому числі і для світлофорів типу П [26]) як дозволяючий.

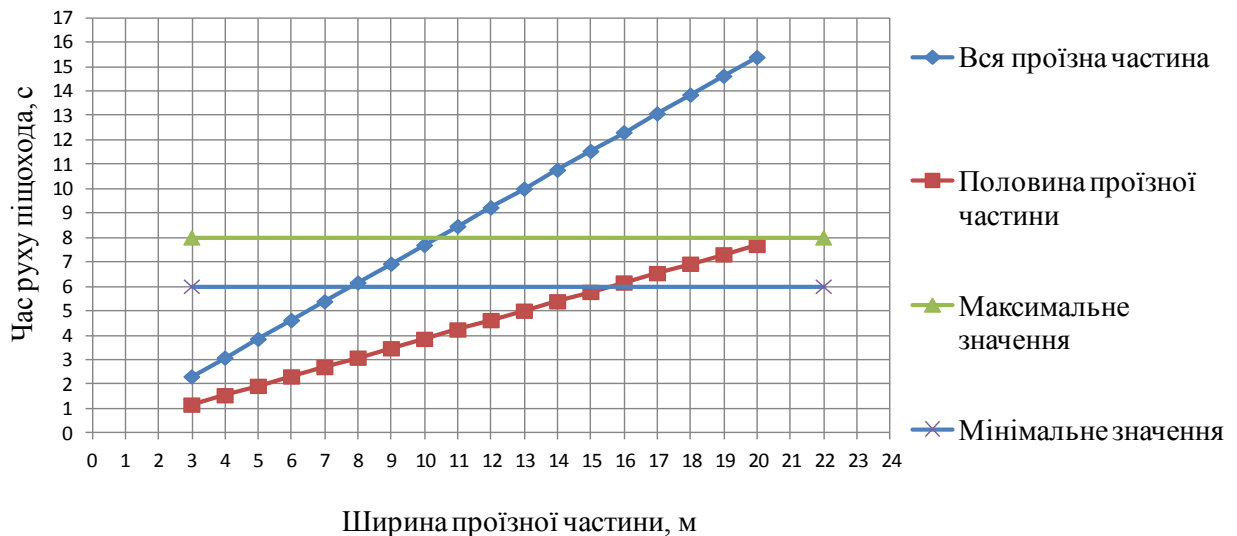


Рисунок 3.5 – Розрахункові та нормативні параметри руху пішоходів

Застосування запропонованого підходу дозволить формалізувати процедуру корекції елементів світлофорного циклу для гарантування безпеки пішоходів, у тому числі і в умовах високої інтенсивності руху пішоходів, за якої в очікуванні дозволяючого сигналу пішохідного світлофора утворюються групи людей; визначити умови, при яких доцільно введення табло зворотного відліку часу дозволяючого сигналу на регульованих пішохідних переходах як в зоні перехресть, так і на перегонах вулиць.



## **3.2 Адаптація підходу до управління за окремими напрямками до сучасних програмно-апаратних засобів АСУДР**

### **3.2.1 Забезпечення перепуску тролейбусів**

Останнім часом актуальності набула проблема підвищення ефективності використання пропускнуої спроможності міських регульованих перехресть. Невідповідність параметрів світлофорних режимів динамічним транспортним потокам призводить до утворення заторів, що погіршують екологічну ситуацію, призводять до простоїв транспортних засобів та втрат часу пасажирами, виступають побіжними причинами дорожньо-транспортних пригод [87].

При застосуванні АСУДР на ВДММ постає необхідність корекції координованих світлофорних режимів з огляду на транспортні засоби громадського користування, яким через особливі динамічні характеристики та наявність зупинок притаманні режими руху, відмінні від режимів загального транспортного потоку. В той-же час через високу у порівнянні з легковим автомобілем пасажиромісткість простої транспортних засобів громадського користування призводять до значних сукупних втрат часу учасниками дорожнього руху, передусім тими пасажирами, що перебувають в цих транспортних засобах та, через збільшення інтервалів руху, тими пасажирами, що чекають на цей транспорт на зупинках [71].

У системах ізольованого світлофорного регулювання та в АСУДР ефективно здійснювати коригування параметрів регулювання залежно від прибуття до зони регулювання рухомого складу громадського транспорту дозволяють системи авторегулювання, що в основному діють за алгоритмами, які залежать від прийнятих стратегій регулювання. Системи пріоритетного пропуску громадського транспорту можуть бути класифіковані по трьом стратегіям: пасивна, активна та адаптивно-оперативна[8]. Пасивні стратегії працю-

ють безперервно незалежно від того, чи наявний перед перехрестям рухомий склад громадського транспорту, чи ні та не вимагають системи виявлення рухомого складу громадського транспорту. Активні стратегії використовують системи виявлення рухомого складу громадського транспорту для того, щоб виявити транспортні засоби, які підлягають пріоритету. Адаптивна оперативна стратегія забезпечує пріоритет, одночасно випробовуючи та оптимізуючи задані критерії роботи.

Для ефективного застосування алгоритмів активної стратегії необхідно надійно та своєчасно виявити наближення транспортного засоби громадського користування до зони регулювання. Для цього використовуються детектори різної конструкції та різного принципу дії.

Такий вид міського електричного транспорту як тролейбус має деякі особливості режиму руху, що більшою мірою проявляються поблизу перехресть. Наявність контактної мережі викликає необхідність проходження спеціальних частин ліній (зокрема, стрілок) зі зниженою швидкістю. Крім того, спеціальні частини є ключовими елементами, які визначають режим руху тролейбусів у всій зоні регулювання[16].

Тролейбусна стрілка в місцях розходження лінії працює за таким принципом (рисунок 3.6): у випадку, якщо тролейбус проїздить стрілку ліворуч водій під час проходження стрілки відключає тролейбусний двигун, сильно знижуючи витрату струму з контактної мережі тролейбусом. Привод стрілки, що являє собою електромагніти, які перенаправляють штанги на ліву лінію, спрацьовує лише в тому випадку, коли обмоткам електромагнітів, підключеним у стрілці послідовно до електричного ланцюга тролейбуса, достатньо для спрацювання величини струму, що проходить через них. Спрацювання приводу і переведення штанг праворуч досягається за рахунок ввімкнення двигуна під час проходження стрілки та збільшення таким чином сили струму через електромагніти.

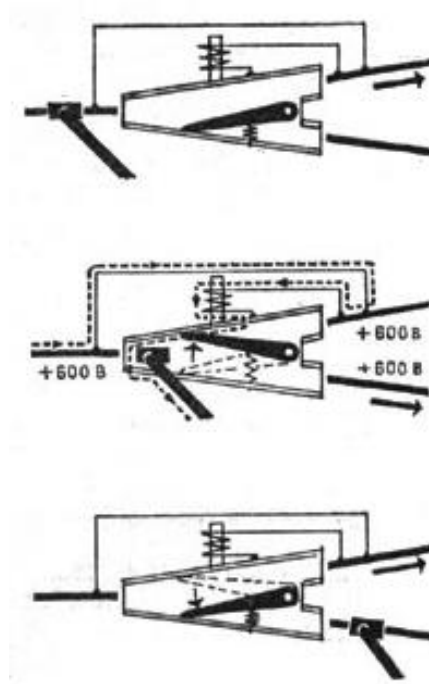


Рисунок 3.6 – Положення тролейбусної стрілки

Аналізуючи роботу керованої тяговим струмом тролейбусної стрілки, можна зауважити, що переведення штанг тролейбуса в напрямі «праворуч» завжди супроводжується проходженням через електромагніти, що є виконавчими елементами стрілки, електричного сигналу, що характеризується силою струму, яка дорівнює струмові спрацювання електромагнітної системи (30-60 А) залежно від налаштування стрілки. Під час проходження штанг в інших напрямках через мережу магнітів проходить струм, що дорівнює струмові власних потреб тролейбуса та до спрацювання електромагнітної системи не призводить. У час, коли струмознімачі на стрілці відсутні, струм через мережу електромагнітів не проходить взагалі. Таким чином, поява електричного струму 30-60А є ознакою прибуття до перехрестя тролейбуса, що рушить ліворуч; поява струму менше 30 А свідчити про прибуття тролейбуса, що рушить прямо чи праворуч [80].

Для перетворення цього сигналу в сигнал виклику, продовження чи пропуску певних елементів циклу світлофорного регулювання пропонується використати пасивний датчик (рис. 3.7), що складається з двох реле струму та

електромагнітного реле. При розробці цього приладу дотримані норми електробезпеки (контактна мережа тролейбусу напругою 600 В гальванічно ізолювана від сигнальної мережі дорожнього контролера напругою 5-12 В).

Виходи 1, 2 та 3 підключаються до викличного блоку дорожнього контролера замість кнопок, які застосовуються для виклику фаз регулювання. Виходи 4 та 5 підключаються до мінусового та плюсового дотів контактної мережі відповідно (у випадку, якщо плюсовий та мінусовий дріт розташовані в іншому порядку, змінюється полярність підключення реле струму). Виходи 6 та 7 підключаються до ізольованих повітряними проміжками пластин, на яких знаходяться направляючі та пір'я стрілки.

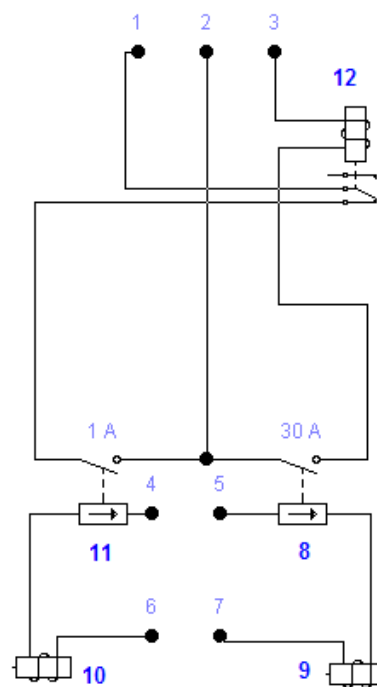


Рисунок 3.7 – Схема електрична принципова запропонованого пристрою

У випадку, коли тролейбус проходить стрілку праворуч, від плюсового дроту через клему 5, обмотку реле струму 8, електромагніт 9, клему 7, допоміжний електричний ланцюг тролейбуса, клему 6, електромагніт 10, обмотку реле струму 11, клему 4 до мінусового дроту проходить струм величиною бі-

льше 1 А та менше 30 А. Оскільки всі перелічені елементи мережі підключено паралельно, значить сила струму через кожен із них буде однаковою. Цієї сили струму недостатньо для спрацювання електромагнітів 9 і 10 та реле струму 8, проте достатньо для спрацювання реле струму 11. Таким чином, реле 11 спрацює та замкне клеми 1 і 2 через нормально замкнені контакти реле 12.

У випадку, коли тролейбус проходить стрілку ліворуч, від плюсового дроту через описаний вище ланцюг до мінусового дроту проходить струм величиною більше 30 А. Оскільки всі перелічені елементи мережі підключено паралельно, значить сила струму через кожен із них буде однаковою. Цієї сили струму достатньо для спрацювання електромагнітів 9 і 10 та реле струму 8 і 11. Під дією електромагнітів 9 і 10 пір'я стрілки змінюють своє положення, і тролейбусні штанги переводяться на ліву лінію, а спрацювання реле струму 8 та 11 викликає замикання між собою контактів 1, 2 і 3. Проте, за рахунок різниці потенціалів на контактах 2 і 3, спрацює реле 12, тому проходження струму між клемами 1 і 2 не буде допущено.

Таким чином, тролейбуси, що проходять стрілку ліворуч і праворуч будуть подавати до дорожнього контролера сигнали про появу перед перехрестям та про напрям подальшого руху, що дозволить скоротити простої транспортних засобів громадського транспорту перед перехрестями, зменшить затримки пасажирів громадського транспорту та позитивно вплине на загальну транспортну ситуацію за рахунок скорочення тривалостей фаз регулювання, розрахованих на пропуск громадського транспорту.

### **3.2.2 Забезпечення перепуску трамваїв**

Наявність в циклі регулювання трамвайних напрямів, а також напрямів, куди включено траєкторії руху трамваїв, передбачає певні особливості при розрахунку параметрів СФР [59].

Сумарна тривалість ОТ і ПІ фази регулювання з трамвайним рухом не повинна бути нижчою за час про слідування через перехрестя трамвайного поїзду. Зважаючи на малу швидкість руху трамваїв, для виконання цієї вимоги при значній відстані до конфліктних точок з трамваєм, слід виділяти на цю фазу значну частину світлофорного циклу. За наявності кількох напрямів руху трамваю, що включені до різних фаз, проблема ускладнюється.

Розглянемо принцип роботи трамвайних стрілок [16].

Схема управління стрілкою від контактної мережі працює від напруги 600В постійного струму. Один з електроприводів серієсний (С) включений до електричного ланцюгу послідовно мережі трамвайного вагону. Інший привод – шунтовий (Ш) включений до електричної мережі паралельно.

На контактному дроті перед стрілкою знаходяться серієсні повітряні контакти (СК), що опускають струмознімач трамваю, поступово відриваючи його від контактного дроту (КД). За стрілкою на лівому напрямі в одному рівні з контактним дротом встановлені шунтові повітряні контакти (ШК).

Якщо трамваю необхідно їхати праворуч, водій проводить його під серієсним контактом накатом, тобто з вимкненими двигунами. Тому стрілка залишається в правому положенні, оскільки серієсний ланцюг залишається розімкненим (рис. 3.8)

Якщо трамваю слід їхати ліворуч, то водій за допомогою контролера вмикає двигуни. Коли поїзд проходить під стрілкою з ввімкненими двигунами, виникає електричний ланцюг: контактний дріт – серієсний електропривод – серієсні повітряні контакти – двигуни вагона – рейки – тягова підстанція (Т П/С) (рис. 3.9).

Таким чином, контролер трамвайного поїзда є вимикачем, що замикає серієсний електричний ланцюг стрілки.

Після того, як вагони минули стрілку, під шунтовими контактами автоматично виникає інша електрична мережа: контактний дріт – шунтові повітряні контакти – шунтовий електропривод – рейки – тягова підстанція. В ре-

зультаті шунтовий електропривод повертає стрілку у початковий стан (рис.3.10).

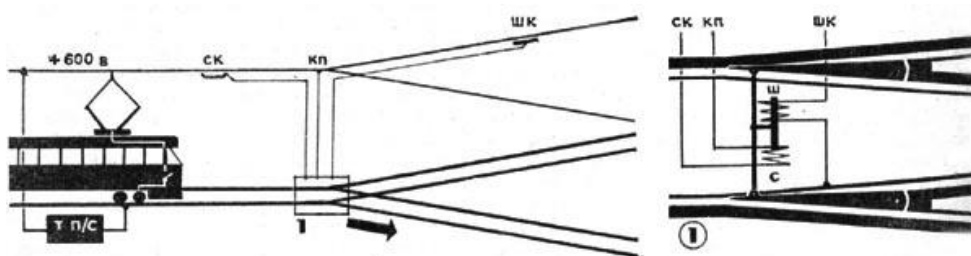


Рисунок 3.8 – Проходження стрілки праворуч

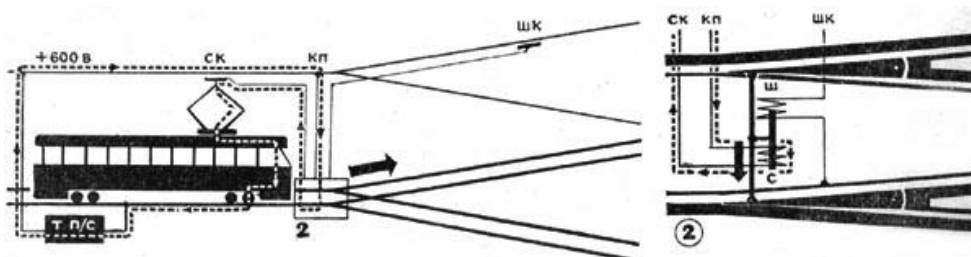


Рисунок 3.9 – Спрацювання серієсного приводу

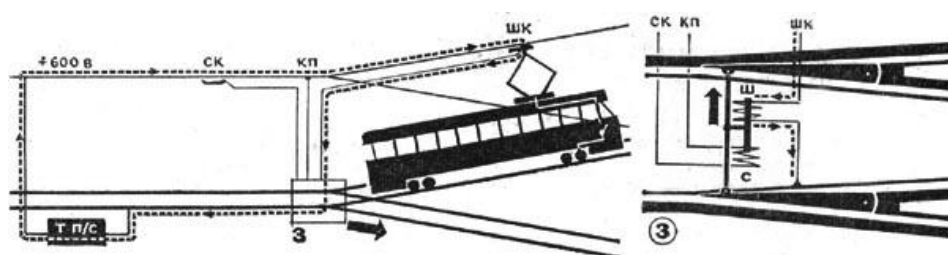


Рисунок 3.10 – Спрацювання шунтового приводу

В результаті аналізу проведеного дослідження інтенсивності дорожнього руху на перехресті можна зборонити висновок, що частота прибуття до ліній регулювання трамвайних поїздів в середньому менша, ніж один поїзд за цикл регулювання. Таким чином, враховуючи напружений рух на перехресті та достатньо високе завантаження підходів до перехрестя, а також його вклю-

чення в систему координації доцільно перевірити можливість застосування авторегулювання щодо груп напрямів, до яких включено траєкторії руху трамваїв.

З цією метою досліджуємо можливість автоматизації трамвайної стрілки та використання електроконтактів, що задіяні в схемі стрілки в якості датчиків для системи авторегулювання.

Пропонується в якості датчиків використати серієсний та шунтовий контакти автоматизованої трамвайної стрілки, а також додати детекторний контакт, функцією якого є виявлення трамвайного поїзду незалежно від напрямку руху (рис. 3.14).

Розглянемо будову запропонованої схеми, зображеної на рис. 3.11.

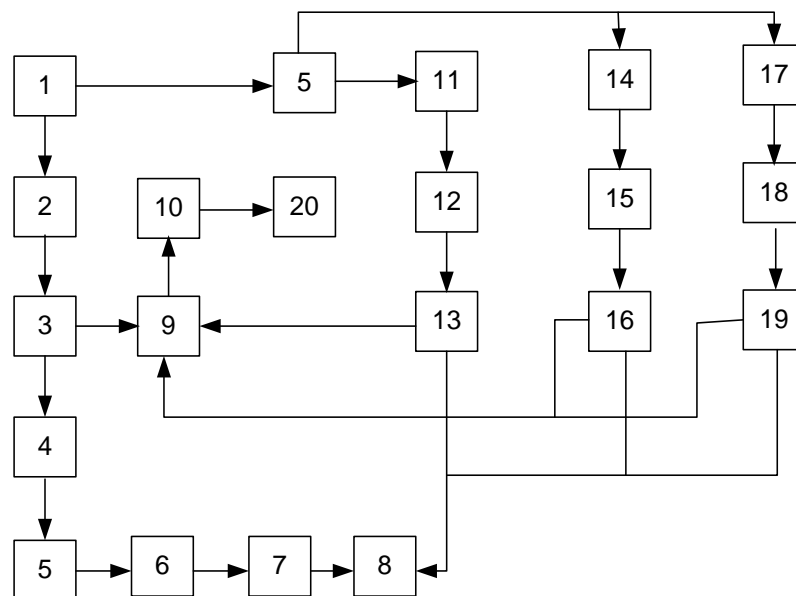


Рисунок 3.11 – Схема моделі управління світлофорним об'єктом для пропуску трамваїв

Електричний струм протікає від плюсового дроту контактної мережі 1 через серієсний соленоїд 2, датчик струму серієсного соленоїда 3, серієсний електричний контакт, розташований на контактному дроті та електрично ізолюваний від нього 4, трамвайний пантограф 5, трамвайний контактор 6, трамвайний електродвигун 7 у рейки 8.



У випадку, якщо сила струму через соленоїд 2 перевищує нормативну величину, він спрацьовує та переводить стрілку для руху ліворуч. Електричний струм, що проходить через соленоїд 2 фіксується датчиком 3, підключеним послідовно до електричного ланцюгу соленоїда. Перевищення силою струму нормативного значення призводить до спрацювання датчика та подачі електричного сигналу до блоку логіки 9, що трамвай буде проходити стрілку ліворуч. Цей сигнал блок логіки передає до дорожнього контролера 10 для виклику відповідної фази світлофорного регулювання.

Далі за серієсним електричним контактом 4 на контактній мережі знаходиться детекторний електричний контакт 11. При проходженні його трамвайним пантографом 5 струм від плюсового дроту 1 проходить через пантограф 5, детекторний контакт 11, детекторний реостат 12, детекторний датчик сили струму 13 у рейки 8. Датчик 13 фіксує проходження струму і подає сигнал до блоку логіки 9. Блок логіки 9 передає сигнал до дорожнього контролера про виклик фази лише в тому випадку, коли попередньо не було отримано сигнал від датчика 3.

На контактному дроті лівого відгалуження стрілки знаходиться шунтовий контакт 14, на який під час проходження подає струм пантограф 5 від плюсового дроту 1. Цей струм приводить у дію шунтовий соленоїд 15 та фіксується датчиком сили струму 16. Далі струм іде до рейок 8. Датчик сили струму 16 подає сигнал до блоку логіки 9, який за цим сигналом визначає, що трамвай по лівому відгалуженню залишив перехрестя.

На контактному дроті правого відгалуження стрілки знаходиться шунтовий контакт 17, який пантограф замикає з плюсовим контактним дротом 1 під час проходження контакту. Струм далі йде на шунтовий реостат 18 та фіксується датчиком струму шумового реостату 19. Електричний струм далі йде до рейок 8. Датчик струму шумового реостату 19 подає сигнал до блоку логіки 9. За допомогою отриманого з датчика 19 сигналу блок логіки 9 фіксує залишення трамваєм перехрестя по правому відгалуженню стрілки.

В момент залишення трамваєм перехрестя, що фіксується датчиками 16 та 19, виклик відповідних фаз контролером завершується, а наступний трамвай може заїздити на стрілку.

Дорожній контролер 10 керує дорожніми світлофорами 20, в тому числі трамвайними.

Застосування цієї схеми дозволяє використати обладнання трамвайної стрілки в якості детектора для фіксації наближення поїзда до зони СФР, перебування в цій зоні та залишення її.

Наявність детекторів такого виду дозволяє реалізувати активну стратегію пріоритету транспортних засобів громадського користування.

### **3.2.3 Перехідні алгоритми між «жовтим миготінням» та режимом зміни сигналів**

Відповідно ДСТУ 4092-2002, перехід світлофорних об'єктів на режим жовтого миготіння може застосовуватись під час тривалого і значного зменшення інтенсивності дорожнього руху у порівнянні з розрахунковими параметрами.

Відповідно до діючих схем, дорожній контролер переводить об'єкт на спеціальну програму жовтого миготіння відповідно до сигналу електричного годинника, тумблера ручного керування або телесигналу пульта управління. Переведення на режим жовтого миготіння може виконуватися і під час виходу на перехрестя регулювальника.

Діючий принцип роботи дорожніх контролерів передбачає такий порядок зміни режимів між програмою та режимом жовтого миготіння [33]: при переході з режиму на жовте миготіння в останню секунду програмного режиму ввімкнені світловипромінювачі відповідно сигналів програмного режиму, у першу півсекунду режиму жовтого миготіння вимкнено всі світло випромінювачі, протягом другої півсекунди режиму миготіння ввімкнено

жовті випромінювачі і далі з періодичністю 1с повторюються пів секундні інтервали вимкнення та ввімкнення випромінювачів жовтих сигналів; при переході з режиму жовтого миготіння на програмний протягом передостанньої півсекунди режиму миготіння вимкнено всі випромінювачі, протягом останньої півсекунди ввімкнено жовтий випромінювач, з початку першої секунди програмного режиму викликається складний спеціальний перехідний інтервал, до якого входять спеціальний додатковий такт “довкола червоний”, додатковий такт, що містить червоно-жовтий сигнал у напрямках, включених до першої фази регулювання та червоний за іншими напрямками регулювання, в тому числі і за пішохідними.

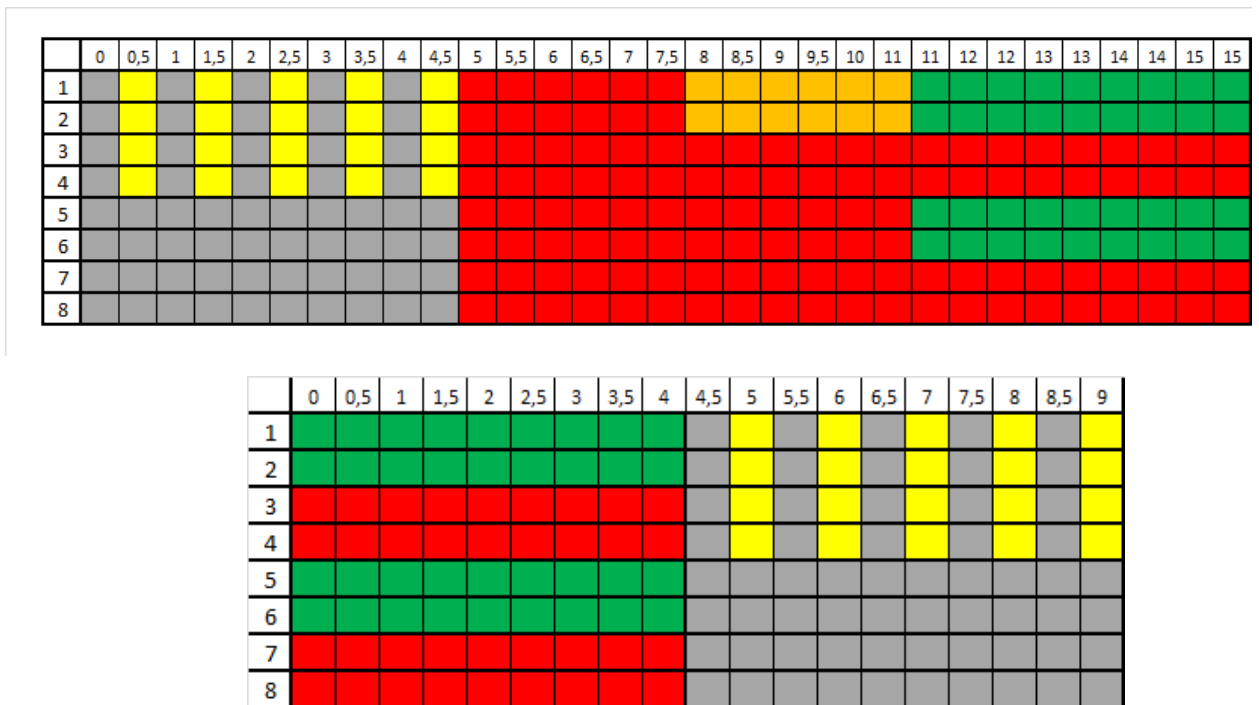


Рисунок 3.18 – Існуючий порядок переходу з жовтого миготіння на програмний режим та з програмного на жовте миготіння

Розглянемо встановлений Правилами дорожнього руху [67] порядок проїзду перехресть в періоди, що містять моменти зміни режиму світлофорного регулювання з програмного на жовте миготіння і навпаки.

Транспортний засіб, що виїхав на перехрестя (проїхав стоп-лінію) на сигнал світлофора, що дозволяє рух, мусить рухатися далі незалежно від сигналів інших світлофорів, якщо перед ними не позначено стоп-лінії (п.16.8 ПДР). З точки зору водія цього транспортного засобу, перехрестя є регульованим, отже вимоги знаків пріоритету на нього не розповсюджуються, тому, навіть рухаючись прямо другорядною дорогою, він, за умови відсутності трамвайного руху, не мусить поступатися дорогою будь яким транспортним засобам, окрім тих, що в'їхали на перехрестя протягом сигналу, що дозволяє рух з іншого напрямку, і полишають перехрестя. Остання умова актуальна лише на початку періодів ввімкнення сигналів світлофора, що дозволяють рух. Таким чином, при переведенні світлофорного об'єкту на режим жовтого миготіння при відсутності дублюючих світлофорів на перехресті водій буде певен, що в'їхав на перехрестя на сигнал, що дозволяє рух. А у разі переведення на жовте миготіння в момент знаходження транспортного засобу в перерізі стоп-лінії, водій змушений буде поступатися дорогою, а то і зупинитися у разі наявності відповідного дорожнього знаку, проте ані часу, ані запасу шляху для цього не передбачається.

Щодо транспортного засобу, що рухається головною дорогою та в момент переходу на режим жовтого миготіння наближається до перехрестя, то його водій керується вимогами ПДР щодо проїзду нерегульованих перехресть, і зупинитися для пропуску транспортних засобів, що знаходяться на перехресті або саме заїздять на нього, не мусить. Вимога п.16.5 ПДР, в якому вказано, що у разі ввімкнення сигналу світлофора, що дозволяє рух, водій зобов'язаний дати дорогу транспортним засобам, що завершують рух через перехрестя, не є для цього водія актуальною, оскільки знаходиться в підрозділі розділу 16 ПДР «Регульовані перехрестя», а на момент прийняття рішення перехрестя не регулюється».

Таким чином, провокуються умови для створення водіями, що рухалися у фазі, яка відповідає напрямкам другорядної дороги аварійних ситуацій ситу-

ації при переході з програмного режиму на жовте миготіння, оскільки миттєво пріоритет передається напрямом головної дороги. При цьому не передбачається жодного перехідного інтервалу для залишення перехрестя, хоча у порівнянні з переходами між фазами регулювання, ступінь небезпеки є більш значним, оскільки немає вимоги щодо пропуску транспорту з другорядних напрямків, який не має часу та відстані для виконання вимоги щодо надання пріоритету.

При переході з режиму жовтого миготіння на програму створюються небезпека для транспортних засобів, що рухаються напрямом головної дороги, які не відповідають напрямом, включеним в першу фазу регулювання, оскільки одразу після переходу ввімкнеться зелений сигнал саме для них. Крім того, відпрацювання спеціального перехідного інтервалу викликає аварійні ситуації, пов'язані з раптовим гальмуванням транспортних засобів, водії яких бачать сигнал «довкола червоний», а потім прискорюються при ввімкненні зеленого сигналу.

При цьому водії транспортних засобів, що рухаються в момент переходу на програмний режим головною дорогою, захищені вимогою п. 16.5 ПДР, проте сигнал «довкола червоний» для транспортних засобів, що рухаються включеними в першу фазу регулювання напрямом має ефект, схожий з проходженням основного такту регулювання, щоправда у дзеркальному відображенні: спочатку потік їде, потім зупиняється, і потім знову їде. Доцільно нагадати, що, відповідно до діючої методики розрахунку параметрів світлофорного регулювання, тривалість основного такту слід обмежувати в менший бік значенням  $7c$ , а тривалість сигналу «довкола червоний», як правило, не перевищує 3-4 с [33].

Для ліквідації більшості пов'язаних з переходом небезпек пропонується не вважати режим жовтого миготіння програмою і ввести до контролера псевдонапряму регулювання, який відповідно до спеціальної процедури, що її прописано до блоку перемикання світлофорних сигналів (БПСС) та блоку

управління світлофорним об'єктом (БУСО) вмикає жовті випромінювачі в режимі миготіння.

Означений псевдонапряма включає в себе траєкторії, що відповідають пріоритетним напрямам руху транспортних засобів для умов нерегульованого перехрестя (при цьому до одного напрямку можуть входити траєкторії, що входять на перехрестя через різні стоп-лінії) та вводиться до конфліктної матриці відповідно до загальних правил, але з урахуванням деяких додаткових положень [86]:

1) елемент, що позначає перехід зі звичайного напрямку на псевдонапряма дорівнює нулю, якщо траєкторії, що входять до вказаного напрямку повністю відповідають напрямам пріоритету для нерегульованого перехрестя;

2) елемент, що позначає перехід з псевдонапряму на пряма регулювання у разі застосування «довкола червоного» дорівнює сумі тривалості «довкола червоного» та червоно-жовтого сигналів у випадку, коли траєкторії, що складають псевдонапряма повністю відповідають траєкторіям, що складають означений пряма регулювання;

3) під час розрахунку відстаней до дальніх конфліктних точок при переході зі звичайних напрямів на псевдонапряма, слід враховувати вимогу п.16.14 ПДР [67] (якщо головна дорога на перехресті змінює напрямок, водії транспортних засобів, які рухаються по ній, повинні керуватися між собою правилами проїзду перехресть рівнозначних доріг) та розраховувати відстань до конфліктної точки лише у випадку, коли пряма, що відповідає номеру рядочка конфліктної матриці позбавлений пріоритету в дальній конфліктній точці, в іншому разі точка виключається з розрахунку.

В таблицях 3.1 та 3.2 показано елементи конфліктних матриць мінімальних часових проміжків. Для переходів з режиму жовтого миготіння на програмний режим прийнято 6-секундний проміжок, що складається з трьох секунд сигналу «довкола червоний» та 3 секунд червоно-жовтого сигналу. Трьома крапками позначені відстані, що їх треба розрахувати за схемою пе-

рехрестя у мірилі. Як бачимо на прикладі напрямів 3 та 6, через врахування пріоритету, принцип конфліктності чи не конфліктності двох напрямів незалежно від напрямку переходу, не виконується.

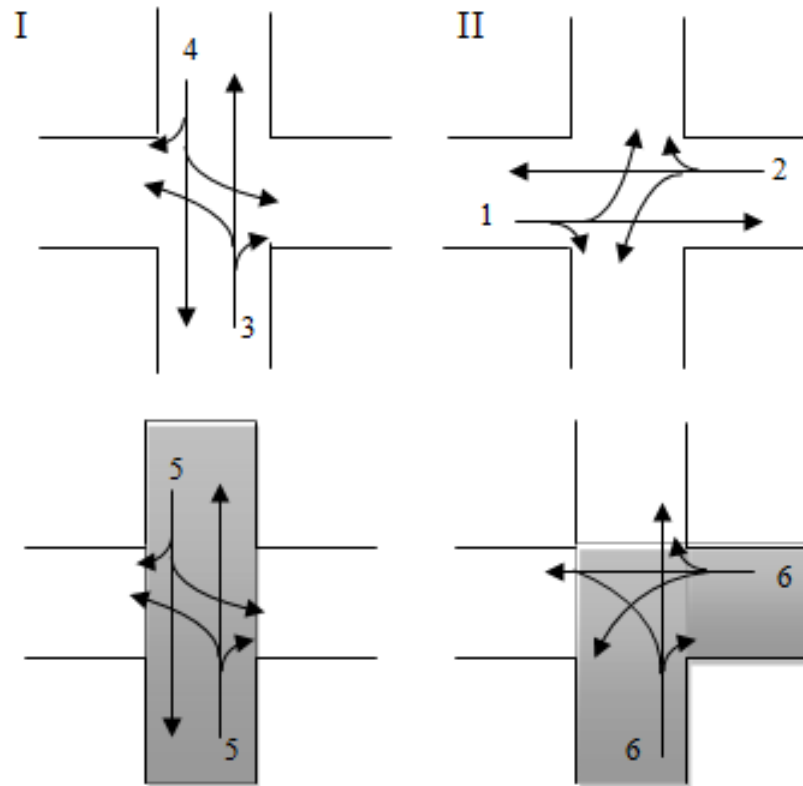


Рисунок 3.19 – Схема пофазного роз’їзду та схема псевдонапрямів за умови змінності та незмінності напрямку головної дороги (1-4 – напрями регулювання, 5,6 – псевдонапрями жовтого миготіння, сірим кольором показано напрям головної дороги)

Застосування цього підходу до формалізації переходів, пов’язаних з режимом жовтого миготіння повністю погоджується з існуючими принципами та нормативами функціонування апаратури систем автоматизованого управління дорожнім рухом, і для його застосування достатньо перепрограмування БПСС та БУСО дорожніх контролерів, що працюють з протоколом

АСЗ-УР зі збереженням протоколу та принципів передачі сигналів телеуправління і телесигналізації [59, 60].

Таблиця 3.1 – Матриця конфліктів для перехрестя з незмінним напрямом головної дороги

напрями	1	2	3	4	5
1	0	0	...	...	...
2	0	0	...	...	...
3	...	...	0	0	0
4	...	...	0	0	0
5	...	...	<b>6</b>	<b>6</b>	0

Таблиця 3.2 – Матриця конфліктів для перехрестя з головною дорогою, що змінює напрям

напрями	1	2	3	4	6
1	0	0	...	...	...
2	0	0	...	...	0
3	...	...	0	0	...
4	...	...	0	0	...
6	...	<b>6</b>	...	...	0

Внаслідок застосування запропонованого підходу можна підвищити рівень безпеки руху транспортних засобів та пішоходів на регульованих перехрестях в момент зміни режимів роботи світлофорного об'єкта за рахунок уникнення дорожньо-транспортних пригод, причиною яких є швидка зміна статусу перехрестя з регульованого на нерегульований та навпаки, що не передбачає можливості проїзду (переходу) перехрестя учасниками руху, що розпочали рух під час дії попереднього світлофорного режиму.



### Висновки за розділом 3

Викладені у розділі положення дозволяють застосувати розроблений підхід до управління світлофорною сигналізацією за окремими напрямками в конкретних складних випадках регулювання на перехрестях, зокрема:

- під час розщеплення фази регулювання для перепуску інтенсивних поворотних потоків та для регулювання перехресть з рознесеними стоп-лініями;

- у випадках регулювання руху інтенсивних пішохідних потоків, що утворюють чисельні групи протягом очікування дозволяючого світлофорного сигналу;

- при програмуванні переведення дорожнього контролера в режим жовтого миготіння та переходу до програмного режиму з урахуванням гарантування безпеки дорожнього руху;

- для перепуску електричного транспорту з метою визначення оптимальних за безпекою руху тривалостей зелених сигналів та мінімальних часових проміжків за напрямками регулювання, що ними рухаються трамваї та тролейбуси.

## РОЗДІЛ 4

### ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС (САПР) ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ РЕЖИМІВ СФР ПРИ УПРАВЛІННІ ЗА ОКРЕМИМИ НАПРЯМКАМИ

#### 4.1 Програмний засіб «Кросроуд»

Для пояснення принципу роботи програми у частині циклоутворення введемо наступні позначення:

- включені напрями – напрями, за якими вмикається дозволяючий сигнал в даній фазі;
- наявні напрями – напрями, що є включеними хоча б до одної фази;
- невключені напрями – напрями, за якими не передбачено ввімкнення дозволяючого сигналу у даній фазі;
- відсутні напрями – напрями, які не є включеними хоча б одної фази.

Результати підрахунків за алгоритмом встановлення параметрів світлофорного циклу (блок-схему алгоритму наведено на рисунку 4.10) структуруються у вигляді матриці фаз та матриці конфліктних напрямів. У останній кожен елемент позначає мінімально припустимий часовий проміжок у секундах між зеленим сигналом напрямку, номер якого дорівнює номеру рядка, в якому знаходиться у матриці конфліктних напрямів відповідний елемент, та ввімкненням зеленого сигналу за напрямом, номер якого дорівнює номеру стовпчика, в якому знаходиться елемент.

В матриці фаз кількість рядків дорівнює кількості фаз. У першому стовпчику прописано номер фази, у другому – тривалість основного такту фази, у третьому – тривалість додаткового зеленого (вводиться з екрану для кожної фази під час введення включених напрямів за умови, що номер включеного напрямку співпадає із номером напрямку, для якого передбачено зелений дода-

тканий сигнал), з четвертого по десятий стовпчик прописуються номери включених напрямів. Після заповнення матриць процедура вводу вважається завершеною.

Далі проводиться перевірка фаз на відсутність включених конфліктних напрямів. Для цього в циклі програма для кожного рядку матриці фаз перебирає всі наявні включені напрями попарно та перевіряє, чи дорівнюють нулю елементи матриці конфліктних напрямів, рядок та стовпчик для яких відповідають напрямам, що перевіряються. Нульове значення мінімального часового проміжку показує, що напрями не є конфліктними, а додатне – що конфлікт наявний. У разі виявлення фази, для якої хоча б одна пара включених напрямів є конфліктними, на екран виводиться повідомлення про те, що тест на конфліктні напрями не пройдено та виконання програми переривається, оскільки для введення нових значень до матриці треба рестартувати програму. У разі, якщо тест пройдено, про це виводиться повідомлення та робота програми триває.

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.

Зпоміж включених напрямів обирається базисний напрям за найбільшою величиною перехідного інтервалу. При цьому величина перехідного інтервалу складається із тривалості мінімального проміжку, зеленого додаткового та зеленого миготливого базисного напрямку, якщо у матриці фаз відповідне значення є додатнім, а тривалість мінімального проміжку визначається елементом у матриці конфліктних напрямів в рядку, номер якого дорівнює номеру фази, що знімається, шляхом перевірки на максимум за усіма стовпчиками матриці мінімальних часових проміжків. Встановлюються значення міток: першій передається значення другої, а другій – значення першої плюс тривалість основного такту в фазі, що знімається, плюс отримане значення перехідного інтервалу.

Проводиться розмітка головного напрямку: від першої мітки відкладаються інтервали для зеленого, зеленого миготливого, жовтого та червоного сигналів (кожного сигналу – за своїм каналом, що його закріплено початковою конфігурацією програми “Крос”) у основному та проміжному тактах. Під час відкладання за допомогою лічильника ведеться перевірка останніх інтервалів для кожного каналу з метою пошук співпадання станів попереднього та поточного інтервалів для раціонального використання обмеженої кількості інтервалів програмою „Крос”.

Далі розмічаються інші включені напрями. Треба зауважити, що початок миготіння зеленого сигналу за напрямом, який не є включеним до фази, що готується, розпочинається у момент часу, який залежить від мінімально припустимого проміжку між вимкненням зеленого сигналу даного напрямку та початком основного такту фази, що готується. Тому до тривалості зеленого сигналу у основному такті додається величина  $Z_{da}$  – зелений додатковий автоматичний такт.

$$Z_{da} = M2 - M1 - T_{mn} - T_{осн} - T_{зм}, \quad (4.1)$$

де  $M2$  та  $M1$  – значення відповідно першої та другої міток циклограми;  
 $T_{mn}$  – значення мінімального часового проміжку для даного включеного напрямку;

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

$T_{зм}$  – тривалість зеленого миготливого (приймається рівним 3 с [26]).

У випадку, коли небазисний напрям включено і до фази, що готується, мінімальний часовий проміжок для нього із ним самим буде дорівнювати нулю, отже у формулі  $T_{mn} = 0$ , а  $T_{зм}$  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. Таким чином очевидно, що зелений сигнал напрямку,

що його включено до двох послідовних фаз послідовності у перехідному інтервалі між основними тактами цих фаз буде ввімкнено.

Зрозуміло, що для базисного напрямку значення мінімально допустимого проміжку дорівнює величині проміжного такту без миготіння зеленого сигналу (зелений блимаючий за означенням відноситься до проміжного такту, але, оскільки згідно до вимог Правил дорожнього руху України [67], що їх введено у дію з 10.10.2001 року, рух транспортних засобів на блимаючий зелений сигнал дозволено, а, отже, дозволено і в'їзд на перехрестя, будемо вважати, що звільнення напрямку розпочинається з моменту ввімкнення жовтого сигналу, а, отже, розраховане значення мінімально припустимого проміжку будемо відкладати з моменту ввімкнення жовтого сигналу означеного напрямку або з моменту вимкнення стрілки додаткової секції за напрямом, що відповідає стрілці), а для інших включених напрямків ці моменти будуть іншими, якщо значення мінімально припустимих проміжків для цих напрямів не дорівнюють такому значенню для головного напрямку [72].

Згідно до вищезазначеного, програма розраховує момент часу початку миготіння зеленого сигналу за кожним із 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 4.1 – сигнали за номерами каналів: 1, 2, 3 – сигнали за головним (базисним) напрямом, включеним до фази, що знімається; 3, 4, 5 – сигнали за небазисним напрямом, включеним до фази, що готується; 7, 8, 9 – сигнали за неголовним (небазисним) напрямом, включеним до фази, що знімається; сигнали за напрямками накреслено у послідовності: червоний, жовтий, зелений.

Варто зауважити, що вирахування моменту вимкнення зеленого сигналу для кожного напрямку при застосуванні фазного принципу побудови світлофорного циклу не є характерним для контролерів, що застосовуються на теперішній час (навіть для останніх моделей, як то ДК-1 запорізького виробництва, що повторює за принципом конфігурації контролер ДКМ [33])

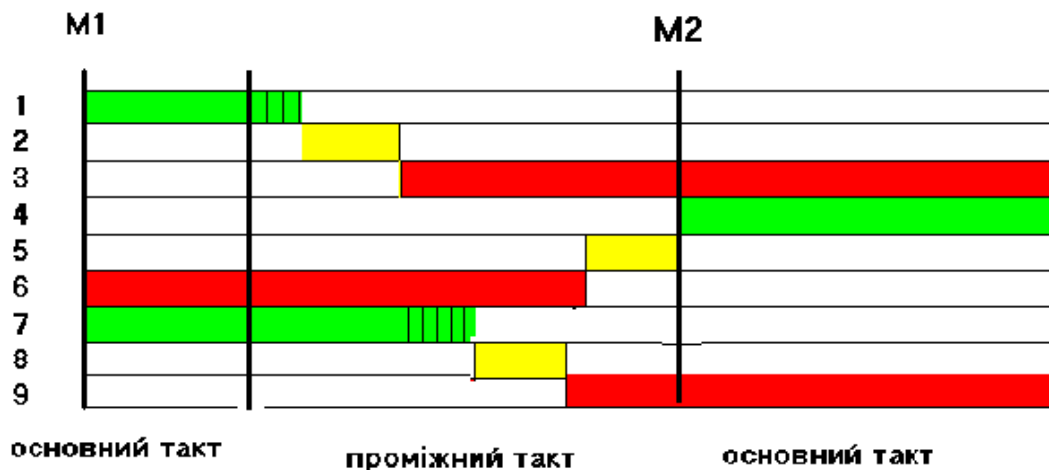


Рисунок 4.1 – Фрагмент графіка роботи світлофорного об'єкту (M1 – перша головна мітка)

. Тому при зміні порядку чергування фаз збільшується втрачений на перехресті час, оскільки перехід для кожного напрямку з червоного на зелений сигнал та з зеленого на червоний є атрибутом виключно напрямку і не має стосунку до інших включених напрямів у фазах що знімаються та готуються. Важливо, що на основі відомостей, що їх отримано з матриці мінімальних проміжків, програма розраховує проміжні такти для будь-якого порядку чергування фаз та для будь-яких варіантів (з числа припустимих за вимогами конфліктного тесту) входження напрямів у фази.

Далі програма розмічає також напрями, що не включені до фази, що знімається (впродовж основного такту фази на світлофорах цих напрямів ввімкнено червоне світло). Для цього по-перше визначаються номери невключених напрямів (усього їх 4, і деякі можуть бути відсутніми): в матриці

фаз вишуковуються напрями з номерами, відмінними від тих, що включені до фази, що знімається. Вони і є невиключені, а інші, серед конфігурованих у програмі “Кросроуд” є відповідно відсутніми. Для знайдених таким чином напрямів від мітки М1 до М2 закладається червоний сигнал, а також визначається значення J, що показує, чи є напрям, що не включений до фази, що знімається, включеним до фази, що готується. У разі істинності J за 3 с перед міткою М2 вмикається і жовтий сигнал за невиключеним напрямом.

В результаті проходження головним циклом матриці каналів стільки разів, скільки зконфігуровано фаз, матриця заповнюється даними і далі готова для оброблення шифратором для створення файлу даних для програми “Кросроуд”.

Для програмування дорожнього контролера здобувачм разом із програмістом Денисенком О.І розроблено програму “Кросроуд” для програмування спеціального блоку перемикання світлофорних сигналів (СБПСС). Особистий внесок здобувача при створенні програми Кросроуд полягав у визначенні переліку задач, виконання яких автоматизується за допомогою програми, створенні алгоритму для програми та дослідному випробуванні отриманого продукту. Внесок співавтора полягав у написанні програмного коду.

Програма “Кросроуд” дозволяє:

- отримувати циклопрограми світлофорних послідовностей та роздруковувати їх;
- зберігати та відтворювати суміжні дані та параметри налаштування світлофорного обладнання;
- проглядати та роздруковувати параметри та стани інтервалів на окремих каналах;
- проробляти циклопрограми на макетах світлофорних об'єктів, що їх укомплектовано СБПСС.

У перспективі заплановано також інші можливості, як то створення типових довідок про роботу світлофорного об'єкта та зберігання проектно-конфігураційної документації у вигляді стандартних таблиць.

Кожному каналу 1..12 відповідають у СБПСС виходи для підімкнення джерела світла світлофорної секції. Секції основного та дублюючих світлофорів під'єднуються паралельно. Таким чином, у головному вікні програми "Кросроуд" (рис. 4.2) видно стан усіх сигнальних груп світлофорного об'єкту протягом циклу регулювання, параметри якого подаються у вікні налаштування параметрів циклу. Відповідно до діючих стандартів [26, 53, 72], джерело світла у світлофорній секції може знаходитися у 3 станах: "вимкнено", "увімкнено", "блимає" (період миготіння – 1 с). Для кожного з каналів програмою "Кросроуд" виділяються у циклі 5 проміжків, для яких стан джерела світла залишається незмінним (цей стан позначено у вікні "налаштування каналів". Цикл регулювання загалом характеризує головний період, а також тривалості і стани незмінних проміжків каналів (з точки зору режиму регулювання) та кількість каналів і закріплення секцій з випромінювачами за виходами вбудованих кладу системи.

Поля даних, що містять уставки налаштування каналів під час виконання розрахунку програмою заповнюються автоматично під час трансформації даних з шифрованого режиму роботи, проте існує можливість ручної корекції тривалостей інтервалів та станів випромінювачів на кожному інтервалі.

При виконанні корекції слід зважати на те, що сума тривалостей всіх інтервалів повинна дорівнювати значенню тривалості циклу світлофорного регулювання (головного періоду). У разі порушення цієї вимоги на екрані з'являється відповідне повідомлення, а відпрацювання режиму за хибними уставками призупиняється.



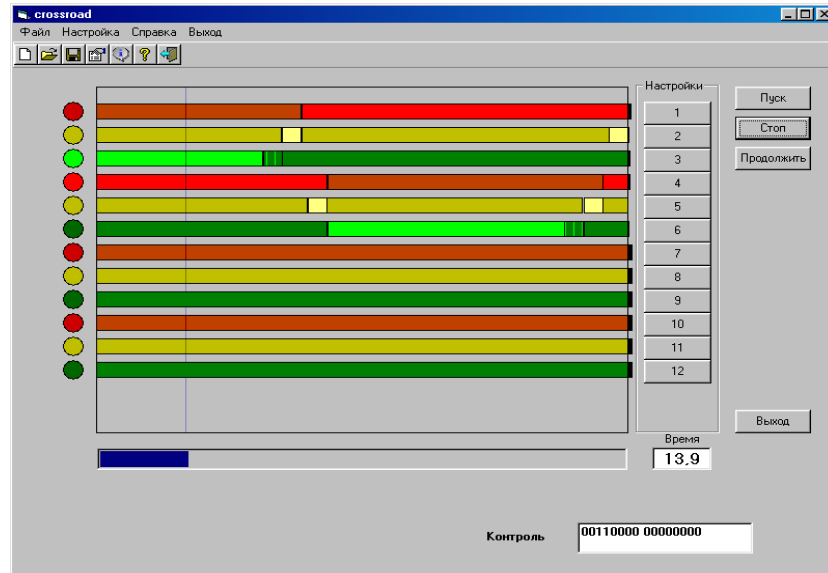


Рисунок 4.2 - Відпрацювання світлофорного циклу на перехресті в on-line режимі (синьою лінією на циклограмі позначено поточний момент часу)

#### 4.2 Використання програмного комплексу для конфігурування СБПСС при управлінні рухом за окремими напрямками

На відміну від багатьох сучасних дорожніх контролерів, у СБПСС практично відсутня основна програма перекладення параметрів циклу (тривалостей основних тактів та перехідних інтервалів) в режим роботи безпосередньо випромінювачів у світлофорах. Цей режим для кожного з випромінювачів розраховується індивідуально для кожної робочої послідовності та має вигляд матриці станів, де прописується щосекундно стан випромінювача (ввімкнено, блимає, вимкнено). Ці матриці записуються до флеш-пам'яті блоку та відпрацьовуються посекудно за системним годинником.

Враховуючи, що за час основного такту стан випромінювачів за визначенням основного такту має бути незмінним, йому відповідає у матриці лише один стовпчик. Багато в цьому принципі нагадує програму «Крос», тому другим з числа робочих варіантів зберігання інформації у пам'яті контролера є саме інтервальний метод за подобою шифропрограм для «Крос».

Слід зазначити, що запропонована методика не виключає використання контролера в діючих АСУДР, проте в цьому випадку матриця станів розбивається на основні такти та перехідні інтервали, що записуються та відпрацьовуються окремо за викликом АСУДР.

Розглянемо фрагмент схеми пофазового роз'їзду на перехресті проспекту Леніна та вул. Комсомольської. До першої фази включено зокрема напрям №1. До другої фази – пішохідний напрям №4 та напрям №2. До третьої фази – пішохідний напрям №4 та напрями №3 та №2. Робоча послідовність №1, що її формує центральний керуючий пункт, включає фази у порядку 1-2-3 (рис.4.3), проте у випадку застосування ручного керування або програми зеленої вулиці формується послідовність №2, до якої фази входять у порядку 1-3-2 (рис. 4.4). Таким чином для напрямку 1 номер найвіддаленішої від вхідної стоп-лінії конфліктної точки змінюється в залежності від послідовності. Першій послідовності відповідає точка №3, а другій – точка №2.

Оскільки перехід з зеленого на червоний сигнал задається у контролерах, що використовуються зараз (ДКМ та ДК-01), однозначно поза залежністю від можливих послідовностей (утворення послідовностей підкоряється законам комбінаторики та на етапі програмування можна лише прогнозувати, які саме послідовності будуть утворені при ручному керуванні або повному авторегулюванні), то в цьому випадку треба запрограмувати перехід таким чином аби в будь-якому разі транспортні засоби напрямку 1 мали можливість проїхати перехрестя.

Тобто за максимальну відстань приймаємо при ручному розрахунку відстань від стоп-лінії до конфліктної точки 2. Ця відстань складає 74,5 м. Розрахуємо мінімальний часовий проміжок для цього напрямку. Отримаємо 12с. Таким чином, частина втраченого часу, що утворюється саме у перехідному інтервалі з першої фази буде дорівнювати 11 с.

На рис. 4.5 частину втраченого часу виділено прямокутниками.

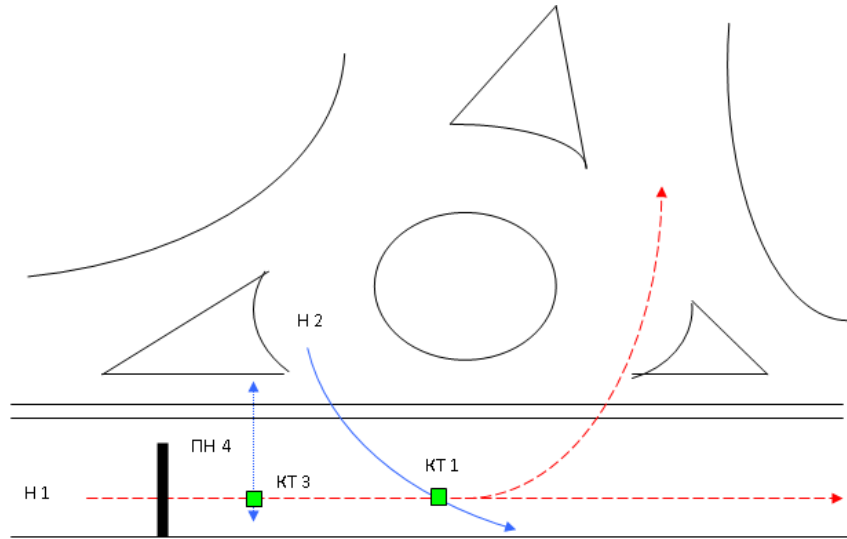


Рисунок 4.3 - Конфліктна точка під час відпрацювання послідовності  
№1

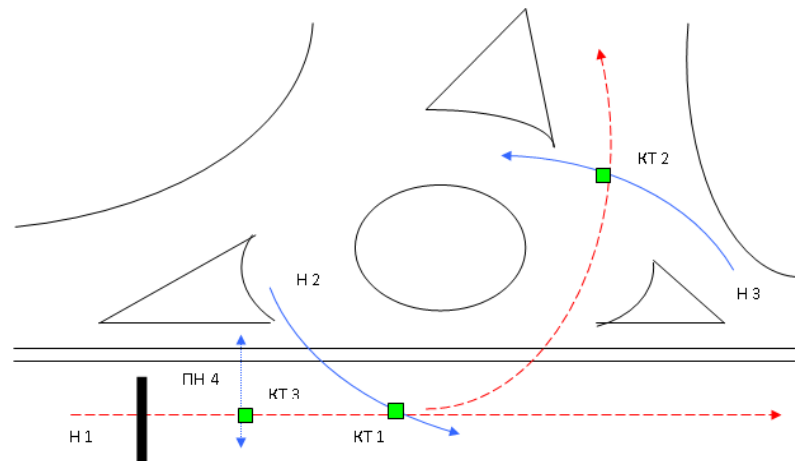


Рисунок 4.4 - Конфліктна точка під час відпрацювання  
послідовності №2

Окрім встановленого виграшу часу за рахунок вибору такого порядку чергування дозволяючих світлофорних сигналів в структурі світлофорного циклу, що забезпечує мінімізацію часових проміжків між дозволяючими сигналами конфліктній напрямків світлофорного регулювання, слід також звернути увагу на зменшення імовірності прояву різниці швидкостей різних тра-

нспортних засобів при русі по однакових траєкторіях, що особливо проявляється на значних відстанях та за наявності криволінійних траєкторій.

Негативний вплив такої різниці на безпеку дорожнього руху проаналізовано у п. 3.1.2 дисертаційної роботи.

Таким чином, можна стверджувати, що застосування означеного підходу дозволяє підвищити безпеку руху і на кільцевих перетинах, а також відмовитися від введення додаткових стоп-ліній у місцях, де вони були б потрібні для запобігання аварійним ситуаціям у конфліктних точках злиття та перетину на виїздах з регульованих перехресть з рухом по колу.

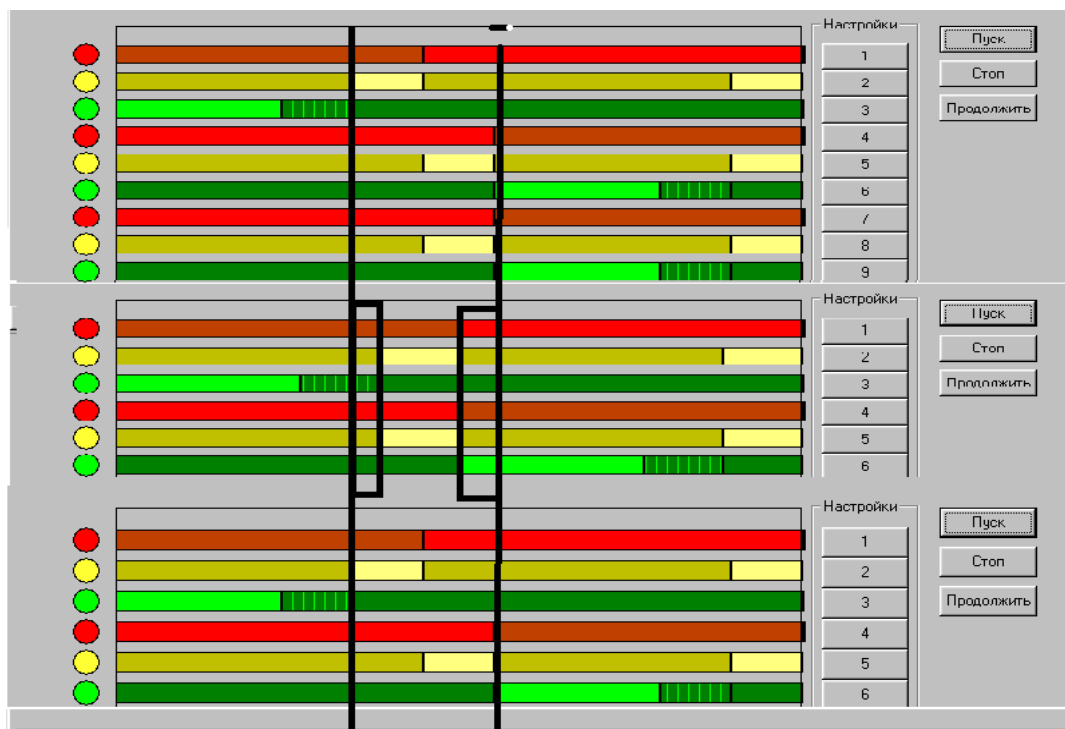


Рисунок 4.5 – Порівняльні циклограми, утворені програмним комплексом: послідовність №2, послідовність №1 за новим принципом, послідовність №1 за старим принципом (номери каналів: 1-3 – напрям №1, 4-6 – напрям №2, 7-9 – напрям №3)

### 4.3 Алгоритм програмного комплексу при визначенні параметрів регулювання

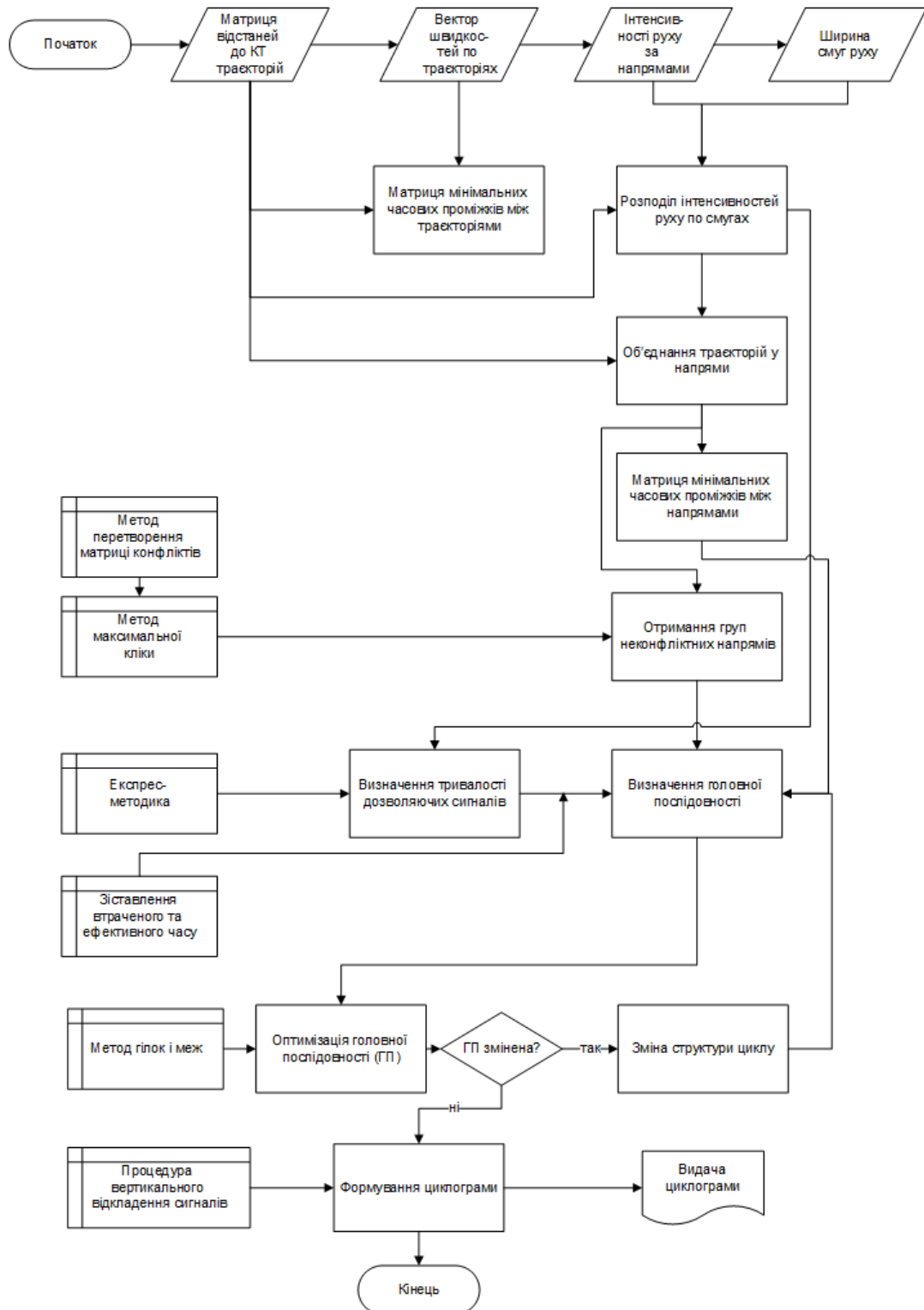


Рисунок 4.6 – Алгоритм програмного комплексу

#### 4.4 Розрахунок режимів координованого регулювання за допомогою програмного комплексу «Курс-13»

Координоване регулювання – це режим роботи світлофорних об’єктів на магістралі чи в районі, що забезпечує безупинний проїзд всіх перехресть на магістралі координації чи за маршрутом координованого регулювання транспортних засобів, що рухаються з розрахунковою швидкістю.

Розрахункова швидкість координованого регулювання мусить визначатися на базі 85%-го забезпечення, тобто не перевищувати швидкість руху 85% транспортних одиниць потоку.

Метою проведення розрахунків з координування за даними про цикл координації та режими світлофорних об’єктів на магістралі є одержання значень зсувів моментів початку горіння зелених сигналів магістральних напрямів. Графік координованого регулювання рис. являє собою графічне відображення у двовимірній системі координат руху щільних груп транспортних засобів і будується за графоаналітичним методом.

До вихідних даних належать початок і тривалість виклику фази координатором. Для спрощення обчислень номер першої за порядком фази завжди приймається за одиницю. Оскільки процес зміни фаз є циклічним, то за допомогою цілочисельного ділення можна привести значення зсуву, взяте з будь-якого циклу регулювання до зсуву в межах циклу. Операційне значення зсуву  $O$  знаходиться для  $i$  –ої фази за формулою:

$$O = P - t_{g(i-1,i)}, \quad (4.2)$$

де  $P$  – номер секунди початку виклику.

Дійсне значення зсуву  $D$ , що відкладається на графіку координації знаходиться за формулою (ділення цілочисельне):

$$D = O + C - \left( \frac{O}{C} \right) \times C, \quad (4.3)$$

де  $C$  – тривалість циклу координованого регулювання, с.

Цикл регулювання становить 81 с. Так, наприклад, якщо отримане значення зсуву 87с, це означає, що дійсне його значення 6 с, а якщо -10 с, це значить 71 с.

На графіку координованого регулювання стрічки часу проходять через смуги перехресть, відстані між якими відповідають відстаням між стоп-лініями на перехрестях магістралей координації. Для програми координації відстані між перехрестями задаються окремо в прямому та зворотному напрямках.

За умови, що значення швидкостей та циклу встановлено і вони незмінні, завдання полягає у «закритті» зеленими сигналами магістральних напрямів ділянки графіку, де стрічка часу входить до смуги перехрестя. Фігура, що повинна закрити цю ділянку, зветься калькою. Далі викладається графічна методика магістральної координації з уточненнями та поправками щодо роботи програми автоматичної координації (алгоритм програми наведено в додатку Ж).

З початку координат під ухилом, що відповідає швидкості координації (для кожного з напрямів та для кожного з перегонів швидкість координації може бути різною, проте вона не повинна відрізнятися від тієї, для якої були підраховані перехідні інтервали циклу і може бути змінена для кожного перехрестя за допомогою відповідного обробника) виходить пряма, що проходить через усі смуги перехресть під кутами, що відповідають швидкості на кожному з перегонів. Паралельно їй праворуч на відстані стрічки часу відповідного напрямку теж будується пряма і така побудова паралельно зноситься праворуч на відстані, що дорівнює світлофорному циклу у масштабі.

Оскільки робота світлофорів в межах одного плану координації має циклічний характер, то всі отримані стрічки є рівними між собою для виконання будь-яких побудов.

Така сама сітка за допомогою обчислення кутів будується і в зворотному напрямі, проте початок першої лінії міститься не на перетині верхньої смуги перехрестя з віссю ОУ, а зміщується вздовж смуги перехрестя на певне значення, що не перевищує циклу регулювання. Це значення є ключем до побудови графіку координації і називається зміщенням зворотної стрічки чи просто зміщенням (на рис. його позначено суцільною стрілкою, пунктирною лінією позначено зсув на одному з перехресть). Програма координації, змінюючи значення зміщення, проробляє різні варіанти, знаходячи розв'язок, коли всі кальки повністю закривають точки входження стрічок часу до смуг перехресть.

Для цього необхідно, беручи за контрольну одну зі стрічок, що входить до сітки стрічок прямого напрямку, домогтися її близького розташування (в межах циклу) із стрічками зустрічного напрямку. З цією метою для спрощення побудови контрольною признається не перша з ліва стрічка.

Точки входження до смуги перехресть контрольної стрічки позначають А та В. Стрічка, що відкладається від зміщення, дає по дві точки на верхньому перетині із кожною зі смуг перехресть.

Далі знаходяться пари точок, що лежать на верхніх межах смуг перехресть на відстані циклу попарно та через них проводяться лінії, що є паралельно знесеними праворуч штрихпунктирними стрічками.

З цієї сітки методом цілочисельного ділення обираються дві стрічки (рис. 4.7), що знаходяться якнайближче до контрольної стрічки.



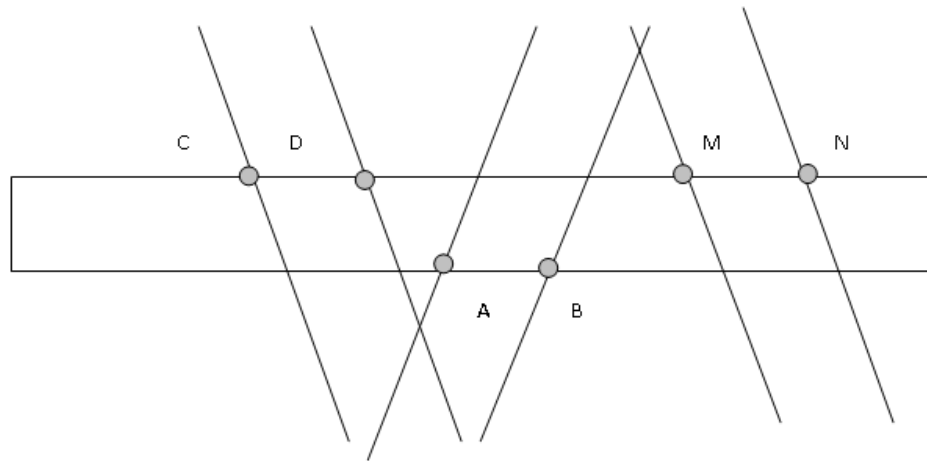


Рисунок 4.7 – Визначення стрічок оточення

Кальки є фрагментами циклограм магістральних напрямків, а саме їхніми зеленими сигналами разом із зеленим миготінням. Проте відомо, що стрічки часу повинні бути закритими калькою навіть і впритул, в той час як стрічки позначають рух щільної групи в координації. Використати весь час зеленого сигналу для руху щільної групи неможливо, оскільки наявні ще позагрупові транспортні одиниці. Виходячи з цього, калька зменшується на 5 с – час, необхідний для проходження через переріз стоп-лінії поза групових автомобілів.

Слід зазначити, що на трифазних перехрестях величина кальок складається не тільки з тривалостей фаз, до яких включено відповідні магістральні напрями, а і з тривалостей перехідних між цими фазами інтервалів, значення яких, як відомо, програмно змінюється у залежності від порядку чергування фаз.

При трифазному регулюванні існує лише дві послідовності фаз, на яких може будуватися світлофорний цикл:  $1 - 2 - 3$  та  $1 - 3 - 2$ . Для уникнення плутанини будемо при позначенні послідовностей починати з першої за конфігурацією фази, оскільки саме вона викликається АСУДР при переході до координованого режиму. Будемо вважати, що обидва магістральні напрями (прямий та зворотний) включено до першої фази, а, за наявністю третьої

фази, до неї включено псевдо напрям або стрілку додаткової секції. До другої фази включено прямий та зворотний напрями вулиць, що перетинають магістраль (рис. 4.8).

На рис. зображено можливі конфігурації перетинів стрічок часу та смуг перехресть з накладеними на них кальками. Саме до цих чотирьох варіантів зводиться розв'язок задачі введення в координований режим кожного з перехресть (рис. 4.9). При цьому довжина кальок розраховується за формулами:

$$Zel = f1 + f3 + t_{\partial 1-3} - 5; \quad (4.4)$$

$$Zel = f1 + f3 + t_{\partial 3-1} - 5. \quad (4.5)$$

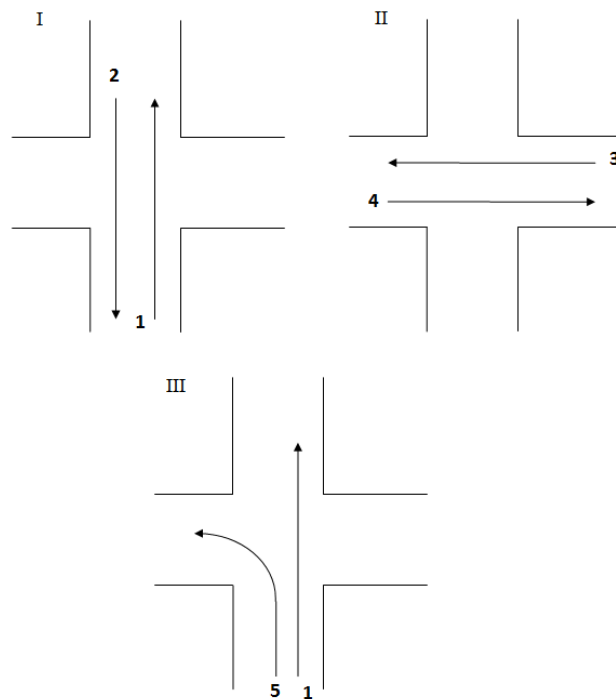
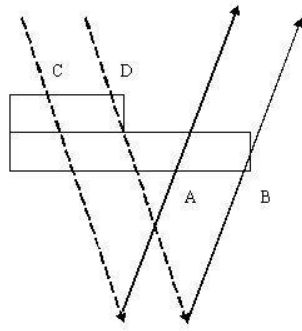
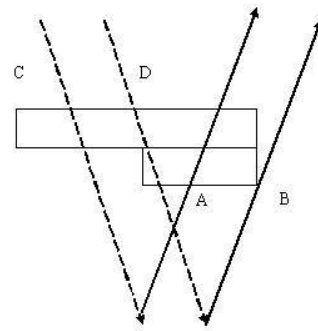


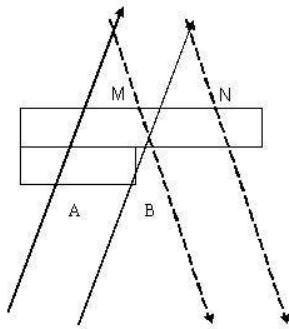
Рисунок 4.8 – Типова схема пофазового роз'їзду для трифазного перехрестя (магістральні напрямки 1,2,5; другорядні напрямки 3,4)



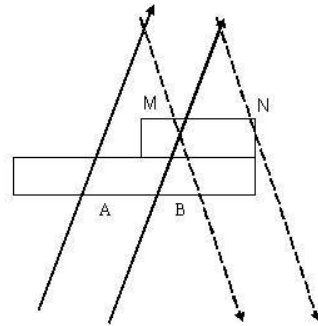
Твірна стрічка ліва, фази: 1-3-2



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



Твірна стрічка права, фази 1-3-2



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

Рисунок 4.9 – Варіанти розташування кальок на стрічках часу

Операційне значення абсолютного зсуву  $O$  початку першої фази визначається для варіантів, наведених на рис. 4.9 за наступними формулами.

Твірна стрічка ліва, фази 1-3-2:

$$O = \max(d, b - f_3 - t_{01-3}). \quad (4.6)$$

Твірна стрічка ліва, фази 1-2-3:

$$O = \max(n, b). \quad (4.7)$$

Твірна стрічка права, фази 1-3-2:

$$O = \max(b, n - f_3 - t_{\partial 1-3}). \quad (4.8)$$

Твірна стрічка права, фази 1-2-3:

$$O = \max(n, b). \quad (4.9)$$

Операційне значення зсуву  $O$  слід розділити націло на цикл координованого регулювання та залишок від ділення прийняти за дійсне значення зсуву:

$$D = \frac{O - f1}{Ц}, \quad (4.10)$$

Дійсне значення заноситься до дорожнього контролера для роботи за безцентровою схемою координації. Для налаштування координатора розраховуються значення моментів початку виклику наступних фаз координатором. Автоматизувати ці розрахунки можна за допомогою описаної на початку розділу програми.

Особливість включення до графіку координованого регулювання перехресть із зеленим додатковим сигналом або раннім стартом полягає у представленні додаткового сигналу або раннього старту у вигляді псевдо фази, що входить до графіку координованого регулювання під виглядом псевдофази. При виконанні повороту, для якого введено зелений додатковий або ранній старт з магістралі координації, псевдонапряма отримує відповідно номер 5 або 6 для вірного формування кальок виходячи зі збільшення зеленого сигналу за рахунок додаткового сигналу.

Введена в систему координації третя фаза може при цьому входити до послідовності після першої та після другої. При цьому псевдо напрям буде викликатися чи то перед зустрічним і конфліктним до нього магістральним

напрямом, чи то після нього. За рахунок цього при проведенні координації зелений додатковий чи ранній старт можуть мінятися між собою, переходячи один до одного в залежності від розрахунку графіку координованого регулювання. Оскільки на певних перехрестях така зміна неприпустима з урахуванням вимог безпеки руху, передбачено можливість введення заборони на ротацію додаткового сигналу. У випадку введення заборони в координації буду розглядатися можливість лише введення зеленого додаткового, а варіанти з раннім стартом будуть ігноруватися. Таким чином, зрозуміло, що зелений додатковий та ранній старт є лише різними проявами виходу зеленого сигналу в перехідний інтервал або псевдофазу.

Вихідними даними для роботи з програмою-координатором є така інформація:

- відстані між стоп-лініями сусідніх перехресть, що внесені до плану координації;

- розрахункові швидкості руху транспортних потоків в координованому режимі в прямому та зворотному напрямках координації (прямим напрямом вважається той. В якому транспортні засоби рухаються вздовж маршруту координації від перехрестя з меншим номером на магістралі координації до перехрестя з більшим номером);

- номери локальних ідентифікаторів перехресть, під'їзди яких підлягають координуванню за даним маршрутом.

Результатом роботи програми за алгоритмом, наведеним на рис. 4.10 та 4.11, є накреслений графік координації та файл, що містить параметри плану координованого регулювання як по всьому маршруту, так і для окремих перехресть. Для кожного перехрестя наводиться порядок слідування груп безконфліктних напрямів, що забезпечує проходження щільної групи транспортних засобів у межах стрічки безперервного часу відповідно до розрахункових характеристик плану координації. Слід звернути увагу на те, що пропо-

новані структури циклів в координованому режимі підлягають інженерній оцінці на предмет безпеки руху.

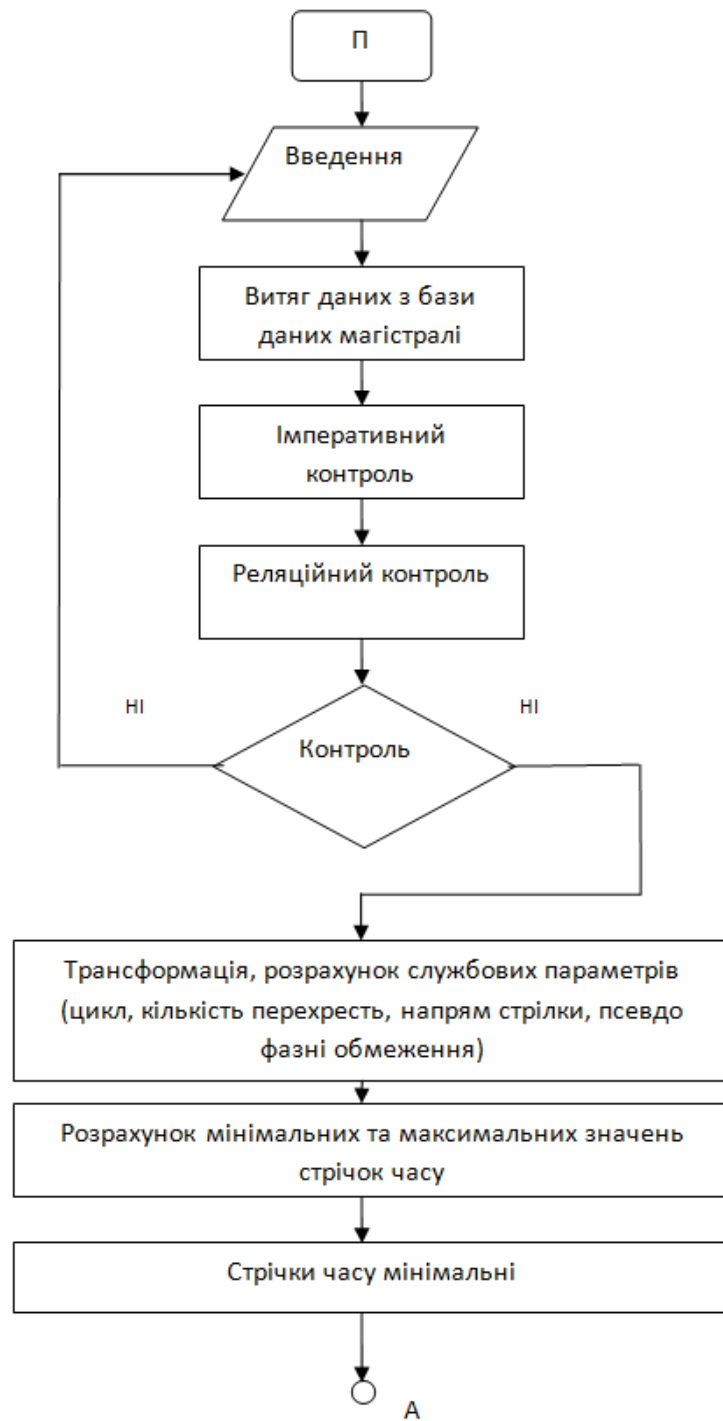


Рисунок 4.10 – Алгоритм координації (частина 1)

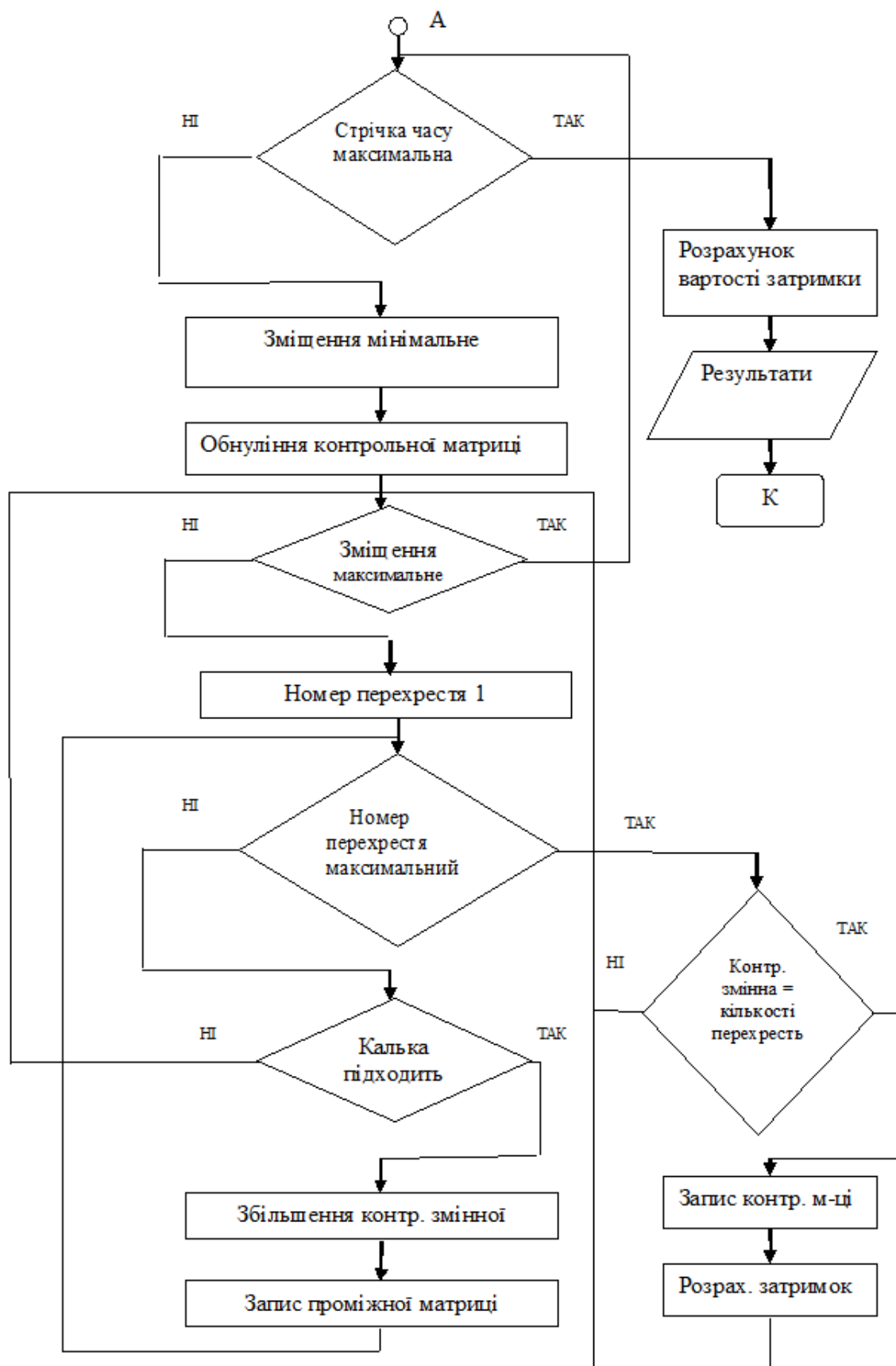


Рисунок 4.11– Алгоритм координації (частина 2)

На графіку координації для перехресть з рознесеними стоп-лініями показуються лише зовнішні стоп-лінії, оскільки локальна координація здійснюється за рахунок перехідних інтервалів. Якщо ж вона здійснюється за рахунок певного чергування фаз, то мусить бути введена заборона на зміну порядку чергування фаз програмою координації.

На рис. 4.12 наведено приклад автоматизованої побудови графіку координованого регулювання для вулиці 40 років Радянської України м. Запоріжжя.

Жовтим кольором позначено межі смуг перехресть, ким відповідає розташування вхідних стоп-ліній на виїздах на перехрестя. Синім кольором позначено стрічки часу прямого напрямку, що відповідають руху транспортних засобів від початкового до кінцевого перехрестя на маршруті координованого регулювання. Червоним позначено стрічки часу зворотного напрямку.

Зеленим кольором на графіку позначено кальки – фрагменти циклограм магістральних напрямів регулювання, що включають в себе зелений та зелений миготливий сигнали. Положення кальок визначається за формулами (4.6) – (4.10), зважаючи на зазначені вище варіанти розташування стрічок часу, що оточують кальку.

Таким чином, програмний комплекс дозволяє автоматизувати весь ланцюг операцій від програмування локальних контролерів до отримання параметрів графіку координації.

Ефективність управління світлофорною сигналізацією за окремими напрямками підтверджується дослідженнями, проведеними на групах перехресть, на яких його було запроваджено у м. Запоріжжі. Результати досліджень наведено в додатку А.



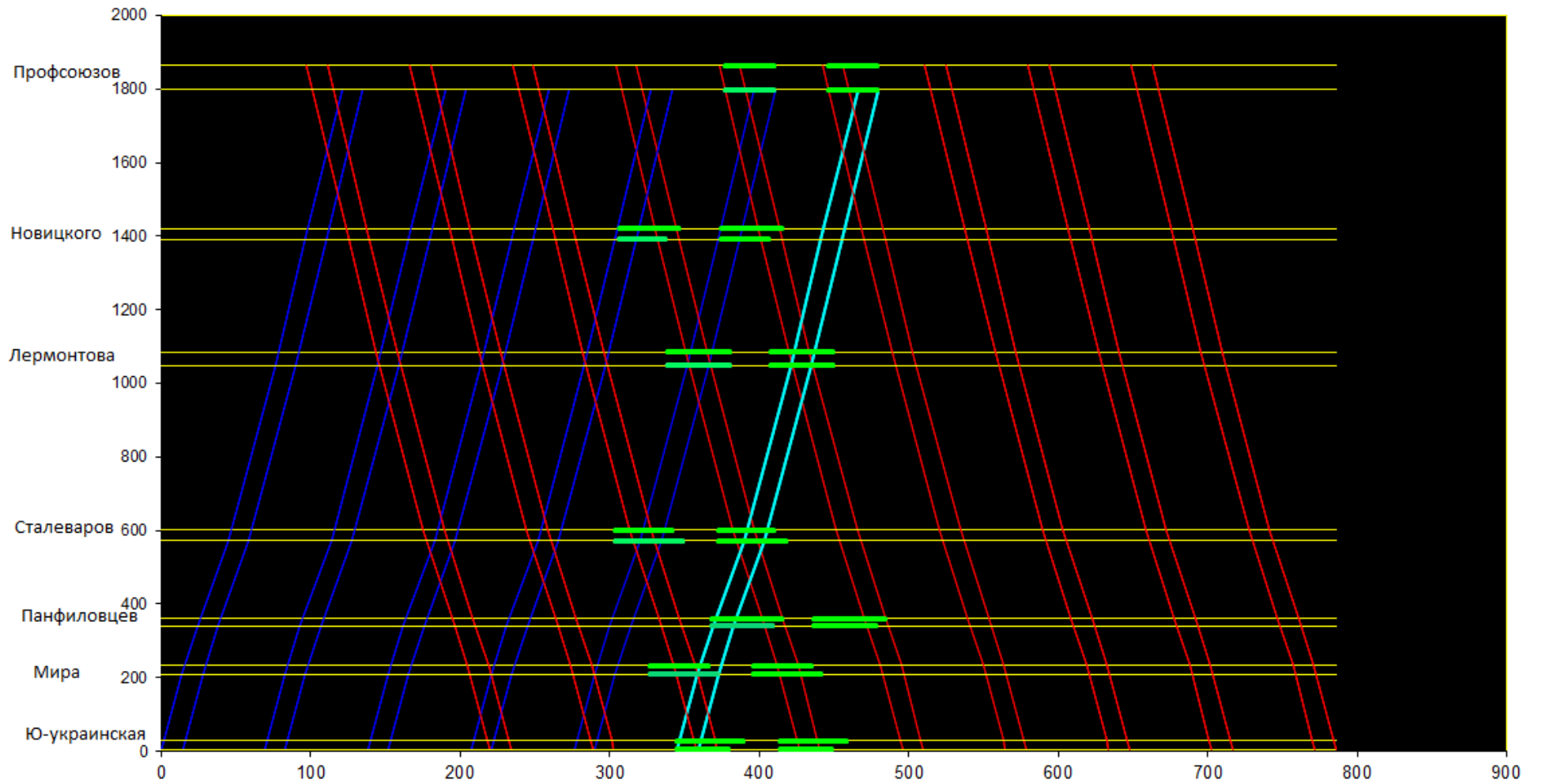


Рисунок 4.12 – Проектний графік координованого регулювання

#### **Висновки за розділом 4**

Таким чином розроблено оригінальне програмне забезпечення і програмно-апаратний комплекс, що обґрунтовано дозволяє застосовувати на практиці розроблений і аплікований в попередніх розділах прогресивний підхід до управління світлофорною сигналізацією за окремими напрямками.

Розроблений програмний комплекс дозволяє виконувати розрахунки, побудову і роздруківку графіку координованого регулювання, реалізуючи графо-аналітичний метод в формалізованому вигляді.

Алгоритми, програми, їх зовнішнє оформлення, забезпечують автоматизацію всього комплексу операцій розрахунку режимів світлофорного регулювання від стадії введення даних до отримання і роздруківки циклограм світлофорних об'єктів, як у локальному, так і в координованому режимах руху.

## ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В результаті виконання дисертаційної роботи здійснено теоретико-прикладне обґрунтування і нове розв'язання наукової задачі, що полягає у вдосконаленні підходу до організації дорожнього руху на регульованих перехрестях за окремими напрямками; визначенні параметрів світлофорного режиму за умови утворення цілісної структури світлофорного циклу, оптимальної з точки зору безпеки дорожнього руху та непродуктивної затримки його учасників перед регульованою ділянкою вулично-дорожньої мережі.

1. Аналіз існуючих методів синтезу структури циклу світлофорного регулювання довів необхідність їх коректування і перегляду основних підходів до реалізації. Вдосконалено підхід до розрахунку режимів світлофорної сигналізації за окремими напрямками, що дозволяє повністю автоматизувати процес визначення параметрів світлофорного режиму для локальних та координованих перехресть.

2. Розроблений адаптивний механізм формалізації схем руху транспортних засобів та пішоходів, що дозволяє відобразити у формальному вигляді весь набір характеристик, що в подальшому застосовуються для зручності комп'ютерної обробки при визначенні структури та параметрів оптимізованого режиму світлофорного регулювання.

3. Розроблені принципи оптимізації структури циклу обслуговування напрямків регулювання, що здійснюється на основі графу, утвореного з матриці формалізації руху на перехресті, при цьому порядок чергування напрямків, що визначає мінімальну тривалість циклу, встановлюється шляхом розв'язання задачі комівояжера. Визначено оптимальну структуру світлофорного циклу та параметри режиму регулювання, вдосконалено спосіб визначення тривалостей перехідних інтервалів, що дозволило знизити тривалості

фактичних часових проміжків між дозволяючими світлофорними сигналами на 11%.

4. Вдосконалено підхід до регулювання руху на перехрестях, у тому числі з рознесеними стоп-лініями, розщепленими фазами, з наявністю напрямів регулювання руху трамваїв і тролейбусів, при цьому доведена можливість зниження затримок трамваїв в 2 рази. Розроблені алгоритми визначення параметрів режиму регулювання при організації руху за окремими напрямками з урахуванням оптимізуючих співвідношень між основними тактами і перехідними інтервалами, між дозволяючими сигналами конфліктних транспортних та пішохідних напрямів регулювання, що спричинило збільшення середнього відношення тривалості дозволяючого сигналу до циклу регулювання на 6%.

5. Проведено впровадження результатів дослідження на 15 перехрестях у м. Запоріжжі, що підтверджується відповідним актом.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Abrams C. Selection of Pedestrian Signal Phasing / C. Abrams //Transportation Research Record. – 1977. – №. 629.
2. Dakin R. J. A tree–search algorithm for mixed integer programming problems / R.J. Dakin //The Computer Journal. – 1965. – Т. 8. – №. 3. – С. 250–255.
3. Drew D.R. Traffic flow theory control. –N.Y. Mc GrawHill, 1968, 430 pages.
4. 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>
5. Highway Capacity Manual / Washington: TRB, 2000. – 1134 p.
6. Inose H. Road traffic control / H. Inose, T. Hamada, E. Posner. – 1975. – 320 с.
7. Javid M., Senevirante P.N. Applying conflict technique to pedestrian safety evaluation // ITEJ. – 1991. №3. p.21–26.
8. 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.
9. Manual on Uniform Traffic Control Devices. – Режим доступу: <http://mutcd.fhwa.dot.gov/htm/2009/part4/part4c.htm>.
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. Teply S. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. Third Edition / S. Teply, D.I. Allingham, D.B. Richardson, B.W. Stephenson. – Toronto: Institute of Transportation Engineers, District 7, 2008. – 230 p.
12. Webster F. Traffic signal settings / F. Webster // Road Research Laboratory. – 1958. – no. 39. – С. 20–36.

13. Webster F.V. Traffic signal Settings and Expected Delay. International Study Week in Traffic Engineering, Stresa, Italy 1956, pp. 315.
14. Webster F.V., Traffic Signal Settings, Road Research Technical Paper No. 39, London, Her Majesty's Stationery Office, 1958: reprinted with minor amendments, 1969.
15. Webster F.V., Cobbe B.M. Traffic Signals // Technical Paper 56, Road Research Laboratory, London, 1966.
16. Афанасьев А. С. Контактные сети трамвая и троллейбуса: Учебник для вузов. – М.: Транспорт, 1988. – 264 с.
17. Васильева Ю.А. О задержках ГОТ в зоне регулируемых перекрестков / А.Ю.Васильева, Е.А.Рейцен. – Режим доступа: <http://towntraffic.narod.ru/Russian/2006/II/vas.htm>.
18. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М: ФМ, 1962. – 564 с.
19. Гаврилов Е.В. Системологія на транспорті. Книга IV: Організація дорожнього руху: Підручник. / Е.В. Гаврилов, М.Ф. Дмитриченко, В.К. Доля, О.Т. Лановий, І.Е. Линник, В.П. Поліщук. – К.: Знання України, 2007. – 452 с.
20. Гаврилов Е.В. Організація дорожнього руху. Підручник. Книга IV/ Е.В. Гаврилов, М.Ф. Дмитриченко, В.К. Доля, О.Т. Лановий, І.Е. Лінник, В.П. Поліщук – Київ, 2007. – 452 с.
21. Гордиенко Н.А. Комплексные числа и их приложение к решению уравнений 3–й и 4–й степени. Учебное пособие для студентов физико–математического факультета / сост.: Гордиенко Н.А. – Воронежский госпе-дуниверситет, 2010. – 92 с.
22. Грибков М. А. Вычислительный подход к решению задачи о поиске максимальной клики / М.А. Грибков, А. В. Алексеевский, С. А. Спирин //Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2006. – Т. 25. – С. 185–192.

23. Григор'єв В.І. Дослідження обставин, факторів та причин, які впливають на виникнення дорожньо-транспортних пригод з вини водіїв транспортних засобів. Заходи профілактики та шляхи уникнення дорожньо-транспортних пригод / В.І. Григор'єв // Безпека дорожнього руху України. – 2005. – №1–2. – С. 43–50.
24. Денисенко О.В. Повышение эффективности определения потоков насыщения / О.В. Денисенко, А.С. Филимонова. – Режим доступа: [archive.nbuv.gov.ua](http://archive.nbuv.gov.ua).
25. Дзюба О.П. Елементи теорії масового обслуговування в організації дорожнього руху / О.П. Дзюба, Н.Т. Кунда. – К.: УТУ, 1996. – 28 с.
26. ДСТУ 4092–2002 "Світлофори дорожні. Загальні технічні вимоги, правила застосовування та вимоги безпеки". – Введ. 2002–06–03. – К.: Держстандарт України, 2002. – 27 с.
27. Енглезі І. П. Ефективність координованого управління транспортними потоками : дис. – (05.22. 01) / І.П. Енглезі. – К.– 2004. – 120 с.
28. Ересов В.И. Перспективы системного подхода в организации дорожного движения / В.И. Ересов, А.П. Винярский // Автомобильный транспорт. – 1992. – Вып. 29. – С. 6–12.
29. Єресов В. І. Шляхи підвищення ефективності управління дорожнім рухом / В.І. Єресов // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 1984. – №. 34. – С. 95–99.
30. Єресов В.І. Автоматизовані системи управління дорожнім рухом: Посібник для студентів спеціальності 5.100.401 «Організація дорожнього руху» / В.І.Єресов, П.Л. Кулай. – Полтава. – Друкарня УМВС. – 2004. –152 с.
31. Єресов В.І. Удосконалення методики оцінки потенційної небезпеки дорожнього руху / В.І. Єресов, Я.В. Рябець // Безпека дорожнього руху України. – 2005. – №1–2 (20). – С. 54–59.

32. Живоглядов В.Г. Методология повышения эффективности управления дорожным движением / В.Г. Живоглядов // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Армавир, 2008, – 350 с.
33. Инструкция по пользованию Программой конфигурирования Дорожного контроллера “СИМВОЛ–01”. – Запорожье. – 2001. – 62 с.
34. Капитанов В.Т. Расчет параметров светофорного регулирования. Научно–практическое пособие / В.Т. Капитанов. – М.: МВД СССР ВНИИБДД., 1981, – 95 с.
35. Капитанов В.Т. Расчет параметров светофорного регулирования. Научно–практическое пособие / В.Т. Капитанов. – М.: МВД СССР ВНИИБДД. – 1981, – 95 с.
36. Капитанов В.Т. Управление транспортными потоками в городах / В.Т. Капитанов, Е.Б. Хилажев. – М.: Транспорт, 1985. – 144 с.
37. Капитанов В.Т. Принципы и методы автоматизированного управления дорожным движением / В.Т.Капитанов, Л.Я. Якушин // Организация и безопасность дорожного движения. Итоги науки и техники. – М.: ВИНТИ, 1988. – №3.– С. 4–32
38. Капитанов В.Т Алгоритмы и методы расчета программ координации работы светофорной сигнализации на ЭВМ / В.Т. Капитанов, С.В. Шауро, Л.А. Якушин. – М.: ВНИИ БД МВДСССР, 1978. – 93 с.
39. Капитанов 83 В.Т. Управление транспортными потоками в городах / В.Т. Капитанов. – М.: Транспорт, 1985. – 92 с.
40. Клибавичюс А. Ю Оптимальные многоцелевые системы координированного регулируемого движения // Материалы VIII международной (одиннадцатой екатеринбургской) научно–практической конференции 14–15 июня 2002 года . – Режим доступа:  
[http://towntraffic.narod.ru/Russian/Streets\\_net/Klibavichus.htm](http://towntraffic.narod.ru/Russian/Streets_net/Klibavichus.htm)
41. Клибавичюс А.Ю. Координированное регулирование светофоров в реальном времени в условиях перенасыщения потоков А.Ю. Клибавичюс // Ма-



териалы XI международной (четырнадцатой екатеринбургской) научно–практической конференции. – Режим доступа:

[http://towntraffic.narod.ru/Russian/Streets\\_net/2005/kli.htm](http://towntraffic.narod.ru/Russian/Streets_net/2005/kli.htm)

42. Кот Е.Н. Исследование взаимодействия конфликтующих пешеходных и поворотных транспортных потоков методом конфликтных ситуаций / Е.Н. Кот. – Режим доступа: <http://towntraffic.narod.ru/Russian/2006/II/ko1.htm>

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

44. Кременец Ю. А. Инженерные расчеты в регулировании движением / Ю.А. Кременец, М. П. Печерский. – М.: Высш. школа. – 1977. – 220с.

45. Кременец Ю.А. Технические средства организации дорожного движения. – М.: Транспорт, 1990. – 254 с.

46. Кристофидес Н. Теория графов. алгоритмический подход / Н. Кристофидес. – М. – Мир, 1978. – 432 с.

47. Кузмичева Л.А. Проблемы организации движения общественного транспорта в центре Москвы / Л.А. Кузмичева // Материалы VIII международной (одиннадцатой екатеринбургской) научно–практической конференции 14–15 июня 2002 года. – Режим доступа:

[http://towntraffic.narod.ru/Russian/Streets\\_net/Kuzmicheva.htm](http://towntraffic.narod.ru/Russian/Streets_net/Kuzmicheva.htm)

48. Кузькін О.Ф. Пошук шляхів у маршрутних мережах міст методом відгалужень і меж / О.Ф. Кузькін. – Режим доступа:

<http://eprints.kname.edu.ua/29538/1/32.pdf>

49. Кухаренок Г. М. Применение многофункциональных дополнительных секций светофоров / Г. М. Кухаренок, В. Ю. Карпилович, Е. Н. Пустовойт // Научно–технический сборник. Коммунальное хозяйство городов. – 2006. – С. 233–244.

50. Лазарева Т. Я. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие / Т.Я. Лазарева, Ю. Ф. Мартемьянов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. 352 с.
51. Левашев А.Г. Проектирование регулируемых пересечений: Учеб. пособие / А.Г. Левашев, А.Ю. Михайлов, И.М. Головных. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 208 с.
52. Лузин С.Ю. Выделение в графе наибольшего полного подграфа в задачах автоматизации проектирования / С.Ю. Лузин, О.Б. Полубасов // Технология и конструирование в электрон. аппаратуре. – 2003. – № 4. – С. 22–25. – 2003.
53. Методические рекомендации по регулированию пешеходного движения. – Москва.: ВНИИБД МВД СССР, 1977. – 55 с.
54. Михайленко В.И. Управление движением на автомобильных дорогах / В.И. Михайленко, Б.М. Четверухин. – К.: Урожай, 1991. – 200 с.
55. ОДМ 218.6.003–2011. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. / Москва.: Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2013. – 69 с.
56. Ваксман С.А. Организация городского движения в условиях высокой автомобилизации как комплексная проблема / С.А. Ваксман, А.А. Цариков // Материалы XI международной (четырнадцатой екатеринбургской) научно-практической конференции. – Режим доступа:  
[http://towntraffic.narod.ru/Russian/Streets\\_net/2005/wak2.htm](http://towntraffic.narod.ru/Russian/Streets_net/2005/wak2.htm)
57. Шелков Ю.Д. Организация дорожного движения в городах: Методическое пособие / под общей ред. Ю.Д. Шелкова. – М.: НИЦ ГАИ МВД России, 1995. –143 с.
58. Петров В. В. Автоматизированные системы управления дорожным движением в городах / В,В Петров.– Омск: Изд-во СибАДИ. – 2007.– 270 с.
59. Печерский М.П. Автоматизированные системы управления движением в городах / М.П. Печерский, Б.Г. Хорович. – М.: Транспорт, 1979. – 176 с.

60. Печерский М.П. Кибернетика и регулирование уличного движения / М.П. Печерский, Б.Г. Хорович. – М.: Знание. – 1971. – 48 с.
61. Повышение эффективности организации дорожного движения на регулируемых пересечениях А.Г. Левашев, А.Ю Михайлов //Материалы XI международной (четырнадцатой екатеринбургской) научно–практической конференции. – Режим доступа:  
[http://towntraffic.narod.ru/Russian/Streets\\_net/2005/lev.htm](http://towntraffic.narod.ru/Russian/Streets_net/2005/lev.htm)
62. Полищук В. П. Проектирование автоматизированных систем управления движением на автомобильных дорогах / В.П. Полищук. – К.: КАДИ, 1983. – 362 с.
63. Полищук В.П. Проектирование автоматизированных систем управления дорожным движением на автомобильных дорогах / В.П. Полищук. – К.: КАДИ, 1983. – 95 с.
64. Полищук В.П. Автоматизированное управление дорожным движением на автомобильных дорогах: Автореферат дис. д-ра техн. наук: 05.22.01 / Укр. трансп. ун-т. – К., 1996. – 41 с.
65. 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.
66. 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.
67. Правила дорожнього руху України. – Введ. 2001–10–10. – К.: Моноліт, 2002. – 57 с.
68. 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.

69. Рейцен Е. А. Оптимизация цикла работы светофора с использованием методов линейного программирования / Е. А. Рейцен, А. Г. Богданов // Містобудування та терит. планув. – 2003. – № 14. – С. 143–151.
70. Рейцен Е.А. Исследование задержек транспорта в городах / Е.А. Рейцен, А.Ю.Васильева // Материалы VIII международной (одиннадцатой екатеринбургской) научно–практической конференции 14–15 июня 2002 года. Режим доступа: [http://towntraffic.narod.ru/Russian/Streets\\_net/Reyzen.htm](http://towntraffic.narod.ru/Russian/Streets_net/Reyzen.htm)
71. Рейцен Е.А. Задержки транспорта в городах, как экономический фактор / Е.А.Рейцен, А.Ю.Васильева // Градостроительство и территориальное планирование. №9. Киев,2001. С.229–23
72. Руководство по регулированию дорожного движения в городах. – Москва.: Стройиздат, 1974. – 99 с.
73. Сайт Государственного казенного учреждения города Москвы Центра организации дорожного движения Правительства Москвы. – Режим доступа: <http://www.gucodd.ru>.
74. Сайт ДДАІ УМВС України. – Режим доступа: <http://www.sai.gov.ua>
75. Самойлов Д. С. Организация и безопасность городского движения: Учебник для вузов / Д. С. Самойлов, В. А. Юдин, П.В. Рушевский. –М: Высшая школа, 1981. – 260с.
76. 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.
77. Страментов В.Г. Городской транспорт и организация движения / А.Е. Страментов, В.Г. Сосянц, М. С. Фишельсон. – М.: Изд–во Министерства коммунал. хоз–ва РСФСР. – 1960. – 352 с.
78. Трушевський В.Е. Особливості розрахунку режимів світлофорного регулювання при здійсненні управління за сигнальними групами / В. І. Єресов, В. Е., Трушевський // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – №4/3. – С. 9–13.

79. Трушевський В.Е. Мінімізація затримок учасників дорожнього руху на регульованих пішохідних переходах / С. В. Грицай, В. Е. Трушевський, Д. А. Никифоровський // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – №5/3. – С. 25–29.
80. Трушевський В.Е. Застосування автоматичних стрілок тролейбусу як детекторів в системах світлофорного авторегулювання / В.Е. Трушевський // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. – №1. – С. 29–32.
81. Трушевський В.Е. Особливості корекції елементів циклу світлофорного регулювання з метою гарантування безпеки руху пішоходів / Трушевський В.Е., Грицай С.В. // Тиждень науки. Тези доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів (Запоріжжя, 9–13 квітня 2012 року), Том 2. – Запоріжжя. – ЗНТУ, 2012. – С. 108-110.
82. Трушевський В.Е. Особливості визначення тривалості елементів циклу світлофорного регулювання з розщепленою фазою / С.В. Грицай, В.Е. Трушевський // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2011. – № 1. – С. 10–14.
83. Трушевський В.Е. Особливості розрахунку параметрів світлофорного регулювання за наявності пішохідних напрямків / В.Е. Трушевський // LXIX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – Київ. – НТУ, 2013. – С. 230.
84. Трушевський В.Е. Особливості введення додаткових стоп-ліній на регульованих перехрестях // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2013. – №4. – С. 44–49.
85. Трушевський В.Е. Особливості корекції елементів циклу світлофорного регулювання з метою гарантування безпеки руху пішоходів / В.Е. Трушевський, С.В. Грицай. // Автошляховик України. – 2014. – № 5. – С. 20–22.

86. 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.
87. 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.
88. Хомяк Я.В. Организация дорожного движения / Я.В. Хомяк. – К.: Вища школа, 1986. – 270 с.
89. Хорович Б.Г. Телеавтоматическая система управления движением транспортов Москве («Старт») / Б.Г. Хорович // Совершенствование организации дорожного движения – М.: Изд. Моск. дома науч.-техн. пропаганды им. Ф.Э. Дзержинского, 1973. – С. 128–136..
90. Цариков А.А. Совершенствование организации движения при выполнении левых поворотов / А.А. Цариков // Материалы XI международной (четырнадцатой екатеринбургской) научно-практической конференции. – Режим доступа: [http://towntraffic.narod.ru/Russian/Streets\\_net/2005/tsa.htm](http://towntraffic.narod.ru/Russian/Streets_net/2005/tsa.htm).
91. Шештокас В.В. Конфликтные ситуации и безопасность движения в городах / В.В. Шештокас, Д.С. Самойлов. – М.: Транспорт, 1987. – 205 с.
92. Якушин Л.А. Концепция обеспечения безопасности дорожного движения с использованием систем управления / Л.А. Якушин // Автомобильный транспорт: Обзор информации. – М.: ЦБНТИ. – 1991. – Вып. 3. – с. 1–60.

ДОДАТОК А  
ХАРАКТЕРИСТИКИ СВІТЛОФОРНИХ РЕЖИМІ  
В НА ПЕРЕХРЕСТЯХ, ДЕ ЗАПРОВАДЖЕНО РЕЗУЛЬТАТИ  
ДОСЛІДЖЕНЬ

На перехрестях, зазначених у табл. А.1, визначено такі параметри:  $T_{ц}$  - тривалість циклу світлофорного регулювання;  $t_{зел.}$  - середня тривалість зеленого сигналу;  $T_{сум. пром.}$  - сумарна тривалість часових проміжків між дозволяючими сигналами конфліктних напрямів у послідовності, що визначається структурою циклу. Результати досліджень наведено в табл. А.2 та А.3.

Таблиця А.1 – Номери перехресть

Номер	Перехрестя
1	Просп. Леніна – Комсомольська вул.
2	Набережна вул. – Запорізька вул.
3	40 років Радянської України вул. – Профспілкова вул.
4	Просп. Леніна – Портова вул.
5	40 років Радянської України вул. – Панфіловців вул.
6	Вул. Грязнова – вул. Героїв Сталінграду

Таблиця А.2 - Характеристики втраченого часу

Номер перехрестя	Базовий варіант			Проектний варіант			Різниця часток
	$T_{ц}$ , с	$t_{зел.}$ ,с	Частка	$T_{ц}$ , с	$t_{зел.}$ ,с	Частка	
1	81	36,25	0,45	81	38,92	0,48	0,03
2	59	20,875	0,35	78	34,13	0,44	0,08
3	81	29,37	0,36	74	31,66	0,43	0,07

Таблиця А.3 – Характеристики ефективного часу

Номер перехрестя	Тсум. пром., с		Різниця, %
	Баовий варіант	Проектний варіант	
4	42	36	14,3
5	54	49	9,3
6	63	57	9,5

Протягом години тривалість цих затримок при жорсткому регулюванні визначається таким чином:

$$T_{затр-ж} = N \frac{T_{\text{ц}} - t_{\text{OT}}^m}{2 \cdot 3600}, \quad (\text{A.1})$$

де  $N$  – інтенсивність руху трамваїв, од./год.;

$T_{\text{ц}}$  – тривалість циклу світлофорного регулювання, с;

$t_{\text{OT}}^m$  – тривалість основного такту світлофорного регулювання фази, до якої включено напрям руху, що містить трамвайну траєкторію, с.;

Тривалість затримки трамваїв (год./год.) протягом години при адаптивному регулюванні визначається за формулою:

$$T_{затр-а} = N \frac{(T_{\text{ц}} - t_{\text{OT}}^m) / (m-1)}{2 \cdot 3600}, \quad (\text{A.2})$$

де  $m$  – кількість фаз світлофорного регулювання.

Таким чином, при  $m > 2$ , середні затримки трамваїв зменшуються в  $(m-1)$  разів при застосуванні гнучкого регулювання з вмонтованим у трамвайну стрілку детектором наявності та напрямку подальшого руху трамвайного поїзда.



**ДОДАТОК Б**

**КОПІЯ АКТУ ПРО ЗАПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ  
НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ**

## АКТ

про запровадження результатів наукової роботи

Запоріжжя

13.11.2013р.

Комісія у складі голови правління ПрАТ «СМЕП «Символ» Петрова В.В., проректора Запорізького національного технічного університету Внукова Ю.М., завідувача кафедри транспортних технологій Запорізького національного технічного університету Бабушкіна Г.Ф., розглянувши матеріали дисертаційної роботи аспіранта Національного транспортного університету Трушевського Вячеслава Едуардовича,

встановила:

- метод управління світлофорною сигналізацією за окремими напрямками регулювання, викладений у дисертаційній роботі Трушевського В.Е. був застосований ПрАТ «СМЕП «Символ» при проектуванні локальних і координованих режимів світлофорного регулювання на таких перехрестях міста Запоріжжя: проспект Леніна – вул. Портова, проспект Леніна – вул. Леппіка, проспект Леніна – вул. Кірова, просп. Леніна – Комсомольська вул. Набережна вул. – Запорізька вул., Хортицьке шосе – дорога на Нікополь; Хартицьке шосе – вул. Рубана, Ювілейний проспект – Лахтинська вул.; на перехрестях вулиці 40 років Радянської України з вулицями Профспілковою, Новицького, Лермонтова, Сталеварів, Миру, Панфіловців, Піденноукраїнською на перехрестях вулиці Грязнова з вулицями Горького, Артема, Героїв Сталінграду;
- вказані розрахунки проведені В.Е. Трушевським особисто під час роботи на посаді інженера у ПрАТ «СМЕП «Символ».

Петров В.В.

Внуков Ю.М.

Бабушкін Г.Ф.



**ДОДАТОК В**  
**КОПІЯ СВДОЦТВА ПРО РЕЄСТРАЦІЮ АВТОРСЬКОГО**  
**ПРАВА НА ТВІР**

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

# СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 48069

**Комп'ютерна програма "КУРС-13"**  
(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Трушевський Вячеслав Едуардович, Єресов Володимир Іванович,  
Дідківська Людмила Сергіївна**  
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Трушевський, Вячеслав Едуардович, вул.  
Суворова, 1, м. Київ, 01010; Єресов Володимир Іванович, вул. Суворова, 1, м.  
Київ, 01010; Дідківська Людмила Сергіївна, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010;  
Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010**  
(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне-найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 26.02.2013



Голова Державної служби  
інтелектуальної  
власності України  
**М.В. Ковіня**

*M. V. Kovinya*

**ДОДАТОК Г**  
**КОПІЯ ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**



НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 94668

ПРИСТРІЙ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РУХУ  
ТРАМВАЇВ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Заресстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 25.11.2014.

Голова Державної служби  
інтелектуальної власності України

*А.Г. Жарінова* А.Г. Жарінова

