



Є. Ю. Форнальчик, І. А. Могила,
В. Е. Трушевський, В. В. Гілевич

УПРАВЛІННЯ ДОРОЖНІМ РУХОМ НА РЕГУЛЬОВАНИХ ПЕРЕХРЕСТЯХ У МІСТАХ





ФОРНАЛЬЧИК Євген Юліанович

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних технологій Інституту інженерної механіки та транспорту Національного університету «Львівська політехніка».

Академік підйомно-транспортної академії України, член Комісії моторизації та енергетики відділу Польської академії наук у Любліні.

Відомий фахівець і педагог у галузі організації перевезень, управління на транспорті, організації та регулювання дорожнього руху, а також у галузі технічного сервісу автомобільної техніки.

Автор понад 200 наукових та навчально-методичних праць, серед яких 1 монографія, 4 навчальні посібники, 8 конспектів лекцій та 2 патенти України.



МОГИЛА Ігор Андрійович

Кандидат технічних наук, керівник відділу стійких транспортних систем Львівського комунального підприємства «Інститут просторового розвитку» та провідний інженер Центру керування рухом Львівського комунального підприємства «Львівавтодор». Працює в галузі світлофорного регулювання та проектування міських вулиць.

Автор 23 наукових праць та низки методичних розробок.

Сфера професійних зацікавлень: сучасні людиноорієнтовані підходи до проектування міських вулиць, системи адаптивного регулювання дорожнього руху з пріоритетним пропусканням громадського транспорту.

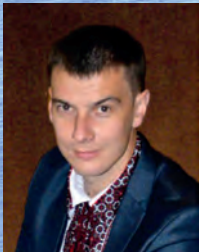


ТРУШЕВСЬКИЙ Вячеслав Едуардович

Кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій Запорізького національного технічного університету. Фахівець з організації і регулювання дорожнього руху.

Автор 15 наукових праць, патентів та програмного забезпечення у сфері світлофорного регулювання руху транспортних засобів у містах.

Наукові зацікавлення: автоматизовані системи управління дорожнім рухом, нормативні документи у сфері дорожнього руху, засоби автоматизації і телемеханіки.



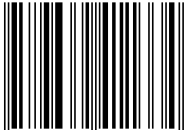
ПЛЕВИЧ Володимир Васильович

Кандидат технічних наук, асистент кафедри транспортних технологій Інституту інженерної механіки та транспорту Національного університету «Львівська політехніка». Фахівець з організації і регулювання та безпеки дорожнього руху.

Автор 17 наукових праць та низки методичних розробок у сфері світлофорного регулювання.

Наукові зацікавлення: моделювання та оптимізація транспортних потоків, які проїжджають перехрестя, особливості їхньої структури; показники та параметри безпеки транспортних процесів.

ISBN 978-966-941-133-4



9 789669 411334 >

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Є. Ю. Формальчик, І. А. Могила,
В. Е. Трушевський, В. В. Гілевич

УПРАВЛІННЯ ДОРОЖНІМ РУХОМ НА РЕГУЛЬОВАНИХ ПЕРЕХРЕСТЯХ У МІСТАХ

Монографія

За заг. ред. професора Є. Ю. Формальчика

Львів
Видавництво Львівської політехніки
2018

Рецензенти:

- Поліщук В. П.**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху Національного транспортного університету;
- Горбачов П. Ф.**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних систем і логістики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету;
- Крайник Л. В.**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автомобілебудування Національного університету «Львівська політехніка»;
- Солодкий С. Й.**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільних доріг та мостів Національного університету «Львівська політехніка»

*Рекомендувала Вчена рада Національного університету
«Львівська політехніка»
(протокол № 37 від 31.10.2017 р.)*

Форнальчик Є. Ю.

Ф 79 Управління дорожнім рухом на регульованих перехрестях у містах : монографія / Є. Ю. Форнальчик, І. А. Могила, В. Е. Грушевський, В. В. Гілевич ; за заг. ред Є. Ю. Форнальчика. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 236 с.

ISBN 978-966-941-133-4

Викладено сучасні наукові підходи до управління дорожнім рухом на регульованих перехрестях у містах з урахуванням режимів роботи світлофорної сигналізації та чинників, які впливають на роботу перехресть. Показано переваги імітаційного моделювання у дослідженні роботи регульованих перехресть, використання нечіткої логіки в адаптивних алгоритмах керування та організації руху за окремими напрямками з урахуванням потреб пішоходів та громадського транспорту.

Розраховано на працівників та науковців у галузі організації та регулювання дорожнього руху, аспірантів та студентів технічних університетів та профільних НДІ.

УДК 656.13

ЗМІСТ

Вступ	5
Розділ 1. Вітчизняний та світовий розвиток у галузі науки і практики управління транспортними потоками на регульованих перехрестях	7
1.1. Історичні передумови	7
1.2. Основні параметри та показники для розрахунку режиму роботи регульованого перехрестя	9
1.3. Дослідження роботи регульованих перехресть із використанням математичного та імітаційного моделювання	31
1.4. Технічні засоби в системах світлофорного регулювання	36
1.5. Локальні адаптивні алгоритми керування рухом на регульованих перехрестях	43
1.6. Застосування нечіткої логіки для керування дорожнім рухом на регульованих перехрестях	53
Розділ 2. Аналіз чинників, які впливають на роботу регульованого перехрестя	71
2.1. Вплив нерівностей дорожнього покриття та технічного стану транспортних засобів на швидкість проїзду перехрестя	71
2.2. Оптимізація роботи регульованих перехресть з урахуванням технічного стану транспортних засобів та нерівностей дорожнього покриття	83
2.3. Визначення потоку насичення за швидкістю проїзду перехрестя	92
Розділ 3. Удосконалення режиму роботи регульованих перехресть	98
3.1. Особливості управління рухом на регульованих перехрестях	98
3.2. Оцінювання роботи регульованого перехрестя з використанням імітаційного моделювання	111
3.3. Удосконалення нечіткого алгоритму керування рухом на регульованому перехресті	120
3.4. Оптимізація режимів світлофорного регулювання під час організації руху за окремими напрямками	139
3.5. Удосконалення режиму роботи регульованого перехрестя з урахуванням безпеки пішоходів та пріоритету громадського транспорту	166
Розділ 4. Техніко-економічна оцінка ефективності світлофорного регулювання	193
4.1. Оцінка ефективності коригування світлофорного циклу	193
4.2. Оцінка ефективності застосування адаптивних алгоритмів керування	195
Висновки	204
Список літератури	206
Додаток. Теоретичні засади нечіткої логіки	222

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

АПС – автобусний пріоритетний сигнал

АСУДР – автоматизована система управління дорожнім рухом

ВДМ – вулично-дорожня мережа

ДТП – дорожньо-транспортна пригода

ММТ – матриця можливих траєкторій

НКТ – найдальша конфліктна точка

ОДР – організація дорожнього руху

ПДР – Правила дорожнього руху

ПН – потік насичення

ПЧ – проїзна частина

СМТ – схема можливих траєкторій

СФР – світлофорне регулювання

ТЗ – транспортний засіб

ТЗГК – транспортний засіб громадського користування (автобус, тролейбус, трамвай)

ТП – транспортний потік

ВСТУП

Сучасне суспільство, зокрема його основна частина – міське населення, не може і не зможе у майбутньому обходитися без транспорту. Сьогодні різними видами міського транспорту (легкові та вантажні автомобілі, автобуси, тролейбуси, трамваї) виконують усі можливі перевезення. Сукупне перебування їх на вулично-дорожній мережі (ВДМ) створює (особливо у старій забудові) низку проблем – затори перед перехрестями та на прогонах між ними, загазованість повітряного басейну відпрацьованими газами і продуктами зношування шин, електромагнітні випромінювання, підвищені шумові навантаження і ризики скоєння ДТП. Усе це зумовлює негативні впливи на людський організм та природне довкілля. Позбутися повністю цих негативних явищ людство не може. Ми приречені жити разом із цим, однак це не означає, що нічого не потрібно робити.

Найбільші труднощі з ОДР виникають на перехрестях вулиць, оскільки вони є «вузькими місцями» на ВДМ з погляду швидкого обслуговування транспортних та пішохідних потоків. Для керування рухом на перехрестях найчастіше використовують світлофорне регулювання (СФР), яке дає змогу підвищити безпеку дорожнього руху, скоротити затримку учасників дорожнього руху, зменшити споживання енергоресурсів та негативний вплив на довкілля, що, своєю чергою, покращує якість життя у містах.

Підвищити ефективність функціонування регульованих перехресть можна адаптивним керуванням, за якого враховують коливання інтенсивності транспортних потоків (ТП) та використовують складні алгоритми, в основу котрих покладено нечітку логіку, нейронні мережі, генетичні алгоритми тощо. Іншими методами вдосконалення СФР є врахування чинників в обґрунтуванні тривалості сигналів, які не розглянуто у наявних методиках розрахунку світлофорного циклу, резервів часу, що виникають через різницю рівнів завантаження на різних напрямках регулювання, уточнення часових проміжків, протягом котрих транспортні засоби (ТЗ) та пішоходи завершують рух через перехрестя чи готуються його розпочати тощо.

Викладені у монографії матеріали є результатами наукових досліджень, проведених упродовж останніх десяти років у Національному університеті

«Львівська політехніка» та Національному транспортному університеті. Ідея написання, наукове керування дослідженнями канд. техн. наук І. А. Могили та В. В. Гілевича і загальне редагування монографії належать д-ру техн. наук, проф. Є. Ю. Формальчику. Автори підрозділів: 1.3–1.6, 2.3, 3.2, 3.3, 4.2 і додатка – канд. техн. наук І. А. Могила; 1.3, 1.4, 3.1, 3.4 та 3.5 – канд. техн. наук, доц. В. Е. Трушевський; 1.2, 2.1–2.3, 3.1 та 4.1 – канд. техн. наук В. В. Гілевич.

Автори сподіваються, що монографія буде корисною для подальшого розвитку науки про організацію і регулювання дорожнього руху, а також для науковців, інженерів, аспірантів та студентів, які працюють і навчаються за спеціальністю «Транспортні технології».

Висловлюємо вдячність рецензентам за їхні зауваження та пропозиції, що дало змогу покращити зміст та сприйняття викладу окремих розділів, а також ТОВ «Сварко Україна» та ПП «Гал-Всесвіт» за фінансову підтримку у виданні монографії.

Розділ 1

ВІТЧИЗНЯНИЙ ТА СВІТОВИЙ РОЗВИТОК У ГАЛУЗІ НАУКИ І ПРАКТИКИ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ НА РЕГУЛЬОВАНИХ ПЕРЕХРЕСТЯХ

1.1. Історичні передумови

Загальновідома парадигма: наявність автомобілів – це благо для сучасної цивілізації. Одночасно – це глобальні проблеми, викликані їхнім масовим використанням, що зумовлюють надмірне вичерпання нафтогазових природних ресурсів і загрозливе забруднення повітряного басейну, затори на ВДМ міст і поза ними, а також спричиняють каліцтва та загибелі людей (водіїв, пасажирів, пішоходів). Поки що радикального виходу з цієї ситуації людство не винайшло. Тому, спираючись на свій та закордонний досвід розвинених країн, тривають наукові та прикладні дослідження як у напрямку вдосконалення конструкцій автомобілів, так і вдосконалення організації їхнього використання на автошляхах та ВДМ населених пунктів.

Поява автомобілів як засобів пересування завдячує геніальним конструкторам, автовиробникам, підприємцям *Карлу Бенцу, Рудольфу Дизелю, Готлібу Даймлеру, Фердинанду Порше, Вільгельму Майбаху, Арманду Пежо, Етторе Бугатті, Генрі Форду, Уолтеру Бентлі, Волтеру Крайслеру*, братам *Мазератті* та багатьом іншим, не менш талановитим автомобільними творцям. Поступ у автомобілебудуванні триває і триватиме надалі, вносячи в конструкції результати сучасних наукових досліджень, з'являються принципово нові гібридні та електромобілі, а також безпілотні ТЗ.

Ефективність використання автомобілів напрямку пов'язана як із наявністю і розвитком мережі шляхів сполучення, так і з досконалістю організації руху ними.

Найдавнішою дорогою з двохшаровим твердим покриттям вважають Аппієву дорогу, прокладену у давньому Римі у 312 році до нашої ери (названа на честь цензора *Аппія Клавдія*; уздовж неї пізніше розпинали на хрестах і хоронили християнських мучеників), фрагменти якої, як історичної пам'ятки,

збереглися донині. Звісно, що рух по ній здійснювався на колісницях і конях. Починаючи від IV–V ст., мережа доріг набувала більшої досяжності й досконалості, особливо у населених пунктах. З'явився гужовий транспорт, зокрема пасажирський, зростає інтенсивність його руху, яка зумовлює проблеми з його організацією. Таке триває до кінця XIX – початку XX ст., відколи на вулицях міст і дорогах з'явилися автомобілі. Надалі помітне стабільне зростання автомобілізації, що зумовило (з метою упорядкування руху та його безпеки) потребу виготовлення та встановлення на ВДМ і поза нею дорожніх знаків. У Європі така потреба стала нагальною ще у 1900 році, коли Асоціація Всесвітнього туризму на Конгресі у Парижі прийняла рішення про дорожні знаки не тільки у формі відповідних написів, а певного набору символів. Вже у 1909 році було затверджене рішення про зовнішній вигляд знаків і місця їх встановлення (перші знаки «Поворот», «Нерівна дорога», «Перетин з залізничним полотном» і «Перехрестя»). Минуло не одне десятиліття, аж поки у 1964 році не з'явилися відповідні групи і кількості знаків, більшість з яких використовують донині.

Майже одночасно із дорожніми знаками створювали Правила дорожнього руху. Хоча історичним аналогом їх вважають Правила, створені у Давньому Римі за правління *Юлія Цезаря* (на деяких римських вулицях запроваджено односторонній рух; заборона проїзду приватних екіпажів і возів упродовж робочого дня – лише пішохідний рух або в паланкінах). Створено спеціальну службу, яка відстежувала дотримання цих правил. У Російській імперії правила руху пішоходів і гужового транспорту регламентувались царськими указами. У 1909 році на Всесвітній конференції у Парижі затверджено «Проект єдиної загальноєвропейської системи правил руху на дорогах», у 1931 році прийнято Звід правил за назвою «Конвенція про впровадження однаковості у сигналізації на дорогах», а у 1968 році – у Відні прийнято Конвенцію про дорожній рух та Конвенцію про дорожні знаки і сигнали.

У діяльності з ОДР найуразливішими є перехрестя, тому виникла потреба регулювання руху по них, спочатку відповідним жестами регулювальників, а потім світлофорами. Відомо, що перший світлофор (винахід інженера *Джона Найта*) встановлено у Лондоні ще у 1868 році. Звичайно, управління ним було ручним з використанням лише стрілок, які переміщалися у відповідне положення. Вони були червоного (заборонного) і зеленого (дозвільного) кольорів. Електричний світлофор з'явився уперше у США (авторства інженера *Лестера Вайра*) з двома сигналами – червоним і зеленим. У 1914, а згодом у

1920 роках розпочали виготовляти і встановлювати у великих містах Клівленд, Нью-Йорк, Детройт триколірні світлофори. У Москві перший світлофор встановлено на перехрестях з інтенсивним рухом у 1930 році.

Крім дорожніх знаків і світлофорів, важливу роль в організації та регулюванні дорожнього руху виконують дорожні розмітки і дорожнє обладнання (огороження, світлові тумби, шумові смуги тощо).

Незважаючи на значний поступ у теорії і практиці щодо управління дорожнім рухом на ВДМ міста, багато питань вивчені ще недостатньо глибоко без урахування практичних можливостей прийняття обґрунтованих рішень. У сучасних умовах непинного зростання автомобілізації потрібні подальші наукові пошуки, пов'язані з використанням прогресивних методів і засобів, зокрема комп'ютерних програмних продуктів і розроблення відповідних прикладних програм, приладів і обладнання для виконання натурних експериментальних досліджень. Отримані за їх допомогою результати адекватно описуватимуть роботу регульованих перехресть з урахуванням різних впливових чинників, що зумовлюють зниження затримок у русі ТЗ, заторів на ВДМ, забруднення довкілля та витрати енергетичних ресурсів.

1.2. Основні параметри та показники для розрахунку режиму роботи регульованого перехрестя

Управління дорожнім рухом, як відомо, – надзвичайно складний процес, тим більше, якщо ідеться про таке управління ТП у великих містах. Найважливішою і до кінця не вирішеною є проблема управління проїздом інтенсивних ТП через регульовані перехрестя. Основним засобом управління дорожнім рухом у містах є світлофорна сигналізація, яка призначена для почергового пропускання учасників дорожнього руху через перехрестя чи через певну ділянку ВДМ, а також для позначення небезпечних ділянок вулиць [171].

Проблеми оптимізації режимів світлофорного регулювання розглядали вітчизняні та іноземні науковці, зокрема *В. П. Поліщук, В. І. Єресов, О. П. Дзюба, Ю. О. Кременець, М. П. Печерський, Д. С. Самойлов, М. С. Фішельсон, Б. М. Четверухін, В. Т. Капітанов, Є. О. Рейцен, Ф. Вебстер, Х. Іносе, Т. Хамада* [47, 57, 76, 77, 97, 112, 124, 130, 140, 180, 201] та інші.

Розрізняють локальні та зональні методи управління. Цільова функція локального управління забезпечує отримання оцінки ефективності функціо-

нування транспорту на одному перехресті без урахування сусідніх. Зональне управління забезпечує оптимізацію функціонування ТП на мережі, яка складається з декількох взаємопов'язаних перехресть [45].

На регульованих перехрестях найчастіше застосовують однопрограмне жорстке управління рухом. Розрахунок тривалості світлофорного циклу та його елементів ґрунтується на опосередкованих значеннях інтенсивності ТП у попередні періоди [60, 77, 87, 107]. Відомо, що існують ранковий та вечірній максимальні піки інтенсивностей ТП у робочі дні, зростання їх до п'ятниці та зниження у вихідні [137, 202], різкий спад у нічну пору доби. Для врахування таких коливань використовують багатопрограмне жорстке (часово-залежне) або адаптивне (транспортно-залежне) управління [28, 77, 107, 118, 168, 202]. У роботі [202] наведено орієнтовні періоди доцільного застосування вказаних типів управління (рис. 1.1), проте рішення щодо використання адаптивного управління потрібно приймати у кожному конкретному випадку.

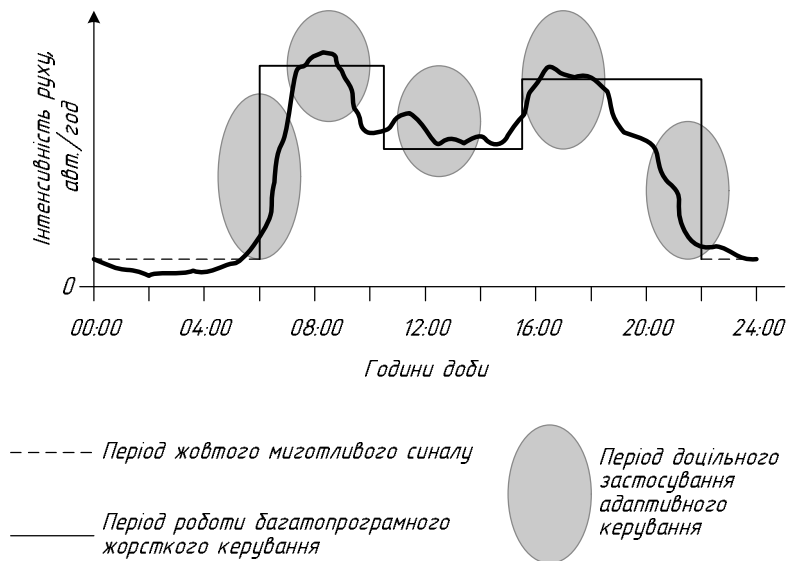


Рис. 1.1. Типова зміна інтенсивності руху ТП упродовж доби

В основу жорсткого управління покладено розрахунок тривалості світлофорного циклу та фаз регулювання на основі попередньо зібраних даних про інтенсивності руху ТП на перехресті. Однак за такого управління також

можлива зміна (до 3–5 разів на добу) параметрів регулювання. Проте ці параметри визначають не з реальної ситуації на перехресті, а на підставі попередньо виконаних досліджень [25].

В Україні та багатьох інших державах світу тривалість світлофорного циклу $T_{\text{ц}}$ розраховують за формулою *Вебстера*, яка ґрунтується на мінімізації затримок транспортних засобів (критерій оптимальності) перед перехрестям [6, 27, 58, 68, 77, 87, 91, 107, 129, 136 та інші]:

$$T_{\text{ц}} = \frac{1,5 \sum_{i=1}^n t_{ni} + 5}{1 - \sum_{i=1}^n y_i}, \text{ с,} \quad (1.1)$$

де t_{ni} – тривалість перехідного інтервалу в i -й фазі регулювання, с; y_i – фазовий коефіцієнт i -ї фази, який визначають через співвідношення

$$y_i = \frac{N_i}{S_i}, \quad (1.2)$$

де N_i – інтенсивність руху ТЗ у цьому напрямку в i -й фазі регулювання, авт./с; S_i – потік насичення в цьому самому напрямку, авт./с.

Тривалість дозвільного сигналу t_3 в i -й фазі регулювання пропорційна до розрахункового фазового коефіцієнта цієї фази [77]:

$$t_3 = \frac{\left(T_{\text{ц}} - \sum_{i=1}^n t_{ni} \right) y_i}{\sum_{i=1}^n y_i}. \quad (1.3)$$

Як видно (з формул (1.1)–(1.3)), для знаходження оптимальної тривалості світлофорного циклу та дозвільних сигналів у фазах регулювання необхідно знати значення двох параметрів: інтенсивності ТП і потоку насичення в певному напрямку i -ї фази на перехресті.

Визначальним показником, який входить у розрахунок фазових коефіцієнтів, а, отже, і тривалостей світлофорного циклу та дозвільного сигналу для певного напрямку, є *інтенсивність руху ТП* [27, 106]. Під інтенсивністю руху ТП розуміють загальну кількість ТЗ, що проїхала через поперечний переріз дороги за одиницю часу [10, 27, 71, 91, 96, 107, 116, 121, 163].

Однак, у складі ТП рухаються ТЗ різних типів з не однаковими розмірами і тому вони по-різному впливатимуть на таких самих учасників дорожнього руху. У зв'язку з цим у розрахунках оперують не фізичним значенням інтенсивності, а зведеним до умовного легкового автомобіля (хоча, не відомо, до якого – з якими габаритами, об'ємами циліндрів двигунів тощо) за допомогою відповідних коефіцієнтів зведення $K_{зв}$. Причому в різних країнах зведення здійснюють за різними критеріями. Так, у США весь ТП поділяють на дві категорії – легкові та вантажні ТЗ; в Австралії той самий вантажний ТЗ може мати три значення коефіцієнта зведення (якщо він рухається транзитом – $K_{зв} = 1,85$, в разі здійснення безконфліктного повороту $K_{зв} = 2,4$ та $K_{зв} = 3,9$ – у разі конфліктного повороту); у Великобританії вантажні ТЗ малої вантажності прирівнюють до легкових ($K_{зв} = 1,0$), великої – $K_{зв} = 1,75$, автобуси – $K_{зв} = 2,25$ і трамваї – $K_{зв} = 2,5$ [27].

Сьогодні існує низка методичних підходів щодо визначення коефіцієнта зведення, серед яких можна виокремити такі, що їх застосовують у дослідженнях ТП на перегонах між перехрестями і такі, що їх використовують у розрахунках світлофорних циклів регульованих перехресть з різними типами перетинів вулиць [87]. Числові значення коефіцієнта зведення прийняті в Україні наведено у чинних ДБН 2.3-4-2015 [7] та ДБН В. 2.3-5-2001 [30]. Вони не передбачають коефіцієнтів зведення для різних умов руху, а лише постійні значення для різних елементів дорожніх мереж. Значення цих коефіцієнтів обґрунтовані ще у 70-х роках минулого сторіччя і тому не можуть адекватно відображати реалії сучасних умов руху ТП. Багато вчених [27, 36, 41, 86, 87, 176] стверджують, що вони є неприйнятними, коли ідеться про розрахунок параметрів світлофорної сигналізації.

Починаючи від другої половини минулого сторіччя виконано значну кількість досліджень, спрямованих для визначення впливу різних типів ТЗ на пропускну здатність регульованих перехресть. Так, наприклад, у роботі [201] *Вебстер* оцінював коефіцієнти зведення (personal car equivalents) для автомобілів великої та середньої вантажності. Загальне значення коефіцієнта зведення в його розрахунках 1,75 [1, 85, 87]. *Міллер* [186] отримав значення коефіцієнта зведення для тих самих типів автомобілів, яке дорівнює 1,85. Його дослідження ґрунтувалися на визначенні додаткового часу, необхідного для ТЗ певного типу, який долає перехрестя, порівняно з легковими автомобілями [1, 85, 87]. *Бренстон* обґрунтував значення коефіцієнта зведення для вантажних автомобілів як 1,74 [174]. У пізнішій роботі *Бренстон* визначає коефіцієнти зведення за методом регресійного аналізу, досліджуючи рух ТП лише прямо.

Відповідно до цього коефіцієнти зведення дорівнюють 1,35 для автомобілів середньої вантажності та 1,68 – великої [1, 85, 87]. Водночас дослідники *Ю. А. Врубель* (Білорусь) [23] та *Я. Сосін* (Польща) [194], використовуючи абсолютно різні теоретичні передумови та методики проведення досліджень, отримали майже однакові значення цих коефіцієнтів [1, 85, 87], які відрізняються від нормативних, зокрема щодо мотоциклів та вантажних автомобілів (у них 0,6;1,6, ДБН 0,5;2,0), щодо автобусів і тролейбусів, відповідно – 1,7;2,0 та 3,0 (для тролейбусів не передбачено) [154]. *Я. Сосін* [194] визначав інтенсивність руху ТП у зведених до легкового автомобіля одиницях за відношенням сумарної затримки ТП D до середньої розрахункової затримки потоку, який складався лише з легкових автомобілів $d_{лег}$. *Ю. А. Врубель* визначив коефіцієнти зведення через співвідношення інтервалів між ТЗ i -го типу t_i під час роз'їзду черги на зелений сигнал світлофора до таких самих інтервалів під час роз'їзду черги, яка складалася лише з легкових автомобілів $t_{лег}$ [27, 41, 70, 85]. Значення коефіцієнтів зведення за різними джерелами наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Коефіцієнти зведення до легкового автомобіля

Тип транспортного засобу	Коефіцієнти зведення до легкового автомобіля за даними різних авторів				
	<i>Вебстер</i>	<i>Бренстон</i>	<i>Сосін</i>	<i>Врубель</i>	ДБН В.2. 3-4:2015
Мотоцикли	0,33	0,15	0,6	0,7	0,5–0,75
Вантажні ТЗ вантажністю:					
до 2 т	–	–	–	–	1,5
від 2 до 6 т	1,75	1,35	1,6	1,4	2
більше ніж 6 т	1,75	1,68	–	–	2,5–3,5
Автопоїзди	–	–	2,8	2,3	3,5–6,0
Автобуси	2,25	1,65	1,7	2,0	3,0
Тролейбуси	–	–	–	2,0	–
Зчленовані автобуси (тролейбуси)	–	–	2,8	2,6	–

Наведені дані вказують на відмінність значень коефіцієнтів зведення, отриманих різними авторами, від нормативних. Це вказує на потребу у використанні уточнених коефіцієнтів зведення для розрахунку світлофорних циклів. Варто зазначити, що у проєкті нової редакції ДБН В.2.3-5-20XX вже передбачено окремі коефіцієнти зведення для ТЗ під час проїзду регульованих перехресть.

Заслугове на окрему увагу підхід до визначення коефіцієнтів зведення, що його розробив російський вчений *О. Г. Левашев* [85–87], який взяв за основу співвідношення, котре запропонував *Ю. А. Врубель* [27]:

$$K_{зв} = \frac{t_i}{t_{лег}}. \quad (1.4)$$

На основі економічної доцільності – мінімізації тривалості роз'їзду черги ТЗ на перехресті T , після вмикання зеленого сигналу світлофора – *О. Г. Левашев* пов'язав її з визначенням коефіцієнта $K_{зв}$, використавши таку модель [85–87]:

$$T = \alpha + \sum_{j=1}^{j=m} \beta_j n_j + \varepsilon, \quad (1.5)$$

де α – стартова затримка, пов'язана з розгоном ТЗ до швидкості, характерної для ТП у разі досягнення значення ПН, ε ; β_j – параметри регресійної моделі, які відображають значення часових інтервалів між ТЗ j -го типу, ε ; n_j – кількість ТЗ j -го типу в черзі, од.; ε – похибка, яка відображає додатковий час, зумовлений чинниками, що не враховані у моделі, ε .

У визначенні параметра T пропонують приймати за початковий момент початок руху першого ТЗ з черги з метою вилучення з цієї моделі додаткового часу на реакцію водія. За кінцевий момент використовують момент проходження над стоп лінією заднього бампера остатнього ТЗ з черги [85–87]. Коефіцієнти зведення, отримані *Левашевим*, наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Коефіцієнти зведення ТП до легкового автомобіля (за Левашевим)

Тип транспортного засобу	Коефіцієнти зведення, $K_{зв}$
Легковий автомобіль	1,000
Мікроавтобус	1,093
Вантажний автомобіль вантажністю до 2 тонн	1,179
Автобус малої пасажиромісткості	1,367
Вантажний автомобіль вантажністю від 2 до 6 тонн	1,480
Автобус великої пасажиромісткості	1,839
Вантажний автомобіль вантажністю понад 6 тонн	1,647
Зчленований автобус (тролейбус)	2,362
Автопоїзд	2,231

Зазначимо, що наведені коефіцієнти можуть брати у цьому дослідженні за базові у розрахунках світлофорних циклів.

Сучасні дослідники пропонують ще інші, відповідно обґрунтовані, коефіцієнти зведення, які, на їхню думку, адекватніше відображають нинішні ТП. Однак вони не враховують змін тягових і гальмівних властивостей ТЗ різних типів та термінів їхньої служби. Спробу врахувати техніко-експлуатаційні характеристики ТЗ у визначенні коефіцієнтів зведення до легкового автомобіля наведено у [131], але ця методика стосується прогонів доріг, а не регульованих перехресть.

Ще одним визначальним параметром під час проектування та аналізу роботи регульованого перехрестя є потік насичення (ПН) – це максимальний потік ТЗ з черги безкінечної довжини перед стоп-лінією, які рушають на дозвільний сигнал світлофора і проїжджають перехрестя упродовж цього сигналу. Він відображає, крім цього, вплив розривів ТП під час світлофорного управління на його поведінку [155, 198]. Сьогодні існує декілька формулювань поняття ПН [156], окремі з яких наведено у табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Формулювання поняття «потік насичення» за різними авторами

Формулювання	Автор (-и)	Рік публікації	Література
Усталена інтенсивність руху ТЗ через стоп-лінію із черги значної довжини	<i>Вебстер</i>	1966	[201]
Пропускна здатність смуги руху за безперервного руху зі швидкістю 15 км/год	<i>Ланцберг, Ставничий та інші</i>	1980	[128]
Середня тривалість горіння зеленого сигналу інтенсивність роз'їзду ТЗ через стоп-лінію за розсмоктування достатньо довгої черги	<i>Врубель</i>	1988	[27]
Максимальна інтенсивність роз'їзду черги за повністю насиченої фази	<i>Кременець</i>	2005	[77]
Інтенсивність, з якою ТЗ, що стояли у черзі упродовж заборонного сигналу, перетинають стоп-лінію упродовж дозвільного сигналу	<i>Teplý, Allingham, Richardson, Stephenson</i>	2008	[198]

Для наглядного розуміння поняття ПН, яке запропонував *Вебстер*, розглянемо графік роз'їзду нескінченної черги ТЗ через стоп-лінію перед перехрестям після увімкнення зеленого сигналу світлофора (рис. 1.2) [42, 84, 87, 93, 151, 201].

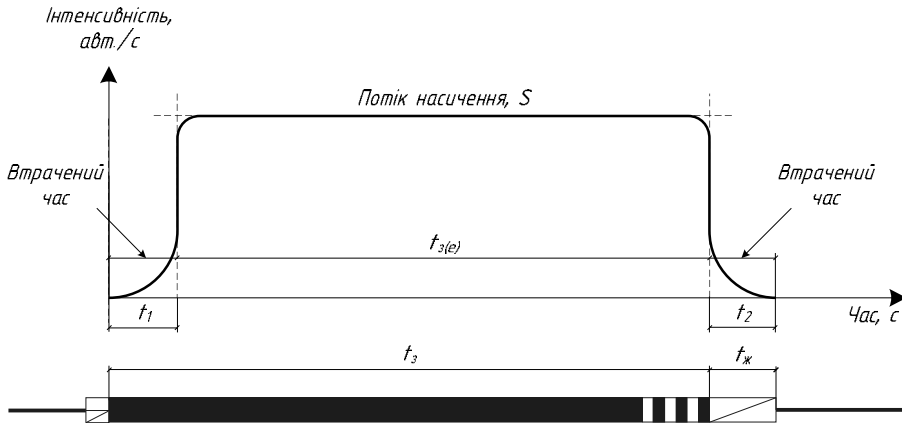


Рис. 1.2. Залежність «інтенсивність–час» проїзду ТП регулируваного перехрестя (за Вебстером)

З рис. 1.2 видно, що після вмикання зеленого сигналу світлофора ТЗ потрібен певний час t_1 для того, щоб рушити з місця і розвинути необхідну швидкість руху. Далі протягом декількох секунд черга ТЗ рухається з постійною максимальною інтенсивністю [93]. Під час увімкнення жовтого сигналу декотрі водії приймають рішення зупинитися тоді, коли інші продовжують рух. У такому разі можна замінити фактичну тривалість зеленого t_3 та жовтого сигналів $t_{ж}$ на «ефективну тривалість зеленого сигналу» $t_{3(e)}$, протягом якої здійснюється рух ТЗ з інтенсивністю, яка дорівнює потоку насичення, і на «втрачений час», протягом якого рух повністю відсутній [84, 87].

Існує багато відомих методик розрахунку потоку насичення. У різних країнах науковці розробляють свої підходи до визначення цього показника або займаються вдосконаленням вже наявних. Найточніше ПН можна визначити безпосередньо на об'єкті дослідження, оскільки на нього впливає низка чинників (геометрично-планувальні параметри перехрестя, умови руху, схема пофазного роз'їзду тощо). Усі відомі методики вимірювання ПН вимагають значних затрат часу [77, 87, 179, 198]. Тому під час проектування чи вдосконалення режиму регулювання використовують значення ідеального ПН та коефіцієнти його коригування, які враховують місцеві умови. *Ідеальним ПН* вважають потік, який існує за таких умов: ширина смуги 3,6 м; ухил підходу до перехрестя – 0 %; сухе покриття; відсутність перешкод, що створюються вуличними стоянками чи зупинками громадського транспорту; відсутність

конфліктних транспортних, велосипедних та пішохідних потоків; відсутність у потоці вантажних ТЗ та автобусів [179, 198].

Чинна вітчизняна методика розрахунку ПН є достатньо простою [38, 77, 93], бо базове значення ПН визначають з урахуванням ширини проїзної частини (ПЧ) за такою емпіричною формулою:

$$S = 525B_{пч}, \quad (1.6)$$

де $B_{пч}$ – ширина ПЧ певного напрямку, по якому ТП рухається у відповідній фазі, м.

Формулу (1.6) можна застосовувати для умови – $5,4\text{ м} \leq B_{пч} \leq 18,0\text{ м}$. У разі меншої ширини проїзної частини, потік насичення вибирають згідно з табл. 1.4 [38, 77, 93].

Таблиця 1.4

Значення потоку насичення залежно від ширини ПЧ

Ширина проїзної частини, м	3,00	3,50	3,75	4,20	4,80	5,10
Потік насичення, авт./год	1850	1920	1970	2075	2475	2700

За наявності поздовжнього ухилу дороги, радіусів її заокруглень у плані та розподілу ТЗ за напрямками руху ПН коригується відповідними поправковими коефіцієнтами. Інші параметри, що визначають умови руху (наявність пішоходів, вуличної стоянки, умови освітлення, тип і стан покриття тощо), враховуються одним додатковим коефіцієнтом [77].

Канадська методика розрахунку ПН передбачає визначення його базового значення окремо для кожної місцевості (штату) [198]. Наводять орієнтовні значення – від 1665 авт./год (м. Фредеріктон) до 2100 авт./год (м. Калгарі). Для перехрестя, геометрично-планувальні параметри, умови руху та параметри регулювання якого не відповідають ідеальним, ПН можна скоригувати за допомогою відповідних коефіцієнтів.

Скоригований ПН визначають з урахуванням функції коригування його $f(F_k)$, аргументами якої є відповідні коефіцієнти коригування [198]:

$$S = S_0 f(F_k), \quad (1.7)$$

де S_0 – базове значення потоку насичення, од/год.

Крім перелічених чинників, у цій методиці окремо враховується вплив кліматичних умов, стану проїзної частини та типу території [198].

Американська методика розрахунку ПН використовує поняття ідеального потоку насичення, який дорівнює 1900 авт./год для однієї смуги руху [42, 86, 87, 179]. Фактичний ПН, скоригований для місцевих умов, визначають із добутку:

$$S = S_0 n f_w f_{HV} f_g f_p f_{bb} f_a f_{LU} f_{LT} f_{RT} f_{Lpb} f_{Rpb}, \quad (1.8)$$

де S_0 – ідеальний потік насичення, авт./год; n – кількість смуг руху, шт.; $f_w \dots f_{Rpb}$ – коефіцієнти, які враховують відповідно: ширину смуги руху; склад потоку; ухил на підході до перехрестя; паркування; перешкоди, що створюються зупинками громадського транспорту; тип території; використання смуг руху; ліві та праві повороти; пішохідний рух за лівого повороту; пішохідний та велосипедний рух за правого повороту.

Перелічені методики використовують поняття ідеального ПН. У такому разі його значення у межах 1700–2100 авт./год, що відповідає часовим інтервалам між ТЗ 1,7–2,1 с. Наявність таких інтервалів за максимальної інтенсивності руху підтверджується дослідженнями *Кероглу*, *Калужського* та *Лобанова* [90, 108]. Значення потоку насичення 1800–2560 авт./год підтверджуються натурними дослідженнями *Akcelik* та *Besley* [173].

Подальший розвиток методів розрахунку ПН зводився до вдосконалення наявних підходів. Так, у роботах [38, 151, 164] досліджено вплив радіуса повороту траєкторії руху ТЗ на потік насичення. Встановлено, що за радіуса повороту 40 м і більше значення потоку насичення прирівнюється до прямолінійного руху [164], а за частки поворотних потоків на перехресті 60–70 % значення ПН може знижуватися у 1,5–2,0 разу [151]. У роботі [22] наведено залежність ПН прямого напрямку руху від ширини проїзної частини та частки вантажних ТЗ у потоці. Розроблена модель надає змогу уточнити на 10 % розрахункове значення ПН порівняно з класичною методикою [38, 77, 93].

У визначенні ПН українські вчені враховують склад ТП [93] та клас легкового автомобіля, який переважає в ньому [15]. Однак, таке припущення є не зовсім правильним, оскільки ПН є показником, який більшою мірою характеризує ВДМ, а не ТП. Вагомим результатом роботи [15] є те, що в ній запропоновано враховувати ймовірність появи певного виду ТЗ у ТП. На нашу думку, це потрібно робити під час розрахунку зведеної інтенсивності, а не значення ПН.

Крім цього, варто зазначити, що жодна з наведених методик розрахунку ПН не враховує стан дорожнього покриття на перехресті та в околі нього. На

практиці часто трапляються умови, які безпосередньо впливають на значення ПН: зчеплення шин ТЗ з дорогою, наявність перешкод на ПЧ (нерівності, вибоїни, трамвайні рейки тощо), підйоми або спуски, безконфліктні або конфліктні повороти. Однак ці чинники враховують під час оптимізації тривалості світлофорних циклів, що засвідчує наявність публікацій, у яких вказано на таку потребу [27, 50]. У роботі [50] показано, що під час перетину трамвайних колій на перехресті з асфальтобетонним покриттям у незадовільному стані водії знижують швидкість до 20–30 км/год. У такому разі ПН, порівняно з перехрестям з гумовокордовим покриттям трамвайного переїзду, знижується на 15 %. У створеній моделі проїзду такого регульованого перехрестя враховують також структуру ТП (легкові та вантажні автомобілі, автобуси) [50]. Вона побудована з використанням апарату клітинкових автоматів, що обмежує сферу застосування без використання потужної комп'ютерної техніки та відповідного програмного забезпечення.

Науковці з Білоруського національного технічного університету докладніше розглядають вплив рівності ПЧ на значення ПН [26, 27]. У методику розрахунку остатнього, яка відрізняється від української, вони внесли коефіцієнт умов руху $K_{ун}$, що є добутком трьох часткових коефіцієнтів, які враховують: зчеплення колеса ТЗ з поверхнею дороги, $K_{ун1}$; наявність перешкод на ПЧ – нерівності, вибоїни, трамвайні або залізничні рейки тощо, $K_{ун2}$; підйоми та спуски, $K_{ун3}$. Значення коефіцієнта $K_{ун2}$, який враховує нерівності на ПЧ, наведено в табл. 1.5.

Таблиця 1.5

Значення часткового коефіцієнта умов руху $K_{ун2}$, який враховує нерівності ПЧ

Оцінковий параметр	Тип нерівностей	Розрахункове значення $K_{ун2}$ для нерівностей h (мм)			
		10–20	20–50	50–100	>100
Нерівності ПЧ	поодинокі	1,0	1,2	1,5	2,0
	такі, що повторюються	1,05	1,3	1,6	2,1

Наведені дані показують, що у розрахунках ПН нерівності ПЧ розглядають у межах від 10 до більше ніж 100 мм. Якщо вони поодинокі, то коефіцієнт, який враховує ці нерівності, набуває значень 1,0–2,0, а для нерівностей, що повторюються, значення коефіцієнта є в межах від 1,05 до 2,1.

З метою оцінювання ефективності впровадження змін на ВДМ загалом та на регульованих перехрестях зокрема використовують низку кількісних параметрів – критеріїв якості керування. Ними, зокрема, є затримка (середня і загальна), тривалість руху, кількість зупинок, середня швидкість руху, довжина черги (середня і максимальна), тривалість заторів, ймовірність проїзду на перший дозвільний сигнал світлофора, пропускна здатність, симетрія керування (відносно напрямків руху чи потоків, що конфліктують), ефективність використання ВДМ, викиди шкідливих речовин у довкілля, транспортний шум, витрати палива тощо [55, 63, 66, 87, 107, 117]. У роботі [142] як критерій ефективності використано кількість ТЗ, які не встигли проїхати перехрестя за певну кількість циклів, а у роботі [8] – індекс поведінки потоку, який є зваженою комбінацією загальної тривалості затримки та кількості зупинок усіх ТЗ у мережі. Для ідеального випадку варто використовувати не один, а декілька критеріїв.

Будь-який критерій повинен не тільки добре описувати поточну ситуацію, але і розраховуватись теоретично або експериментально. Тому економічні чинники та чинники, пов'язані з довкіллям, рідко приймають як критерії.

Однією із класифікаційних ознак, за якими обирають критерії, є мета керування. У табл. 1.6 наведено цілі, які висуваються під час проектування міських АСУДР, та відповідні їм критерії якості [4, 117]. Варто відзначити, що одночасне виконання декількох критеріїв приводить до більшого системного ефекту, ніж сума ефектів тих самих елементів, що діють незалежно [117].

Загальносистемний критерій якості керування можна подати у вигляді

$$F = \sum_{i=1}^n f_i \rightarrow \max, \quad (1.9)$$

де f_i – ефект, отриманий за критерієм i ; n – кількість критеріїв.

З погляду отримання інформації, критерії якості керування можна розподілити на ті, які можна безпосередньо виміряти, та такі, які потрібно розраховувати. Як правило, другі є наслідком перших. На рис. 1.3 показано взаємозв'язок між критеріями обох груп [117].

Деякі з критеріїв для досягнення оптимального результату вимагають максимізації, а інші – мінімізації тих самих параметрів. Ще інші – навпаки: оптимізація керування за одним із них приводить до підвищення якості керування і за іншим. Це вказує на те, що для різних умов руху доцільно

використовувати різні критерії, що забезпечують максимальний ефект саме в таких умовах. У такому разі не існує цільової функції, яка б дала змогу здійснювати ефективне керування для всіх можливих змін умов руху.

Таблиця 1.6

Критерії якості керування в АСУДР у містах

Мета керування	Критерії якості керування
Гарантування безпеки руху	Рівень аварійності на ВДМ
Підвищення рівня обслуговування учасників руху	Тривалість затримки Тривалість руху Середня швидкість руху Кількість зупинок Довжина черги перед перехрестям Рівномірність руху Експлуатаційні витрати
Підвищення використання пропускної здатності ВДМ	Рівень використання пропускної здатності ВДМ
Зменшення шкідливого впливу транспорту на довкілля	Рівень транспортного шуму Рівень забруднення довкілля відпрацьованими газами Витрати палива
Надійність керування	Максимальна швидкість руху Параметр нерівномірності руху (середньоквадратичне відхилення пришвидшення автомобіля)

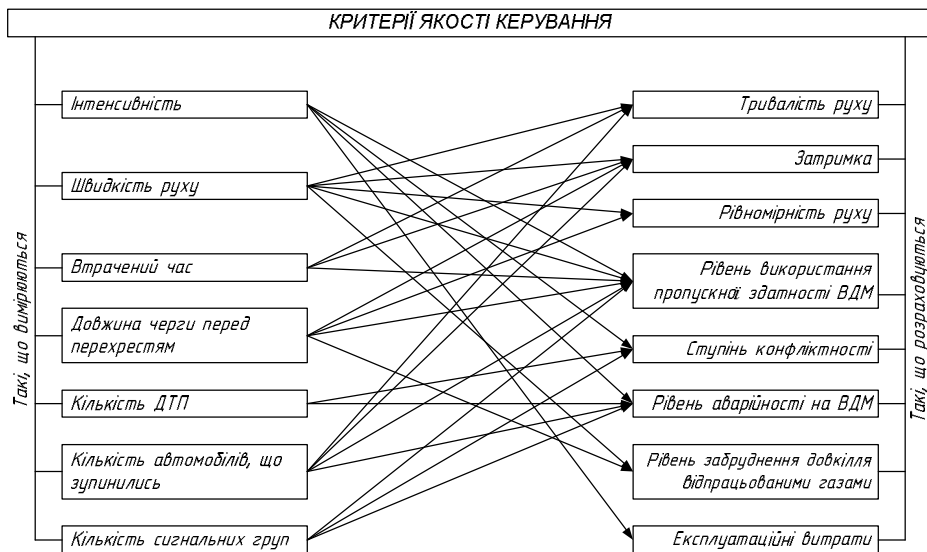


Рис. 1.3. Взаємозв'язок критеріїв якості керування

Так, за значної інтенсивності руху критеріями можуть бути тривалість поїздки, затримки та пропускна здатність [63]. Пропускную здатність можна визначати за допомогою двох інших параметрів, оскільки недостатнє її значення відображається на затримках або тривалості поїздки. Тривалість поїздки краще оцінює сумарний ефект системи, але затримки простіше розраховують. Оскільки тривалість руху є сумою затримок біля перехрестя та тривалості руху між перехрестями, і другий параметр мало залежить від параметрів роботи світлофорного керування, використовуючи як критерій затримку, можна наближено оцінити сумарну тривалість поїздок усіх автомобілів.

За малої інтенсивності руху зручно використовувати як критерій «кількість зупинок». Проте, такий параметр складно розрахувати теоретично, оскільки важко визначити не лише мінімальне значення швидкості, що відповідає зупинці, але і саме значення швидкості. Тому як критерій за малої інтенсивності руху також використовують затримку.

У разі заторів або щільних ТП ні затримку, ні тривалість поїздки не можна використовувати як критерій, оскільки вони не мають стаціонарних значень, а радше володіють ефектом нагромадження в часі. У цьому разі як критерій обирають довжину черги або тривалість існування затору [55, 63]. Оскільки затор зумовлюється різними причинами (ДТП, дорожньо-будівельні роботи, інтенсивний рух, несправність роботи світлофорів), в кожному конкретному випадку призначають відповідний критерій.

Одним із найпоширеніших критеріїв в оптимізації СФР є середня затримка ТЗ перед перехрестям [17, 43, 58, 65, 87, 98, 107, 120], оскільки вона має чіткий фізичний зміст, порівняно просто вимірюється і легко оцінюється в грошовому вимірюванні, що дає змогу легко розрахувати економічну ефективність запропонованих заходів [55, 107]. Транспортна затримка є основним показником, який входить у поняття рівня обслуговування і який використовується у визначенні необхідної довжини смуги руху перед перехрестям, витрати палива та викидів відпрацьованих газів [87].

Під *транспортною затримкою* на регульованому перехресті розуміють затримку, яка виникає в результаті зниження швидкості руху ТП, зумовленої роботою світлофорної сигналізації. Отже, затримка визначається різницею між фактичною тривалістю проїзду ТП перехрестя та тривалістю проїзду його ж у вільних умовах без дії СФР (рис. 1.4) [85, 87].

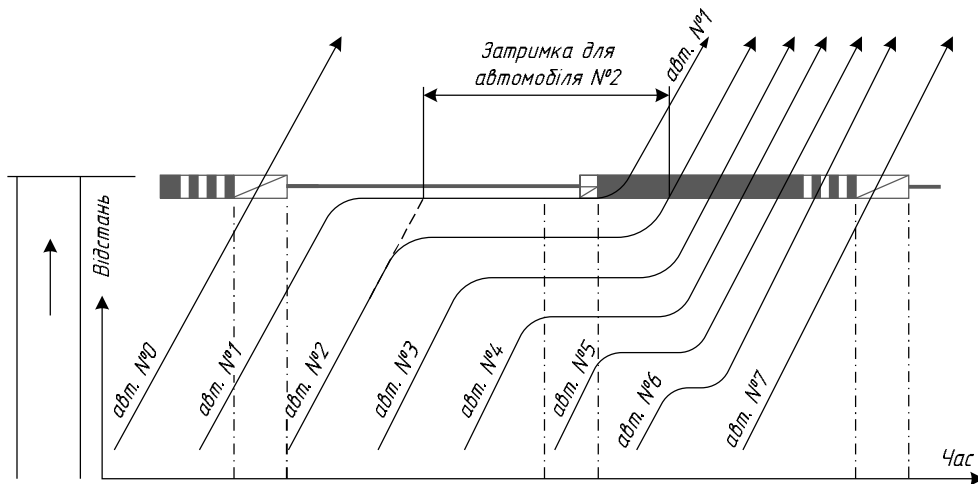


Рис. 1.4. Ілюстрація транспортної затримки на регульованому перехресті

У спрощених розрахунках для визначення середньої затримки (d) одного ТЗ перед перехрестям можна використовувати формулу, яка побудована на припущенні, що середня тривалість затримки дорівнюватиме половині періоду, протягом якого заборонено рух [58, 77, 116], тобто:

$$d = \frac{T_y - t_3}{2}, \quad (1.10)$$

де T_y – тривалість світлофорного циклу, с; t_3 – тривалість дозвільного сигналу світлофора, с.

Формула ґрунтується на припущенні, що затримка ТЗ, який прибув до перехрестя на початку дії забороненого сигналу, дорівнюватиме тривалості горіння цього сигналу, а якщо в кінці, то дорівнюватиме нулю. Вираз (1.10) можна використовувати у разі рівномірного прибуття ТЗ до перехрестя. Таке можливе лише за щільних ТП [77].

Однак відомо, що прибуття ТЗ до них є випадковим процесом. Формулу, яка враховує випадкову природу ТП, уперше запропонував англійський вчений Вебстер [55, 68, 76, 77, 83, 87, 91, 107, 114, 152, 166, 175, 201]:

$$d = \frac{T_y(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2N(1-x)} - 0,65 \left(\frac{T_y}{N^2} \right)^{1/3} x^{2+5\lambda}, \quad (1.11)$$

де λ – відношення тривалості горіння зеленого сигналу до тривалості циклу;
 x – ступінь насичення напрямку руху; N – інтенсивність руху ТЗ у досліджуваному напрямку, од/с.

Перша складова формули відображає затримку в разі регулярного прибуття ТЗ до перехрестя, друга – випадковість цього процесу з урахуванням пуассонівського процесу прибуття, третя складова – це емпірична поправка, яка підвищує точність розрахунку і становить приблизно 10 % від значення отриманого за формулою (1.10) [76, 77, 83, 87, 175, 201]. На практиці дуже часто використовують спрощений варіант цієї формули [26, 28, 58, 68, 77, 87, 103, 158, 201], однак у разі застосування комп'ютерної техніки використовують формулу (1.10), оскільки можна отримати точніший розв'язок [77].

На основі формули Вебстера можна отримати і значення циклу регулювання, які мінімізують сумарну транспортну затримку. Одним із результатів виявилась залежність середньої затримки d умовного автомобіля для низки типових перехресть від тривалості світлофорного циклу (рис. 1.5) [6, 87, 91, 107, 179].

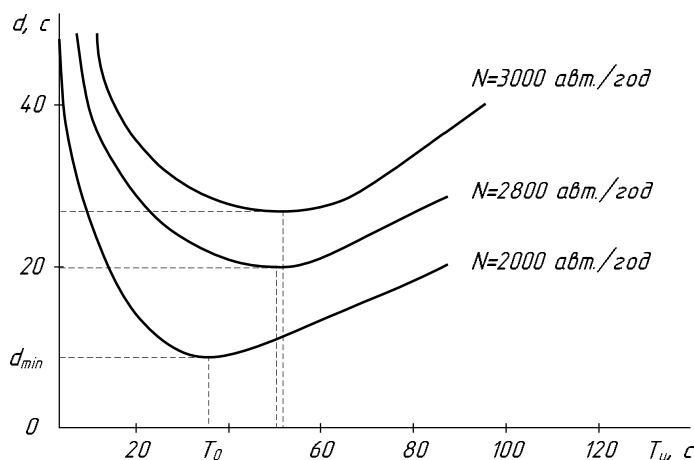


Рис. 1.5. Залежність середньої затримки транспортних засобів від тривалості світлофорного циклу

З наведеного можна зробити такі висновки [107]:

– затримка має мінімальне значення в точці T_0 , яка відповідає оптимальному циклу СФР для відповідних інтенсивностей ТП;

- зі збільшенням тривалості циклу відносно T_0 затримка зростає;
- зі зменшенням тривалості циклу відносно T_0 затримка також зростає;
- у діапазоні від $0,75T_0$ до $1,5T_0$ затримка перевищує мінімальне значення d_{min} не більше ніж на 10–15 %.

Результати експериментальних і теоретичних досліджень затримок та швидкостей руху ТЗ, що їх виконала *Г. Ю. Васильєва*, на магістральній ВДМ міст Києва, Горлівки і Краматорська дали змогу отримати залежності між середньою затримкою ТЗ та тривалістю світлофорного циклу [19]:

$$d = 0,38T_y - 9,94 . \quad (1.12)$$

Основним недоліком методики *Вебстера* є неможливість застосування її для щільних ТП, коли ступінь насичення напрямку руху $x \geq 1$, оскільки в таких випадках вона дає нескінченні значення затримки. *Ступінь насичення напрямку руху* є відношенням середньої кількості ТЗ, які прибули до перехрестя за цикл, до максимальної кількості ТЗ, які проїхали перехрестя за час горіння зеленого сигналу світлофора [76, 77], і визначається за формулою

$$x = \frac{NT_y}{St_3} , \quad (1.13)$$

де S – потік насичення, од/с.

Дослідники не встановили, за яких значень показників, що входять у це співвідношення, формула (1.11) припиняє давати адекватні результати. Так, у роботі [16] сказано, що вона ефективно працює, якщо $x \leq 0,8$, інші науковці [77] зазначають, що для забезпечення певного резерву пропускної здатності потрібно, щоб $x = 0,85 - 0,9$ (не більше). Білоруські вчені вказують [29, 49, 69] на значення $x \leq 0,93$, після якого спостерігатимуться перенасичені цикли і розпочне утворюватися затор. Хоча ті самі науковці в попередній роботі [26] вказують на максимальне значення $x \leq 0,95$, а в роботах [6, 76], де табульовано значення деяких величин формули (1.13), наводять максимальне значення, $x = 0,98$.

Удосконаленням формули *Вебстера* займався *Міллер* [17, 55, 120, 185]. Він запропонував для визначення транспортної затримки на регульованому перехресті використовувати формулу

$$d = \frac{T_y - \lambda}{2T_y(S - N)} \left(\frac{IS(2x - 1)}{N(1 - x)} + S(T_y - \lambda) + I - 1 + \frac{N}{S} \right) , \quad (1.14)$$

де I – коефіцієнт варіації інтенсивності потоку (як відношення середньоквадратичного відхилення до математичного сподівання кількості ТЗ, що прибувають за цикл до перехрестя).

Основною перевагою цієї формули є те, що її можна використовувати для розрахунку транспортних затримок за різних за характером прибуття ТП. Так, якщо події ТП підпорядковуються закону Пуассона – $I=1$, якщо ж потік є детермінованим – $I=0$, якщо стохастичним – $0 < I < 1$ [55, 56].

Аналогічні зауваження можна висловити і до формули Ньюелла [55, 188]:

$$d = \frac{t_u^2}{2(t_u + t_s)(1-y)} + \frac{IH(\mu)}{2S} \left(\frac{t_s}{t_u + t_s} - y \right) + \frac{It_u}{2S(t_u + t_s)(1-y)^2}, \quad (1.15)$$

де t_u – тривалість заборонного сигналу світлофора, s ; y – фазовий коефіцієнт цієї фази (дорівнює відношенню інтенсивності ТП до потоку насичення); $H(\mu)$ – інтегральна залежність Вінера–Хопфа [17, 55, 120], пов'язана із синтезом оптимальної передатної функції каналу «інтенсивність–затримка» за критерієм мінімуму середньоквадратичної похибки [55].

Моделі Вебстера, Міллера, Ньюелла не враховують, крім цього, тривалість пікового періоду або величини перевантаження і, тому їх не можна використати за великих значень ступеня насичення фази та фазового коефіцієнта [166].

Зі збільшенням інтенсивності руху ТП, особливо в «час-пік», перед регульованими перехрестями з магістральними вулицями починають утворюватися черги ТЗ. Настає момент, коли протягом достатньо тривалого часу виникають перенасичені світлофорні цикли ($x \geq 1$). У цьому разі вчені Білоруського НТУ [26, 28, 29, 49, 69, 125, 166] запропонували питому транспортну затримку розраховувати за формулою Брілона і Ву:

$$d = \frac{T_u(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{N_0}{S\lambda}, \quad (1.16)$$

де N_0 – середня довжина черги перед перехрестям у «час-пік», авт.

Її можна визначити, користуючись співвідношеннями для $x < 1,14$

$$N_0 = 524T_0S\lambda \left(1,09x - 1 + \sqrt{(1,09x - 1)^2 + \frac{1,09x - x_0}{175S\lambda}} \right); \quad (1.17)$$

для $x \geq 1,14$

$$N_0 = 900T_0S\lambda \left(x-1 + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{x-0,92x_0-0,08}{300S\lambda}} \right), \quad (1.18)$$

де T_0 – тривалість пікового періоду (визначають експериментально), год/добу;
 x_0 – значення коефіцієнта x , вище від якого спостерігатимуться перенасичені цикли:

$$x_0 \approx 0,67 + \frac{M_n \lambda T_{\psi}}{600}. \quad (1.19)$$

Інші іноземні дослідники [198] стверджують, що затримка ТЗ залежить від тривалості горіння заборонного сигналу, інтервалів прибуття ТЗ і тривалості урухомлення черги, та пропонують формулу [58, 96]

$$d = t_{\psi} - \frac{\Psi(2i-1)}{2} + \sum_{x=1}^i D_x, \quad (1.20)$$

де Ψ – середнє значення часового інтервалу прибуття ТЗ до стоп-лінії, с;
 $i=1,2,\dots,n$ – порядковий номер ТЗ у черзі; D_x – інтервал часу відправлення ТЗ за виїзду на перехрестя, с (для легкових автомобілів $D_x = 2,1$ с) [96].

Вчений *А. А. Поляков* пропонує для визначення середньої тривалості затримки ТЗ у зоні перехрестя використовувати співвідношення, яке враховує рух всіх автомобілів (враховуючи і тих, що проїхали без зупинки) [116]:

$$d = \frac{(t_{\psi-ж} + 2,5)^2}{2T_{\psi}(p-q)}, \quad (1.21)$$

де $t_{\psi-ж}$ – сумарна тривалість сигналів (червоного та двох жовтих), які забороняють рух у досліджуваному напрямку, с; p – середній інтервал між розрахунковими зведеними ТЗ, які під'їжджають до перехрестя по одній смузі руху цього самого напрямку, с; q – середній інтервал між автомобілями, які виїжджають на перехрестя, с.

Враховуючи передумови, закладені в формулу (1.21), *В. Г. Живоглядюв* [58] пропонує вдосконалену емпіричну формулу для визначення тривалості затримки ТЗ біля стоп-лінії регульованих перехресть.

Одну з перших формул для розрахунку транспортної затримки, яка найточніше враховує умови руху на регульованому перехресті, наводять в

американській інструкції з пропускної здатності доріг (HCM 1994 – Highway Capacity Manual) [83, 87, 198]:

$$d = d_1(DF) + d_2; \quad (1.22)$$

$$d_1 = 0,38T_u \frac{(1-\lambda)^2}{1-\lambda}; \quad (1.23)$$

$$d_2 = 173x^2 \left[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{m}{P}x} \right], \quad (1.24)$$

де d_1 – затримка, яка враховує рівномірне прибуття ТЗ до перехрестя, с/зв. од.; DF – коригувальний коефіцієнт, який враховує прогресію ТП і режим СФР (для жорсткого регулювання $DF=1$); d_2 – додаткова затримка, яка виникає за випадкового прибуття ТЗ, до того ж допускають, що початкова черга дорівнює нулю, с/зв. од.; m – додатковий калібрувальний коефіцієнт, який враховує тип прибуття і утворення пачок ТЗ у ТП (для випадкового прибуття $m=16$); P – пропускна здатність смуги руху, зв. од./год.

Параметр d_1 подібний до першої частини формули Вебстера і часто використовується в розрахунках затримок за умови рівномірного прибуття однорідного ТП. Цей параметр можна застосовувати тоді, коли рівень завантаження (ступінь насичення) менший від одиниці ($x < 1$). Другий параметр d_2 аналогічний до другої частини формули Вебстера і враховує затримки за випадкового прибуття ТЗ.

Ще одну формулу, яку використовують для визначення транспортної затримки, наведено в канадській інструкції з пропускної здатності регульованих перехресть (CCG 1995 – Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections) [83, 87, 198]. У цій інструкції моделі не розрізняють стоп-затримки (*стоп-затримка* – затримка ТЗ у разі зниження його швидкості менше ніж 5 км/год) від загальних затримок, тоді як у HCM 1994 передбачено, що 76 % всіх затримок становлять саме стоп-затримки. Тому в CCG 1995 є емпіричні коефіцієнти, які дають змогу зі загальних затримок виділити стоп-затримки [83]. Оцінка стартових втрат часу актуальна у разі застосування коротких фаз. Значення втраченого часу під час старту за даними різних авторів коливається в межах від 0,8 с до 4,5 с. Такий широкий діапазон значень свідчить про різноманітні умови руху на регульованих перехрестях у тих країнах, де проводили дослідження [87].

У спеціальній літературі зауважено, що модель CCG 1995 аналогічна до моделі HCM 1994. Проте є різниця – моделі канадської інструкції оцінюють загальні затримки, тоді як (1.23) і (1.24) – стоп-затримки. Крім цього, в HCM 1994 ТП обчислюється у натуральних показниках (авт./год), тоді як в CCG 1995 – у зведених (зв. од./год). У цих інструкціях по-різному розраховують потік насичення (в HCM 1994 його значення в середньому на 5 % вище, порівняно з CCG 1995) [85].

Існують американські інструкції щодо визначення пропускної здатності HCM 2000. Вони відповідають сучасним підходам до проектування та оцінювання роботи регульованих перехресть, зокрема й щодо визначення транспортних затримок [2, 83, 86, 87, 179]. Наведені тут моделі подібні до моделі CCG 1995. Відмінність становлять: наявність додаткової змінної d_3 , застосування фізичних показників, які визначають значення потоку замість зведених [83]. Коефіцієнт прогресії PF потрібно використовувати для всіх координованих груп руху за відсутності адаптивного регулювання. Поправний коефіцієнт для додаткової затримки k враховує вплив типу контролера системи адаптивного регулювання на величину цієї затримки. Для жорсткого регулювання параметр $k=0,5$, що пов'язано з накопиченням черги з випадковим прибуттям ТЗ і постійною тривалістю обслуговування. Коефіцієнт, який враховує віддаленість попереднього перехрестя I для додаткової затримки враховує ефект «фільтрації» ТП, що прибуває від попереднього (за напрямком руху) перехрестя. У разі ізольованого перехрестя – $I=1,0$ (за умови, що попередній світлофор розташований на відстані 1,6 км і більше від досліджуваного). Якщо всі автомобілі не встигли роз'їхатися за тривалість горіння зеленого сигналу, виникає додаткова затримка d_3 . За відсутності початкової черги значення додаткової затримки дорівнює нулю [87, 179].

Сьогодні наявна низка комп'ютерних програм імітаційного моделювання ТП, які дають змогу отримати середні затримки ТЗ під час проїзду регульованого перехрестя за різних початкових даних. Так, у роботі [83] здійснено порівняльний аналіз значень транспортних затримок, отриманих за допомогою аналітичних залежностей за *Вебстером*, HCM 1994, CCG 1995, HCM 2000 та результатів моделювання руху ТП через ізольовані регульовані перехрестя за допомогою програмних продуктів VISSIM, AIMSUN, SYNCHRO, SIMTRAFFIC та інші.

Початкові дані, які брали у розрахунках за аналітичними залежностями та закладали у програми імітаційного моделювання, такі: кількість смуг руху

на перехресті – 1×1 ; потік насичення – 1800 зв. од./год; двофазний світлофорний цикл ($T_{\text{ц}} = 30 + 2 + 30 + 2 = 64$ с); ТП складається лише з легкових ТЗ. У роботі [83] наведено порівняльні результати, отримані за допомогою моделювання та за розрахунковим методом (табл. 1.7).

За результатами аналізу аналітичних моделей HCM 2000, CCG 1995 та формули Вебстера можна стверджувати, що за малонасиченого ТП затримки приблизно однакові. Наприклад, для ступеня насичення $x \leq 0,2$ межі значень не перевищують 2,5 %, а для $x \leq 0,4$ – не більше ніж 6 %. Водночас затримки, отримані за методикою HCM 1994, занижені, особливо, коли ступінь насичення $x \geq 1,0$, а формула Вебстера загалом перестає працювати.

Таблиця 1.7

Порівняльний аналіз розрахунку транспортних затримок

Програма моделювання / Аналітична залежність	Ступінь насичення напрямку руху x						
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
VISSIM	10,9	11,2	11,4	11,7	13,8	10,3	15,5
AIMSUN	7,4	8,4	11,2	11,3	15,7	15,5	17,8
SYNCHRO	10,0	10,8	11,8	12,9	14,4	16,3	18,9
SIMTRAFFIC	9,6	8,6	11,1	12,1	13,1	15,2	18,9
<i>Вебстер</i>	9,7	10,4	11,3	12,5	13,8	15,7	18,4
HCM 1994	9,6	10,2	10,9	11,8	12,8	14,1	15,8
CCG 1995	9,7	10,4	11,3	12,5	13,8	15,7	18,3
HCM 2000	7,2	7,6	8,0	8,6	9,3	10,4	12,0
Програма моделювання / Аналітична залежність	Ступінь насичення напрямку руху x						
	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
VISSIM	14,2	14,8	17,7	20,9	28,4	52,9	86,8
AIMSUN	16,7	19,7	25,7	30,5	102,2	165,2	199,0
SYNCHRO	23,8	32,5	50,8	82,4	121,8	164,6	207,0
SIMTRAFFIC	26,0	30,2	92,3	449,0	675,0	1046	1264
<i>Вебстер</i>	22,9	35,0	∞	–	–	–	–
HCM 1994	18,6	24,4	48,6	121,0	200,0	294,0	379,0
CCG 1995	22,6	32,0	61,5	128,0	206,0	299,0	383,0
HCM 2000	14,8	20,9	37,1	73,0	126,0	207,0	300,0

Аналіз результатів моделювання також підтверджує найбільшу розбіжність значень затримок за умови, коли $x \geq 1,0$, а за малого значення x для однакового напрямку руху вони залишаються приблизно однаковими. У

зв'язку з цим потрібно вивчати і порівнювати програми та алгоритми оцінки функціонування ізольованих регульованих перехресть за умови високих значень ступеня насичення напрямку руху [83].

1.3. Дослідження роботи регульованих перехресть із використанням математичного та імітаційного моделювання

З метою оцінювання ефективності вибраного режиму регулювання та алгоритму керування дорожнім рухом потрібно дослідити роботу перехрестя в умовах, коли дорожні контролери реалізують різні алгоритми та стратегії керування. Проте цей метод повною мірою застосувати на практиці неможливо, оскільки, з одного боку, складно знайти в межах певної ділянки відповідні до кожного експерименту ТП, а з іншого – це принципово недопустимо, оскільки експериментування на реальному об'єкті може призвести до виникнення заторів та ДТП [5, 52, 63]. Отже, потрібно сформуванати модель транспортної системи, яка б реалістично відтворювала поведінку ТП та давала б змогу прогнозувати його поведінку та характеристики за різних стратегій керування.

1.3.1. Математичне моделювання транспортних потоків. У математичних моделях ТП використовують різні підходи, які відрізняються математичним апаратом залежно від ступеня деталізації опису процесу руху [54, 72]. Через це і немає єдиної загальноприйнятої класифікації транспортних моделей [132]. Тому різні вчені використовують власний поділ [10, 21, 31, 40, 72, 113, 132–134, 141, 165], який для конкретних досліджень є найприйнятнішим.

Історично в моделюванні ТП склалися два основні підходи: детермінований та ймовірнісний (стохастичний) [31, 132, 133]. У детермінованих моделях розглядають функціональні залежності між певними показниками ТП, а в стохастичних враховують його випадковість [131].

З іншого боку, якщо розглядати моделювання з погляду конкретизації опису взаємодії ТЗ у ТП, виділяють три класи моделей [10, 54]. Макроскопічні моделі описують рух ТЗ за аналогією з рухом рідини, тому їх інколи називають гідродинамічними моделями. Перевагою таких моделей є те, що їх можна

подати системою диференціальних рівнянь. У макроскопічних моделях описано взаємозв'язок між інтенсивністю, швидкістю і щільністю, у мікроскопічних – поведінку та взаємодію між автомобілями, з яких складається ТП [10, 20, 55, 110, 134, 135, 164]. Такий підхід дає змогу отримати реальніший опис руху ТЗ, однак для їх розрахунку потрібна потужна комп'ютерна техніка [54, 132, 165]. До мікроскопічних також належать моделі, побудовані на клітинкових автоматах [10]. Проміжним рівнем між макроскопічними та мікроскопічними моделями є мезоскопічні (кінетичні). У них описують окремі ТЗ, але без взаємодії між ними. Їх застосовують тоді, коли потрібно використати мікромоделювання, але неможливо для значних розмірів транспортної мережі [10, 54].

Очевидно, що моделі, які застосовують для опису процесу руху ТЗ через регульовані перехрестя, належать до мікроскопічного моделювання. До відомих моделей такого типу зараховують: модель руху за лідером [10, 20, 132, 165]; модель оптимальної швидкості [10]; модель розумного водія [10, 11]; клітинкові автомати [10, 109, 132].

Тімoffeєва і *Завалищн* розглядають перехрестя з рухом ТЗ в один бік, як одноканальну модель систем масового обслуговування з обмеженою чергою [144]. На основі теорії ланцюгів *Маркова* складають диференціальні рівняння *Колмогорова*, які розв'язують за допомогою програмного забезпечення *MathCad*. У результаті знайдено, що ймовірності станів системи та середня довжина черги перед перехрестям можуть описувати періодичними функціями. Зокрема, середня довжина черги ТЗ перед перехрестям наближається до періодичної функції та стабілізується, коли в черзі 3–8 автомобілів. У цій самій статті вказують на неможливість визначення за аналітичним методом оптимального режиму роботи перехрестя.

У зв'язку з наведеним запропоновано критерії роботи перехрестя:

- середня довжина черги перед ввімкненням зеленого сигналу;
- ймовірність того, що на початок заборонного сигналу на перехресті немає ТЗ;
- ймовірність того, що довжина черги перед ввімкненням зеленого сигналу буде більшою від наперед заданого значення.

Роботу такої системи досліджували з урахуванням залежності показників її функціонування від інтенсивності надходження ТЗ до перехрестя та інтенсивності його проїзду.

Крім односмугового руху, розглядалась СМО для проїзду перехрестя з двох смуг [144]. У результаті встановлено залежність тривалості проїзду перехрестя від моменту вмикання зеленого сигналу. Незважаючи на достатньо глибокий аналіз і адекватне представлення роботи перехрестя, оптимальних режимів його роботи та затримок ТЗ у черзі перед перехрестям, рекомендації щодо раціональних співвідношень між тривалістю окремих сигналів світлофорного циклу не наведено.

У пізнішій статті [59] ці ж автори розглядають роботу перехрестя, як СМО з урахуванням руху ТЗ за різними напрямками. Встановлені залежності середньої кількості ТЗ, які стоять у черзі для руху за різними напрямками. Стационарний режим роботи перехрестя досліджують з метою визначення оптимальних меж його функціонування. У такому разі використовують матричне обчислення вектор-функцій. За критерій оптимальності розглядають сумарну середню кількість ТЗ, які очікують проїзду перехрестя.

Крім цього, окремо розглядають ситуацію, коли у момент ввімкнення зеленого сигналу тривалість проїзду перехрестя не є постійною і зменшується в міру збільшення тривалості від моменту ввімкнення цього сигналу (відповідає дійсності у зв'язку зі зростанням швидкості ТЗ, які під'їжджають до стоп-лінії). Зроблено висновок про те, що залежність середньої тривалості проїзду перехрестя від тривалості зеленого сигналу апроксимується функцією $\theta(t) = a + be^{-kt}$. На підставі цього знайдено оптимальні тривалості світлофорного циклу залежно від інтенсивності надходження ТЗ до перехрестя: інтенсивність вхідних потоків (авт./с), λ – 0,2; 0,25; 0,3; 0,35. Відповідно для них оптимальна тривалість циклу (с), $T_{\text{ц}}$ – 46; 68; 86; 104.

Незважаючи на конкретні «оптимальні» результати, отримані з використанням поглибленого математичного апарату теорії СМО, автори не розглядають стартових затримок для різних видів ТЗ (вантажні, легкові, автобуси), варіації швидкостей проїзду перехрестя ними, залежно від їхніх тягових характеристик (пов'язані з різними технічними станами ТЗ), а також із різними типами і технічним станом дорожніх покриттів. Крім того, не розглядають тривалість простоювання в черзі перед перехрестям. Урахування усього переліченого безумовно матиме вплив на результати оптимізації проїзду ТП перехрестя та тривалостей світлофорних циклів.

Ще одним оригінальним підходом у моделюванні проїзду ТП через перехрестя є такий, який використовує стохастичні транспортні клітинкові

автомати [50]. Він враховує стан дорожнього покриття та локальні швидкісні обмеження як у зв'язку з нерівностями покриття, так і обмеженнями дорожніми знаками. Розглянуто багатосмуговий рух з урахуванням «правила повільного старту і просторового випередження». Режим прискорення, гальмування, перевищення швидкості, випадкові впливи розглядають як випадкові процеси з відповідними межами значень їхніх ймовірностей. Моделювання проїзду ТП з такими характеристиками через регульовані перехрестя виконано з урахуванням «правил реагування на сигнали світлофора» та ймовірності появи пішоходів і тривалості їхнього переходу [50].

Серед інших публікацій про моделювання проїзду перехрестя можна виділити [88], в якій розглянуто регульоване перехрестя і визначають вплив черги перед світлофором на його пропускну здатність і на тривалість проїзду залежно від довжини черги ТЗ, які можуть проїхати за час горіння дозвольного сигналу. До того ж беруть до уваги вплив потужнісних характеристик автомобілів та типи і якості дорожніх покриттів. Вплив потужнісних характеристик на динаміку проїзду оцінюють за величиною середнього прискорення. Після цього визначають час, потрібний для проїзду перехрестя з урахуванням розташування автомобіля перед стоп-лінією [88]:

$$t_{np} = \sqrt{\frac{(l_m + \Delta l_{cm}) n_{ij \max}}{j_{cp}}}, \quad (1.25)$$

де l_m – довжина перехрестя, м; Δl_{cm} – відстань між автомобілями в черзі, м; $n_{ij \max}$ – максимальна довжина черги ТЗ перед перехрестям, м; j_{cp} – середнє прискорення ТЗ, м/с².

Залежності кількості тихохідних та швидкохідних ТЗ, які проїжджають перехрестя, від довжини черги перед ним, – нелінійні. Однак, у роботі [88] прийнято лінійну апроксимацію (розбіжність 15 %).

1.3.2. Імітаційне моделювання транспортних потоків. Незважаючи на переваги математичного моделювання, у роботі [27] стверджено, що математичні залежності мають в основі спрощені підходи, що вказує на неточність результатів дослідження, а найточніші результати дадуть розрахунки, за яких моделюють рух кожного ТЗ. В іншій роботі [5] наголошено, що підвищення якості програмного забезпечення для АСУДР через налаштування керуючих параметрів можна досягти імітаційним моделюванням роботи системи координування руху на магістралях.

У табл. 1.8 наведено порівняння аналітичних методів дослідження, імітаційного моделювання та експерименту [52]. З таблиці видно, що моделювання по суті є комбінацією аналітичного дослідження та експерименту, оскільки дає змогу досліджувати більшість складних процесів (що не підвладне аналізу) і не впливає на ТП до прийняття рішення (експеримент чинить певний вплив на ТП).

Таблиця 1.8

Порівняння методів дослідження умов руху транспортних потоків

Критерій	Аналітичні методи	Імітаційне моделювання	Натурний експеримент
Вартість	найменша	середня	найбільша
Тривалість	найменша	середня	найбільша
Можливість повторення	найбільша	середня	найменша
Реальність	найменша	середня	найбільша
Узагальненість результатів	найбільша	середня	найменша

Імітаційне моделювання дає змогу завчасно визначати вплив заходів з регулювання руху на наявній ВДМ без створення завад водіям, внесення змін у конструкцію дороги чи дорожньої споруди, збільшення інтенсивності руху, а також передбачати місця можливих перевантажень [52].

У роботі [63] вказано, що моделювання дає змогу точніше зрозуміти поведінку об'єкта з меншими апроксимаціями, ніж математичні моделі, та забезпечує менші обсяги проведення досліджень та прогнозування поведінки системи за значних змін у початкових концепціях. Вказують, що для першого наближення доцільно використовувати математичні моделі, а для уточнення характеристик – нематематичні методи, зокрема, імітаційне моделювання.

Викладене дає змогу узагальнити перелік задач, які розв'язують під час імітаційного моделювання:

- задачі, пов'язані з роботою вулично-дорожньої мережі загалом;
- локальні задачі (робота окремих перехресть);
- задачі аналізу роботи певного виду транспорту.

Імітаційне моделювання дорожнього руху дає змогу:

- аналізувати наявні ТП;
- моделювати прогнозовані ТП;
- аналізувати і планувати інфраструктуру громадського транспорту;
- аналізувати і прогнозувати транспортні затори;
- вибирати оптимальну схему ОДР на перехресті;
- оптимізувати роботу СФР.

Найважливішим етапом під час моделювання транспортної системи на ПК є створення моделі. Роль ПК полягає в тому, що він реалізує обрані дослідником моделі, а програмування є засобом спілкування між дослідником та ПК. Проте ні модель, ні програма не є кінцевою метою, а лише є засобом розв'язування складної задачі, пов'язаної з функціонуванням наявної транспортної системи або проектуванням майбутньої.

1.4. Технічні засоби в системах світлофорного регулювання

Однією з основних переваг СФР над іншими засобами регулювання дорожнього руху є можливість постійної зміни режиму регулювання відповідно до дорожньо-транспортної ситуації в зоні регулювання. Це зумовлює потребу як швидкого автоматизованого визначення параметрів СФР за методами комп'ютерних розрахунків з метою їх швидкого безпомилкового виконання, так і наявності спеціальних технічних засобів для виявлення різних параметрів ТП – детекторів транспорту.

1.4.1. Аналіз принципової схеми роботи дорожнього контролера. З метою ефективного використання можливостей СФР як оперативного засобу управління дорожнім рухом програмно-апаратні можливості технічних засобів автоматизованих систем управління дорожнім рухом (АСУДР) повинні забезпечувати максимальну автоматизацію всіх операцій. Сучасне обладнання АСУДР дає змогу регулювати дорожній рух на основі пофазового методу та на основі окремих напрямків регулювання [76]. Головним чинником, який визначає технічну можливість управляти світлофорними пристроями, є функціональність дорожнього контролера. Дорожній контролер – це електронний або електромеханічний пристрій, що забезпечує реалізацію заданого алгоритму керування та перемикання світлофорних сигналів через подання електричної напруги на лінії живлення випромінювачів світла у світлофорах. Зазвичай сучасний контролер має функціональну складову, схему якої наведено на рис. 1.6.

Мікропроцесорний блок управління програмується за допомогою комп'ютера так, щоб контролер виконував команди, що надходять лініями зв'язку, перетворюючи їх на електричні сигнали для світлофорів, передавав необхідну телеметричну інформацію. Також програмно та апаратно виконують

багаторівневий контроль відповідності послідовності світлофорних сигналів нормативним вимогам безпеки дорожнього руху. Блоком управління реалізують принцип пріоритетності управління на локальному та вищих рівнях з урахуванням можливості ручного управління, виклику фаз детекторами та пішоходами через табло.

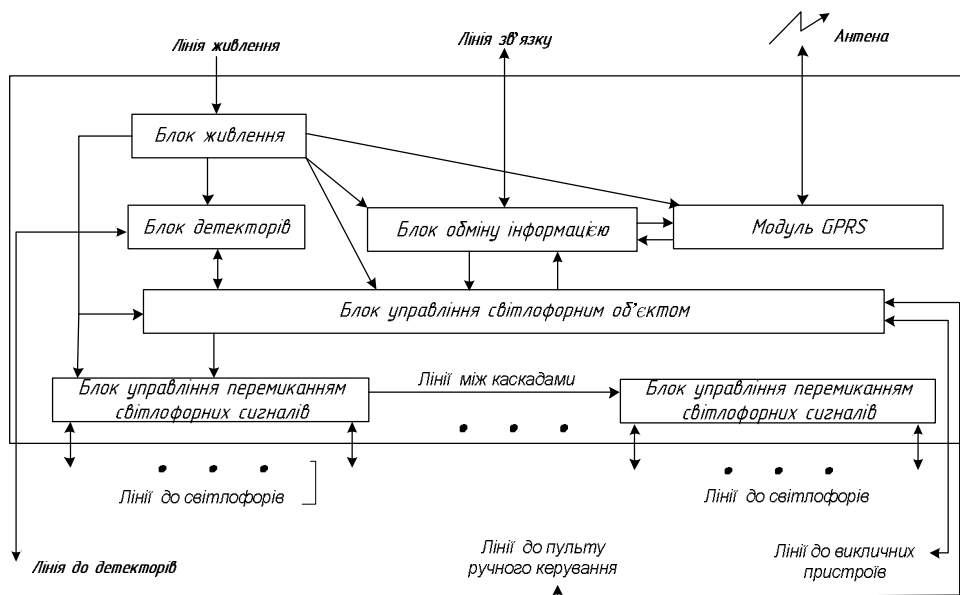


Рис. 1.6. Функціональна схема дорожнього контролера

Під час вибору технології управління світлофорною сигналізацією потрібно враховувати апаратну, інформаційну та програмну складові такої технології. Апаратну складову становлять напівпровідникові елементи як ключі силових блоків перемикання світлофорних сигналів, а пофазне управління не призводить до спрощення функціональної схеми контролера. У будь-якому разі, для кожної групи паралельно з'єднаних випромінювачів, що відповідають одному сигналу основного та дублювальних його світлофорів, виділяється свій напівпровідниковий ключ – симістор, який керується індивідуально сигналами з блоку управління дорожнього контролера.

В АСУДР від центральної шафи до контролера відбувається щосекундне передавання сигналу управління, де в бітовому коді зашифрований номер фази,

яку викликає центр на цьому об'єкті. У відповідь контролер видає сигнал про номер основного такту, що фактично відпрацьовується на перехресті, або про те, що відпрацьовується перехідний інтервал. Пропускна здатність ліній зв'язку за цифрового передавання, а також характеристики процесорів блоку управління дають змогу передавати засобами телемеханіки та опрацьовувати в контролері й у центрі керування рухом не номери фаз, а номери напрямків регулювання.

З наведеного можна зробити висновок, що застосування пофазної технології, з одного боку, спрощує процедуру програмно-апаратного контролю відсутності одночасного ввімкнення дозвільних сигналів різних напрямків регулювання та спрощує відпрацювання перехідних інтервалів, але, з іншого – не призводить до спрощення апаратної частини світлофорних об'єктів, а, навпаки, не дає змоги сповна реалізувати можливості, що має апаратна частина.

Під час розгляду інформаційної складової варто враховувати зв'язок між необхідною гнучкістю структури світлофорного циклу на перехресті та значеннями світлофорних сигналів різних типів. На початковому етапі визначення параметрів і структури циклу СФР проводять побудову схеми траєкторій руху транспорту та пішоходів у межах ділянки регулювання. Керуючись [77, 129, 201], розподіл інтенсивностей руху по смугах на під'їздах до перехрестя здійснюють з урахуванням дозволених напрямків руху з кожної смуги відповідно до [44] та, за можливістю, рівномірного завантаження смуг. Тобто, можна стверджувати, що

$$\sqrt{\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r (y_i - \bar{y})^2} \rightarrow \min, \quad (1.26)$$

де r – кількість смуг руху; y_i – фазовий коефіцієнт.

У такому разі максимальної гнучкості регулювання за умови повного каналізування руху можна досягти керуванням руху ТЗ та пішоходів по кожній з траєкторій руху. Для сигналів світлофорів різних типів максимально гнучке керування можливе [44, 112] лише за окремими напрямками руху з одного під'їзду за умови застосування світлофорів типу 2 та типу 5 (для ТЗГК, що рухаються виділеними смугами та відділеними трамвайними коліями). Однак дискусійним є питання щодо можливості одночасного подавання різних сигналів в одному напрямку руху світлофорами типу 2, розташованими над різними смугами одного під'їзду, рух з яких здійснюється в одному напрямку.

Хоча існує такий варіант роботи світлофорів другого типу [13], проте застосування такого режиму на практиці можна вважати небезпечним, оскільки у [44] йдеться, що для визначення смуги, на яку поширюється дія світлофорного сигналу, застосовують відповідну табличку вибору. Крім неї, зі світлофором типу 2 застосовують табличку, що вказує напрямок, в якому він регулює рух. У результаті інформаційне навантаження на водія з урахуванням наявності зелених та контурних стрілок на секціях самих світлофорів другого типу буде настільки високим, що зростає небезпека помилки у сприйнятті сигналів саме своєї смуги руху. Тому такий варіант можливий лише у разі застосування табличок з внутрішнім, постійно діючим, світлодіодним освітленням.

З погляду інформаційної складової СФР, максимальним ступенем гнучкості є роздільне управління рухом ТЗ за окремими напрямками руху кожного з під'їздів до перехрестя, враховуючи відділені напрямки руху маршрутного транспорту. Отже, пофазова технологія управління призводить до неповної реалізації можливостей інформаційного впливу світлофорних сигнальних пристроїв на учасників дорожнього руху. Водночас мінімальним неподільним об'єктом управління для СФР є напрямок регулювання, який можна визначити як сукупність траєкторій руху ТЗ з одного під'їзду до перехрестя, рух яким регулюється одним основним та (за потреби) кількома дублювальними світлофорами. Щодо пішохідних напрямків регулювання, то їх можна визначити як сукупність траєкторій руху пішоходів (зустрічні пішохідні потоки) на одному пішохідному переході.

Програмна складова має утилітарне значення, зважаючи на сучасний рівень розвитку обчислювальних технологій та віртуальних моделей. Вона може бути обмежувальним чинником лише з огляду на рівень кваліфікації дорожніх технологів, що визначатимуть структуру та параметри режимів регулювання. Для успішного практичного застосування програмних комплексів для різних типів перехресть позитивними є якнайбільша уніфікація та алгоритмізація за автоматизованого програмування контролера. Тому деяке ускладнення способів представлення інформації виправдовується сповна уніфікацією такого подання для перехресть та регульованих пішохідних переходів будь-якого типу. Це, своєю чергою, дає змогу максимально автоматизувати та візуалізувати процес визначення структури і параметрів світлофорного режиму та реалізувати діалектичний підхід до проектів у сфері організації дорожнього руху загалом.

На основі аналізу усіх складових технологій управління світлофорною сигналізацією можна зробити висновок, що лише управління за окремими напрямками регулювання (не плутати з напрямками руху) забезпечує максимально можливий ступінь реалізації керуючого впливу на учасників дорожнього руху. Деяке ускладнення програмної частини в АСУДР виправдано повною уніфікацією та алгоритмізацією усіх дій. Це дає перспективи швидкого розв'язання задачі пошуку оптимальної структури і параметрів світлофорного циклу та автоматичної роботи систем СФР.

1.4.2. Детектори транспорту в АСУДР. Для реалізації адаптивного керування та вибору оптимальної програми СФР потрібно мати інформацію про параметри ТП, яка надходить з детекторів транспорту. Основними параметрами ТП, які фіксуються детекторами транспорту, є [26, 63, 77]:

- моменти проїзду ТЗ заданих перерізів дороги;
- інтенсивність ТП;
- склад ТП;
- середня швидкість ТП на заданій ділянці дороги;
- щільність ТП на заданій ділянці дороги;
- довжина черги ТЗ перед стоп-лінією в заданому напрямку.

У табл. 1.9 наведено параметри детекторів різних типів, а також подано їхню відносну вартість [25]. У сучасних АСУДР доцільно використовувати відеодетектори, які мають значний рівень надійності, не вимагають руйнування дорожнього покриття, дають змогу одночасно контролювати декілька смуг багатосмугових ПЧ, автоматично класифікувати тип ТЗ, ідентифікувати затори та проводити попереднє опрацювання та нагромадження інформації. Відеодетектори, крім кількості ТЗ, які перетнули певний переріз, дають змогу фіксувати швидкість ТЗ, завантаження вулиці, кількість розворотів, змін смуг руху, а також можливість автоматичного виявлення порушень ПДР та фіксування ДТП.

Ефективність адаптивного керування залежить від місця розташування чутливих елементів детекторів, а за використання відеодетекторів – від правильного налаштування поля зору камери. На ізольованому перехресті чутливі елементи потрібно розташовувати на підходах (рекомендована відстань – 20–50 м до стоп-лінії [77]). За використання алгоритму пошуку розриву у ТП чутливі елементи потрібно встановити на такій відстані, щоб ТЗ після проходження детектора міг своєчасно зупинитись перед стоп-лінією.

Технічна характеристика детекторів різних типів

Тип детектора	Визначення кількості	Визначення швидкості	Класифікація типів ТЗ	Можливість контролю декількох смуг	Відносна вартість
Індуктивна рамка	так	так	так	так	низька
Магнітний детектор	так	так	ні	ні	низька–середня
Мікрохвильовий радар	так	так	так	так	низька–середня
Активний інфрачервоний	так	так	так	так	середня–висока
Пасивний інфрачервоний	так	так	ні	ні	низька–середня
Ультразвуковий	так	так	ні	ні	низька–середня
Акустичний	так	так	ні	так	середня
Відеодетектор	так	так	так	так	середня–висока

Інтенсивність руху можна легко визначити за допомогою підсумовування імпульсів детектора, тоді як для вимірювання інших параметрів потрібно використовувати інші методи та засоби. Точне значення швидкості може бути визначене радіолокаційним детектором або з використанням пари детекторів. Проте для того, щоб визначити інтенсивність, щільність та швидкість за допомогою одного детектора, використовують поняття зайнятості ділянки мережі, яку визначають за формулою [63]

$$\Theta = \frac{\sum t_i}{T}, \quad (1.27)$$

де t_i – тривалість перебування одного автомобіля у контрольованій зоні; T – загальна тривалість вимірювань.

Щільність ТП становитиме [63]:

$$q = \frac{\Theta}{d}, \quad (1.28)$$

де d – середня довжина автомобіля.

Тоді середня швидкість визначається за формулою [63]

$$v = \frac{N}{q} = \frac{nd}{T\Theta}, \quad (1.29)$$

де N – інтенсивність руху; n – кількість зафіксованих автомобілів.

Довжина черги також є важливим параметром під час оцінювання ефективності роботи регульованого перехрестя, проте її вимірювання є значно складнішим. Найпростішим способом є встановлення значної кількості детекторів, довжина чутливих елементів яких дорівнює середній довжині автомобіля. Проте такий спосіб є надто дорогим. Іншим способом є встановлення індукційного детектора з довгим чутливим елементом, який охоплює значну ділянку дороги [77]. Сигнал на виході з такого детектора пропорційний до маси металу, що є в межах контрольованої зони. Довжину черги можна також визначити за допомогою двох детекторів, які фіксують автомобілі, що в'їжджають на певну ділянку дороги та виїжджають з неї. Однак такий метод не забезпечує достатньої точності.

Для вимірювання середньої довжини черги існує метод, що використовує величину зайнятості ділянки мережі, оскільки зміна довжини черги відбувається синхронно з циклом регулювання. Тому, якщо розташувати детектор транспорту в будь-якому місці на ділянці утворення черги, спостерігається значна кореляція між значенням зайнятості, що визначається детектором, та довжиною черги [63, 100]. У [100] зазначено, що спрацювання детектора відбуватиметься як під час вільного руху автомобіля, так і під час його сповільнення чи зупинки в черзі. Тому доцільно виділяти такі види зайнятості: від руху потоку ТЗ Θ_p та від черги Θ_q , які в сумі дають загальну зайнятість Θ_{zag} :

$$\Theta_{zag} = \Theta_p + \Theta_q. \quad (1.30)$$

Встановлено [100], що залежності довжини черги від місця розташування детектора та значення зайнятості є лінійними (рис. 1.7). Рівняння прямих, які апроксимують експериментальні результати, встановлено з використанням регресійного аналізу (x – значення зайнятості ділянки мережі від черги):

$$\text{– для 20 м:} \quad y_{20} = 216,57 \cdot x + 4,895; \quad (1.31)$$

$$\text{– для 40 м:} \quad y_{40} = 307,46 \cdot x + 16,567; \quad (1.32)$$

$$\text{– для 60 м:} \quad y_{60} = 379,20 \cdot x + 23,302; \quad (1.33)$$

$$\text{– для 80 м:} \quad y_{80} = 520,37 \cdot x + 26,053; \quad (1.34)$$

$$\text{– для 100 м:} \quad y_{100} = 631,82 \cdot x + 34,519. \quad (1.35)$$

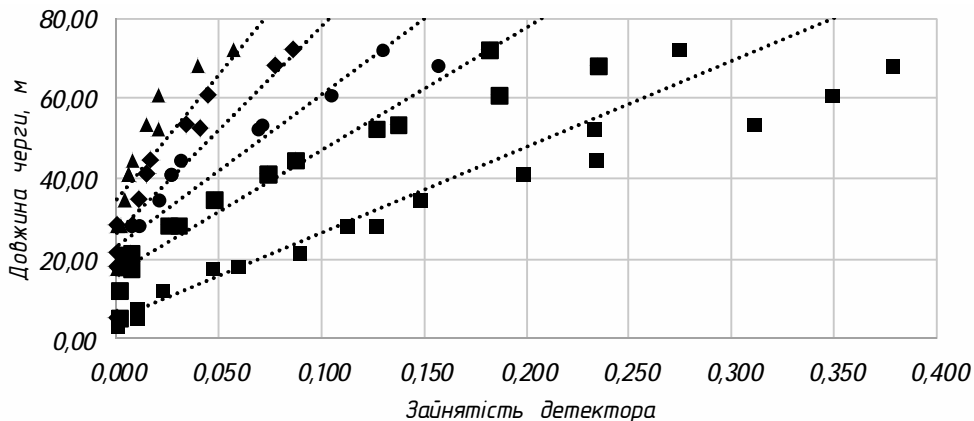


Рис. 1.7. Залежність довжини черги від зайнятості детекторів

На практиці за допомогою цих рівнянь можна отримати довжину черги для кожної смуги для руху на підході до перехрестя. Дані про довжину черги можна використовувати для адаптивного керування рухом на регульованому перехресті, зміни програми керування та для виявлення блокування попереднього перехрестя.

Отже, використання детекторів транспорту дає змогу в автоматичному режимі зібрати інформацію про параметри ТП, яку можна використати для оптимізації режиму роботи регульованого перехрестя.

1.5. Локальні адаптивні алгоритми керування рухом на регульованих перехрестях

Адаптивне керування рухом – це концепція, коли за певним алгоритмом прогнозують поведінку ТП та приймають відповідні керуючі впливи на основі інформації, що надходить з детекторів, розташованих у різних точках мережі [17, 26, 107, 163, 199]. За адаптивного керування відповідно до поточних умов руху коригують параметри світлофорного циклу. У такому разі можна оптимізувати розподіл тривалості фаз, пропускання незавантаженої фази за багатофазного регулювання, викликання фази пішоходами, вилучення частини дозвільного сигналу, за якого не відбувається рух, тощо.

Використання адаптивних систем керування рухом ТЗ дає змогу [17, 63, 77, 118, 199]:

- 1) збільшити пропускну здатність перехрестя;
- 2) зменшити затримки ТП;
- 3) підвищити середню швидкість руху на ВДМ;
- 4) перерозподілити ТП у разі заторів;
- 5) зменшити витрати палива і забруднення довкілля.

Усі адаптивні системи керування містять подібні принципові процеси:

- 1) збирання інформації в режимі реального часу із детекторів для встановлення умов руху;
- 2) оцінювання альтернативних стратегій керування;
- 3) застосування кращої стратегії керування відповідно до покращення певних показників функціонування перехрестя.

Першочерговим у створенні автоматичних адаптивних систем керування рухом є питання вибору алгоритму (сукупності алгоритмів) керування світлофорною сигналізацією. Алгоритм керування – це набір однозначних правил для опрацювання інформації про параметри реальних ТП на перехресті, в результаті чого виробляється та чи інша керуюча дія [17, 130].

Вибір алгоритму (сукупності алгоритмів) керування залежить насамперед від об'єкта керування, а потім вже від характеристик ТП. Об'єктами керування в умовах міста можуть бути окремі ізольовані перехрестя, рух транспорту на яких не залежить від роботи світлофорної сигналізації на суміжних перехрестях, група перехресть або мережа магістралей. Відповідно до цього вибирають алгоритми керування. У такому разі неправильний вибір керуючих впливів (робота алгоритму в неоптимальному режимі) іноді може призвести до зниження ефективності роботи перехрестя [17].

Дослідження процесу керування рухом транспорту можна звести до задач двох типів. Задачі першого типу пов'язані з розробленням нових алгоритмів керування. У такому разі вирішують питання щодо необхідної вхідної інформації про ТП, принципів її опрацювання, стійкості алгоритму тощо. У задачах другого типу основним питанням є оптимізація керування за вибраним алгоритмом.

За способом опрацювання інформації, що надходить у керуючий пристрій від детекторів, алгоритми із зворотним зв'язком для керування рухом на ізольованих перехрестях можна поділити на три групи [17, 77]:

- 1) алгоритми, в яких питання про потребу перемикання сигналу вирішується за інформацією про стан перехрестя в поточному циклі регулювання;

2) алгоритми статистичної оптимізації, які враховують на кожному кроці керування історію процесу і здійснюють керування на основі імовірнісного прогнозування ситуацій на наступному кроці;

3) алгоритми випадкового пошуку керування, що найкраще відповідає умовам руху; під час керування тривалості тактів регулювання змінюються випадково; за певних обмежень, що забезпечують стійкість процесу, алгоритми випадкового пошуку можуть здійснювати керування, близьке до оптимального.

Оптимізація керування за тим чи іншим алгоритмом означає пошук таких значень керуючих впливів, за яких вибраний критерій якості керування є найкращим для умов руху, що визначаються параметрами ТП. У зв'язку з цим важливими є спостереження в умовах, коли дорожні контролери реалізують різні алгоритми керування. Проте цей метод сповна застосувати на практиці неможливо, оскільки, з одного боку, складно знайти в межах певної ділянки відповідні до кожного експерименту ТП, а з іншого – це принципово недопустимо, оскільки експериментування на реальному об'єкті може призвести до виникнення заторів та ДТП [5, 63]. Тому для дослідження ефективності адаптивного алгоритму керування рухом необхідно мати математичну або імітаційну модель роботи перехрестя, з використанням якої можна реалістично відтворити та прогнозувати поведінку ТП на регульованому перехресті, а також визначати його характеристики за різних концепцій керування. У разі встановлення ефективності роботи алгоритму, він завантажується у програмний блок контролера світлофорного об'єкта (рис. 1.8). Алгоритм використовує інформацію з детекторів транспорту, формує рішення та подає його у виконавчий блок контролера для перемикання сигналів світлофорів. Крім інформації з детекторів, можна також використовувати дані, що надходять з ТЗГК, маршрути яких проходять через перехрестя, автомобілів швидкої допомоги, аварійно-рятувальних служб тощо.

Найпростішим локальним адаптивним алгоритмом керування є *алгоритм пошуку часового розриву у ТП за фіксованих значень керуючих умов*. Цей алгоритм уперше розроблено і застосовано у 1920 р. у Великобританії [17].

Якщо в деякий момент часу t , що є у діапазоні

$$T_{\min} - e \leq t \leq T_{\max} - e, \quad (1.36)$$

у ТП на напрямку із дозвільним сигналом з'явиться розрив у часі, не менший ніж e , то в момент $t + e$ дозвільний сигнал вимкнеться (T_{\min} , T_{\max} – мінімальна та максимальна тривалість дозвільного сигналу).

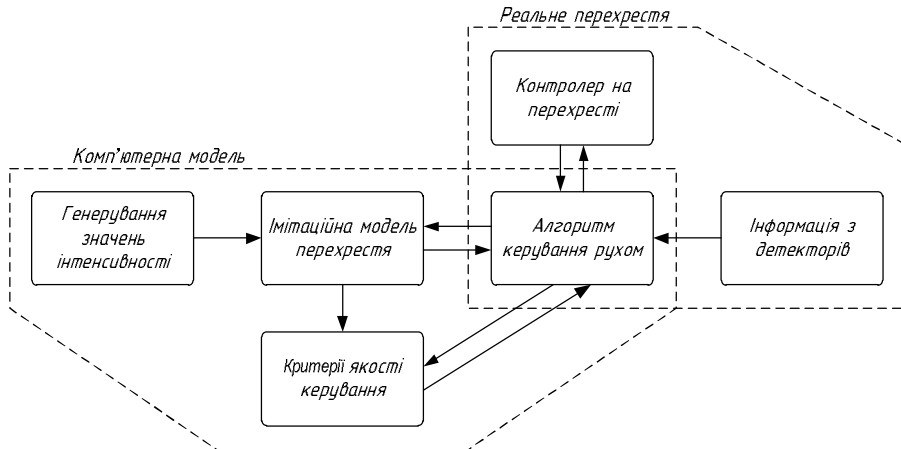


Рис. 1.8. Принципова схема дослідження роботи адаптивного алгоритму керування рухом на регульованому перехресті

Цю умову можна трактувати так: у разі виявлення ТЗ детектором на напрямку із зеленим сигналом у момент часу t , що задовольняє умову (1.36), тривалість горіння дозвільного сигналу подовжується на величину e (рис. 1.9). У цій умові закладено основну ідею алгоритму пошуку розриву в потоці, що дає змогу вилучити марне горіння дозвільного сигналу для напрямку, на якому з'явився достатньо великий розрив між ТЗ [17, 25, 63, 77, 163].

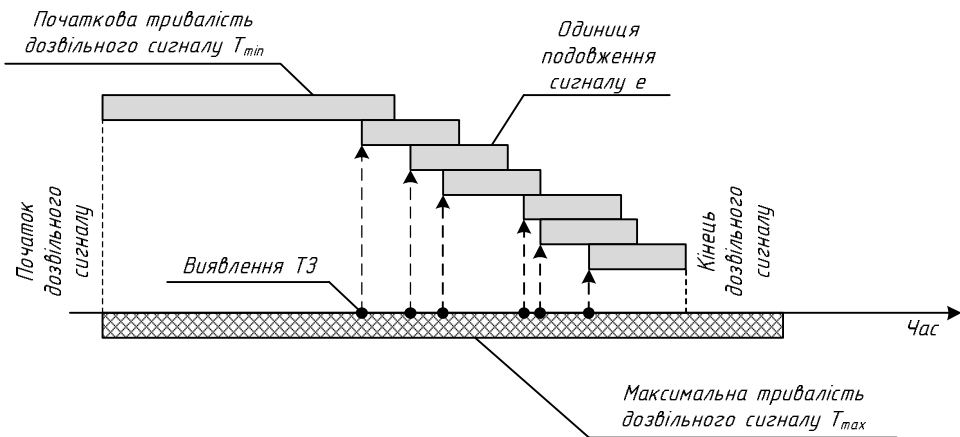


Рис. 1.9. Схема роботи алгоритму пошуку розриву

Із міркувань безпеки тривалість такту регулювання не може бути меншою за мінімальну величину T_{\min} і більшою за максимальну величину T_{\max} . Тобто, керуючими умовами у цьому алгоритмі є обмеження на тривалість тактів T_{\min} і T_{\max} , а також значення розривів e у ТП. Величину розриву e вибирають так, щоб кожен ТЗ встигав за час e після проїзду детектора покинути перехрестя. Впливу різної швидкості окремих ТЗ можна позбутись, якщо вести пошук не часового, а просторового розриву, обладнавши перехрестя на всіх напрямках парою детекторів. Тоді умовою перемикування сигналів світлофора буде нульова кількість автомобілів між вхідним та вихідним детекторами. Реалізація такого алгоритму, крім подвоєної кількості детекторів, значно ускладнюється у зв'язку з необхідністю точного визначення кількості ТЗ між детекторами.

Алгоритм пошуку часового розриву в ТП є найпростішим алгоритмом адаптивного керування і широко використовується на практиці [25, 67, 77, 97, 107, 118, 163]. Перевагами такого алгоритму є те, що [17]:

- для роботи алгоритму потрібно мінімум інформації про транспорт у зоні перехрестя – у будь-який момент часу важливим є лише факт наявності ТЗ на цьому напрямку; з прибуттям i -го ТЗ інформація про $(i-1)$ -й засіб не потрібна;

- робота алгоритму менше піддається впливу похибок транспортних детекторів, ніж робота будь-якого іншого алгоритму, в якому необхідно визначати довжини черги;

- можливе використання багатосмугових індуктивних детекторів, чутлива рамка яких охоплює більш ніж одну смугу руху, оскільки детектори не виконують функцію обчислення кількості автомобілів;

- підвищення безпеки руху в зоні перехрестя.

Недоліком такого алгоритму є значне зниження ефективності роботи перехрестя за збільшення інтенсивності прибуття до нього ТЗ [68].

Ідея алгоритму пошуку розриву за змінних керуючих умов, що залежать від умов руху, така сама, як і попереднього. Їх відмінністю є те, що в процесі керування рухом використовується більше інформації про ТП, ніж в алгоритмі пошуку фіксованого розриву, для роботи якого достатньо лише значення інтервалів між ТЗ на напрямку з дозвільним сигналом [17, 25, 68, 130]. Додатковою інформацією тут є значення швидкості автомобіля або довжини черги ТЗ у кінці заборонного сигналу. Керуючий пристрій, залежно від виду алгоритму, використовує одну або декілька функцій:

$$e = f(v), g = f(n), T_{\min} = f(q), T_{\max} = f(n), \quad (1.37)$$

де v – швидкість автомобіля в момент проходження через детектор; q – довжина черги в кінці заборонного сигналу на відповідному напрямку; n – поточне значення довжини черги на напрямку із заборонним сигналом.

Усі функції (1.25) є монотонними: причому що більша швидкість v , то менше подовження дозвільного сигналу e ; що більше поточне значення черги, то менша величина розриву g і максимально можлива тривалість дозвільного сигналу T_{\max} ; що більша величина черги в кінці заборонного сигналу q , то більша тривалість наступного гарантованого дозвільного сигналу T_{\min} . Усі ці різновиди алгоритму пошуку розриву висувають додаткові вимоги до пристроїв збирання і опрацювання інформації. Крім цього, явний вигляд залежностей (1.25), що мінімізують затримки на перехрестях, невідомий, а тому закони зміни керуючих умов для кожного перехрестя призначають способом підбору за результатами натурних експериментів. Через вказані причини такі алгоритми мають обмежене застосування.

В алгоритмі виклику на себе дозвільного сигналу останній вмикається лише для обслуговування черги ТЗ, що очікують перед перехрестям, і вимикається одразу після проїзду останнього ТЗ з черги. Тривалість дозвільного сигналу світлофора для кожної фази залежить від довжини черги, що утворилась на момент його ввімкнення. За відсутності на напрямку черги ТЗ, які очікують дозвільного сигналу, фаза пропускається, і для конфліктних потоків дозвільний сигнал може бути ввімкненим безмежно довго [130, 162].

Тривалість дозвільного сигналу для роз'їзду черги на i -му напрямку становить

$$t_3 = \frac{q_i}{S_i} + L_i, \quad (1.38)$$

де q_i – довжина черги на i -му напрямку; S_i – потік насичення на i -му напрямку; L_i – втрачений час для i -го напрямку.

Такий алгоритм використовують у системах з пристроями виклику. Він є ефективним за значної інтенсивності руху на головному напрямку та незначної з епізодичним характером появи автомобілів – на другорядному.

Алгоритм порівняння концентрації транспорту на напрямку зі зеленим сигналом із затримкою на напрямку з червоним сигналом передбачає вимкнення дозвільного сигналу за виконання нерівності

$$k \leq xD, \quad (1.39)$$

де k – поточне значення концентрації транспорту в зоні перехрестя на напрямку із зеленим сигналом; x – коефіцієнт, який залежить від параметрів конфліктних потоків; D – накопичене значення затримки в цьому такті регулювання на напрямку із заборонним сигналом.

Цей алгоритм є узагальненням попередніх, оскільки основною його ідеєю є вимкнення дозвільного сигналу за зниження нижче від певного рівня потреби транспорту в цьому сигналі [17, 130]. Під час роботи алгоритму використовують максимум інформації про ТП на всіх конфліктних напрямках – моменти прибуття автомобілів у зону перехрестя, моменти покидання її, затримки окремих ТЗ. Алгоритм рекомендують застосовувати за значної інтенсивності руху, коли поява великих розривів малоїмовірна.

З метою ефективного використання тривалості горіння дозвільного сигналу він може перемикатись на заборонний у момент повного роз'їзду черги. У такому разі потік насичення існує протягом усього дозвільного сигналу. З іншого боку, є потреба обмежувати тривалість цього сигналу мінімальним та максимальним значеннями, що забезпечує безпечний перехід вулиць пішоходами і запобігає виникненню занадто довгих циклів регулювання. Зважаючи на це, запропоновано *алгоритм керування за довжиною черги*, в основі якого є припущення, що довжини черг на конфліктувальних напрямках лінійно залежні між собою [17, 63]. Нехай у момент часу t значення черг на підходах до Х-подібного перехрестя становлять q_1 та q_2 . Тоді стан перехрестя в будь-який момент часу можна подати точкою в координатах (q_1, q_2) . Під час керування точка здійснює випадкові переміщення відповідно до випадкових законів прибуття ТЗ у чергу та виїзду з неї (рис. 1.10). Перемикання світлофора відбувається в момент, коли траєкторія стану перехрестя перетинає одну із обмежувальних прямих, що задаються рівняннями

$$f_1 = a_1q_1 + b_1 - q_2 = 0, \quad f_2 = a_2q_2 + b_2 - q_1 = 0, \quad (1.40)$$

де a_1, a_2, b_1, b_2 – параметри обмежувальних прямих (бар'єрів).

Блок-схему цього алгоритму наведено на рис. 1.11. Сигнал світлофора змінюється, коли або $q_i = 0$ або $f_i = 0$. Причиною використання обох умов замість однієї $q_i = 0$ є потреба підтримувати тривалість циклу відносно малою, дозволяючи її збільшення за зростання інтенсивності руху.

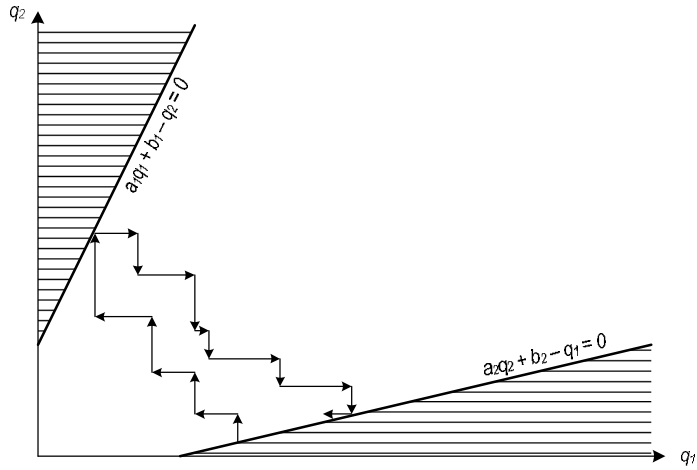


Рис. 1.10. Зміна довжин черг на конфліктних напрямках

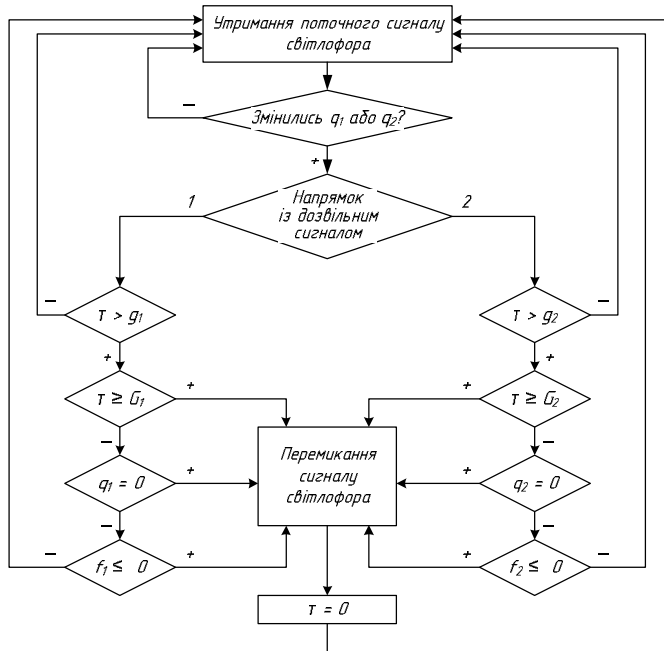


Рис. 1.11. Блок-схема алгоритму керування рухом ТЗ за довжиною черги перед перехресттям

Наведений алгоритм складний з погляду технічної реалізації, оскільки він висуває жорсткі вимоги до роботи детекторів. Крім цього, відсутні рекомендації щодо вибору керуючих параметрів для зменшення затримки в різних умовах руху.

Дозвільний сигнал в алгоритмі вимкнення дозвільного сигналу в разі зникнення насичення і наявності обмежень на тривалість сигналів вмикається лише на тривалість, достатню для обслуговування черги, а за першого зникнення черги обслуговування передається іншому напрямку [17]. Реалізація алгоритму передбачає знання для кожного напрямку інтенсивності потоків насичення. Наявність на будь-якому напрямку потоку насичення виявляють за методом аналізу інтервалів у транспортному потоці, що проїжджає перехрестя. Такий алгоритм доцільно застосовувати за високих значень інтенсивності руху.

За алгоритмом перерозподілу тривалості фаз вони в середині циклу перерозподіляються за результатами розрахунку завантаження на конфліктних напрямках [17, 25]. Завантаження розраховують за формулою

$$y_i = \frac{N_i}{S_i}, \quad (1.41)$$

де N_i – кількість транспортних засобів, які прибули на i -й напрямок протягом циклу регулювання; S_i – інтенсивність потоку насичення на i -му напрямку.

Перерозподіл фаз усередині циклу здійснюють відповідно до рівнянь

$$\begin{aligned} y_1 : y_2 : \mathbf{K} : y_m = t_{31} : t_{32} : \mathbf{K} : t_{3m}, \\ t_{31} + t_{32} + \mathbf{K} + t_{3m} = T_{\text{ц}}, \end{aligned} \quad (1.42)$$

де m – кількість конфліктних напрямків; $T_{\text{ц}}$ – тривалість світлофорного циклу.

Цей алгоритм може використовувати як постійну тривалість циклу, так і змінну, яка розраховується на кожному кроці керування заново. Розрахунок можна виконувати один раз на цикл з використанням згладжених даних, накопичених за декілька попередніх циклів, або один раз на декілька циклів [25].

У роботі [99] запропоновано алгоритм, який базується на жорсткому циклі та фіксує розриви у ТП. Він подовжує дозвільний сигнал, якщо інтенсивність значна, або швидше вмикає наступну фазу, якщо на конфліктному напрямку є велика черга. Цей алгоритм реалізовано для типового Т-подібного перехрестя, на якому є трифазне регулювання, причому послідовність перемикання фаз не змінюється (рис. 1.12).

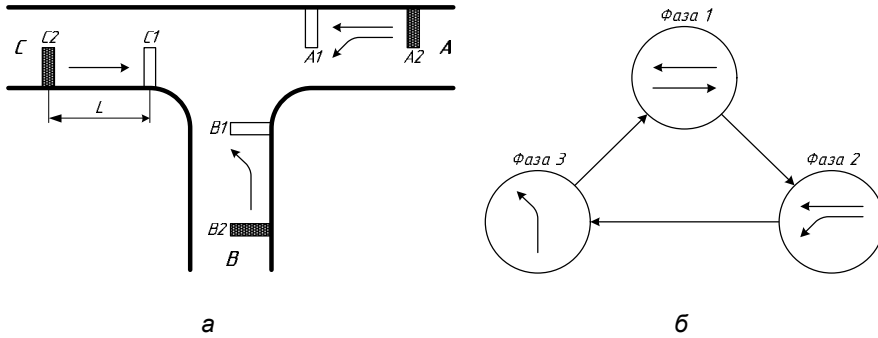


Рис. 1.12. Схема регульованого Т-подібного перехрестя з детекторами транспорту (а) та пофазний роз'їзд на ньому (б)

Для фіксування параметрів ТП на кожному підході використовують два детектори: один у перерізі стоп-лінії фіксує розриви у ТП (A1, B1, C1), а другий, розташований на відстані L від першого, – тривалість очікування ТЗ з порядковим номером у черзі N (A2, B2, C2).

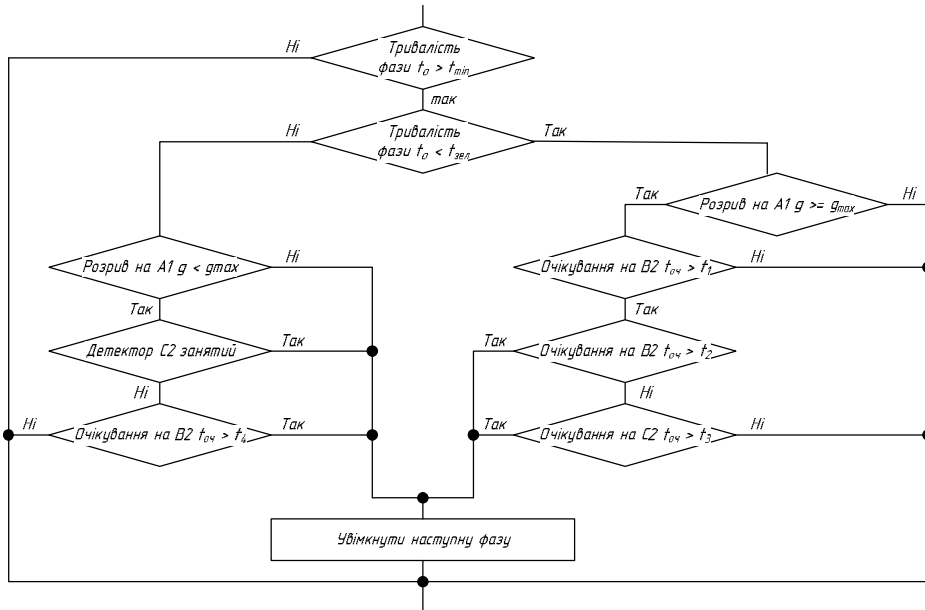


Рис. 1.13. Фрагмент алгоритму керування дорожнім рухом для підходу А на Т-подібному перехресті

Блок-схему запропонованого алгоритму керування рухом (на прикладі підходу *A*) наведено на рис. 1.13. У разі, коли тривалість дозвільного сигналу менша за t_{\min} (мінімальна тривалість сигналу за ДСТУ 4092-2002 «Світлофори дорожні» або мінімальний час, потрібний пішоходам для переходу проїзної частини), алгоритм жодних дій не пропонує. Якщо ж тривалість сигналу є більшою за t_{\min} , але не перевищує $t_{зел}$ (тривалість дозвільного сигналу за жорсткого регулювання), то алгоритм перевіряє, чи не зникає насичення під час роз'їзду черги.

Якщо розрив у ТП не перевищує g_{\max} , жодних дій не виконують. Годі перевіряється тривалість очікування ТЗ на конфліктних напрямках та вмикається наступна фаза. Якщо тривалість дозвільного сигналу перевищує $t_{зел}$, розриви у ТП є меншими від g_{\max} , а очікування ТЗ на конфліктному напрямку незначне, то наступна фаза не вмикається. В іншому разі вона вмикається. Для підходів *B* та *C* алгоритм працює аналогічно.

За результатами моделювання роботи реального Т-подібного перехрестя за описаним алгоритмом у середовищі VISSIM встановлено, що його використання, порівняно з жорстким регулюванням, приводить до зменшення затримок та черг перед перехрестям на 10–15 %.

1.6. Застосування нечіткої логіки для керування дорожнім рухом на регульованих перехрестях

1.6.1. Про сфери застосування нечіткої логіки. Першою публікацією з теорії нечітких множин прийнято вважати роботу професора з Університету Берклі (Каліфорнія, США) *Лотфі Заде* в 1965 р. Поняття нечіткої множини дало поштовх теоретичним та прикладним дослідженням, у межах яких запропоновано нечіткі узагальнення всіх основних теоретико-множинних та формально-логічних понять. Серед основних відомих робіт у цій галузі є публікації *Л. Заде*, *Д. Дюбуа* та *А. Прада* з теорії нечіткої міри, *М. Сугено* – з нечіткого висновку, *Дж. Беждека* – з нечіткої кластеризації та розпізнавання символів, *Р. Ягера* – з нечіткої логіки [79]. Теоретичні засади нечіткої логіки викладено в додатку.

Незважаючи на велику кількість теоретичних робіт, прикладне застосування нечітких моделей тривалий час було під сумнівом. Навіть нині,

коли є інформація про успішне застосування нечітких моделей, деякі вчені все ще скептично ставляться до можливості нечіткого моделювання.

Однією з причин, що зумовили стрімке зростання популярності нечіткої логіки, є те, що нечітка логіка зрозуміліша, ніж аналогічна математична модель на основі диференціальних чи різницевих рівнянь. Наприклад, у японському місті Сіндай є метрополітен із 16 станціями, який керується нечітким комп'ютером [89]. У такому разі нечіткий комп'ютер впливає на процеси розгону та гальмування потягів метро, помиляючись на 70 % менше, ніж оператор.

Компанія *Mitsubishi* виготовляє автомобілі, в якому керування всіма системами ґрунтується на нечіткій логіці [89]. *Mitsubishi* також випускає «нечіткий» кондиціонер, який змінює температуру і вологість відповідно до людського сприйняття ступеня комфорту. Компанія *Nissan* розробила «нечітку» автоматичну трансмісію та «нечітку» антиблокувальну гальмівну систему і реалізувала їх у своїх автомобілях підвищеного комфорту.

На початку 1990-х років провідні європейські корпорації розпочали надолужувати втрачені можливості. У цей період у Європі з'явилося понад 200 видів промислових пристроїв та виробів, у яких реалізовано нечіткі моделі. Сьогодні нечітка логіка використовується для систем керування персональних комп'ютерів, у сфері теле- та радіозв'язку, а також в оборонній та космічній галузях. Тобто, з кожним роком сфера застосування теорії нечітких множин та нечіткої логіки розширюється.

Основні переваги системи з нечіткою логікою:

- нечіткі системи можуть узгодити потенційно конфліктні цілі за допомогою експертних знань;
- нечітке керування успішно використовують у гнучких схемах керування;
- очевидна та інтуїтивна природа множини правил та вхідних змінних у нечіткій системі роблять її порівняно простою в розвитку, тестуванні та модифікуванні;
- нечітка логіка добре задовольняє нелінійні зв'язки;
- нечітка логіка може керувати моделлю, навіть коли параметри не є точно відомими або коли немає повних знань про систему.

Основні недоліки систем із нечіткою логікою:

- вихідний набір нечітких правил формується експертом-людиною і може бути неповним або суперечливим;

- вигляд і параметри функцій належності, що описують вхідні та вихідні змінні, вибираються суб'єктивно і можуть неточно відображати дійсність;
- невміння системи автоматично набувати знання.

1.6.2. Характеристика закордонного досвіду застосування нечіткої логіки для керування дорожнім рухом. У роботі [3] наведено класифікацію автоматизованих систем керування дорожнім рухом. Системи, починаючи від 4 покоління, використовують штучний інтелект для формування керуючих дій у режимі реального часу. Штучний інтелект розроблено як засіб вийти за обмеження традиційного математичного апарату [3]. Штучний інтелект, до якого належать мурашині алгоритми, нейронні мережі, генетичні алгоритми, нечітка логіка тощо, дає змогу створити алгоритми керування, поведінку яких людина сприймає як розумну [46].

Перші відомі спроби застосувати нечітку логіку для регулювання руху зробили *Pappis* та *Mamdani* у 1977 р. [193]. Вони моделювали роботу контролера, що використовує для оптимізації нечітку логіку на ізольованому перехресті (2 смуги руху, рух односторонній, без поворотних потоків). У дослідженні *Pappis* та *Mamdani* порівнювали нечіткий алгоритм керування з алгоритмом пошуку розриву. Для формулювання стратегії використано 25 правил, які встановлювали зв'язок між часом T , інтенсивністю прибуття N , довжиною черги Q та тривалістю сигналу E . Правила забезпечували втручання на 7-й, 17-й, 27-й, 37-й та 47-й секундах.

Від того часу і до сьогодні розробляють різні системи керування рухом, які використовують для оптимізації нечітку логіку. *Niittyumaki* (1998) розробив нечіткий контролер FUSICO (Fuzzy Signal Control) для двофазного ізольованого перехрестя [189, 190]. Нечіткий алгоритм керування працював на двох рівнях. На вищому рівні відбувалось визначення поточних умов руху ТЗ (нормальні чи перевантаження) на основі інтенсивності ТП у попередні 5 хв та завантаження детектора протягом останніх 5 хв (вхідні змінні). Метою нижчого рівня є коригування тривалості дозвільних сигналів (завершити чи продовжити). Вхідними змінними на цьому рівні є інтенсивність прибуття ТЗ на напрямку з дозвільним сигналом та довжина черги на напрямку із заборонним сигналом.

Моделювання роботи перехрестя з контролером, що працює за створеним алгоритмом, проводилось з використанням HUTSIM-симулятора, розробленого Гельсінським технологічним університетом. Встановлено, що ефективність контролера FUSICO є вищою на 10–20 % порівняно з роботою контролера, який

використовує алгоритм пошуку розриву у ТП. Розроблений нечіткий контролер у 1998 р. встановлено на ізолюваному перехресті у м. Гельсінкі.

Trabia (1999) запропонував нечіткий контролер для ізолюваного перехрестя з чотирма підходами з прямим та лівоповоротним рухом [197]. Контролер має можливість коригувати тривалість сигналів відповідно до виявлених змін у потоках, що наближаються до перехрестя. У такому разі приймають рішення, продовжувати чи завершувати поточну фазу.

Murat (2003) розробив нечіткий контролер FLMuSiC (Fuzzy Logic Multi-phased Signal Controller) для ізолюваного перехрестя, перевагою якого, порівняно з FUSICO, є можливість оптимізувати розподіл фаз на багатофазних регульованих перехрестях [187]. Структуру цього контролера зображено на рис. 1.14. Він складається з двох блоків – нечіткого контролера тривалості сигналу та нечіткого перемикача фаз. Перший блок визначає тривалість дозвільного сигналу під час отримання даних із детекторів, розташованих на кожному підході до перехрестя. Другий блок визначає послідовність чергування фаз. Обидва блоки мають різні бази правил (64 нечітких правила для першого блоку та 37 правил – для другого).

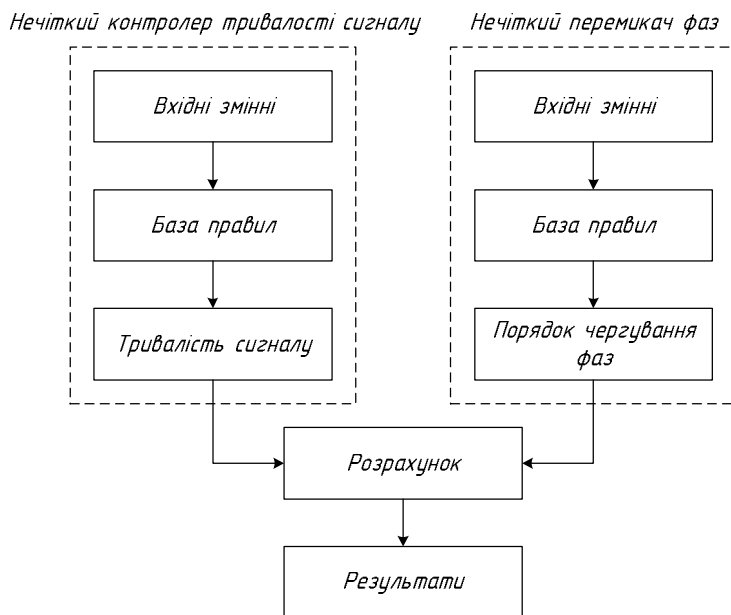


Рис. 1.14. Структура нечіткого контролера FLMuSiC

Вхідними змінними нечіткого контролера тривалості сигналу є:

- найдовша черга ТЗ на заборонний сигнал;
- інтенсивність прибуття ТЗ до перехрестя упродовж дозвільного сигналу;
- індикатор (лічильник) дозвільного сигналу.

Вихідна змінна цього блоку – рішення щодо впливу на дозвільний сигнал (дуже зменшити, зменшити, залишити без змін, збільшити, дуже збільшити).

Вхідні змінні нечіткого перемикача фаз:

- найдовша черга ТЗ на заборонний сигнал;
- найдовша черга ТЗ у наступній фазі;
- тривалість заборонного сигналу для найдовшої черги.

Вихідна змінна цього блоку – рішення щодо зміни порядку чергування фаз (не змінювати або змінити).

Було змодельовано роботу X-подібного перехрестя з двома смугами для руху в одному напрямку на кожному підході, рух на якому регулюється за допомогою контролера FLMuSiC. Середній інтервал роз'їзду прийнято 2 с для неконфліктних потоків та 3 або 4 с – для конфліктних. У такому разі використано експоненційний розподіл інтервалів між ТЗ. У моделі не враховано впливу складу ТП та руху пішоходів.

Результати моделювання роботи контролера FLMuSiC порівнювали з результатами роботи контролера з алгоритмом пошуку розриву. Встановлено, що за малої інтенсивності руху ТЗ результати роботи контролерів майже не відрізняються. Проте в разі зростання інтенсивності нечіткий контролер є ефективнішим (зниження затримок до 20 % за високої інтенсивності руху). Результати моделювання роботи контролера FLMuSiC порівнювали також з результатами роботи контролера FUSICO. Вони фактично не відрізняються за однакових значень інтенсивності ТП.

Yulianto (2003) запропонував нечіткий алгоритм для керування рухом на ізольованому X-подібному перехресті [202]. У цьому алгоритмі на основі максимальної довжини черги та середньої зайнятості детекторів визначають їх частки, що відображають ступінь потреби у дозвільному сигналі кожної сигнальної групи. На основі значень часток розраховуються тривалості дозвільних сигналів у фазах. На відміну від попередніх досліджень [169, 192], у цій роботі розглядають змішані ТП. Встановлено, що застосування розробленого алгоритму керування, порівняно з оптимізованим жорстким керуванням, дасть змогу зменшити середню затримку на 5–40 %.

Madhavan та *Cai* (2007) розробили нечіткий контролер для ізолюваного регульованого Х-подібного перехрестя [184]. Кількість фаз на перехресті – 4, послідовність увімкнення фаз не змінюється. Вхідні змінні системи керування:

- довжина черги ТЗ на напрямку з червоним сигналом;
- кількість ТЗ, що прибувають на дозвільний сигнал;
- частка дозвільного сигналу, що залишився;
- середній інтервал між ТЗ, які проїжджають перехрестя на дозвільний сигнал.

Вихідна змінна (керуючий вплив) – рішення щодо впливу на дозвільний сигнал (дуже зменшити, зменшити, залишити без змін, збільшити, дуже збільшити).

Модель системи керування створено в середовищі MATLAB з використанням Fuzzy Logic Toolbox. Використання нечіткого контролера зумовлює зменшення затримок, порівняно з контролером, який використовує алгоритм пошуку розриву у ТП, особливо за виникнення нетипових ситуацій поблизу перехрестя (часткове або повне блокування смуги руху, зниження швидкості через погані дорожні умови тощо). Проте такий нечіткий контролер не враховує рух пішоходів через перехрестя.

Zhang, Li та *Prevedouros* (2008) розробили нечіткий контролер, який вирішує, подовжити чи завершити поточний дозвільний сигнал світлофора [204]. Вхідні змінні алгоритму керування:

- довжина черги ТЗ на смузі, що обслуговується у поточній фазі;
- довжина черги ТЗ на смузі, що отримає право на рух у наступній фазі;
- середня інтенсивність потоку прибуття ТЗ на смузі, що обслуговується у поточній фазі.

Крім цього, в алгоритмі задано мінімальну та максимальну тривалість горіння дозвільного сигналу. Нечіткий контролер перевіряє, подовжити чи завершити поточну фазу після закінчення горіння мінімального дозвільного сигналу. Якщо прийнято рішення про подовження фази, то наступний раз перевірка відбувається через час Δt (одиниця подовження сигналу). Якщо прийнято рішення про завершення дозвільного сигналу, то вмикається наступна фаза. Рішення приймається на основі 48 нечітких правил.

Для перевірки роботи контролера створено програму мікроскопічного моделювання роботи перехрестя. Встановлено, що використання нечіткого контролера приводить до зменшення затримок та підвищення швидкості руху ТЗ, причому покращення є відчутнішим у разі зростання інтенсивності руху.

Брегедда, Бурковский та Чопоров (2009) запропонували нечіткий алгоритм роботи світлофора на регульованому Х-подібному перехресті [18], на якому тривалість циклу є незмінною, а керування ТП здійснюється на основі перерозподілу тривалості фаз регулювання.

Вхідні змінні системи керування:

- довжина черги ТЗ на напрямку з дозвільним сигналом;
- довжина черги ТЗ на напрямку із заборонним сигналом;
- тривалість поточного дозвільного сигналу.

Вихідна змінна (керуючий вплив) – рішення щодо зміни дозвільного сигналу (зменшити, залишити без змін, збільшити).

У роботі [18] запропоновано можливість модифікації набору лінгвістичних змінних та формування відповідної бази правил безпосередньо під час керування, проте тут не наведено жодних результатів перевірки адекватності та ефективності запропонованого нечіткого алгоритму керування рухом.

Zarandi та Rezapour (2009) запропонували дворівневий нечіткий контролер для ізольованого Т-подібного регульованого перехрестя [203]. Структуру системи керування, яка має нечіткий продовжувач дозвільного сигналу та нечіткий перемикач фаз, наведено на рис. 1.15. Система керування роботою світлофорів працює за такою послідовністю:

1) отримання необхідної інформації з детекторів, розташованих на перехресті;

2) прийняття рішення про подовження чи завершення поточного дозвільного сигналу (нечіткий подовжувач дозвільного сигналу):

- якщо поточний сигнал подовжується, то виконується п. 1;
- якщо поточний сигнал завершується, то виконується п. 3;

3) визначення наступної фази (нечіткий перемикач фаз).

Нечіткий перемикач фаз визначає найкращу послідовність чергування фаз для поточних умов руху ТЗ на перехресті. Рішення про наступну фазу приймають у момент завершення дозвільного сигналу на основі значень довжин черг на напрямках, що можуть отримати право на рух у наступній фазі (вхідні змінні для нечіткого перемикача фаз). База знань складається із 16 правил для кожної фази (загалом 48 правил). Рішення приймають на основі (вхідні змінні):

- довжини черги ТЗ на смузі, що обслуговується у поточній фазі;
- довжини черги ТЗ на смузі, що отримає право на рух у наступній фазі;

– середньої інтенсивності потоку прибуття ТЗ на смузі, що обслуговується в поточній фазі.

Крім цього, задають мінімальну та максимальну тривалості горіння дозвільного сигналу. Рішення про подовження чи завершення поточної фази приймається в момент завершення горіння мінімального дозвільного сигналу.

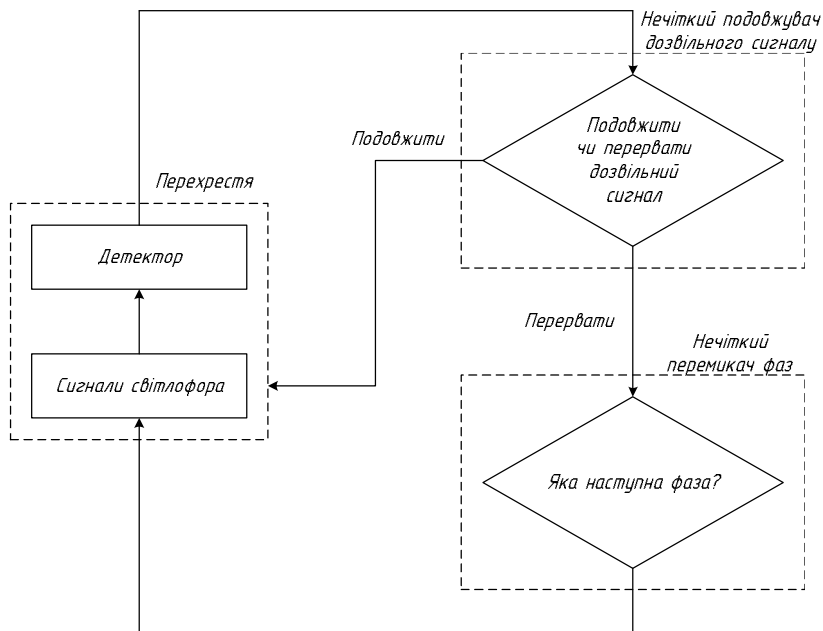


Рис. 1.15. Структура дворівневої нечіткої системи керування рухом ТЗ через перехрестя

Результати роботи нечіткого контролера порівнювали з роботою звичайного жорсткого контролера. За рівномірного прибуття ТЗ до перехрестя з усіх підходів ефективність роботи такого контролера проявляється за значної інтенсивності прибуття (в такому разі середня довжина черги є меншою). За нерівномірного прибуття ТЗ з різних підходів ефективність нечіткого контролера проявляється за будь-яких значень інтенсивності руху.

Staniek (2011) запропонував нечіткий алгоритм керування [195], який виробляє рішення про подовження тривалості сигналу чи вмикання наступної фази на основі інтенсивності ТП, які прибувають до перехрестя, та кількості ТЗ

у черзі. Для прийняття рішення використовують чотири нечіткі правила. Встановлено, що середня затримка та кількість зупинок під час роботи перехрестя з нечітким керуванням є меншими, ніж за жорсткого керування.

Pranevicius та *Kraujalis* (2012) запропонували алгоритм [193], який приймає рішення про подовження поточної фази чи вмикання наступної за значеннями середніх довжин черг ТЗ на напрямках із дозвільним Q_{green} та заборонним Q_{red} сигналами. Нечіткими множинами є множини «продовжити зелений» та «завершити зелений», а довжини черг впливають на значення функцій належності за формулами (цифри у с)

$$\mu_E(Q_{green}) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } Q_{green} \leq 0; \\ 0,125 \cdot Q_{green}, & \text{якщо } Q_{green} \in (0;8); \\ 1, & \text{якщо } Q_{green} \geq 8; \end{cases} \quad (1.43)$$

$$\mu_T(Q_{red}) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } Q_{red} \leq 0; \\ 0,0625 \cdot Q_{red}, & \text{якщо } Q_{red} \in (0;16); \\ 1, & \text{якщо } Q_{red} \geq 16, \end{cases} \quad (1.44)$$

де μ_E та μ_T – функції належності для нечітких множин «продовжити зелений» та «завершити зелений» відповідно.

Рішення приймається кожні 6 секунд у період між мінімальною та максимальною тривалістю дозвільного сигналу на основі порівняння значень функцій належності (якщо $\mu_E(Q_{green}) \geq \mu_T(Q_{red})$, то дозвільний сигнал подовжується, в іншому разі вмикається наступна фаза). Робота цього алгоритму досліджувалась на моделі Т-подібного перехрестя. Встановлено, що використання цього алгоритму дає змогу зменшити середні значення порівняно із жорстким керуванням, проте інтенсивність ТП змінювалась у вузьких межах (370–680 авт./год), що не відповідає умовам руху на реальних перехрестях, де інтенсивність змінюється у значно ширших межах.

Тарасов (2012) пропонує алгоритм керування рухом для Х-подібного регульованого перехрестя [142], який приймає рішення про величину зміни тривалості дозвільного сигналу. Вхідними змінними є кількість ТЗ на вулицях, які перетинаються, на кінець циклу та тривалість дозвільного сигналу. Як критерій ефективності роботи перехрестя прийнято кількість транспортних засобів, які не встигли проїхати перехрестя за певну кількість циклів.

У такому разі покращують роботу перехрестя порівняно з традиційним жорстким керуванням.

Нечіткі контролери можна використовувати не лише для поліпшення ефективності роботи регульованих перехресть. *Nakatsuyama, Nagahashi* та *Nishizuka* застосовували у 1984 р. нечітку логіку для керування рухом на двох суміжних перехрестях магістралі з одностороннім рухом [182]. Нечіткий контролер встановлював, продовжувати чи завершувати дозвільний сигнал на другому перехресті на основі дослідження руху на першому. З мережевого погляду тривалість сигналів на перехресті визначають трьома параметрами: тривалістю циклу, розподілом фаз та зсувом їх. *Chiu* (1992) вперше використовував нечітку логіку для узгодження цих трьох параметрів [182]. У моделі використано 40 нечітких правил для узгодження сигналів на 3×3 перехрестях. *Chen, May* та *Auslander* (1990) досліджували нечіткий контролер в'їзду на автомагістраль [197]. *Niittymaki* та *Kikuchi* (1998) розробили нечіткий алгоритм для регулювання руху пішоходів [197]. За допомогою мікроскопічного моделювання вони встановили, що нечіткий алгоритм регулювання забезпечує кращий результат, ніж стандартний. Нечіткі контролери використовуються також для надання пріоритету в русі громадському транспорту.

Нечітка логіка застосовується і для керування рухом ТЗ на залізничних переїздах. Зокрема, *Годяєв* (2004) використав нечітку логіку для моделювання роботи залізничного переїзду [35]. У такому разі проаналізовано небезпечні ситуації, які можуть виникати на переїзді, та виявлено їх причини.

1.6.3. Характеристика вітчизняного досвіду застосування нечіткої логіки для керування дорожнім рухом. Вовк (2002) у роботі [24] запропонувала алгоритм роботи світлофора, який використовує нечітку логіку, на Х-подібному регульованому перехресті (поворотні потоки на перехресті відсутні). Вхідні змінні нечіткої системи керування – кількість ТЗ, їхня середня швидкість та відстань до перехрестя на вулицях Північ-Південь та Захід-Схід (n_{NS} , n_{WE} , v_{NS} , v_{WE} , l_{NS} , l_{WE}); вихідні змінні – тривалість дозвільного сигналу на вертикальній та горизонтальній вулицях (t_{NS} , t_{WE}). Для нечіткої системи керування створено базу знань, яка налічує 144 правила.

Загалом передбачено, що базова тривалість світлофорного циклу становить 60 с (тобто, по 30 с дозвільного сигналу на кожному з напрямків). За 3 с до закінчення заборонного сигналу на певній вулиці розраховується

керуючий вплив на базове значення тривалості дозвільного сигналу (дуже зменшити, зменшити, трохи зменшити, не змінювати, трохи збільшити, збільшити, дуже збільшити). Процес роботи світлофора з нечіткою логікою змодельовано в середовищі MATLAB у пакеті SIMULINK. Недоліком цієї моделі є те, що вона лише теоретична, і не проведено порівняння роботи такої системи з іншими системами керування роботою світлофорів.

Славич (2008) розробив модель системи керування ТП на регульованих перехрестях на основі нечіткої логіки [138, 139]. Структура цієї системи є типовою для систем керування, які використовують нечітку логіку (рис. 1.16).

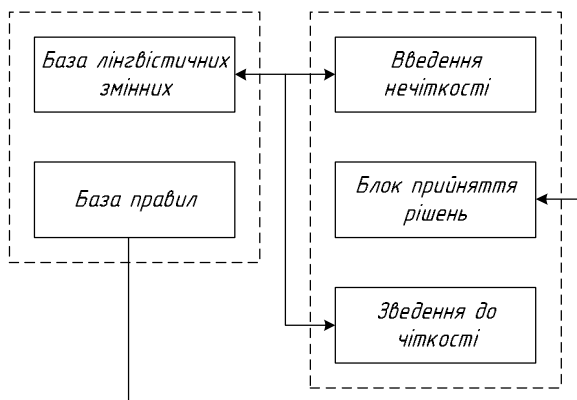


Рис. 1.16. Схема нечіткої системи керування транспортним потоком

У цій роботі розглядається система перехресть (рис. 1.17), тривалість світлофорних циклів на яких є однаковою із зсувом t_c . Система керування ТП регулює зсув t_c так, щоб мінімізувати суму тривалості очікування для потоків, що прибувають до перехресть:

$$t_{оч} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 t_{ij}, \quad (1.45)$$

де t_{ij} – тривалість очікування в черзі автомобілів потоку p_{ij} , $i, j=1,3$.

У запропонованій системі керування з нечіткою логікою вхідними лінгвістичними змінними є поточний час синхронізації t_c та кількість ТЗ k_{ij} ,

що проїдуть на дозвільний сигнал у напрямку p_{ij} . Вихідна лінгвістична змінна – зміна часу синхронізації Δt_c . Система для певного набору значень величини k_{ij} повинна видавати таке значення Δt_c , яке наближає час синхронізації t_c до оптимального значення t_{onm} .

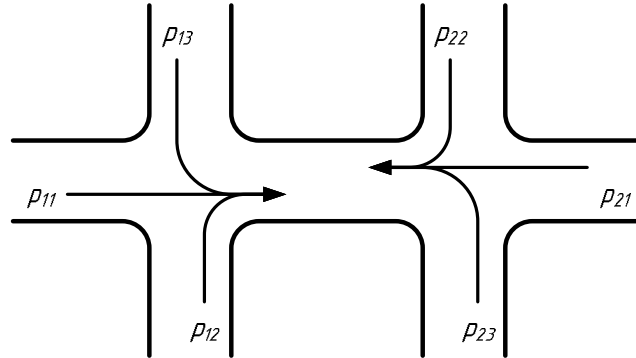


Рис. 1.17. Схема системи перехресть

Базу правил записують так:

- 1) для заданих значень k_{ij} визначають таке значення t_{onm} , за якого t_{oc} набуває найменше значення;
- 2) визначають, за якого Δt_c значення виразу

$$t_c^{i+1} = t_c^i + \Delta t_c \quad (1.46)$$

буде ближчим до оптимального t_{onm} за допомогою системи

$$t_c^{i+1} = \begin{cases} t_c^i + \Delta t_c - T_u, & \text{якщо } t_c^i + \Delta t_c > T_u, \\ T_u - t_c^i + \Delta t_c, & \text{якщо } t_c^i + \Delta t_c \leq T_u, \end{cases} \quad (1.47)$$

де T_u – тривалість циклу світлофора.

Нехай t_c – середня тривалість проїзду ділянки між перехрестями; t_p – тривалість розгону автомобіля; t_z – тривалість гальмування автомобіля; t_u – тривалість заборонного сигналу; t_z – тривалість дозвільного сигналу; Δt – часовий інтервал між ТЗ у русі.

Тоді тривалість синхронізації та загальну тривалість очікування залежно від ситуації визначають так:

1) якщо всі автомобілі стоять на заборонний сигнал, то:

$$t_c \in [t_{cp} - (s_{12} + s_{13}) \cdot \Delta t; t_{cp} + t_u],$$

$$t_0^{11} = k_{11} (t_c - t_{cp} + t_p + t_e) + (s_{12} + s_{13}) \cdot \Delta t; \quad (1.48)$$

2) якщо частина автомобілів проїжджають на дозвільний сигнал, а решта стоять на заборонний сигнал, то:

$$t_c \in [t_{cp} + t_u; t_{cp} + t_u + k_{11} \cdot \Delta t],$$

$$t_0^{11} = s_{11} \cdot (t_u + t_p + t_e) = \left(k_{11} + \frac{t_{cp} + t_u + t_c}{\Delta t} \right) \cdot (t_u + t_p + t_e); \quad (1.49)$$

3) якщо всі автомобілі проїжджають на дозвільний сигнал, то

$$t_c \in [t_{cp} + t_u + k_{11} \cdot \Delta t; t_{cp} + t_u + t_z - (s_{12} + s_{13}) \cdot \Delta t],$$

$$t_0^{11} = 0. \quad (1.50)$$

Наведена модель керування режимами світлофорної сигналізації на системі перехресть, що побудована з використанням апарату нечіткої логіки, дає змогу вибирати оптимальні варіанти регулювання сигналів світлофора на перехресті так, щоб перебування ТЗ у мережі було мінімальним. Своєю чергою, це дає змогу знижувати затримки ТЗ та зменшувати затори [139].

Манькут та Смолянкін (2009) розробили алгоритм керування роботою світлофорів на регульованому Т-подібному перехресті [94]. Вхідними змінними нечіткої системи керування є сумарна кількість ТЗ на перехресті та сумарна тривалість дозвільного сигналу, вихідною змінною – керуючий вплив на дозвільний сигнал. Кількість фаз регулювання – три (автомобілі з кожного підходу виїжджають в окремій фазі). Для визначення кількості ТЗ на перехресті використовують систему пар датчиків, один з яких розташований перед перехрестям, а інший – на певній відстані проти руху. Кількість ТЗ на перехресті визначають як різницю між показами пари датчиків.

Недоліком цієї моделі є те, що вихідна змінна (керуючий вплив на тривалість дозвільного сигналу) безпосередньо впливає на вхідну змінну нечіткої системи керування (сумарну тривалість дозвільних сигналів), а також не вказано, в який момент приймають відповідне рішення. Крім того, тривалість циклу на перехресті є незмінною і становить 90 с, а максимальна сумарна

тривалість дозвільних сигналів – 60 с. Решта часу передбачено відводити для пішохідної фази. Хоча за наведеними розрахунками пішоходам для переходу найширшої проїзної частини достатньо 15 с.

1.6.4. Аналіз досліджень щодо оптимізації параметрів функцій належності в нечітких алгоритмах керування рухом. У більшості робіт із розроблення нечітких алгоритмів керування рухом ТЗ на регульованих перехрестях параметри функцій належності обирає дослідник на основі власних припущень про поведінку нечіткої системи, що не суперечить теоретичним положенням нечітких множин та нечіткої логіки [79]. З іншого боку, параметри функцій належності, як і база правил, можуть бути некоректними і дослідники не пропонують жодного способу їх коригування. Окремі з них обґрунтовують відповідно параметри функцій належності вхідних та вихідних змінних нечіткого алгоритму керування рухом. У роботі [187] запропоновано формувати функції належності вхідних змінних (довжини черги та інтенсивності) на основі даних натурних спостережень. У такому разі визначають математичне сподівання μ та середньоквадратичне відхилення σ вимірної величини. Функції належності лінгвістичних змінних «довжина черги» та «інтенсивність» наведено на рис. 1.18.

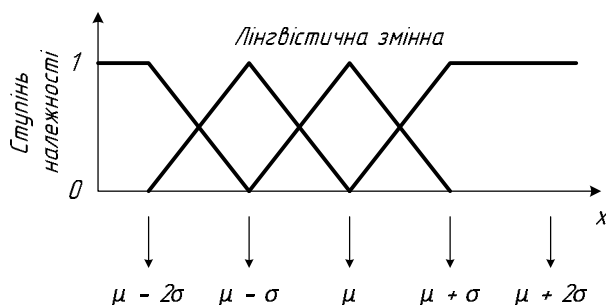


Рис. 1.18. Функції належності лінгвістичних змінних «довжина черги» та «інтенсивність»

У роботі [138] для вхідних змінних (кількості ТЗ на кожному напрямку та тривалості дозвільного сигналу) пропонують терми «нуль», «мало», «середньо» та «багато», вихідної (зміна тривалості сигналу) – «від’ємна», «нульова»,

«додатна». Функції належності можуть бути синглтоном, трикутного або трапецієподібного вигляду. Їхній вигляд залежить від значень чисел R_1 , R_2 , R_3 та R_4 , які задають ліві нижню та верхню і праві нижню та верхню межі (рис. 1.19).

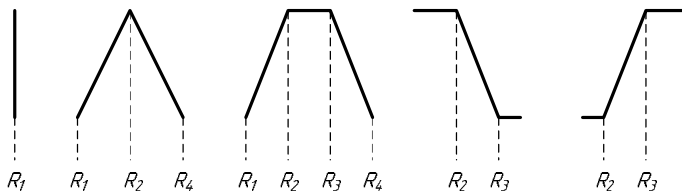


Рис. 1.19. Можливі функції належності нечітких змінних

Вказують [138], що вибір параметрів функцій належності зумовлюється реальними характеристиками перехрестя (шириною дороги, інтенсивністю руху тощо), і загалом вони є унікальними для кожного перехрестя. Один із пропонуванних у [138] наборів лінгвістичних змінних для деякого перехрестя наведено на рис. 1.20.

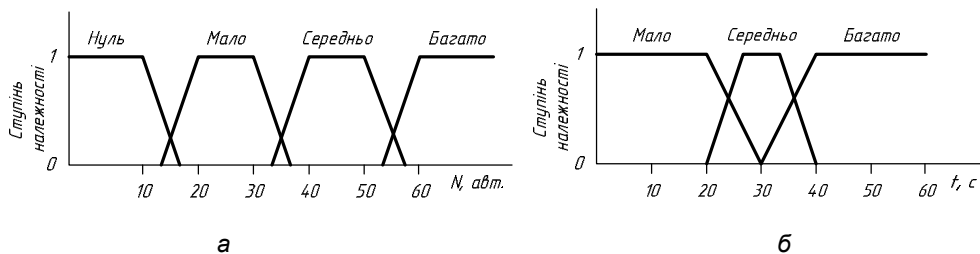


Рис. 1.20. Приклади функцій належності: а – для кількості автомобілів перед стоп-лінією; б – для тривалості дозвільного сигналу

Проте у перелічених працях не показано, що такий вибір параметрів функцій належності забезпечує ефективне керування рухом на регульованих перехрестях за обраним критерієм.

У роботі [18] відзначено, що вибір параметрів функцій належності визначається реальними характеристиками перехрестя: шириною проїзної частини, інтенсивністю руху тощо. Загалом ці параметри є унікальними для кожного перехрестя. Тому тут запропоновано принциповий алгоритм уточнення набору лінгвістичних змінних та набору правил (рис. 1.21).

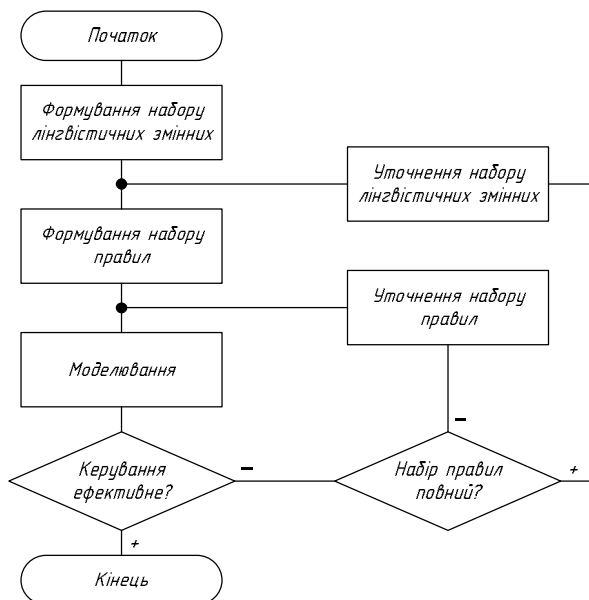


Рис. 1.21. Алгоритм уточнення набору лінгвістичних змінних та набору правил

Крім модифікації параметрів функцій належності, можна коригувати і базу правил. Зокрема, у роботі [18], на відміну від традиційного підходу до побудови нечіткого алгоритму керування, де набір лінгвістичних змінних формується в процесі створення системи, передбачено можливість модифікації цього набору безпосередньо під час керування. Для цього розроблено спеціальну підпрограму, яка автоматично формує нову базу правил за кожної зміни набору лінгвістичних змінних. Потреба у зміні цього набору може виникнути, зокрема, за різних значень інтенсивності ТП, що рухаються в різних напрямках.

1.6.5. Особливості нечітких систем керування рухом ТЗ на перехрестях. Загалом структура нечіткого алгоритму керування рухом на ізольованому перехресті є типовою для адаптивних систем керування рухом (рис. 1.22) [195]. На вхід нечіткої системи керування надходять дані з детекторів транспорту. На виході формується множина значень вихідних змінних (керуючі змінні), які подаються на контролер, в результаті чого

змінюються сигнали світлофора. Це визначає ефективність функціонування регульованого перехрестя.

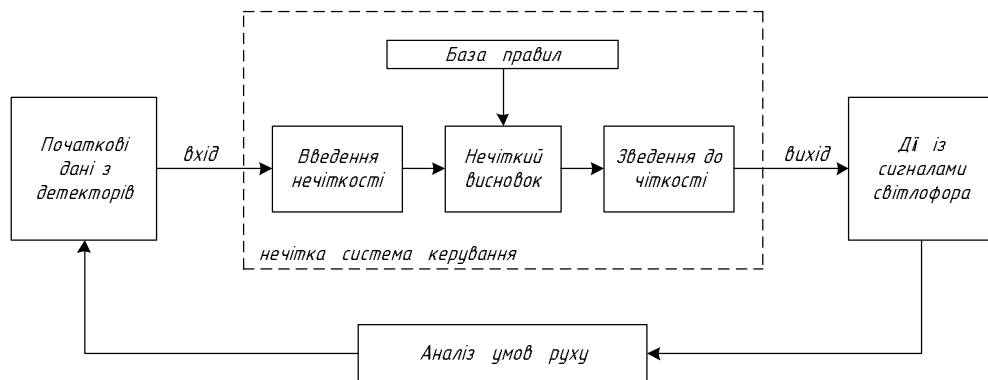


Рис. 1.22. Структура нечіткого алгоритму керування рухом на ізольованому перехресті

До основних вхідних змінних нечітких алгоритмів керування рухом на регульованих перехрестях належать:

- 1) інтенсивність прибуття ТЗ до перехрестя;
- 2) довжина черги ТЗ перед перехрестям (середня і максимальна);
- 3) поточне значення тривалості дозвільного сигналу;
- 4) тривалість заборонного сигналу;
- 5) середній інтервал між ТЗ, що проїжджають на дозвільний сигнал;
- 6) швидкість руху ТЗ на підходах до перехрестя.

Типові керуючі впливи у таких алгоритмах:

- 1) встановлення тривалості дозвільного сигналу;
- 2) рішення про продовження або припинення горіння дозвільного сигналу;
- 3) рішення про величину подовження або скорочення дозвільного сигналу;
- 4) вибір наступної фази;
- 5) визначення умов руху ТЗ на перехресті.

Застосування нечіткої логіки дає змогу підвищити ефективність роботи регульованого перехрестя. Дослідники мають різні підходи до побудови нечітких алгоритмів керування рухом. Використовують різні вхідні параметри та керуючі впливи, різноманітні функції належності, розглядають як уявні

перехрестя, так і наявні, тощо. З проаналізованих вище праць помітно, що досі триває пошук такого нечіткого алгоритму керування, який би забезпечував ефективне функціонування перехрестя у конкретних умовах.

Основні актуальні завдання у керуванні рухом ТЗ на регульованих перехрестях із використанням нечіткої логіки:

- підвищення безпеки перехрестя;
- збільшення пропускну здатності перехрестя;
- мінімізація затримок ТЗ;
- зниження забруднення довкілля;
- вплив на вибір маршруту руху.

Доцільність застосування нечіткої логіки в задачах транспорту за *Hoodendoorn* [197] полягає в такому:

- здатність нечітких множин до моделювання нечіткості, неоднозначності та невизначеності робить внесок у дослідження численних явищ і процесів прийняття рішень у задачах транспорту, таких як вибір маршруту чи режим руху ТЗ за лідером;

- здатність нечіткої логіки до об'єднання інформації з різних джерел збільшує точність оцінок та передумов і заміщує пропущену (відсутню) інформацію; нечітке керування може узгоджувати різні потенційно конфліктні (суперечливі) цілі;

- прозорість та інтуїтивна природа бази правил та вхідних змінних, прийнятих у нечіткій системі керування, робить її порівняно простою в розробленні, тестуванні та модифікуванні (вдосконаленні).

Розділ 2

АНАЛІЗ ЧИННИКІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА РОБОТУ РЕГУЛЬОВАНОГО ПЕРЕХРЕСТЯ

2.1. Вплив нерівностей дорожнього покриття та технічного стану транспортних засобів на швидкість проїзду перехрестя

Безперервне зростання рівня автомобілізації призводить до погіршення умов руху та виявлення прихованих проблем в ОДР, які передовсім існують у вузлових пунктах ВДМ – перехрестях. З метою мінімізації черг перед перехрестями та затримок відповідно обґрунтовано тривалості світлофорних циклів. Однак під час розрахунку режиму роботи регульованих перехресть не враховують усі відомі чинники. Як показують дослідження, не можна нехтувати такими чинниками, як: рівність дорожнього покриття (як на перехресті, так і на прогонах між ними); динамічні характеристики різних типів ТЗ та їх технічний стан; частка цих ТЗ у чергах перед перехрестями.

Магістральні вулиці міст відзначаються значними інтенсивностями ТП, які, залежно від їхньої структури, часу доби, технічного стану ТЗ і дорожніх покриттів, наявності пунктів притягання населення та кваліфікації водіїв, можуть змінюватися у значних межах. Комплексне порівняльне дослідження змін затрат часу на проїзд регульованих і нерегульованих перехресть дає можливість адекватно оцінити напрямки та можливості вдосконалення ВДМ, засобів та режимів регулювання, залишаючи незмінними структуру ТП та технічний стан ТЗ, кваліфікацію водійського персоналу. Крім того, стає можливим з'ясування, що є справді транспортною затримкою, а що технологічним (обов'язковим) часом (тривалістю) проїзду перехресть [158].

2.1.1. Особливості експериментальних досліджень роботи регульованих перехресть. У м. Львові на вулицях загальною довжиною 580 км нараховується 137 регульованих перехресть, з яких 23 працюють в адаптивному режимі (16,8 %), 11 перехресть на трьох магістральних вулицях

працюють координовано в режимі «зеленої хвилі», а решта – ізольовані з жорстким циклом регулювання.

Під час дослідження двох Т-подібних перехресть – нерегульованого на час досліджень перехрестя – вул. Городоцька – Бандери та регульованого – вул. Стрийська – Сахарова в м. Львові (рис. 2.1), встановлено, що більшість легкових автомобілів у ТП є іноземного виробництва з високими показниками технічних характеристик, незначними термінами служби. Однак, у цих ТП є й такі ТЗ (вантажні автомобілі – 19 %, автобуси – 26 %, тролейбуси – 1 %), для яких названі показники мають значно гірші показники.

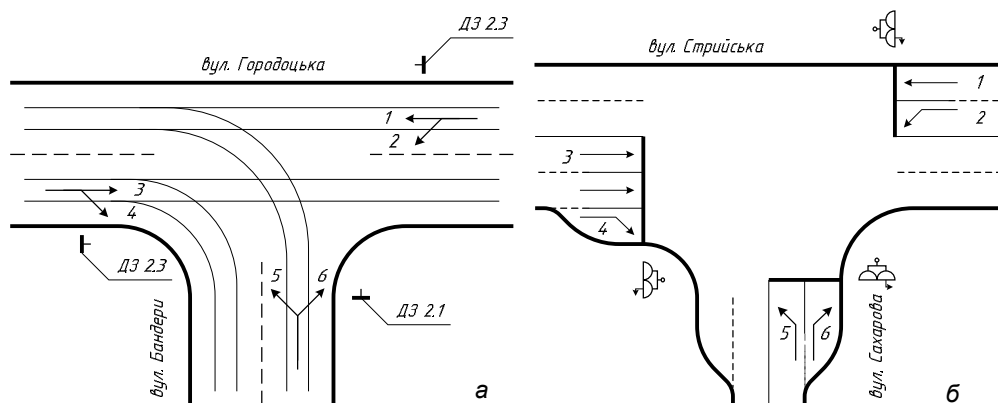


Рис. 2.1. Схеми нерегульованого (а) та регульованого (б) перехресть

Якщо припустити, що усі ТЗ є одного року випуску з однаковим технічним станом, то за динамічними характеристиками вони різні. Різницю у них підсилюють додатково рівень завантаження пасажирами (вантажами). Усі ці ТЗ рухаються спільно в тому самому потоці і, очевидно, що тривалість проїзду ними перехрестя буде різною. Вона, крім цього, видовжуватиметься і через різні типи дорожніх покриттів (на першому – бруківчасте, на другому – асфальтобетонне), їхню якість (перше із значними нерівностями, виступами головок трамвайних колій, друге – з місцевими вибоїнами та хвилястостями). Це, зокрема, частково вплинуло на меншу зведену інтенсивність проїзду нерегульованого бруківчастого перехрестя (1422 авт./год) порівняно з регульованим асфальтобетонним (3862 авт./год) [158].

Варто зазначити, що у цих ТП, крім різних типів ТЗ, є ще водії з різною кваліфікацією. Усе перелічене відображається кількісними показниками

фактичних інтенсивностей проїзду перехресть та зібраних спостереженнями даних щодо кількості ТЗ, які під'їжджають до перехрестя, проїжджають його чи очікують проїзду у черзі (табл. 2.1) [158].

Таблиця 2.1

Розподіл кількості автомобілів, які проїжджають перехрестя

Номер потоку	Регульоване перехрестя		Нерегульоване перехрестя
	Кількість ТЗ, що під'їжджають до перехрестя під час заборонного сигналу, авт./цикл	Кількість ТЗ у потоці, що перетинають «стоп-лінію» під час зеленого сигналу, авт./цикл	Кількість ТЗ у черзі, авт./год
1	легкові – 10; вантажні – 6; автобуси – 7; тролейбуси – 1	легкові – 6; вантажні – 1; автобуси – 2	–
2	легкові – 14; вантажні – 3; автобуси – 2	легкові – 9; вантажні – 1; автобуси – 2	легкові – 36; вантажні – 12; автобуси – 12
3	легкові – 13; вантажні – 7; автобуси – 8; тролейбуси – 1	легкові – 8; вантажні – 3; автобуси – 4	–
4	легкові – 5; вантажні – 2	легкові – 3	–
5	легкові – 3; вантажні – 1	легкові – 3; вантажні – 1	легкові – 36; вантажні – 30; автобуси – 6
6	легкові – 6; вантажні – 5; автобуси – 1	легкові – 4; вантажні – 1	вантажні – 6; автобуси – 6
Разом	94	48	144

Якщо врахувати, що тривалість світлофорного циклу становить 66 с, то за зведеної інтенсивності потоку 3862 авт./год, за час горіння забороненого сигналу з трьох сторін перехрестя під'їжджає 94 автомобілі. Тобто у кожній смузї руху може накопичуватися в середньому по 15 одиниць. А упродовж години, яка має 54 світлофорні цикли, умовна сумарна (за усіма напрямками) довжина черги може становити 810 одиниць. Водночас умовна сумарна (за усіма напрямками) кількість автомобілів у черзі перед нерегульованим перехрестям упродовж години – 144 одиниці. Зважаючи на відношення зведеної інтенсивності проїзду перехресть ($3862/1422 = 2,72$ разу), умовні годинні довжини черг відрізняються у 5,63 рази (810/144).

Викладене вказує на те, що не існує прямої закономірності між інтенсивністю проїзду перехрестя та довжиною черг перед ними. На таку закономірність впливають різні типи перехресть, різні структури ТП, технічних

стан ТЗ та якість дорожнього покриття [158]. У дослідженні тривалості циклу СФР потрібно враховувати і непостійність інтенсивностей ТП. Наприклад, сумарна інтенсивність їх на перехресті вул. Стрийській вулиці у зоні перехрестя з вул. Володимира Великого зросла за 30 років (з 1980 р. по 2010 р.) у 2,62 разу (1349 та 3528 авт./год) [160].

Серед перехресть з жорстким циклом регулювання на особливу увагу заслуговують ті, які мають основний магістральний потік з високою інтенсивністю. Наприклад, інтенсивність магістрального потоку по вул. Стрийській на перехресті вул. Стрийська – Франка на час досліджень становила 1046 од./год. Тривалість світлофорного циклу становить 70 с; ефективна частка в циклі регулювання – 36 с; ступінь насичення фази – 0,76; інтенсивність руху – 1046 зв. авт./год. Отже, розрахункова тривалість затримки, розрахована за формулою *Вебстера* (1.11), становить 15,97 с. Фактична середня тривалість затримки, отримана натурними дослідженнями на цьому самому перехресті, становила 28,3 с [161]. Аналогічно розраховували затримки ТЗ для інших перехресть, крім тих, на яких інтенсивність ТП перевищувала 1200 од./год. На затримки істотно впливали розташування різних ТЗ перед стоп-лінією: якщо першим був вантажний автомобіль або маршрутний автобус, фактичні значення затримок були значно більшими, ніж розрахункові, що зумовлено низькими їхніми розгінними швидкостями, порівняно з легковими автомобілями (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Технологічні параметри проїзду перехресть

Назва перехрестя	Тривалість світлофорного циклу (зеленого сигналу в магістральному напрямку), с	Сумарна інтенсивність руху в магістральному напрямку, зв. од./год	Структура транспортного потоку	Середні швидкість та тривалість проїзду перехрестя першими автомобілями з черги	
				км/год	с
1	2	3	4	5	6
вул. Стрийська – Франка	70 (36)	1046	Л – 88 %, В – 8 %, А – 2 %, Т – 1 %, Тр – 1 %	11,02	9,57
вул. Стрийська – Сахарова	63 (26)	1344	Л – 80 %, В – 16 %, А – 3 %, Тр – 1 %	18,64	9,06

Продовження табл. 2.2

1	2	3	4	5	6
вул. Героїв УПА – Бандери	56 (32)	936	Л – 81 %, В – 11 %, А – 5 %, Т – 2 %, Тр – 1 %	12,57	9,02
вул. Антоновича – Бандери	59 (28)	1066	Л – 87 %, В – 6 %, А – 5 %, Т – 1 %, Тр – 1 %	16,17	8,08
вул. Антоновича – Залізняка	43 (28)	954	Л – 87 %, В – 6 %, А – 6 %, Тр – 1 %	15,74	5,33
вул. Пасічна – Вашингтона	70 (37)	1234	Л – 81 %, В – 13 %, А – 6 %	19,66	9,63
вул. Варшавська – Тунельна	56 (17)	1520	Л – 59 %, В – 39 %, А – 2 %	20,20	10,37
вул. Липинського – Замарстинівська	70 (40)	2232	Л – 66 %, В – 20 %, А – 13 %, Т – 1 %	22,22	8,62
вул. Мазепи – Миколайчука	56 (32)	1610	Л – 63 %, В – 24 %, А – 11 %, Тр – 2 %	16,11	9,05
вул. Шевченка – Левандівська	64 (20)	1154	Л – 65 %, В – 22 %, А – 13 %, Т – 1 %	12,47	11,43

Примітка. Склад ТП: Л – легкові автомобілі, В – вантажні автомобілі, А – автобуси, Т – трамваї, Тр – тролейбуси.

Отримані результати обстеження техніко-технологічних параметрів перехресть ВДМ міста та особливостей проїзду ними ТП різної структури свідчать про те, що користуватися в сучасних умовах традиційними методами проектування та розрахунку показників їх функціонування недоцільно, оскільки вони не достатньою мірою відтворюють реальні ситуації. Невраховання у цих методах типів та станів дорожніх покриттів, структури ТП та технічного стану в них ТЗ призводить до отримання заниженої тривалості дозвільного сигналу на магістральному напрямку і як результат – зростання затримок ТЗ на ньому.

2.1.2. Вплив рівності покриття на швидкість проїзду перехрестя.

У розрахунках тривалості жорстких світлофорних циклів враховують умови ідеальної рівності дорожніх покриттів і рівномірності проїзду перехресть. Однак, відомо, що сучасний стан ВДМ міст характеризується (особливо у весняний період) значною кількістю локальних дефектів, ямок, нерівностей, виступів.

Якщо ідеться про перехрестя з такими дефектами, вони зумовлюють істотне зниження швидкості їх проїзду. В результаті нагромаджуються значні черги, які призводять до часових втрат учасників дорожнього руху, негативного впливу на довкілля та марнування енергетичних ресурсів.

Регульовані та нерегульовані перехрестя, особливо з трамвайними коліями, за показником рівності покриття не завжди відповідають нормативним вимогам до експлуатаційного стану. За обстеженням перехресть магістральної вул. Липинського, зокрема з вул. Замарстинівська та вул. Промислова (відстань між ними 1,5 км), виявлено, що на час досліджень перше перехрестя мало вкрай незадовільний стан: головки трамвайних рейок в окремих місцях виступають на 8–10 см над проїзною частиною, наявна значна кількість ямок із заглибленнями 5–12 см. Показники рівності другого відповідали нормативам. У зв'язку з наведеним сформульовано завдання дослідити швидкості ТП на цій магістралі в зоні вказаних перехресть.

Встановлено, що швидкість проїзду перехресть з якісним дорожнім покриттям у 3 рази вища, ніж на перехрестях з дефектами покриття. Тут можна говорити про те, що не склад ТП впливає на інтенсивність проїзду його через «дефектне» перехрестя, а ступінь рівності покриття. У зв'язку з нерівностями проїзної частини черга автомобілів, яка утворилася за час горіння червоного сигналу, не встигає роз'їхатися на перехресті вул. Липинського – Замарстинівська, хоча тривалість дозвільного сигналу достатня, $t_3 = 30$ с. Це підтверджується тим, що за такого самого складу ТП і майже однакової тривалості горіння зеленого сигналу ($t_3 = 34$ с) на перехресті вул. Липинського – Промислова уся черга встигає роз'їхатися.

На підставі докладного дослідження характерних 10 з 103 ізольованих регульованих перехресть встановлено (табл. 2.3), що довжина перехрестя в напрямку магістрального потоку становить від 23,3 до 58,1 м, ширина ПЧ вулиць магістрального напрямку є в межах від 7,2 до 17,8 м. Дорожні покриття на час досліджень у межах перехресть були у незадовільному стані: максимальні нерівності, виміряні з використанням 3-метрової рейки [51], лежать в межах від 10 до 60 мм [161], є велика кількість місцевих вибоїв, виступи головок рейок над рівнем покриття від 12 до 45 мм (згідно з ДСТУ 3587-97 [12], виступи головок рейок трамвайних колій відносно поверхні дорожнього покриття не повинні перевищувати 2 см).

За обстеженням рівності різних типів дорожніх покриттів на цих перехрестях, виявлено (особливо для тих, які утворюються магістральними

вулицями, на яких асфальтобетонне покриття, а безпосередньо на перехресті з бруківчастим) велику кількість ямок та напливів. До цих дефектів додаються значні виступи головок рейок трамвайних колій.

Таблиця 2.3

Технічні параметри перехресть (геометрія, типи та рівність покрить)

Назва перехрестя	Магістральна вулиця	Геометрія перехрестя		Тип покриття ПЧ магістр. напрямку до, на та після перехрестя	Наявність трамвай. колій (тролейб. ліній) на перехресті	Рівність дорожнього покриття за 3-метровою рейкою, мм	
		довжина пере-хрес. в магістр. напрямку, м	ширина вулиці магістр. напрямку, м			фактична	норматив [143]
вул. Стрийська – Франка	вул. Стрийська	29,30	10,60	б – б – а/б	+ (+)	30*	10
вул. Стрийська – Сахарова	вул. Стрийська	46,90	17,80	а/б – а/б – а/б	- (+)	10	10
вул. Героїв УПА – Бандери	вул. Героїв УПА	31,50	7,60	а/б – б – а/б	+ (+)	50*	10
вул. Антоновича – Бандери	вул. Антоновича	36,30	7,20	а/б – б – а/б	+ (+)	50*	10
вул. Антоновича – Залізняка	вул. Антоновича	23,30	7,20	а/б – а/б – а/б	- (+)	30	10
вул. Пасічна – Вашингтона	вул. Пасічна	52,60	16,90	а/б – а/б – а/б	- (-)	20	10
вул. Варшавська – Тунельна	вул. Варшавська	58,10	15,20	а/б – а/б – а/б	- (-)	30	10
вул. Липинського – Замарстинівська	вул. Липинського	53,20	15,90	а/б – а/б – а/б	+ (-)	10	10
вул. Мазепи – Миколайчука	вул. Мазепи	40,50	10,80	а/б – а/б – а/б	- (+)	20	10
вул. Шевченка – Левандівська	вул. Шевченка	39,60	12,00	б – б – б	+ (-)	60*	10

Примітка. Тип дорожнього покриття: а/б – асфальтобетон, б – бруківка; * – виступи рейок над рівнем дорожнього покриття (норматив – 20 мм [12]; фактично в середньому – 50 мм).

За результатами дослідження на перехресті вул. Липинського – Замарстинівська встановлено, ТП складався з 75 % легкових автомобілів, 16 % автобусів та 9 % вантажних автомобілів. Швидкості руху легкових автомобілів на цьому перехресті були в межах 3–10 км/год, автобусів 3–8 км/год і

вантажних автомобілів 3–6 км/год. Такі незначні швидкості проїзду перехресть пояснюються наявністю дефектів дорожнього покриття.

Перехрестя вул. Липинського – Промислова має аналогічні планувальні рішення (кількість смуг руху, наявність трамвайної колії). Через нього проїжджає приблизно однаковий з попереднім перехрестям ТП: 81 % легкових автомобілів, 14 % автобусів та 5 % вантажних автомобілів. Проте швидкості ТЗ тут значно вищі: легкові автомобілі – 12–33 км/год; автобуси – 11–23 км/год; вантажні автомобілі – 9–15 км/год.

Із використанням методики математичного опрацювання статистичних даних знайдено числові характеристики розподілу швидкостей проїзду ТП цих перехресть (математичне сподівання, дисперсію та середнє квадратичне відхилення). Для перехрестя вул. Липинського – Замарстинівська: відповідно $M(V) = 5,48$ км/год; $D(V) = 2,36$ км/год; $\sigma(V) = 1,54$ км/год. Для перехрестя вул. Липинського – Промислова: відповідно $M(V) = 16,61$ км/год; $D(V) = 21,14$ км/год; $\sigma(V) = 4,59$ км/год. Гістограми та теоретичні криві швидкостей проїзду підпорядковані гамма-розподілу (рис. 2.2). Значення критерію згоди χ^2 для першого перехрестя становить $\chi^2 = 3,74$, для другого – $\chi^2 = 1,42$ з достатньо високим рівнем узгодження експериментальних розподілів з теоретичним $P(\chi^2) = 0,29$ і $P(\chi^2) = 0,84$ відповідно.

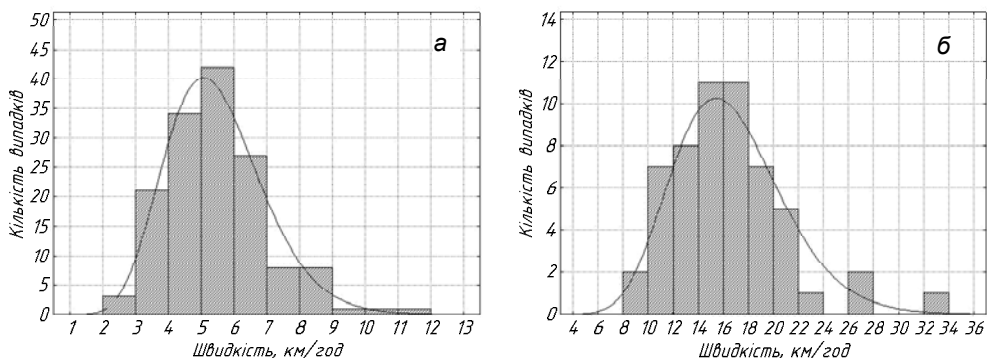


Рис. 2.2. Гістограми і теоретичні криві розподілів швидкостей проїзду перехресть вул. Липинського – Замарстинівська (а) та вул. Липинського – Промислова (б)

2.1.3. Вплив технічного стану ТЗ на швидкість проїзду перехрестя. Одним із визначальних параметрів під час розрахунку тривалості світлофорного циклу є зведена до легкового автомобіля інтенсивність ТП [153]. Коефіцієнти зведення враховують лише динамічний габарит [41, 87], проте однакові за розмірами і різні за видами та марками ТЗ можуть мати і різну відповідну тягову динамічність, яка, крім цього, буде різною і з прив'язкою до їх технічного стану. На останній, як відомо, впливає кумулятивний пробіг (термін служби) ТЗ [154].

Науковці з ДонНТУ зазначають [93], що в разі роз'їзду черги обмеженням у русі для першого автомобіля є його тягово-швидкісні характеристики. Для усіх інших обмеженнями є лише інтервал безпеки до ТЗ, що рухається попереду. У роботі [27] вказано, що на потік насичення впливає розташування ТЗ перед стоп-лінією (спочатку вантажний, а потім легковий або навпаки). На необхідність врахування технічного стану ТЗ під час оптимізації світлофорних циклів вказано і в [36], у якій регульоване перехрестя подають одноканальною системою масового обслуговування. Однак результати розрахунків тривалості руху ТЗ через перехрестя отримані лише з урахуванням його габаритних розмірів і тягових властивостей [153].

Відчутне погіршення показників тягової динамічності зі зростанням кумулятивних пробігів значною мірою характерне для вантажних автомобілів і автобусів (особливо з високим рівнем завантаження чи заповнення салонів) через несвоєчасне виконання ремонтів, насамперед двигунів. Це, зокрема, стосується ремонту деталей циліндро-поршневої групи (ЦПГ), якою забезпечується якісний перебіг робочих процесів згоряння паливної суміші та отримання відповідної потужності двигунів. Якщо ці деталі зношені, то двигун не видає номінальної ефективної потужності, в результаті чого знижуються крутний момент на колінчастому валу та тягові зусилля на ведучих колесах ТЗ. Це погіршує його динаміку, видовжує процес старту в разі увімкнення дозвольного сигналу світлофора, зменшує розгінну швидкість проїзду перехрестя. У результаті відповідних порівняльних розрахунків тягової сили на ведучих колесах для автомобілів з новим та зношеним двигуном встановлено, що в останніх вона зменшилася на 5332,75 Н від $P_{к.н} = 22414,79 \text{ Н}$ до $P_{к.зн} = 17082,04 \text{ Н}$.

Отримані розрахункові показники зниження потужності та крутного моменту зношеного двигуна підтверджуються раніше виконаними за керів-

ництвом проф. *М. І. Іващенко* експериментальними дослідженнями на прикладі вантажних ТЗ [61] та порівняно недавніми щодо двигунів легкових автомобілів [92]. У першій публікації встановлено [61], що нові двигуни вантажних ТЗ на початку експлуатації розвивали потужність 70,56 кВт, а коли кумулятивний пробіг досяг 119860 км, потужність зменшилась до 51,80 кВт (на 27 %). Радіальне зношення робочої поверхні циліндрів на відстані 10 мм від площини роз'єму блока з головкою становило 0,21 мм. Для цих самих двигунів крутний момент на колінчастому валу знизився на 24,5 %.

Для двигунів легкових ТЗ за результатами дослідження зношених гільз циліндрів та поршневих кілець встановлено (у межах пробігів від 20 до 210 тис. км) [92], що кожні 0,01 мм збільшення діаметра циліндра (за рахунок зношення його робочої поверхні) збільшують зазор у замку поршневих кілець на 0,0314 мм. Зокрема, наприклад, на пробігу ТЗ 100–120 тис. км зношення циліндрів становить 0,05 мм, у результаті чого зазор у замку зріс до 0,16 мм. Зростання зазору пояснюється зміною радіальної товщини кілець у результаті зношування їх робочих поверхонь та робочих поверхонь циліндрів. На пробігу ТЗ 140–160 тис. км зазори у замках поршневих кілець можуть сягати 2,0–3,0 мм, порівняно із зазорами нових двигунів 0,20–0,35 мм. Усе це призводить до зниження потужності двигуна на 9 % (358,7 до 53,42 кВт) та компресії у циліндрах – на 6 % (31,25 до 1,18 МПа). Отже, зношення деталей ЦПГ двигунів має істотний вплив на зниження показників тягової динамічності ТЗ, зокрема, на їх розгінні швидкості. Цей факт впливатиме на динаміку транспортних потоків, зокрема на динаміку проїзду регульованих перехресть, оскільки у структурі будь-якого ТП є автомобілі з різними кумулятивними пробігами.

Так, встановлено, що динамічні характеристики (на прикладі тягової динамічності) автомобіля безпосередньо залежать від технічного стану його двигуна, зокрема від ступеня зношення деталей ЦПГ. Зростання їхнього зношення супроводжує втрату компресії, зниження індикаторного тиску, потужності двигуна та крутного моменту колінчастого валу й, зрештою, тягової сили на ведучих колесах. Очевидно, що останнє впливає не тільки на динаміку руху ТП на перегонах між перехрестями, але й на тривалість їхнього проїзду. Цей вплив проявляється особливо у ситуації, коли такий вантажний ТЗ або автобус стоїть перед стоп-лінією першим. У разі рушання на зелений сигнал світлофора, через погіршену тягову динаміку він сповільнюватиме проїзд перехрестя іншими ТЗ. Тому у розрахунках тривалості світлофорних циклів потрібно враховувати не лише коефіцієнти зведення різних видів ТЗ до

легкового автомобіля за динамічним габаритом, але й за динамічними характеристиками, які пов'язані з термінами служби їх (особливо вантажних автомобілів, автобусів), збільшення яких знижує динаміку проїзду перехресть.

З метою перевірки і підтвердження розрахункових даних щодо зниження тягових характеристик ТЗ зі зношеними двигунами виконували натурні дослідження динамічності ТЗ (на прикладі рейсових автобусів ЛАЗ-А183D1 на відповідних маршрутах) із різними кумулятивними пробігами на вулично-дорожній мережі м. Львів з використанням приладу SPRINT SG-2, який дає можливість визначити пришвидшення і сповільнення, швидкість, шлях та час руху, стартові можливості (розгінні швидкості) автобусів [62]. Загальна кількість перехресть різних типів, якими проїжджали ці автобуси, становила 11. Для порівняння вибиралися перехрестя з однаковими дорожніми покриттями та автобуси однакових марок (ЛАЗ-А183D1) з такими кумулятивними пробігами: 125,8, 153,3 і 161,2 тис. км. Жоден з автобусів та їхніх двигунів не зазнавали капітального ремонту. Наповненість салонів пасажирами на маршрутах була приблизно однаковою (розбіжність ± 5 осіб). У дослідженнях брали участь водії зі стажем водіння 8–10 років [153]. Прилад SPRINT SG-2 дав змогу реєструвати розгінні швидкості автобусів, які стояли першими перед стоп-лінією перехрестя, а також в інших місцях черги. Показники розгінних швидкостей реєструвалися на приладі впродовж перших 5 с руху. Для прикладу на рис. 2.3 подано розгінні характеристики під час проїзду перехрестя вул. Стрийська – Наукова автобусами маршруту № 3а із вказаними вище кумулятивними пробігами [153].

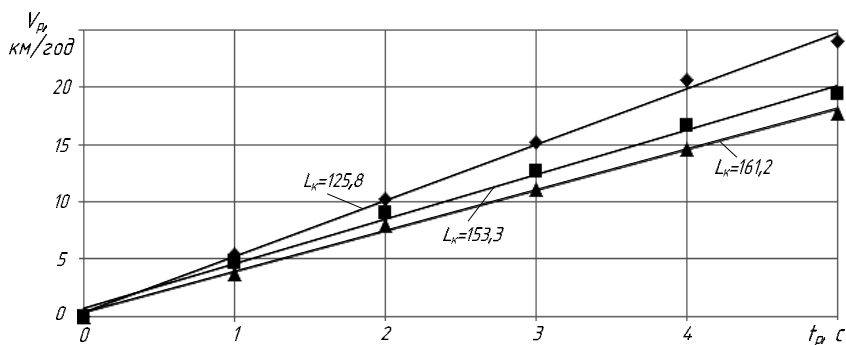


Рис. 2.3. Вплив кумулятивного пробігу автобусів (y тис. км) на їх розгінну швидкість на перехресті вул. Стрийська – Наукова (перші перед стоп-лінією)

З наведеного видно, що автобуси з кумулятивним пробігом 161,2 тис. км розвивають стартову швидкість протягом 5 с 17,79 км/год, а з меншим (125,8 тис. км) за цей самий час 24,08 км/год. Тобто приріст кумулятивного пробігу на 35,4 тис. км зумовив зниження розгінної швидкості на 26,1 %.

Опрацювання відповідних статистик розгінних швидкостей цих автобусів по усіх решта 11 перехрестях підтвердили аналогічну до наведеного прикладу тенденцію зниження тягово-швидкісних показників (рис. 2.4).

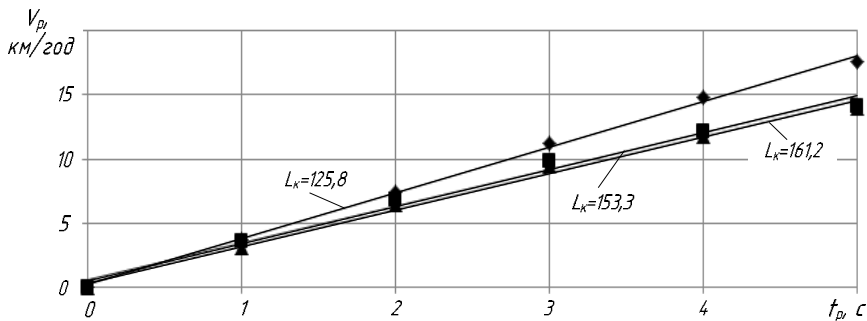


Рис. 2.4. Вплив кумулятивного пробігу автобусів (у тис. км) на їхню розгінну швидкість (опосередковані дані) під час проїзду усіх 11 перехресть (перші та в інших місцях черги перед стоп лінією)

Таблиця 2.4

Середня посекудна розгінна швидкість руху автобусів на перехрестях

№ з/п	Кумулят. пробіг автобуса, тис. км	Швидкість руху за секундами, км/год					Рівняння апроксимації	Коефіцієнт детермінації, R^2
		1	2	3	4	5		
на перехресті вул. Стрийська – Наукова								
1	125,8	5,43	10,22	15,16	20,65	24,08	$V_p = 4,8857t_p + 0,3757$	0,9970
2	153,3	4,72	9,00	12,73	16,64	19,49	$V_p = 3,9126t_p + 0,6486$	0,9945
3	161,2	3,73	7,93	11,11	14,56	17,79	$V_p = 3,5606t_p + 0,2852$	0,9978
на усіх 11 решта перехрестях								
4	125,8	3,77	7,45	11,26	14,78	17,63	$V_p = 3,5711t_p + 0,2205$	0,9980
5	153,3	3,60	6,87	9,81	12,20	14,17	$V_p = 2,8454t_p + 0,6614$	0,9886
6	161,2	3,14	6,48	9,51	11,82	13,97	$V_p = 2,8263t_p + 0,4210$	0,9924

Результати опрацювання отриманих даних розгінних швидкостей автобусів під час проїзду першого перехрестя та решта 11 з відповідними залежностями їх від тривалості руху наведено у табл. 2.4.

Якщо розрахунками у [154] встановлено зниження тягових сил на ведучих колесах від терміну служби ТЗ в межах 23,8 %, то результати експериментальних досліджень розгінних характеристик від кумулятивного пробігу (терміну служби) показують зниження їх на 26,1 %. Цим засвідчується прямий взаємозв'язок між термінами служби ТЗ та динамікою руху, зумовлений зниженням рівня їхнього технічного стану [153].

Отже, потрібно враховувати зміну динамічних властивостей ТЗ із різним технічним станом у розрахунках потоків насичення та тривалості світлофорних циклів [159], які адекватніше характеризуватимуть динаміку ТП загалом, і, в результаті, дадуть змогу знизити величини черг та тривалості затримок ТЗ перед перехрестями.

2.2. Оптимізація роботи регульованих перехресть з урахуванням технічного стану транспортних засобів та нерівностей дорожнього покриття

З метою врахування особливостей руху ТЗ різних типів у ТП під час розрахунку СФР використовують коефіцієнти зведення. Оскільки тяговошвидкісні характеристики ТЗ, зокрема вантажних автомобілів та автобусів, погіршуються зі зростанням терміну їхньої служби та кумулятивного пробігу, що, своєю чергою, призводить до зміни динамічного габариту таких ТЗ, особливо під час рушання з черги перед стоп-лінією, запропоновано враховувати це значенням коефіцієнта зведення.

Для розрахунку коефіцієнтів зведення $K_{зв}$ використано співвідношення

$$K_{зв} = \frac{t_i}{t_{лег}}, \quad (2.1)$$

де t_i – часовий інтервал між ТЗ i -го типу за роз'їзду черги на зелений сигнал світлофора, с; $t_{лег}$ – часовий інтервал між легковими ТЗ у разі роз'їзду черги на зелений сигнал світлофора, с.

Для визначення коефіцієнтів зведення у програмному продукті VISSIM було створено модель смуги руху зі стоп-лінією (світлофором). Спочатку змодельовано рух потоку легкових автомобілів, опісля – потоку вантажних із

різним технічним станом, який у моделі виражався через стартове прискорення, яке змінювалося в межах 0,25–3,5 м/с² з кроком у 0,25 м/с². За результатами моделювання встановлено, що часовий інтервал за роз'їзду черги легкових автомобілів становить 1,53 с, а для вантажних ТЗ він знаходився у межах від 2,061 с (для ТЗ із прискоренням 3,5 м/с²) до 6,337 с (для ТЗ з прискоренням 0,25 м/с²). З використанням формули (2.1) визначено коефіцієнти зведення, які враховують технічний стан ТЗ (табл. 2.5).

Таблиця 2.5

Коефіцієнти зведення, які враховують зміну технічного стану ТЗ

Прискорення ТЗ, м/с ²	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75
Коефіцієнт зведення	4,14	2,88	2,35	2,04	1,83	1,72	1,63
Прискорення ТЗ, м/с ²	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50
Коефіцієнт зведення	1,58	1,52	1,47	1,44	1,40	1,37	1,35

Отримані результати вказують на те, що коефіцієнт зведення за фізичним змістом є змінною величиною, яка залежить від зміни технічного стану ТЗ, особливо для вантажних ТЗ і автобусів.

Для перевірки придатності до використання отриманих коефіцієнтів зведення у програмному середовищі VISSIM створено моделі регульованих перехресть, схеми яких наведено на рис. 2.5. На першому етапі виконувались чотири досліді: 1-й – всі напрямки мають 1×1 смуги руху, тривалість світлофорного циклу 65 с; 2-й – головний напрямок має 2×2 смуги руху (потоки 1 і 2), а другорядний 1×1 (потоки 3 і 4), тривалість світлофорного циклу – 60 с; 3-й аналогічний другому, однак тривалість світлофорного циклу – 65 с; 4-й аналогічний третьому з тривалістю світлофорного циклу – 70 с.

Інтенсивність ТП змінювалась від 400 авт./год до 700 авт./год для головного напрямку та від 100 авт./год до 300 авт./год для другорядного з кроком 100 авт./год. Склад ТП був також змінним: частка вантажних ТЗ і автобусів у ТП на головному напрямку змінювалась від 25 % до 40 % з кроком 5 %, на другорядному напрямку рухались лише легкові автомобілі. Для спрощення у моделі заборонено ліві повороти з усіх напрямків, а правоповоротні потоки становили 8 % від інтенсивності на підході до перехрестя. Розрахунок світлофорного циклу проведено з використанням коефіцієнтів зведення, які запропонував *Левашев* [86], та коефіцієнтів зведення, які враховують технічний стан ТЗ.

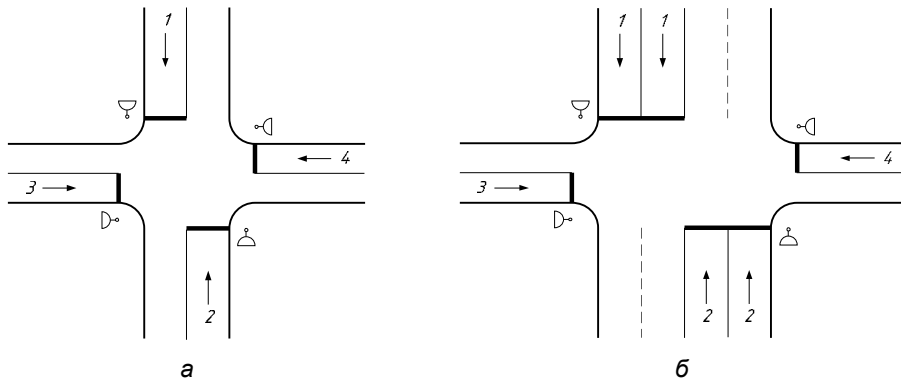


Рис. 2.5. Модель регульованого перехрестя зі смугами руху 1×1 на усіх напрямках (а) та з 2×2 на головному напрямку і 1×1 – на другорядному (б)

За результатами моделювання (табл. 2.6) встановлено, що, наприклад, для ТП з інтенсивністю 600 авт./год на головному напрямку, який складався з 75 % легкових і 25 % вантажних (автобусів), інтенсивностями 100, 200, 300 авт./год на другорядному (3-й дослід) та тривалістю світлофорного циклу 65 с середні затримки на головному напрямку становили 5,82–19,52 с.

Графічно результати моделювання наведено на рис. 2.6. Видно, що на головному напрямку затримки знижуються (рис. 2.6, а, б, в), однак на другорядному зростають (рис. 2.6, г, д, е). Аналіз усіх результатів моделювання дає змогу встановити скорочення тривалостей затримок ТЗ на головному напрямку і неістотне збільшення їх на другорядному (рис. 2.6). Встановлено [34], що для усіх варіантів (192) поєднань інтенсивностей ТП на головному і другорядному напрямках у кожному з дослідів тривалість затримок ТЗ на першому знижується в середньому на 7,6 % порівняно, якщо використовувати коефіцієнти зведення за *Левашевим*. На другорядному напрямку спостерігається збільшення затримок на 7,1 %. Загальна затримка усіх ТЗ на обох напрямках знижується на 3,6 %.

Отримані результати вказують на те, що, якщо використовувати запропоновані коефіцієнти зведення ТП до легкового автомобіля у визначенні тривалості горіння зелених сигналів, то затримки на головному напрямку завжди знижуються, а на другорядному – зростають [34]. Однак вважаємо це допустимим, оскільки створюються кращі умови для головного (магістрального) напрямку, яким рухається ТП із, як правило, значно більшою кількістю ТЗГК, затримки яких з метою дотримання графіків руху не допускають.

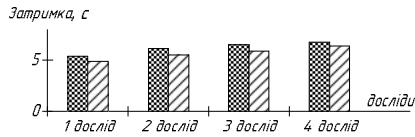
**Середні тривалості затримок ТЗ за результатами моделювання
(склад ТП – 75 % легкових та 25 % вантажних ТЗ)**

№ дослідж.	№ ТП	Інтенсивність ТП на головному напрямку, $N_{гол}$, авт./год	Інтенсивність ТП на другорядному напрямку, $N_{ор}$, авт./год					
			100		200		300	
			Коефіцієнти зведення					
			за Левашевим	запропоновані	за Левашевим	запропоновані	за Левашевим	запропоновані
Затримка, с								
1	1	400	8,13	7,72	13,98	13,33	18,35	17,63
	2		8,33	7,73	14,75	13,98	19,62	18,68
	3		14,82	15,57	9,33	9,92	7,00	7,48
	4		13,75	14,42	9,60	10,15	7,85	8,37
2	1	500	7,00	6,62	13,33	11,78	17,97	16,55
	2		6,92	6,33	13,10	11,52	17,60	15,92
	3		17,27	18,02	11,13	12,40	8,52	9,63
	4		15,83	16,55	11,40	12,65	9,43	10,60
3	1	600	6,52	5,92	11,60	11,02	16,23	15,38
	2		6,37	5,82	11,50	10,95	15,98	15,03
	3		18,80	19,57	13,00	13,65	10,18	10,82
	4		17,35	18,13	13,33	14,02	11,20	11,78
4	1	700	6,27	5,60	11,07	10,52	15,65	14,18
	2		5,62	5,15	11,13	10,40	15,50	13,97
	3		20,37	21,18	14,33	15,07	11,45	12,70
	4		18,95	19,73	14,70	15,40	12,43	13,77

У базовій моделі ТП складався з легкових і вантажних ТЗ (маршрутні автобуси), коефіцієнт зведення для яких становить $K_{зв}=1,647$ [86]. У моделі роботи регульованого перехрестя закладено такі обмеження: вантажні ТЗ рухаються лише головним напрямком; заборонено ліві повороти з усіх напрямків, а частка правоповоротних потоків становить 8 %; поздовжні ухили на підходах до перехрестя відсутні. Тому потік насичення залежав лише від ширини смуги руху.

Для усіх варіантів моделювання тривалість світлофорного циклу становила 65 с, що є, як встановлено натурними дослідженнями, характерною тривалістю для таких перехресть. Під час моделювання змінювались тривалості дозвільних сигналів на головному напрямку для перехресть з 1×1 смугами руху – від 40 до 52 с, а для 2×1 – відповідно 31–49 с.

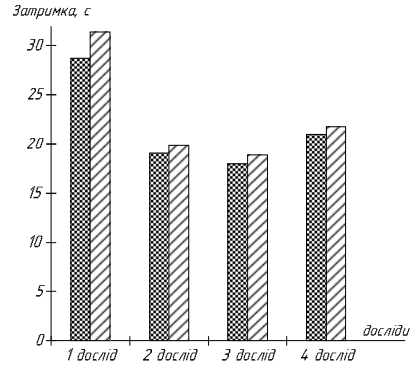
Головні напрямки
 $N_{гол}=600$ авт./год



а

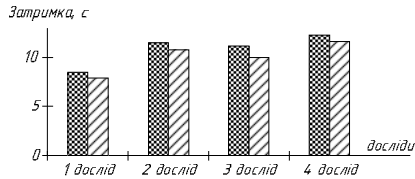
$N_{гол}=600$ авт./год

Другорядні напрямки
 $N_{др}=100$ авт./год



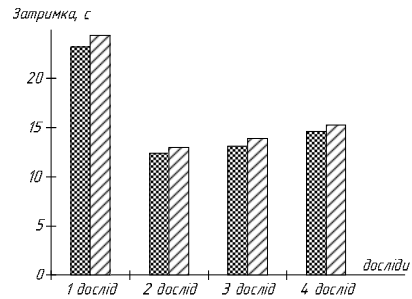
в

$N_{др}=200$ авт./год



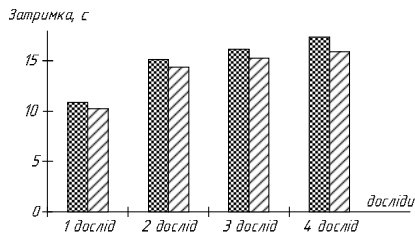
б

$N_{гол}=600$ авт./год

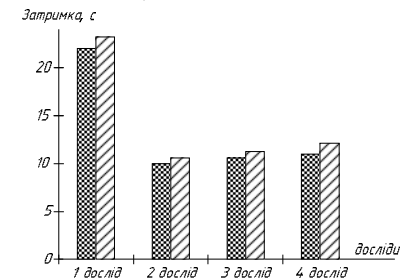


г

$N_{др}=300$ авт./год



д



е

Рис. 2.6. Зміна тривалостей затримок ТЗ у ТП перед регульованим перехрестям з структурою 75 % легкових автомобілів і 25 % вантажних автомобілів і автобусів:

▒ – використання коефіцієнтів зведення за Левашевим; ▨ – використання коефіцієнтів зведення, які враховують зниження динамічних характеристик ТЗ

У цьому дослідженні проведено 16 дослідів з різною інтенсивністю ТП (табл. 2.7). Кожен із них реалізовували для чотирьох випадків з урахуванням відповідно: 1) коефіцієнтів зведення за *Левашевим* (базовий варіант); 2) технічного стану ТЗ; 3) рівності ПЧ; 4) технічного стану ТЗ та рівності ПЧ одночасно.

Таблиця 2.7

Характеристика дослідів під час моделювання

Номер дослідів	Співвідношення інтенсивності ТП на головному та другорядному напрямках, авт./год	Склад ТП, який проїжджає перехрестя, %	Кількість смуг руху на напрямках, шт.
1	500×100	65 % – легкові, 35 % – автобуси (вантажні ТЗ)	1 на головному напрямку та 1 на другорядному (1×1)
2	500×200		
3	700×100		
4	700×200		
5	500×100	65 % – легкові, 35 % – автобуси (вантажні ТЗ)	2 на головному напрямку та 1 на другорядному (2×1)
6	500×200		
7	700×100		
8	700×200		
9	500×100	70 % – легкові, 35 % – автобуси (вантажні ТЗ)	1 на головному напрямку та 1 на другорядному (1×1)
10	500×200		
11	700×100		
12	700×200		
13	500×100	70 % – легкові, 35 % – автобуси (вантажні ТЗ)	2 на головному напрямку та 1 на другорядному (2×1)
14	500×200		
15	700×100		
16	700×200		

Отримані результати моделювання для випадку 2×1 смуги руху та складу ТП – 65 % легкові автомобілі, 35 % – автобуси (вантажні ТЗ) наведено у табл. 2.8. З метою аналізу їх ці табличні дані систематизували з виведенням лише сумарних затримок ТЗ для різних тривалостей дозвільного сигналу й різних структур ТП та їх інтенсивностей.

Зрозуміло, що за усіх варіантів дослідження зі зростанням інтенсивності ТП зростають і сумарні затримки ТЗ (табл. 2.9 та графічно на рис. 2.7 та 2.8).

Таблиця 2.8

Середні затримки ТЗ (у секундах) під час проїзду регульованого перехрестя з 2×1 смуги руху

Номер ТП	Коефіцієнт зведення за Левашевим		Технічний стан ТЗ		Рівність ПЦ		Технічний стан ТЗ і рівність ПЦ		Коефіцієнт зведення за Левашевим		Технічний стан ТЗ		Рівність ПЦ		Технічний стан ТЗ і рівність ПЦ	
	Тривалість дозвільного сигналу, с	Середня затримка	Тривалість дозвільного сигналу, с	Середня затримка	Тривалість дозвільного сигналу, с	Середня затримка	Тривалість дозвільного сигналу, с	Середня затримка	Тривалість дозвільного сигналу, с	Середня затримка	Тривалість дозвільного сигналу, с	Середня затримка	Тривалість дозвільного сигналу, с	Середня затримка	Тривалість дозвільного сигналу, с	Середня затримка
Співвідношення інтенсивностей ТП на головному та другорядному напрямках, авт./год																
500×100																
1	41	6,97	42	6,30	45	5,12	46	4,72	31	12,78	33	11,12	3	9,98	3	8,78
2		6,78		6,12		5,03		4,60		12,70		10,90	6	9,37	8	8,52
3	18	17,97	17	18,78	14	21,17	13	22,23	28	11,77	26	13,00	2	15,08	2	16,55
4		16,58		17,35		19,75		20,67		12,00		13,32	3	15,42	1	16,93
Співвідношення інтенсивностей ТП на головному та другорядному напрямках, авт./год																
700×100																
1	45	6,23	46	5,68	48	4,75	49	4,32	36	10,88	38	9,63	4	8,02	4	7,60
2		5,77		5,17		4,47		4,10		10,97		9,67	1	7,88	2	7,32
3	14	21,20	13	22,17	11	24,45	10	25,50	23	15,08	21	16,55	1	19,10	1	19,95
4		19,72		20,68		23,15		24,78		15,43		16,88	8	19,45	7	20,23

Таблиця 2.9

Оцінка ефективності роботи регульованих перехресть за показником скорочення тривалості сумарної затримки транспортних засобів

Співвідношення інтенсивностей ТП на головному та другорядному напрямках, авт./год кількість смуг руху на перехресті, шт.	Сумарні затримки ТЗ на перехресті / для різних тривалостей зеленого сигналу головного напрямку, з урахуванням, с.авт./год				Скорочення / відсоток скорочення сумарних затримок ТЗ порівняно з базою, з урахуванням, с.авт./год	
	коефіцієнта зведення за Левашевим	технічного стану ТЗ	рівності ПЧ	технічного стану ТЗ і рівності ПЧ	технічного стану ТЗ	рівності ПЧ
Склад ТП на перехресті: 65 % – легкові автомобілі, 35 % – вантажні ТЗ (автобуси)						
$\frac{500 \times 100}{2 \times 1}$	$\frac{10330,0}{41}$	$\frac{9823,0}{42}$	$\frac{9167,0}{45}$	$\frac{8950,0}{46}$	$\frac{507,0}{4,91}$	$\frac{1380,0}{13,36}$
$\frac{500 \times 200}{2 \times 1}$	$\frac{17494,0}{31}$	$\frac{16274,0}{33}$	$\frac{15775,0}{36}$	$\frac{15346,0}{38}$	$\frac{1220,0}{6,97}$	$\frac{2148,0}{12,28}$
$\frac{700 \times 100}{2 \times 1}$	$\frac{12492,0}{45}$	$\frac{11880,0}{46}$	$\frac{11214,0}{48}$	$\frac{10922,0}{49}$	$\frac{612,0}{4,90}$	$\frac{1570,0}{12,57}$
$\frac{700 \times 200}{2 \times 1}$	$\frac{21397,0}{36}$	$\frac{20196,0}{38}$	$\frac{18840,0}{41}$	$\frac{18480,0}{42}$	$\frac{1201,0}{5,61}$	$\frac{2917,0}{13,62}$
Склад ТП на перехресті: 70 % – легкові автомобілі, 30 % – вантажні ТЗ (автобуси)						
$\frac{500 \times 100}{2 \times 1}$	$\frac{10622,0}{40}$	$\frac{9823,0}{42}$	$\frac{9313,0}{44}$	$\frac{9073,0}{45}$	$\frac{799,0}{7,52}$	$\frac{1549,0}{14,58}$
$\frac{500 \times 200}{2 \times 1}$	$\frac{17339,0}{31}$	$\frac{16747,0}{32}$	$\frac{15420,0}{36}$	$\frac{15201,0}{37}$	$\frac{592,0}{3,41}$	$\frac{2138,0}{12,33}$
$\frac{700 \times 100}{2 \times 1}$	$\frac{12818,0}{44}$	$\frac{12423,0}{45}$	$\frac{11075,0}{48}$	$\frac{10872,0}{49}$	$\frac{395,0}{3,08}$	$\frac{1946,0}{15,18}$
$\frac{700 \times 200}{2 \times 1}$	$\frac{21087,0}{36}$	$\frac{20566,0}{37}$	$\frac{19069,0}{40}$	$\frac{18651,0}{41}$	$\frac{521,0}{2,47}$	$\frac{2436,0}{11,55}$

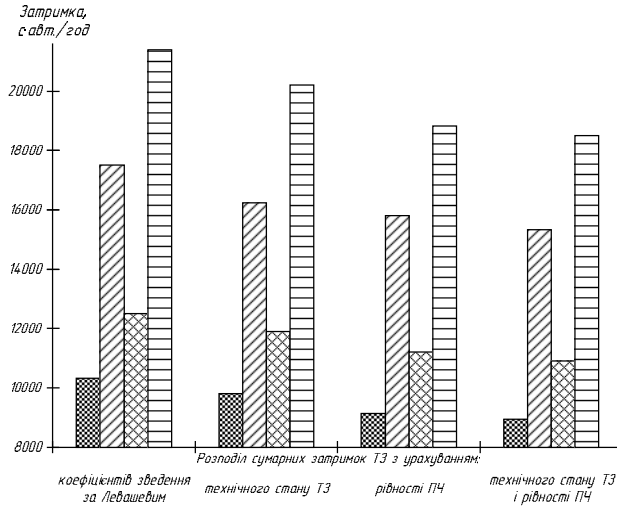


Рис. 2.7. Зміна сумарних затримок ТЗ перед регульованими перехрестями для смуг руху 2×1 та складу ТП 65 % – легкових, 35 % – вантажних з відповідними інтенсивностями руху (авт./год):
 ■ – 500×100; ▨ – 500×200; ▩ – 700×100; ▭ – 700×200

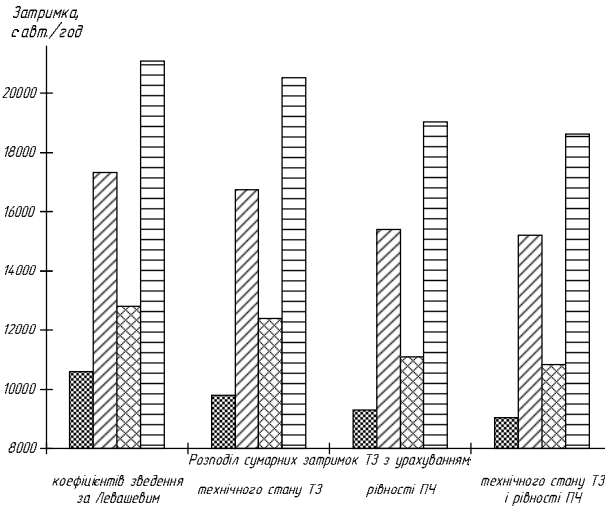


Рис. 2.8. Зміна сумарних затримок ТЗ перед регульованими перехрестями для смуг руху 2×1 та складу ТП 65 % – легкових, 35 % – вантажних (автобусів) з відповідними інтенсивностями руху (позначення аналогічні до рис. 2.7)

Однак, якщо порівняти результати для трьох різних варіантів з базовим варіантом, то спостерігається явно виражена тенденція скорочення сумарних затримок ТЗ. Для цих варіантів отримано (з урахуванням технічного стану ТЗ) скорочення сумарної затримки на 395–1220 с-авт./год (на 2,47–7,52 %). За врахування рівності ПЧ сумарна затримка також скорочується на 1163–2557 с-авт./год (на 9,57–13,60 %). Тенденція зменшення сумарних затримок ТЗ зберігається і за врахування одночасного впливу технічного стану ТЗ і рівності ПЧ – сумарна затримка в цьому разі зменшується на 1380–2917 с-авт./год (на 11,55–15,18 %).

Тенденція скорочення сумарних затримок ТЗ зберігається і для перехрестя з 1×1 смугами руху. У такому разі вони зменшуються на 124–641 с-авт./год (0,81–2,92 %), якщо враховувати лише технічний стан ТЗ; на 88–1319 с-авт./год (0,59–5,46 %), якщо враховувати лише рівність ПЧ, та на 88–1156 с-авт./год (0,59–6,30 %) за одночасного врахування обох чинників.

У такий спосіб, отримані результати вказують на потребу врахування технічного стану ТЗ і рівності проїзних частин під час розрахунку тривалості світлофорних циклів для регульованих перехресть.

2.3. Визначення потоку насичення за швидкістю проїзду перехрестя

Існують різні методи вимірювання потоку насичення під час натурних досліджень, проте вони вимагають значних затрат часу, крім цього, їх неможливо виконати для перехресть, що проєктуються [77, 87, 177, 179, 198].

З усіх проаналізованих методів та моделей у дослідженнях потоків насичення можна зробити висновок, що вони використовують поняття ідеального потоку насичення. Вітчизняна методика визначає його залежність від ширини смуги руху, канадська пропонує визначати його безпосередньо в місці проєктування, американська використовує фіксоване значення. При цьому значення потоку насичення за всіма методиками є у межах 1700–2100 авт./год, що відповідає часовим інтервалам між автомобілями 1,7–2,1 с. Наявність таких інтервалів за максимальної інтенсивності руху підтверджують дослідження Кероглу, Калужського та Лобанова [90, 108].

Потік насичення за своєю суттю є ТП на проїзній частині (смугі руху), яка функціонує в умовах пропускну здатності. Теоретичну пропускну

здатність смуги руху визначають з використанням спрощених динамічних моделей і з урахуванням середньої швидкості руху потоку v та значення безпечної відстані між автомобілями, що рухаються один за одним L [90]:

$$N = \frac{1000v}{L}. \quad (2.2)$$

За використання першої групи спрощених динамічних моделей, в якій закладено лінійну залежність відстані між автомобілями від швидкості руху (табл. 2.10), значення теоретичної пропускної здатності (потоку насичення) досягає 4500 авт./год [90]. Проте на практиці така ситуація не виникає.

Таблиця 2.10

Спрощені динамічні моделі для визначення ПН [90]

Група спрощених динамічних моделей	Залежність «інтенсивність–швидкість»
перша	$N = \frac{1000v}{l_a + l_p + l_\sigma}$
друга	$N = \frac{1000v}{l_a + l_p + l_\sigma + l_{e2}}$
третя	$N = \frac{1000v}{l_a + l_p + l_\sigma + l_{e2} - l_{e1}}$
v – середня швидкість ТП, км/год; l_a – довжина автомобіля, м; l_p – шлях, який проходить автомобіль за час реакції водія, м; l_σ – відстань безпеки, м; l_{e1} – гальмівний шлях переднього автомобіля, м; l_{e2} – гальмівний шлях заднього автомобіля, м	

Використання другої групи динамічних моделей, у якій враховують не тільки тривалість реакції водія, але й гальмівні властивості заднього автомобіля, призводить до зниження теоретичної пропускної здатності до 2700 авт./год [90]. Це значення досягається за швидкості 55 км/год.

Третя група динамічних моделей враховує тривалість реакції водія, гальмівні властивості заднього та переднього автомобілів та коефіцієнт зчеплення. Це зумовлює зниження теоретичної пропускної здатності до 1875 авт./год, яке досягається за швидкості 45 км/год [90].

Поява в потоці автомобілів з кращими динамічними властивостями зумовлює збільшення пропускної здатності. Швидкість, що відповідає пропускній здатності смуги руху, становить 60 км/год. Спостереження показують, що у щільних потоках модальне значення інтервалу між автомобілями може становити 1,5 с. Пропускна здатність при цьому може досягати

2400 авт./год. Це і є максимальною інтенсивністю, що може існувати за мінімальних часових інтервалів у потоці. На практиці така інтенсивність досягається рідко, оскільки потребує від водія значного емоційного напруження.

Для ідеалізованої моделі, в якій відстань між автомобілями є сталою (інтервал між автомобілями, який дорівнює 30 м), і вона не залежить від швидкості, ця модель може відповідати випадку автоматичного керування автомобілем [90]. Зростання пропускну здатності за збільшення швидкості під час рівномірного руху підтверджується також даними, наведеними в [135].

Чинники, які впливають на потік насичення, впливають також і на зміну швидкості ТП [150]. Але жодна з поширених методик розрахунку ПН не враховує швидкості проїзду перехрестя. Хоча в роботі [126] стверджують, що максимальна кількість ТЗ, які можуть проїхати по смузі руху за один світлофорний цикл за заданої тривалості дозвільного сигналу, залежить від швидкості проїзду перехрестя та часових інтервалів між ТЗ.

Зважаючи на викладене, швидкість проїзду перехрестя можна розглядати як величину, на яку впливають геометрично-планувальні характеристики перехрестя, стан дорожнього покриття, умови руху на перехресті, склад потоку, технічний стан ТЗ тощо.

На перехрестях є різні випадки обмеження швидкості руху (тут обмеження швидкості означає таку швидкість ТЗ, якої він вимушений дотримуватись для забезпечення безпеки руху). Зокрема, швидкість може обмежуватись лише в зоні перехрестя (рис. 2.9, *a*). Таке обмеження може виникати внаслідок зміни типу покриття, незадовільного стану ПЧ, зниження швидкості для виконання маневру тощо. Швидкість також може обмежуватись як у межах перехрестя, так і поза ним, наприклад, коли тип покриття або стан ПЧ погіршується, починаючи від перехрестя (рис. 2.9, *b*). Обмеження може виникати також лише за (рис. 2.9, *в*) або лише до перехрестя (рис. 2.9, *г*), а також може бути постійним (рис. 2.9, *д*). Ідеальним є випадок, коли швидкість руху на підходах до перехрестя, безпосередньо на ньому і поза ним обмежується лише динамічними властивостями ТЗ, рівнем їх технічного стану та ПДР (рис. 2.9, *е*) [155, 157, 177]. Перехрестям вважали ділянку за стоп-лінією завдовжки 20 м.

Оскільки ПН утворюється під час роз'їзду черги ТЗ на дозвільний сигнал світлофора і його інтенсивність визначається в перерізі стоп-лінії для однієї смуги руху, то для дослідження ПН у середовищі VISSIM створено модель

смуги руху із стоп-лінією та ділянкою обмеження швидкості. У середовищі VISSIM немає можливості фіксувати ПН. Тому фіксувався момент ввімкнення дозвільного сигналу та моменти перетину стоп-лінії. Результати моделювання опрацьовано за методикою, що ґрунтується на методиці натурних досліджень потоку насичення, наведеній у [77].

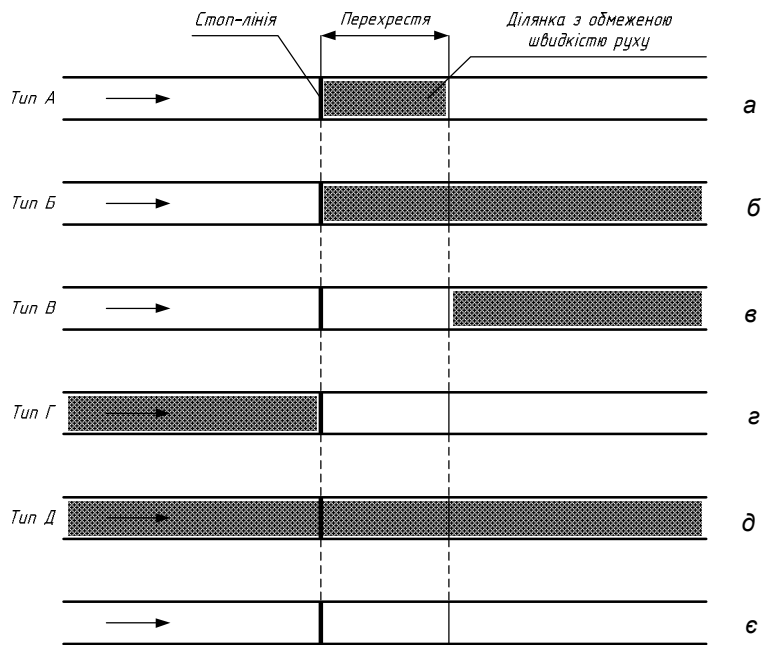


Рис. 2.9. Можливі випадки обмеження швидкості руху ТП через перехрестя

З рис. 2.10 видно, що швидкість проїзду перехрестя впливає на ПН для усіх розглянутих типів обмеження швидкості. За обмеження швидкості 15 км/год ПН знижується до 1250–1400 авт./год. За збільшенні швидкості руху ПН зростає, досягаючи значення 2134 авт./год, яке є близьким до ідеального ПН та до фактичної пропускнуї здатності смуги руху. Тут також можна помітити, що потік насичення з обмеженням швидкості типу Б (перехрестя і після нього) є дещо нижчим, ніж за обмеження типу А (лише перехрестя). Це вказує на те, що збільшення довжини зони обмеження швидкості також знижує

і ПН. Тому було проведено додаткові дослідження потоку насичення з урахуванням одночасного впливу обох чинників – швидкості проїзду перехрестя та довжини ділянки обмеження. Значення обмеження швидкості змінювалось від 10 км/год до 55 км/год з інтервалом 5 км/год, а довжина зони обмеження – від 5 м до 50 м (зона завдовжки 5 м імітує, наприклад, проїзд нерівностей чи ямок на покритті або малі радіуси заокруглень для правоповоротних потоків) [155, 177].

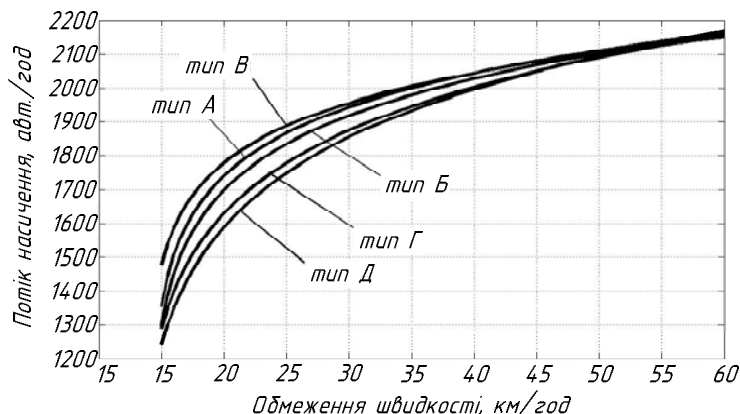


Рис. 2.10. Залежність потоку насичення за різних випадків обмеження швидкості

Встановлено [102, 177], що одночасний вплив швидкості проїзду перехрестя та довжини ділянки її обмеження на ПН описується залежністю

$$S(v, L) = -17200v^{-1,08} - 0,8635L + 2417, \quad (2.3)$$

де v – швидкість проїзду перехрестя, км/год; L – довжина перехрестя (ділянки зниження швидкості), м.

Графічно цю залежність наведено на рис. 2.11.

Для перевірки адекватності моделі (2.3) розраховано відхилення даних, отриманих з її використанням, від результатів моделювання процесу проїзду перехрестя в середовищі VISSIM. Встановлено, що розбіжності між цими результатами рівномірно розподілені в околі нуля і не перевищують

200 авт./год (10 % від розрахованих значень), що вказує на адекватність моделі. Коефіцієнт детермінації для запропонованої моделі становить $R^2 = 0,968$.

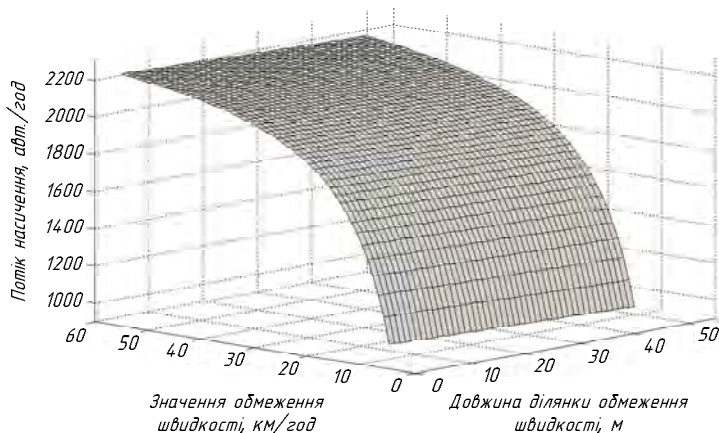


Рис. 2.11. Залежність потоку насичення від обмеження швидкості та довжини ділянки обмеження

Отриману залежність ПН від швидкості проїзду перехрестя та довжини ділянки її обмеження можна застосовувати лише для наявних перехресть. Однак порівняно з відомими методами розрахунку вона є зручнішою, оскільки вимагає визначення лише двох параметрів. Крім цього, залежність неявно враховує вплив таких чинників, як геометрично-планувальні характеристики перехрестя, умови руху та регулювання, а також структуру ТП та технічний стан ТЗ.

Розділ 3

УДОСКОНАЛЕННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ РЕГУЛЬОВАНИХ ПЕРЕХРЕСТЬ

3.1. Особливості управління рухом на регульованих перехрестях

З прийнятою схемою методології управління дорожнім рухом у містах взаємодію між дорожніми умовами та транспортними потоками розглядають як кібернетичну систему [136]. Ефективність управління дорожнім рухом розглядають з позиції забезпечення необхідної пропускної здатності ВДМ, оптимізації її за мінімумом дорожньо-транспортних витрат, за показниками безпеки руху та швидкості руху. Наприклад, система «транспортний потік – автомобіль – перехрестя», у якій основними елементами є перехрестя, транспортний потік та автомобіль (рис. 3.1).

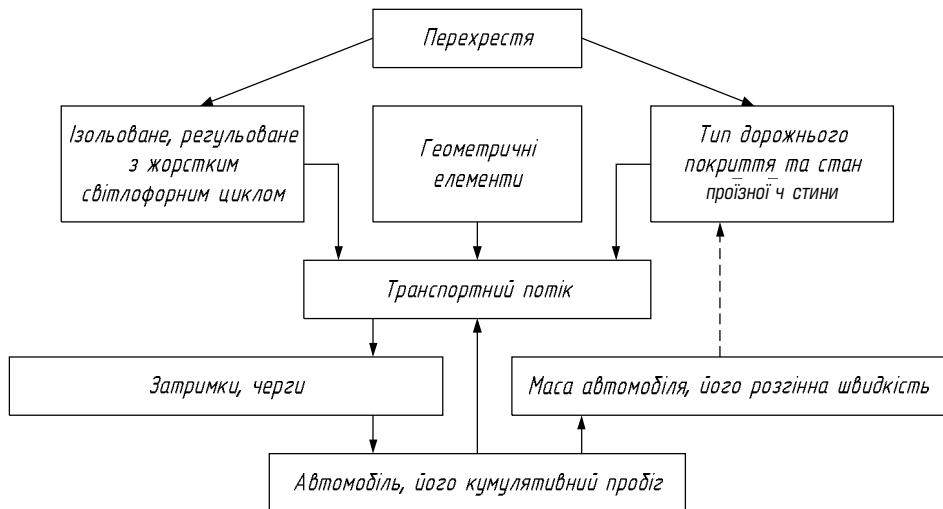


Рис. 3.1. Система «транспортний потік – автомобіль – перехрестя»

Є низка публікацій [17, 52, 60, 63, 68, 97], які не повністю розкривають суть управління дорожнім рухом. На це звертає увагу *В. Г. Живогляд* [58].

Управління дорожнім рухом, як відомо, надзвичайно складний процес, тим більше, якщо йдеться про управління транспортними потоками у великих містах. Найбільш проблематичною і до кінця не вирішеною є проблема управління проїздом інтенсивних транспортних потоків через регульовані перехрестя. Сьогодні існує низка наукових публікацій [16, 23, 73, 105, 117 та інші], а також відповідних програмних продуктів (*VISSIM, PARAMICS, AIMSUN, SISTM, SIDRA, FLEXSYT, DRACULA* та інші), з використанням яких намагаються оптимізувати цей процес.

Якщо узагальнити сказане, то може йтися про формування сьогодні методології дослідження проїзду ТП через регульовані перехрестя. Основу її становлять експериментальні натурні дослідження та їхні результати щодо структур потоків, інтенсивностей проїзду перехресть, затримок перед перехрестями та довжин черг, для різних типів (за геометрією та рядністю) перехресть. Майже в усіх дослідженнях, де використовують різні математичні моделі та програмні продукти, витримують цю основу. Якщо цю основу беруть за відправну точку, то наступним у методології дослідження вибирають (з урахуванням фізичної суті) відповідний математичний апарат, який адекватно відображає особливості його функціонування.

З розвитком комп'ютерної техніки і програмних продуктів для визначення основних параметрів проїзду перехресть, стало можливим швидко отримати їх, з урахуванням впливу на проїзд перехресть найрізноманітніших чинників, зокрема і тих, діапазон числових значень яких зібрано натурними дослідженнями. Отримані результати моделювання дають змогу обґрунтувати тривалості світлофорних циклів за такими критеріями: мінімізація затримок перед перехрестям, обмеження довжини черги, потік насичення, екологічні показники в зоні перехрестя.

Заслужують на увагу, з цього приводу, роботи [73, 105]. Як цільову функцію у задачі оптимізації проїзду регульованих перехресть *О. Є. Колесніков* обґрунтував функціонал [73, 105]:

$$\begin{aligned}
 F = & \sum_{(i,j) \in M} Z_{ij} \{ \Delta t_{0,i}, \Delta t_{0,j}, (T, t_{жс}, t_3)_i, (T, t_{жс}, t_3)_j, l_{ij}, V_{ij}, P_{ij} \} + \\
 & + \sum_{(k,j) \in M} R_{kj} \{ \Delta t_{0,k}, \Delta t_{0,j}, (T, t_{жс}, t_3)_k, (T, t_{жс}, t_3)_j, l_{kj}, V_{kj}, P_{kj} \},
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

де Z_{ij} і R_{kj} – сумарні затримки ТЗ за один цикл регулювання на прогоні з відстанню l_{ij} у прямому напрямку, а l_{kj} у зворотному напрямку, с; $\Delta t_{0,m}$ – зсув циклу регулювання кожного світлофора, стосовно обраного нульового (початкового), $\{0 \leq \Delta t_{0,m} < T\}$, с; T_u – тривалість циклу регулювання, с; $t_{жс}$, $t_з$ – тривалість фаз жовтого та зеленого сигналів відповідно, с; V – обмеження швидкості або рекомендована швидкість руху ТЗ, км/год; P – кількість смуг для руху транспорту; M – множина номерів світлофорних об'єктів на магістралі.

Використаний функціонал є багатоекстремальним з нечутливістю до змін параметрів управління [105]. У зв'язку з цим автор застосував метод *Монте–Карло* та генетичні алгоритми, з використанням яких отримав адекватніші (порівняно з традиційними методами) результати в управлінні транспортними потоками, які проїжджають регульоване перехрестя.

У пізнішій своїй роботі [74] *О. Є. Колесніков* враховує випадковий характер формування ТП та технічні характеристики ТЗ і визначає швидкість, час та розташування першого автомобіля після вмикання зеленого сигналу. Проїзд автомобілів через перехрестя враховує і безпечну відстань між ними. На підставі цих моделей визначено раціональну тривалість фаз світлофорного регулювання.

Розрахунок локальних режимів світлофорної сигналізації за пофазного принципу управління містить визначення структури світлофорного циклу (введення напрямків у фази регулювання і встановлення порядку чергування фаз) та розрахунок тривалостей елементів світлофорного циклу (основних тактів і перехідних інтервалів).

Визначення тривалості циклу та основних тактів регулювання основане на порівнянні фактичної інтенсивності руху на підходах до перехрестя й пропускної здатності (потоків насичення) цих підходів. Тому ці параметри потрібно розглядати як основні початкові дані у розрахунках тривалості циклу та його елементів. Послідовність розрахунків наведено на рис. 3.2.

Основні принципи пофазного роз'їзду ТЗ на перехресті [76]:

- 1) прагнути до мінімальної кількості фаз у циклі регулювання;
- 2) враховувати, що допускають сполучати в одній фазі лівоповоротний потік, що конфліктує з визначальним зустрічним потоком прямого напрямку, якщо інтенсивність лівоповоротного потоку не перевищує 120 авт./год;

3) забезпечувати безконфліктне пропускання пішоходів; у крайньому разі пішохідний і конфліктні з ними ТП, що повертають, можна пропускати в одній фазі, якщо інтенсивність пішохідного потоку не перевищує 900 ос./год, а ТП, що повертають, – не перевищує 120 авт./год;

4) не випускати з тієї самої смуги ТЗ, рух яких передбачено в різних фазах, тобто смуги руху закріплюють за певними фазами;

5) прагнути до рівномірного завантаження смуг. Інтенсивність руху, яка припадає на одну смугу, не повинна перевищувати 700 од/год;

6) за наявності острівців безпеки або розділювальної смуги варто розглядати можливість поетапного переходу пішоходами вулиці упродовж двох наступних одна за одною фаз регулювання.

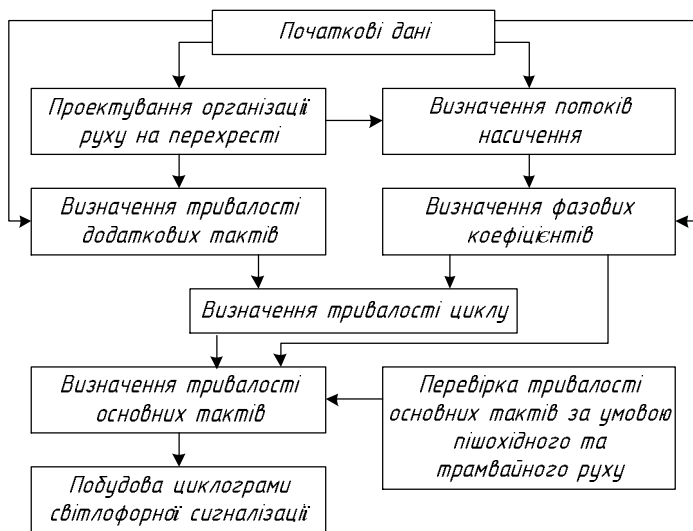


Рис. 3.2. Послідовність розрахунку тривалості світлофорного циклу та його елементів

Основний такт є частиною циклу регулювання та пропорційний до фазового коефіцієнта, розрахункове значення якого відповідає максимальному відношенню інтенсивності ТП до потоку насичення для різних підходів до перехрестя в заданій фазі. Перехідний інтервал, з огляду на його призначення, залежить від довжини ТЗ і визначається планувальною характеристикою перехрестя та швидкістю його руху у зоні перехрестя. Дані про перехідні

інтервали і розрахункові фазові коефіцієнти покладено в основу розрахунку тривалості циклу регулювання, що її можна скоригувати з урахуванням вимог пішохідного або трамвайного руху. Завершальним етапом методики обґрунтування оптимальної тривалості світлофорного циклу є побудова циклограми світлофорної сигналізації, на якій відображено тривалості та послідовність чергування сигналів.

Однак окремі процедурні моменти під час застосування цієї методики не чітко визначені, внаслідок чого виникають практичні проблеми, зокрема на етапі визначення структури циклу світлофорного регулювання. Наприклад, *П. А. Полозенко* у своїй роботі [114] визначає декілька принципів, які можна застосувати під час визначення структури циклу світлофорного регулювання. За числовими експериментами виявлено, що за певних умов, які визначають способом розрахунку додаткових тактів (перехідних інтервалів) циклу світлофорного регулювання (СФР), параметр його режиму – втрачений у циклі час (L) залежить не лише від загальної кількості фаз (тактів), а й від черговості цих фаз (тактів) у циклі. Так, у разі врахування тривалості руху ТЗ до найдалшої конфліктної точки (НКТ) перетинання в кожному з додаткових тактів величина L змінюється на 15–20 % залежно від загальної кількості фаз регулювання та їхньої черговості.

Дослідники довели [114], що:

- існує оптимальна черговість фаз, за якої значення втраченого часу у циклі регулювання є мінімальним;
- у разі збільшення кількості фаз i , як наслідок – кількості варіантів черговості фаз, діапазон $DL = L_{max} - L_{min}$ збільшується;
- втрачений час досягає свого мінімального значення за черговості фаз, за якої сума відстаней до НКТ мінімальна.

Останнє твердження можна, однак, заперечити на такому прикладі. Нехай напрямки 1 та 2 конфліктні між собою та неконфліктні лише з напрямком 3 (рис. 3.3). Тривалість дозвільного сигналу за напрямком 3 ($t_{зел3}$) значно більша, ніж за напрямками 1 та 2 ($t_{зел1}$ та $t_{зел2}$). Якщо мінімальний проміжок часу між напрямками 1 та 2 ($t_{пр1-2}$) менший від різниці тривалості напрямку 3 та суми тривалостей напрямків 1 та 2, то його тривалість не впливає на оптимальну тривалість циклу регулювання.

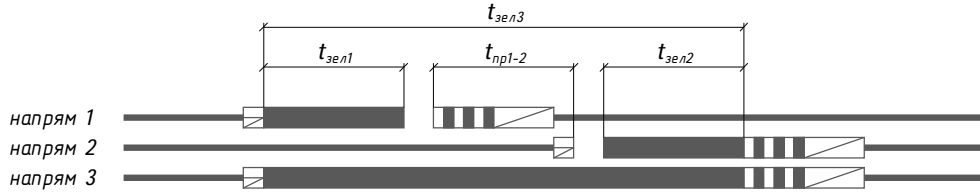


Рис. 3.3. Фрагмент структури циклу світлофорного регулювання

Умову оптимізації режиму СФР за критерієм мінімізації втраченого часу у циклі регулювання записують як [114]

$$L(P_m) = \min, \quad (3.2)$$

$$P_m = (m - 1)! \quad (3.3)$$

де m – кількість можливих варіантів черговості та сигнальних фаз регулювання за обмежень:

$$2 < m < m_{max}. \quad (3.4)$$

Вираз для визначення втраченого часу у циклі має вигляд

$$L = \sum_{i=1}^m (t_{ni} - 1), \quad (3.5)$$

де t_{ni} – значення тривалостей додаткових тактів (перехідних інтервалів) для відповідних основних тактів, що беруть участь у циклі регулювання, с.

Своєю чергою, тривалості додаткових тактів (перехідних інтервалів) t_{ni} є функціями параметрів транспортних потоків і дорожніх умов:

$$t_{ni} = \delta + \frac{V}{2d} + \frac{(l_a + l'_{HKT})}{V} - \left(\frac{2l''_{HKT}}{a} + 3 \right)^2, \quad (3.6)$$

де d – тривалість реакції водія, с; V – швидкість ТП у напрямку перехрестя, м/с; d – комфортне уповільнення ТЗ, м/с²; l_a – довжина ТЗ, м; l'_{HKT} , l''_{HKT} – відповідно дистанції від стоп-лінії до найдальшої конфліктної точки у фазі, м; a – максимальне прискорення під час розгону ТЗ, м/с².

Це також накладає обмеження на вираз (3.2). Тому можна стверджувати, що умова оптимізації (3.2) виконується за відповідної черговості фаз (сигнальних груп), для якої:

$$\sum_{i=1}^m l_{HKTi} = \min. \quad (3.7)$$

Загалом визначення відстані до НКТ виконують експериментально у зв'язку з тим, що значення $l_{НКТi}$ залежить від траєкторії руху ТЗ. На траєкторію руху впливають геометричні параметри перехрестя: кут перетину доріг, ширина та кількість смуг руху. Для кожного перехрестя геометричні параметри є індивідуальними, й отримати аналітичні залежності для знаходження $l_{НКТi}$, які б охоплювали всі види перехресть міста, надто трудомістке завдання. Проте сучасні комп'ютерні графічні технології дають змогу моделювати траєкторії руху ТП і визначати $l_{НКТi}$, а $l_{НКТi}$, а сучасні технології програмування контролерів світлофорних об'єктів (наприклад, LISA+) – одразу розраховувати тривалість перехідних інтервалів.

Зауважимо, що у формулі (2.6) не враховано можливість введення до одного напрямку регулювання прямих та поворотних траєкторій руху ТЗ. Під час руху ТП поворотними траєкторіями швидкість їх зменшується на 30 %, але не нижче ніж 30 км/год. Тому лінійний зв'язок між зменшенням відстаней до НКТ та тривалостей перехідних інтервалів можна не сприймати. Крім того, в разі зміни порядку чергування сигнальних груп за рахунок зміни втраченого часу відбувається зміна тривалостей дозвільних сигналів, яка накладається на нову структуру перехідних інтервалів, утворюючи рекурсивну залежність.

У [87] йдеться, що в оптимізації структури циклу за критерієм мінімізації втраченого часу потрібно розглядати лише певні перехідні інтервали з усіх можливих комбінацій напрямків світлофорного регулювання. Наведено означення поняття *критичного перехідного інтервалу* як такого, що утворився для відліку часу, необхідного для роз'їзду ТЗ з критичних конфліктних напрямків регулювання. Критичними напрямками названо конфліктні напрямки, додання яких ТЗ буде досягнуто через найменший проміжок часу після увімкнення дозвільного сигналу у наступній фазі регулювання. Вказано також, що оптимальною з погляду втраченого часу є послідовність чергування фаз, за якою критичні перехідні інтервали є найкоротшими за тривалістю.

До недоліків у цьому можна зарахувати те, що визначення критичних перехідних інтервалів відбувається за методом перебору можливих послідовностей вже сформованих фаз регулювання. У разі значної кількості напрямків і фаз кількість варіантів збільшується (див. формулу 3.63), тому на перебір витрачають багато часу. Крім цього, не враховано, що на складних перехрестях існує декілька варіантів введення напрямків регулювання до фаз. Залежно від вибору цих варіантів змінюються пари критичних напрямків, що, своєю чергою, змінює тривалість критичних перехідних інтервалів.

У [119] зазначено, що наявна матрична модель конфліктів між напрямками світлофорного регулювання у циклі достатньо адаптована лише для жорсткого регулювання за обмеженої кількості напрямків у циклі. Проте в реальних умовах кількість напрямків регулювання визначається для перехрестя одноразово і не змінюється залежно від режимів регулювання, оскільки цю кількість визначають наявність та розташування світлофорів на перехресті. Можна припустити, що в деяких режимах СФР певні напрямки змінюватимуть сигнали одночасно (тобто належатимуть до однієї сигнальної групи), проте за рахунок цього розрахункова кількість напрямків може лише зменшуватися. Очевидно, що ця кількість не може перевищити кількість смуг на всіх підходах до перехрестя, оскільки для кожного напрямку регулювання повинна виділятися як мінімум хоча б одна смуга [129]. Запропоновано також практичний та наочний метод подання конфліктності напрямків регулювання за допомогою графа, що відкриває можливість застосування елементів теорії графів для розв'язання сформульованої задачі. В її умові сформульовано критерій – мінімізувати кількість поділу початкової множини напрямків на групи (мінімізація кількості фаз світлофорного регулювання) та визначити послідовність руху ТЗ у зазначених напрямках.

Щодо наведеної аналогії між сигнальними групами та фазами регулювання, таке застосування може бути припустимим лише під час визначення кількості розбивок початкової множини. В оптимізації порядку зміни напрямків руху у циклі, що сформований за принципом сигнальних груп, потрібно враховувати співвідношення між тривалостями дозвільних сигналів кожного напрямку та мінімальними часовими проміжками від завершення дозвільного сигналу за одним із конфліктних напрямків до його початку за іншим з напрямків.

Для поділу напрямків регулювання на неконфліктні групи пропонують [78] використати модифікований «жадібний» алгоритм розфарбування графу. Підмножини, зафарбовані одним кольором, насправді відповідають групам неконфліктних напрямків регулювання, тобто їх можна зарахувати до однієї фази.

У статті [39] розроблено підхід до розв'язування задачі пошуку максимального повного підграфа в графі. Сама задача, як відомо, є NP-повною, тобто загалом отримати розв'язок можливо лише перебиранням усіх варіантів. Запропоновані алгоритми дають змогу отримати кількість підграфів, наближену до оптимальної, у такому разі кожен підграф характеризуватиметься максимально високою для початкових умов потужністю.

Проблема підвищення ефективності СФР загострюється і за кордоном. Встановлено [138], що високі темпи розвитку АСУДР передбачають системи управління рухом, що містять також програмно-апаратні комплекси для забезпечення одно- та двосмугового реверсивного руху зі зміною напрямків пропускання транспорту та кількості задіяних смуг залежно від дорожніх умов та інтенсивності руху. Застосовують також практику переведення двосмугових та трисмугових вулиць у режим одностороннього руху зі зміною напрямку руху протягом доби залежно від дорожніх умов.

Завдання оптимізації режиму роботи світлофорного об'єкта навіть на локальному рівні є багатокомпонентним, що підтверджується у [53]. Розрахунок керуючих впливів на локальному перехресті є багатостадійним і містить у собі такі підзавдання: розрахунок перехідних інтервалів; об'єднання напрямків у фази; розрахунок тривалостей сигналів, що дозволяють і забороняють рух; формування циклу управління (стикування, що дозволяють і забороняють рух, перехідних інтервалів). Тут [53] вказують, що оперативність роботи АСУДР забезпечується: зміною тривалості дозвільного сигналу на основі даних про рух (переважно в системах використовують алгоритм пошуку розриву у потоці); збільшенням тривалості дозвільного сигналу з урахуванням інтересів громадського транспорту; збільшенням тривалості дозвільного сигналу для пішоходів (якщо від них надходить відповідний запит).

Зазначимо, що в умовах координованого регулювання алгоритм пошуку розриву може існувати лише протягом проміжків часу у циклі регулювання, через які не проходить рядок безперервного часу, а також потужні потоки позагрупових ТЗ. Крім того, всі перераховані дії спрямовуються лише на тривалості дозвільних і заборонних сигналів, оминаючи структуру циклу регулювання. Водночас тривалості перехідних інтервалів на перехрестях з багатосмуговим рухом досягають мінімальних значень тривалостей основних тактів регулювання. І ще – порядок чергування дозвільних сигналів впливає на графік координованого регулювання. Тому можна зробити висновок, що оптимізація СФР повинна супроводжуватися паралельною оптимізацією структури циклу.

Наведені недоліки у формулюванні задач оперативного регулювання дорожнього руху на перехресті у роботі [53] відображаються і у математичних моделях для АСУДР. Зокрема не розв'язується задача оптимального розподілу напрямків регулювання між фазами, визначення фазових коефіцієнтів з

урахуванням розділення інтенсивностей руху між частинами дозвільних сигналів, увімкнених у різні фази, та перехідними інтервалами цих фаз.

I. П. Енглезі зазначає [31], що одним із напрямків оперативного регулювання дорожнього руху на перехресті є врахування пріоритетів ТЗГК. Це питання розвивають у роботі [181]. Зокрема, коли ідеться про систему автобусного пріоритетного сигналу (АПС), що була впроваджена в багатьох містах. Більшість систем АПС не працюють ефективно під час руху автобусів в мережі з близько розташованими зупинками через невизначеність у реальному часі. Для більшості автобусних зупинок на магістральних вулицях США цей тип є характерним. Реальний час під'їзду до лінії регулювання від близько розташованих зупинок можна змоделувати із застосуванням методу найменших квадратів. Важливішим є те, що розраховано інтервали передбачення, які пов'язані з оцінюванням реального часу і спрямовувалися на зменшення негативних ефектів близько розташованих автобусних зупинок на операції АПС.

Мета АПС полягає в тому, щоб зменшити затримки автобусів на регульованих перехрестях. Одна з цілей у виборі тривалості транспортного сигналу полягає у мінімізації повної затримки усіх ТЗ на перехресті. Однак визначення пріоритету у русі з метою зменшення сумарних затримок учасників дорожнього руху буде ефективнішим, якщо враховувати завантаження ТЗ пасажирями. Системи АПС класифікують за трьома стратегіями: пасивною, активною та адаптивно-оперативною. 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 належать до пріоритетних. Адаптивно-оперативна стратегія забезпечує пріоритет, одночасно випробовуючи та оптимізуючи задані критерії роботи.

Оскільки вибір тривалості сигналу пристосований для магістральної координації автобусного потоку, рух на другорядних вулицях може зазнавати небажаної затримки та зупинки. Пасивні стратегії АПС загалом спричиняють непродуктивні затримки у русі на другорядних напрямках через пріоритетне пропускання автобусів у кожному циклі, незалежно від того, чи вони наявні. Розрізняють такі різновиди пасивних стратегій пріоритету:

- регулювання тривалості циклу (за певних обставин зменшення тривалості циклу для ТЗ, які рухаються транзитом, призводить до того, що вони обслуговуються частіше, зменшуючи затримку);

- розщеплення фаз (розщеплення фази пріоритету на багатократні фази, що можна увімкнути кілька разів упродовж кожного циклу, не зменшуючи його тривалість);
- збільшення тривалості фази (збільшення тривалості зеленого сигналу для напрямку, який призначений для транзитного руху ТЗ збільшує імовірність; транзитні ТЗ проїдуть лінію регулювання без зупинки);
- вимірювання кількості транспортних засобів (обмежує кількість ТЗ, яку дозволено в системі, водночас це забезпечує перевагу для автобусів, дозволяючи їм проїхати у відведену дозвільним сигналом тривалість).

Активні стратегії АПС ефективніші від пасивних тому, що пріоритет надається тільки за наявності автобуса. Ці стратегії вимагають: а) пристроїв виявлення, що можуть визначати автобуси, які наближаються на попередньому за напрямком руху перехресті; б) сучасних дорожніх контролерів, щоб активізувати стратегії пріоритету для надання пріоритету.

Активні стратегії за допомогою контролера можуть виявляти автобуси і, у такий спосіб: збільшувати тривалість зеленого сигналу в поточній фазі (зелена стратегія); завершувати іншу фазу раніше, щоб дати ранній старт автобусу (рання зелена стратегія); робити вставку додаткової автобусної фази (стратегія вставки), що дозволить йому проходити раніше, ніж відбудеться повернення до регулярного вибору тривалостей.

Якщо автобус наближається до перехрестя незадовго до завершення дозвільного сигналу, його тривалість відповідно до зеленої стратегії збільшення тривалості зеленої фази можна збільшити, поки автобус не покине перехрестя. Без збільшення тривалості сигналу йому довелося б чекати можливості проїзду перехрестя в наступному циклі, в такий спосіб збільшувалася б його затримка.

Коли автобус виявлено під час горіння заборонного сигналу, непріоритетна фаза відповідно до ранньої зеленої стратегії скорочується на вимогу прискорити стартову фазу для руху автобусів. Якщо ж він досягне стоп-лінії незадовго до завершення горіння червоного сигналу, поточна фаза може бути закінчена швидше, щоб якнайраніше увімкнути дозвільний сигнал для автобуса.

За стратегією вставки фази надається спеціальна фаза, коли автобус виявлено на попередньому за рухом перехресті. Якщо автобус доїде 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.

Активна стратегія АПС для великої інтенсивності ТП показує, що контроль часто досягається резервуванням нормального режиму в контролерах. Це, однак, може зумовити руйнування системи, якщо вона працює в координованому режимі. Описане дослідження вказує на потребу зміни структури циклу у разі застосування активних стратегій у системах пріоритетного пропускання маршрутних автобусів. Сигнал про наближення до лінії регулювання ТЗГК може надійти у будь-який момент, тому прийняття рішення про зміну структури циклу повинно бути автоматизованим.

Окрім зазначених вище параметрів, потрібно також визначати тип ТЗ, що наближається, та напрямок його руху. За цих умов електротранспорт істотно відрізняється від інших, призначених для громадського користування. Тролейбуси та трамваї мають меншу технічну швидкість поблизу перехрестя та на перехрестях, що пов'язано із необхідністю проходження кривих ділянок колії і контактного дроту, стрілок, секційних роз'єднувачів та інших спеціальних частин старого зразка (сучасні спеціальні частини допускають рух зі швидкістю 40–50 км/год). Таке зменшення швидкості з урахуванням також значних габаритів цих ТЗ (особливо в разі застосування зчленованих троллейбусів і трамваїв) призводить до необхідності збільшення тривалостей елементів циклу, призначених для їх пропускання. Тому важливим завданням є виявлення таких ТЗ на підходах до перехрестя, визначення заздалегідь напрямків їх подальшого руху та забезпечення пріоритетного пропускання, зважаючи на їх високу пасажиромісткість.

За наявності на перехресті пішохідних напрямків світлофорного регулювання вони також впливають на параметри світлофорного циклу, оскільки тривалість, яку відводять для проходу проїзної частини пішоходами розраховують з інших міркувань, ніж ті, на основі яких встановлюють значення тривалостей дозвільних сигналів для руху ТЗ.

Невідповідність тривалостей ввімкнених в одній фазі дозвільних сигналів для ТЗ та для пішоходів призводить до потреби виконання корекції тривалостей елементів циклу світлофорного регулювання [172, 178, 191]. Вона проводиться трьома способами [76]: збільшенням тривалості певного елемента циклу регулювання; збільшенням тривалості групи елементів циклу регулювання; визначенням 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 упродовж фази регулювання, що є вимогою державного стандарту [13]. Недолік цього способу: у разі наявності

широкої проїзної частини з однобічним рухом тривалість мінімального часового проміжку для пішохідного напрямку може перевищувати нормативне значення, а також ставати визначальною у розрахунку тривалості перехідного інтервалу. Крім цього: не враховується тривалість входження 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 горіння червоного сигналу в кінці перехідного інтервалу.

Під час застосування другого способу корекції тривалості всіх основних тактів регулювання збільшуються пропорційно так, щоб тривалість коригованого основного такту забезпечувала необхідний мінімум тривалості для пішоходів. Недоліком цього способу є те, що за значної відмінності визначених для пропускання ТЗ тривалостей основних тактів регулювання і під час ввімкнення пішохідного напрямку зі значною шириною ПЧ у фазі, для якої розраховану невелику тривалість основного такту відповідно до транспортного завантаження, значення основного такту іншої фази змінюється після проведення корекції. Оскільки корекція тривалостей основних тактів регулювання відбувається способом їх пропорційного збільшення, то після її виконання сумарна тривалість скоригованих тактів може перевищити 120 с.

Під час проведення корекції пошуком нових співвідношень (третьій спосіб) розв'язують систему рівнянь [76]:

$$\begin{cases} T_u^* = (1,5T_n + 5) / [1 - (y + y^*)] \\ T_o^* = [(T_u - T_n) y^*] / (y + y^*) \end{cases}, \quad (3.8)$$

де T_u та T_u^* – тривалість циклу регулювання до та після корекції відповідно, с; y та y^* – суми максимальних фазових коефіцієнтів фаз, у 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:

$$T_u^* = B / 2A + \sqrt{B^2 / (4A^2) - C / A}. \quad (3.9)$$

Принцип такого підходу полягає у розрахунку нового фазового коефіцієнту для фази, у якій ввімкнено пішохідний напрямок регулювання, і щоб його значення відповідало збільшеній за рахунок дозвільного сигналу для пішоходів тривалості основного такту СФР. Недоліком є те, що процедура визначення коригованих фазових коефіцієнтів еквівалентна до введення псевдонапрямку регулювання з рівнем завантаження рухом, що відповідає мінімальній тривалості зеленого сигналу для пішоходів.

3.2. Оцінювання роботи регульованого перехрестя з використанням імітаційного моделювання

Одним з основних етапів у дослідженні транспортних систем за допомогою імітаційного моделювання є створення імітаційної моделі. З цією метою можна використовувати як універсальне, так і спеціалізоване програмне забезпечення. У першому модель є програмою, записаною з використанням операторів присвоєння, умови, циклу, а змінити умови моделювання можна, лише змінивши текст програми. У спеціалізованому програмному забезпеченні користувачу легко змінювати умови моделювання, а також закладено можливість візуалізації роботи транспортної системи.

Незважаючи на переваги спеціалізованого програмного забезпечення, воно часто не дає змоги перевіряти складні алгоритми адаптивного керування рухом. Тому для створення імітаційної моделі роботи регульованого перехрестя обрано середовище MATLAB.

Оскільки інтервал між подіями у системі (прибуття автомобіля до перехрестя, виїзд з черги, проїзд перехрестя, перемикання сигналів світлофора) є дуже малим, тому для моделі роботи регульованого перехрестя обрано алгоритм із детермінованим кроком. Важливе значення при цьому має приріст часу Δt , який повинен бути достатньо малим для підвищення точності результатів, і щоб дві неодноразові події не потрапили в той самий часовий інтервал та не створили хибного враження про їх одночасність [48]. З іншого боку, він не повинен бути занадто малим, оскільки в цьому разі потрібні значні апаратні ресурси. Зважаючи на сказане, у створеній моделі прийнято $\Delta t = 0,1$ с.

Блок-схему запропонованого алгоритму моделювання роботи перехрестя протягом години для одного підходу перехрестя наведено на рис. 3.4. За більшої кількості підходів алгоритм доповнюється відповідною кількістю

блоків проїзду ТЗ перехрестя на дозвільний сигнал (рис. 3.5), блоками проїзду ТЗ перехрестя, що є на ньому в момент ввімкнення жовтого сигналу (рис. 3.6), та блоками моделювання розподілу транспортних засобів за напрямками руху та формування черг (рис. 3.7), а також умовними операторами настання моменту ввімкнення дозвільного або заборонного сигналу.

Робота перехрестя імітується протягом однієї години (одна імітація). Результатом є кількість ТЗ, що проїхали в кожному з дозволених напрямків руху; середня та максимальна довжини черг ТЗ на напрямках прибуття.

Випадковість у моделі реалізується за нерівномірного прибуття ТЗ до перехрестя, тобто через випадкові часові інтервали між ними. У спрощеному випадку інтервали між ТЗ описують за рівномірним законом розподілу [52], щільність розподілу якого є постійною в певному інтервалі та дорівнює нулю за межами цього інтервалу. Часто інтервали між ТЗ описують за експоненційним законом. Він є зручною моделлю для опису часових інтервалів між послідовними ТЗ у малоінтенсивному ТП [52]. Однак за значної інтенсивності значення інтервалів, визначені за цим розподілом, відрізняються від реальних. Кожен автомобіль має певну довжину, тому інтервали між послідовними ТЗ не можуть бути безмежно малими, як це передбачає експоненційний розподіл. Для отримання точніших результатів можна використовувати зміщений експоненційний розподіл або гамма-розподіл [52, 183].

Одним із спрощень моделі є те, що під час руху ТЗ вважають, що він зупиняється та набуває швидкості руху миттєво. Якщо ТЗ виїхав на перехрестя в момент ввімкнення жовтого сигналу, то він завершує проїзд перехрестя. Вказане спрощення призводить до того, що максимального значення черги в моделі досягають у момент ввімкнення дозвільного сигналу. В реальних умовах за час початку руху перших ТЗ з черги в її хвіст прибувають ще кілька ТЗ. У момент початку руху останнього автомобіля з черги, що була в момент ввімкнення дозвільного сигналу, довжина черги на підході до перехрестя є меншою, ніж максимальна, але протяжність черги (в автомобілях чи метрах) є більшою. Тому отримане значення максимальної довжини черги можна використовувати для оцінки ефективності алгоритму керування, а не для оцінки довжини смуги руху, необхідної для накопичення черги.

В алгоритмі не враховано склад ТП, а також пішохідний рух через перехрестя (вважають, що пішоходам достатньо часу для переходу проїзної частини за тривалість горіння дозвільного сигналу відповідної фази).

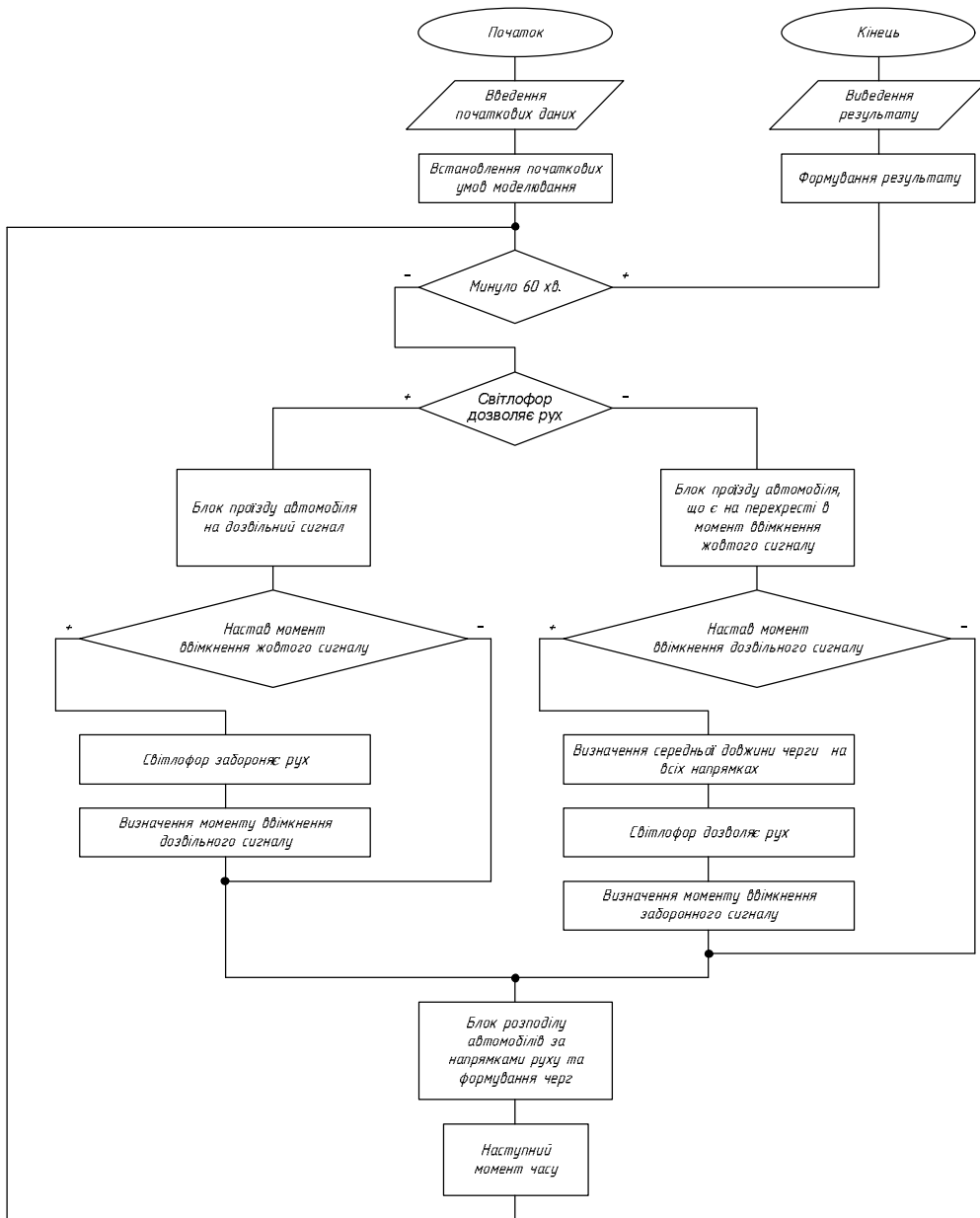


Рис. 3.4. Блок-схема алгоритму моделювання роботи регульованого перехрестя (для одного підходу)

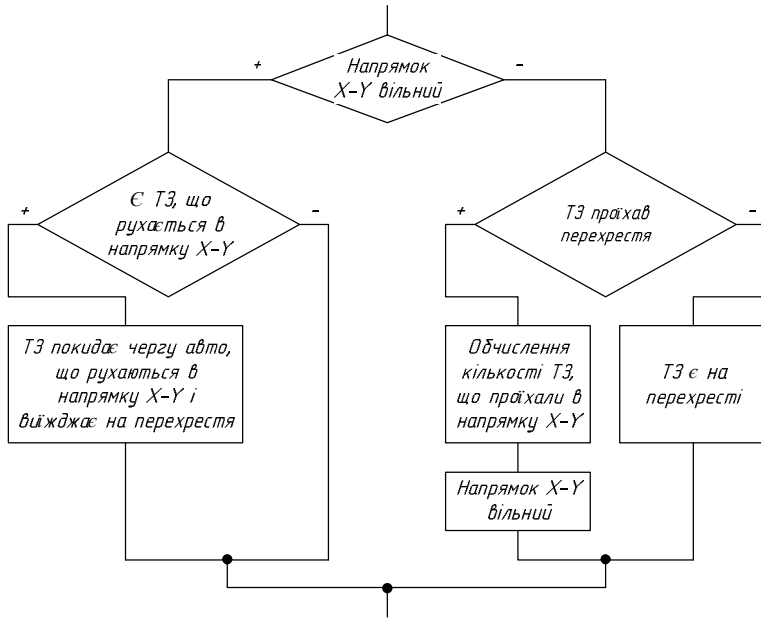


Рис. 3.5. Блок-схема блоку проїзду автомобілем перехрестя на дозвільний сигнал (див. рис. 3.4)

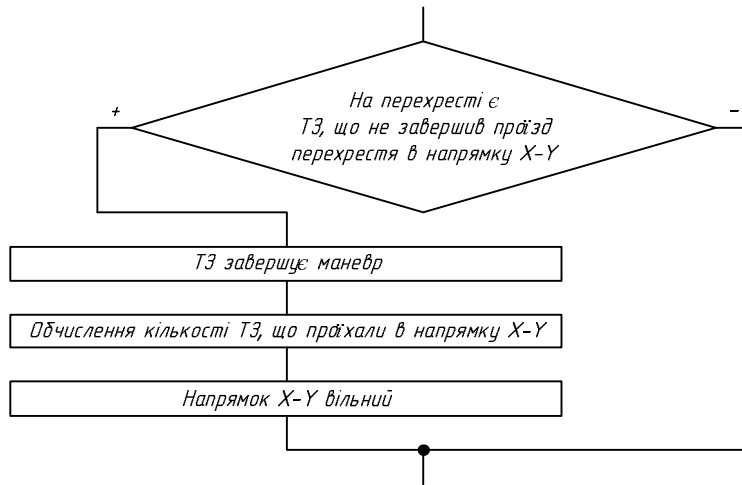


Рис. 3.6. Блок-схема блоку проїзду автомобілем перехрестя, що є на ньому в момент ввімкнення жовтого сигналу (див. рис. 3.4)

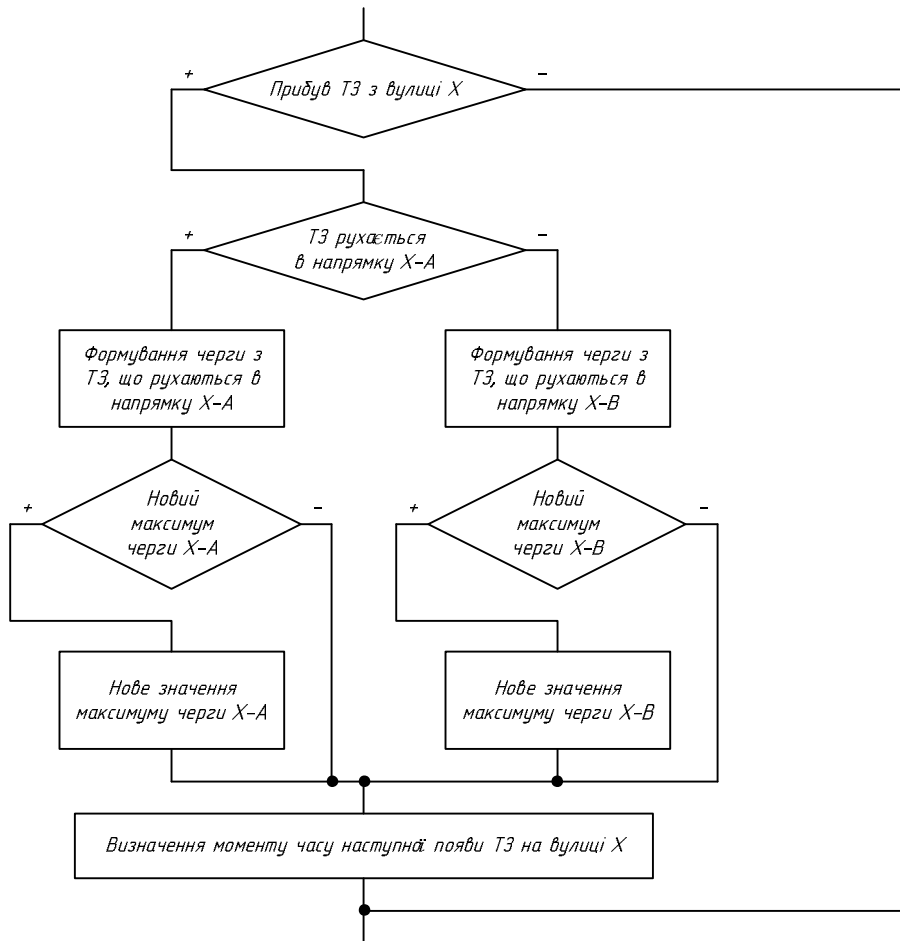


Рис. 3.7. Блок-схема блоку розподілу ТЗ за напрямками руху (дві смуги руху) та формування черг (див. рис. 3.4)

Для усереднення результатів моделювання використано ще одну функцію, яка виконує k імітацій роботи перехрестя протягом години. Блок-схему алгоритму проведення k імітацій роботи перехрестя протягом години (для одного підходу перехрестя) наведено на рис. 3.8. Початковим параметром є кількість імітувань. Результатом виклику функції є кількість ТЗ, що проїхали в кожному напрямку, середня та максимальна довжина черги ТЗ на підходах до перехрестя.

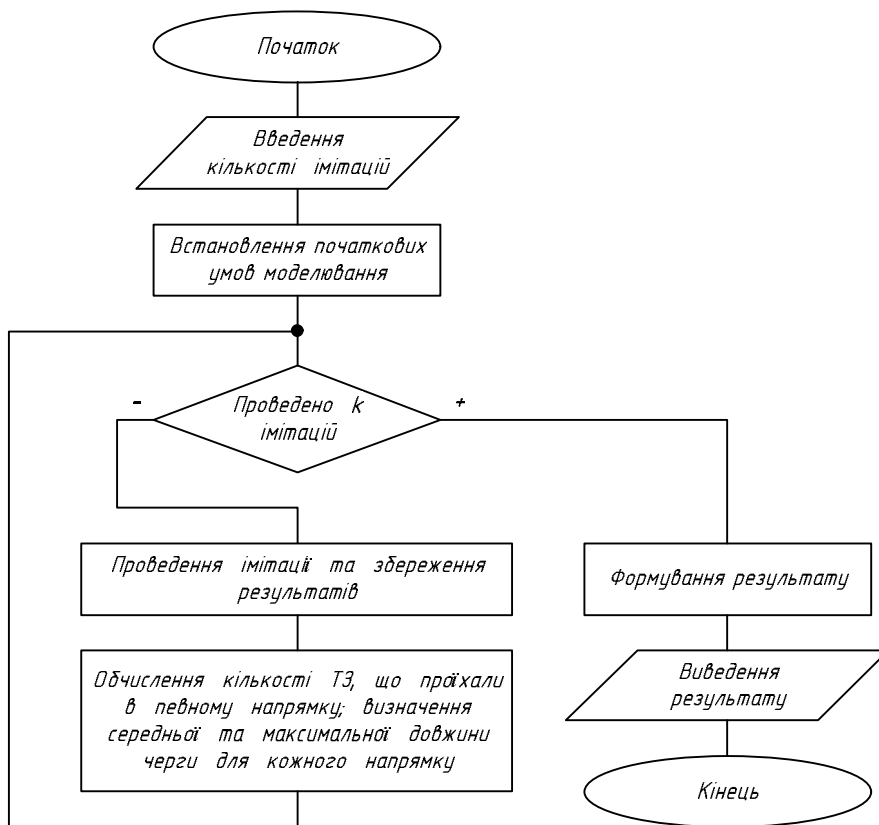


Рис. 3.8. Блок-схема алгоритму проведення k імітацій

Важливим етапом створення будь-якої імітаційної моделі є процес її верифікації (перевірки адекватності) [31]. Для моделі роботи регульованого перехрестя це можна виконати за методом натурних досліджень за роботою реального перехрестя та відтворення таких самих умов у моделі, або створення моделі реального перехрестя у спеціалізованому програмному продукті, адекватність якого підтверджена на практиці.

Для проведення натурних експериментів доцільно обирати нескладні перехрестя із добрим станом проїзної частини, чітко позначеними смугами та напрямками руху, з переважним рухом легкових автомобілів для того, щоб уникнути впливу додаткових чинників на швидкість проїзду перехрестя та інтенсивність потоку насичення (крім випадків, коли вплив цих чинників не є

метою розроблення імітаційної моделі). Дослідження виконуються у теплу погоду за сухого покриття, звертаючи увагу на справність роботи світлофора та відсутність ДТП.

Перевірити адекватність розробленої імітаційної моделі регульованого перехресті можна порівнянням результатів натурних досліджень на перехресті та результатів моделювання роботи цього перехрестя. Для перевірки адекватності імітаційної моделі обрано перехрестя вулиць Левицького, Тершаковців та Дороша (м. Львів).

Дослідження виконано для трьох розподілів часових інтервалів між автомобілями, що прибувають до перехрестя: рівномірний (відхилення ± 3 с), експоненційний та гамма-розподіл із параметром $k=2$. Для усереднення результатів проведено 100 імітацій роботи перехрестя протягом години для різних законів розподілу.

Крім моделі в середовищі MATLAB, створено модель функціонування цього самого перехрестя у програмному середовищі VISSIM (рис. 3.9) [101]. У цій моделі задавали геометричні параметри перехрестя, вхідну інтенсивність ТП та розподіл потоків за напрямками, що визначені під час натурних досліджень. Параметрами моделі також були кількість ТЗ, що проїжджають перехрестя у кожному напрямку, середня та максимальна довжина черги на кожній смузі. У середовищі VISSIM довжина черги вимірюється в метрах. Для отримання рівнозначної (із середовищем MATLAB) довжини черги в автомобілях її значення в метрах ділили не на довжину, а на середній динамічний габарит автомобіля, який визначають за формулою

$$L = l_a + l_b k_{cm}, \quad (3.10)$$

де l_a – середня довжина ТЗ (для 97 % легкових та 3 % вантажних автомобілів у моделі $l_a = 4,4$ м); l_b – відстань безпеки між зупиненими ТЗ (в моделі $l_b = 2,0$ м); k_{cm} – коефіцієнт, що враховує ущільнення ТП на регульованих перехрестях (в моделі $k_{cm} = 0,6$).

У такому разі $L = 4,4 + 2,0 \cdot 0,6 = 5,6$ м.

Оскільки кожен цикл моделювання є випадковим, для усереднення результатів виконано 25 імітацій функціонування перехрестя протягом години. Результати моделювання роботи перехрестя та натурального дослідження наведено у табл. 3.1 та табл. 3.2.



Рис. 3.9. Модель перехрестя у програмному середовищі VISSIM

Таблиця 3.1

Результати дослідження кількості автомобілів, які проїхали перехрестя

Тип дослідження		Кількість ТЗ, що проїхали перехрестя в напрямку, авт.			
		вул. Тершаковців	вул. Левицького (права смуга)	вул. Левицького (ліва смуга)	вул. Дороша
Натурне		250	280	360	200
Моделювання в MATLAB за законом розподілу	Рівномірного	244,94	276,94	349,76	197,10
	Експоненційного	242,54	273,84	350,06	197,86
	Гамма	241,94	265,36	347,70	196,82
Моделювання у VISSIM		246,48	274,72	355,12	202,52

Отримані результати показують (табл. 3.1), що кількість автомобілів, які проїхали перехрестя в кожному з напрямків, під час моделювання в MATLAB та VISSIM, а також під час натурального дослідження добре узгоджується (відхилення між ними не перевищує 6 %). Кількість ТЗ, які проїхали перехрестя, під час моделювання є меншою, ніж у натурному дослідженні. Це зумовлено тим, що моделювання роботи перехрестя розпочинається в момент повної відсутності ТЗ перед перехрестям, а завершується через годину після початку моделювання, а не у момент проїзду останнього ТЗ, який прибув до перехрестя протягом години.

Середня та максимальна довжини черги ТЗ під час натурних досліджень та моделювання у MATLAB і VISSIM відрізняються (див. табл. 3.2). Під час моделювання у MATLAB для гамма-розподілу інтервалів між автомобілями,

що прибувають до перехрестя, його результати найкраще узгоджуються з реальними даними [101]. Результати моделювання у VISSIM частково відрізняються від результатів натурних досліджень. У VISSIM середнє значення черги визначається на кожному кроці моделювання, враховуючи періоди горіння дозвільного сигналу (вбудований у програмне середовище механізм визначення середньої довжини черги), а у натурних дослідженнях та моделюванні у MATLAB – як середнє значення довжин черг, які утворювались перед перехрестям у момент ввімкнення дозвільного сигналу. Максимальна довжина черги ТЗ під час моделювання у VISSIM є більшою, ніж у натурних дослідженнях та моделюванні у MATLAB. Це пов'язано з тим, що під час визначення довжини черги у натурних дослідженнях та моделюванні у MATLAB враховувались лише ті ТЗ, які повністю зупинились перед стоп-лінією, а під час моделювання у VISSIM до черги долучались також ті ТЗ, швидкість яких була меншою ніж 5 км/год (вбудований у програмне середовище механізм визначення максимальної довжини черги).

Таблиця 3.2

Результати дослідження черги автомобілів

Смуга руху	Інтенсивність потоку прибуття, авт./год	Довжина черги, авт.									
		Натурне дослідження		Моделювання в MATLAB за закону розподілу						Моделювання у VISSIM	
				рівномірний		експоненційний		гамма-розподіл			
		сер.	макс.	сер.	макс.	сер.	макс.	сер.	макс.	сер.	макс.
вул. Левицького, права смуга	340	3,70	9	2,85	4	2,87	11	2,83	8	0,58	10,54
вул. Левицького, ліва смуга	420	3,77	9	3,48	5	3,50	11	3,47	9	0,72	11,61
вул. Тершаковців, права смуга	330	3,40	9	3,10	4	3,10	11	3,04	9	0,82	13,57

Отже, розроблена імітаційна модель роботи ізольованого регульованого перехрестя є адекватною та може використовуватись для дослідження роботи перехресть, які працюють у жорсткому чи адаптивному режимі регулювання.

3.3. Удосконалення нечіткого алгоритму керування рухом на регульованому перехресті

3.3.1. *Характеристика розробленого нечіткого алгоритму керування рухом.* У багатьох дослідженнях критерієм ефективності алгоритму керування є затримка ТЗ. Незважаючи на важливість цього параметра, він не є визначальним для розв'язування окремих задач транспорту (наприклад, затримка не може бути оцінкою величини затору на ВДМ). Іншим важливим параметром роботи перехрестя, який дає змогу оцінити завантаження мережі, є довжина черги ТЗ (максимальна та середня). У зв'язку з цим ми розробили нечіткий алгоритм керування рухом на регульованому перехресті, одним із вхідних параметрів у якому є довжина черги ТЗ. Іншою вхідною змінною є інтенсивність прибуття ТЗ до перехрестя на відповідному напрямку. Вихідною змінною обрано тривалість дозвільного сигналу, яку необхідно визначати на основі значень довжини черги та інтенсивності прибуття ТЗ до перехрестя.

Отже, лінгвістичними вхідними змінними моделі є інтенсивність прибуття ТЗ до перехрестя (інтенсивність ТП) та довжина черги ТЗ перед перехрестям; вихідною змінною – тривалість дозвільного сигналу світлофора.

Зважаючи на те, що довжина черги та інтенсивність ТП на перехресті можуть змінюватись у широких межах, доцільно використовувати не менш ніж три нечіткі змінні. З іншого боку, занадто велика їхня кількість може призвести до побудови суперечливої бази правил. Тому у дослідженні для інтенсивності ТП та довжини черги ТЗ введено чотири нечіткі змінні – *«мала»*, *«середня»* і *«велика»* та *«дуже велика»*.

Тривалість дозвільного сигналу також може змінюватись у широких межах, проте навіть незначна зміна його тривалості може призвести до зміни умов руху на перехресті. Тому доцільно обрати не менш ніж п'ять нечітких змінних – *«дуже короткий»*, *«короткий»*, *«середній»*, *«довгий»* і *«дуже довгий»*.

Інтенсивність ТП на підході до перехрестя упродовж доби змінюється в широких межах. Проте за значної інтенсивності на підході до перехрестя формується значна черга і виникає затор. До того ж уникнути його зміною режиму роботи світлофора без інфраструктурних змін часто неможливо. Тому у дослідженні під час формування функцій належності діапазон можливої

зміни інтенсивності прийнято в межах 0–1200 авт./год, черги – 0–30 авт. (з розрахунку на одну смугу руху). Тривалість дозвільного сигналу має мінімальне обмеження 7 с, а рекомендована максимальна тривалість світлофорного циклу становить 120 с (зазначення умов руху та режиму регулювання). Канадська методика з проектування і розрахунку регульованих перехресть [198] передбачає для простих перехресть (перехрестя з трьома та чотирма підходами з двофазним регулюванням) рекомендовану тривалість циклу 60–90 с. Зважаючи на це, у дослідженні під час формування функцій належності для тривалості дозвільного сигналу обрано діапазон 7–45 с.

Важливим етапом у проектуванні нечіткого алгоритму керування рухом на перехресті є вибір параметрів функцій належності з метою досягнення найефективнішої роботи перехрестя [195]. З аналізу методів навчання нечітких алгоритмів керування випливає, що існує можливість налаштування параметрів функцій належності, проте для цього потрібна навчальна вибірка, яка містить значення виходу для конкретних значень входу. Припустимо, що існує ідеальне регульоване перехрестя з таким адаптивним алгоритмом керування, що за будь-якої інтенсивності прибуття ТЗ до перехрестя встановлюється така тривалість дозвільних сигналів та циклу, що середні та загальні затримки головного або усіх потоків є мінімальними. У такому разі, вимірявши на цьому перехресті інтенсивність прибуття ТЗ до нього, довжини черг перед стоп-лініями тощо, можна сформувати вхідний вектор X_r , а вимірявши тривалості дозвільних сигналів (або циклу) – відповідні значення виходу y_r . Однак на реальному перехресті чітко встановити такий взаємозв'язок неможливо. Зокрема, якщо вхідними параметрами є інтенсивність прибуття ТЗ до перехрестя та довжина черги перед стоп-лінією, то важко стверджувати, що тривалість дозвільного сигналу для якого-небудь напрямку як вихідна змінна повинна мати певне конкретне значення. Критеріями ефективності роботи алгоритму є затримки в русі, довжини черг, швидкість та рівномірність руху тощо [117], а вони, своєю чергою, залежать і від тривалості дозвільного сигналу, і від поточної фази на перехресті. Тобто, для адаптивних алгоритмів керування рухом на регульованих перехрестях немає можливості провести навчання, оскільки неможливо отримати навчальну вибірку. Це вказує на те, що потрібно шукати інші способи налаштування параметрів функцій належності.

За результатами попередніх досліджень встановлено [159], що параметри функцій належності істотно впливають на ефективність роботи регульованого перехрестя. Розглядали два варіанти параметрів функцій належності за інших однакових умов. За менших значень інтенсивності руху за першого варіанта параметрів функцій належності покращення, порівняно з жорстким керуванням, існує, проте не є істотним (середня черга коротша на 0,4 автомобілі). За другого варіанта покращення роботи перехрестя є відчутнішим – середня черга є коротшою більш ніж на 1 автомобіль, максимальна – на 1–2. Однак за більших значень інтенсивності руху ТЗ застосування нечіткого алгоритму керування з першим варіантом параметрів функцій належності призведе до погіршення роботи перехрестя (черги збільшуються), тоді як за другого варіанта параметрів функцій належності – до покращення (черги зменшуються) [159]. Ці результати вказують на потребу в обґрунтуванні параметрів функцій належності лінгвістичних змінних нечіткого алгоритму керування рухом на регульованих перехрестях. Можна, наприклад, дібрати найкращі параметри для певних значень інтенсивності ТП або для всього діапазону її зміни з урахуванням передовсім ранкових та вечірніх пікових періодів.

Однак оскільки налаштувати параметри функцій належності за відомими методами неможливо, а в роботі [18] зазначено, що вибір параметрів функцій належності визначається реальними характеристиками перехрестя (шириною проїзної частини, інтенсивністю руху тощо), які загалом є унікальними для кожного перехрестя, доцільно розглянути декілька можливих варіантів цих параметрів та вибрати найкращий. На рис. 3.10 наведено пропонувані вигляд і параметри функцій належності для інтенсивності ТП, довжини черги та тривалості дозвільного сигналу світлофора [195]. Використано трапецієподібні та трикутні функції належності. Варіанти відрізняються розміром області, на якій визначена кожна нечітка змінна, а також розташуванням цієї області. Видно, що у перших трьох варіантах (рис. 3.10, *А, Б, В*) функції належності найменше перекриваються між собою, в останніх трьох (рис. 3.10, *Є, Ж, З*) – найбільше. Крім цього, у варіантах, наведених на рис. 3.10, *А, Г, Є*, функції належності розташовані близько одна від однієї на початку діапазону кожної змінної, в інших варіантах – більш розосереджено.

База правил складається з шістнадцяти нечітких висловлювань (табл. 3.3) [195]. Для нечіткого висновку використовували метод *Мамдані*, для зведення до чіткості – центроїдний метод.

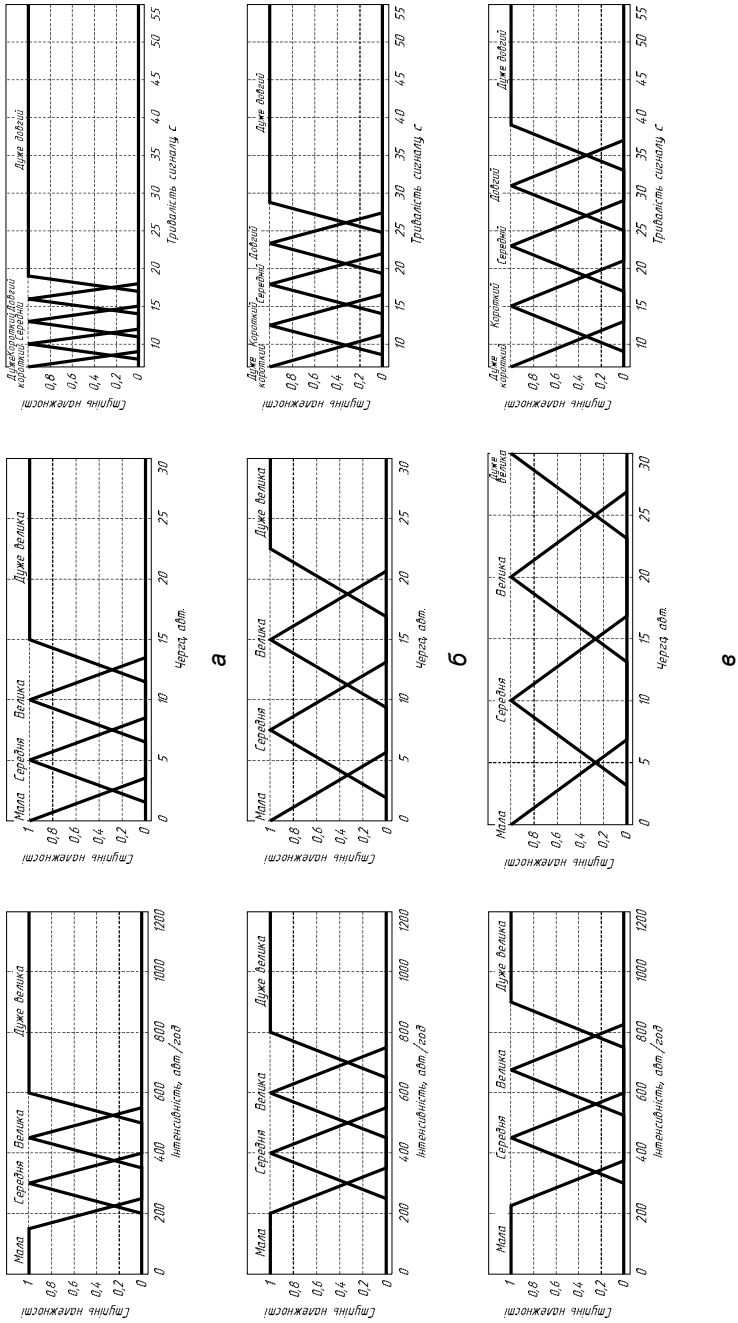


Рис. 3.10. Вигляд і параметри функцій належності вхідних (інтенсивність ТП та довжина черги) та вихідної (тривалість дозвільного сигналу світлофора) змінних

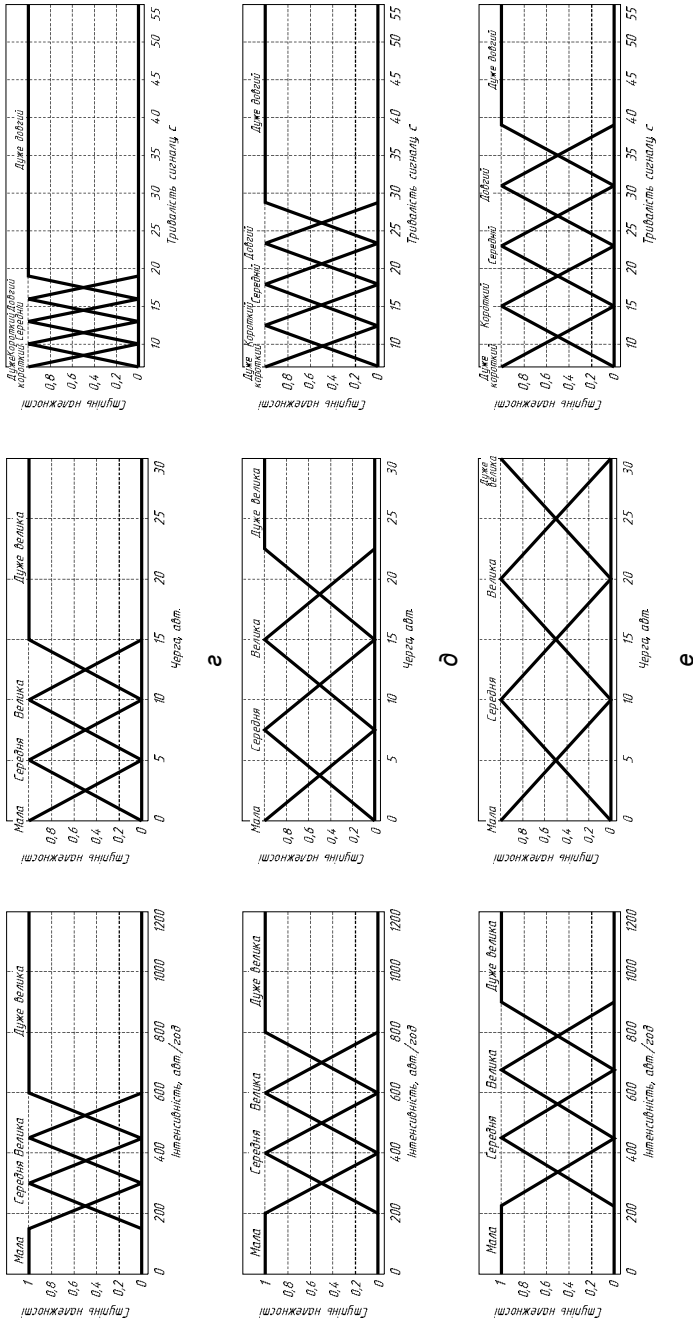


Рис. 3.10. (Продовження). Видяг і параметри функцій належності вхідних (інтенсивність ТП та довжина черги) та вихідної (тривалентність дозвільного сигналу світлофора) змінних

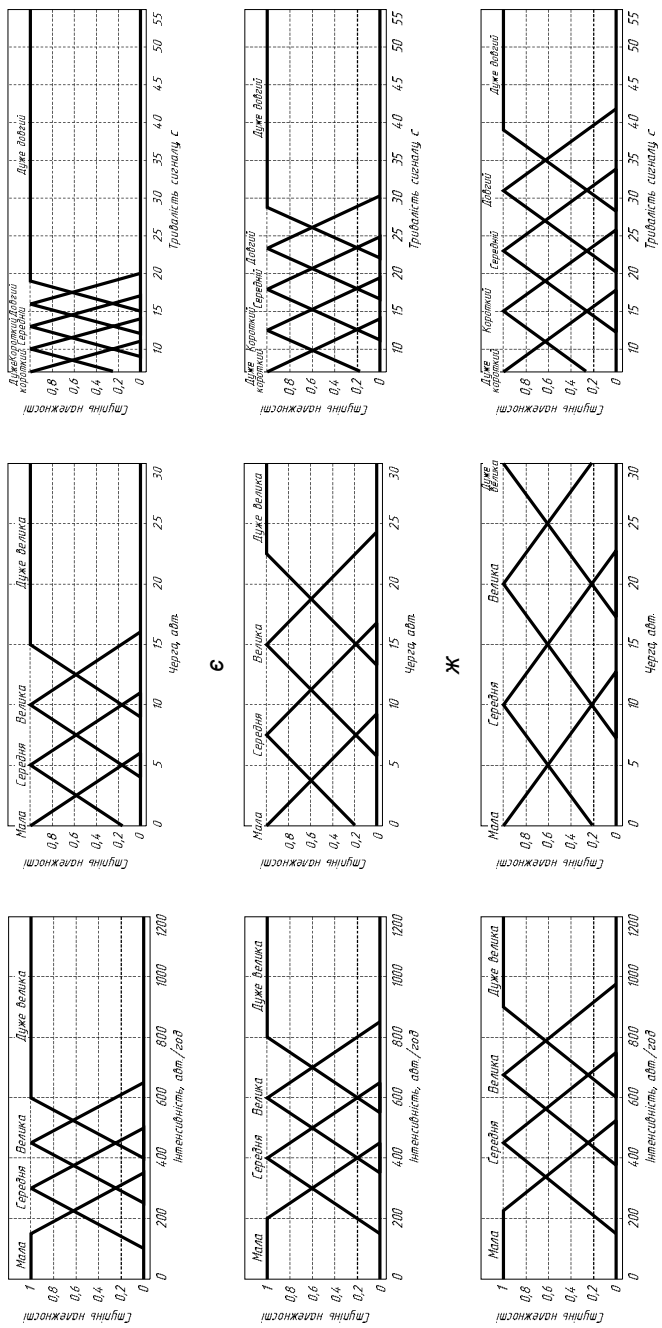


Рис. 3.10. (Закінчення). Вигляд і параметри функцій належності вхідних (інтенсивність ТП та довжина черги) та вихідної (тривалість дозвільного сигналу світлофора) змінних

База правил нечітких висловлювань

№ з/п	Інтенсивність	Черга	Дозвільний сигнал
1	мала	мала	дуже короткий
2	мала	середня	короткий
3	мала	велика	короткий
4	мала	дуже велика	середній
5	середня	мала	короткий
6	середня	середня	середній
7	середня	велика	середній
8	середня	дуже велика	довгий
9	велика	мала	середній
10	велика	середня	довгий
11	велика	велика	довгий
12	велика	дуже велика	дуже довгий
13	дуже велика	мала	середній
14	дуже велика	середня	довгий
15	дуже велика	велика	дуже довгий
16	дуже велика	дуже велика	дуже довгий

Залежності тривалості дозвільного сигналу світлофора від довжини черги та інтенсивності прибуття ТЗ до перехрестя (поверхні відгуку) для всіх варіантів параметрів функцій належності наведено на рис. 3.11 [101]. Видно, що із збільшенням інтенсивності прибуття ТЗ до перехрестя та довжини черги тривалість дозвільного сигналу зростає. Також видно, що різні параметри функцій належності вхідних та вихідної змінної впливають на вигляд поверхні відгуку.

Зрозуміло, що на залежність тривалості дозвільного сигналу світлофора від довжини черги та інтенсивності прибуття ТЗ до перехрестя може впливати і повнота бази знань (кількість правил). Проте у роботах [167, 168] показано, що для опису неспадної функції з використанням двох вхідних змінних з чотирма термами та однієї вихідної змінної з п'ятьма термами найкращих результатів досягають за повноти бази знань 80–100 % (повнота бази знань розробленого алгоритму – 100 %).

У моделі роботи перехрестя звертання до нечіткого алгоритму керування для визначення тривалості дозвільного сигналу відбувається безпосередньо перед його ввімкненням для певного напрямку.

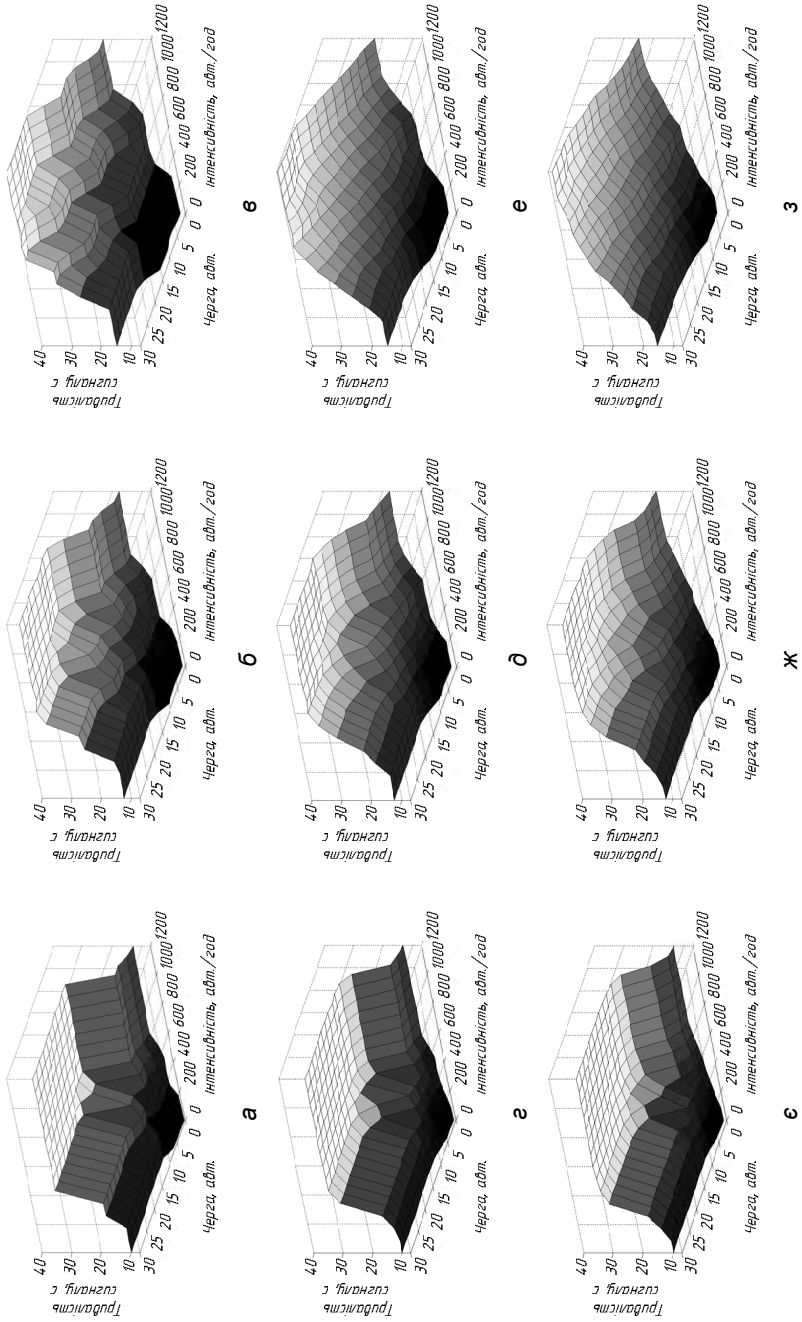


Рис. 3.11. Залежність тривалості дозвільного сигналу від інтенсивності прибуття ТЗ до перехрестя та довжини черги на підході до перехрестя

3.3.2. Пошук параметрів функцій належності у нечіткому алгоритмі керування. Для дослідження ефективності роботи нечіткого алгоритму керування рухом з різними варіантами функцій належності обрано Х-подібне регульоване перехрестя вулиць з одностороннім рухом легкових автомобілів без поворотних потоків (рис. 3.12). Кількість смуг руху на кожній з вулиць – 1. Потоки 1 та 2 пропускаються у різних фазах. Кожен підхід характеризується інтенсивністю потоку насичення S_1 та S_2 , яка враховує ширину проїзної частини, ухили, поворотні потоки, незадовільний стан покриття, склад ТП тощо. У дослідженні прийнято $S_1 = S_2 = 1800$ авт./год, що не є максимально можливим значенням за ідеальних умов, проте реальним значенням на регульованих перехрестях.

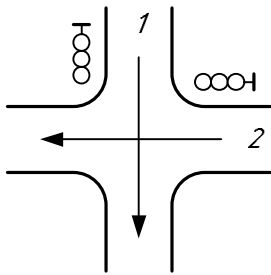


Рис. 3.12. Схема регульованого перехрестя

На практиці перетин лише прямих потоків одного напрямку на регульованому перехресті трапляється вкрай рідко. Однак існує багато Т- та Х-подібних перехресть із двофазним регулюванням, у яких у жодній з фаз немає конфліктної точки перетину, коли ТЗ блокують рух на одній із смуг, даючи дорогу потоку з вищим пріоритетом. У Львові на 26-ти регульованих перехрестях зі 130 виконується вказана умова, причому 16 з них розташовані на магістральних вулицях. Оскільки здебільшого ТЗ розподіляються по

смугах руху на підході рівномірно, то для розрахунків можна приймати по одній смузі з кожного підходу, на якій є найвища інтенсивність або найменший потік насичення.

У роботі [31] зазначено, що оцінювання ефективності застосування адаптивних алгоритмів доцільно проводити за різних значень інтенсивності руху. Варто задавати значення, характерні для конкретного перехрестя протягом доби або хоча б періоду найінтенсивнішого руху (в нічний період більшість світлофорних об'єктів переводяться в режим жовтого мигання), з малим інтервалом їхньої зміни. Зважаючи на те, що параметри функцій належності істотно впливають на ефективність роботи перехрестя, проведено дослідження роботи перехрестя протягом години за усталеної та змінної інтенсивності ТП. Використано імітаційну модель роботи регульованого

перехрестя у середовищі MATLAB з гамма-розподілом інтервалів між ТЗ, що наближаються до перехрестя.

Під час дослідження роботи перехрестя протягом години за усталеної інтенсивності ТП інтенсивність обох потоків змінюється від 300 до 1400 авт./год із кроком 100 авт./год. Дослідження проведено для 9 варіантів параметрів функцій належності. Результатом моделювання є значення середніх черг, які утворюються перед стоп-лінією. Зважаючи на те, що інтенсивність потоку насичення кожного з підходів становить 1800 авт./год, то дослідження проводять лише для тих комбінацій інтенсивності ТП на підходах до перехрестя, сума яких менша ніж 1800 авт./год.

За результатами моделювання встановлено, що алгоритм за будь-яких варіантів параметрів функцій належності забезпечує адаптування режиму СФР до умов руху, оскільки для будь-якої комбінації інтенсивності ТП на підходах до перехрестя утворюються середні черги 2–7 ТЗ. Неefективною робота перехрестя є за сумарної інтенсивності обох ТП 1600–1700 авт./год, що практично дорівнює пропускній здатності регульованого перехрестя (з урахуванням тривалості проміжних тактів), оскільки утворюються значні черги (понад 30 ТЗ). Такі черги відповідають передзаторовому та заторовому станам, однак цей алгоритм не призначений для керування рухом у такі періоди.

Графічно для інтенсивності ТП 700 авт./год та 1000 авт./год на підході 1 результати моделювання роботи перехрестя протягом години подано на рис. 3.13–3.14. Видно, що черга на підході 1 зростає за збільшення інтенсивності ТП на підході 2. Проте за різних варіантів параметрів функцій належності вхідних та вихідної змінної за однакової інтенсивності довжини черг є різними. Зокрема, за сумарної інтенсивності ТП 1500 авт./год, що є близьким до пропускної здатності обраного регульованого перехрестя, спостерігається різниця між найбільшим та найменшим значенням довжини черги. За інтенсивності 700 авт./год на підході 1 абсолютна різниця не перевищує – 2–2,5 автомобілі, а за інтенсивності 1000 авт./год – 20–22 автомобілі. Відносна різниця становить 30–90 % для всіх значень інтенсивності. Аналогічні закономірності є і за інших значень інтенсивності ТП. Це вказує на те, що використання одних варіантів параметрів функцій належності забезпечує ефективнішу роботу регульованого перехрестя порівняно з іншими.

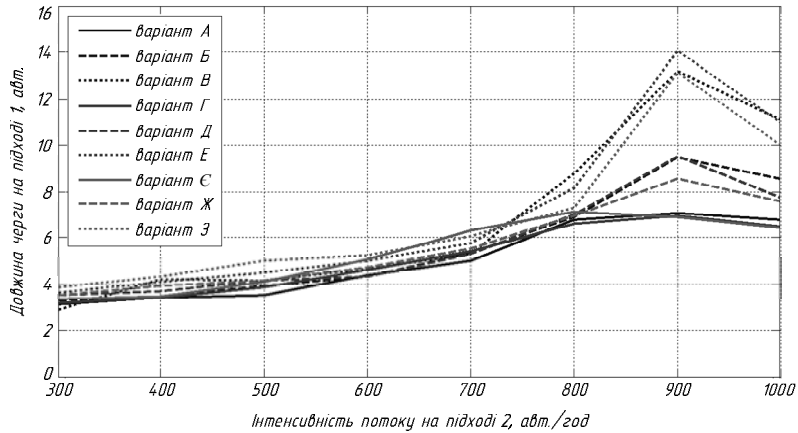


Рис. 3.13. Зміна довжини черги на підході 1 для різних варіантів функцій належності (інтенсивність потоку 700 авт./год)

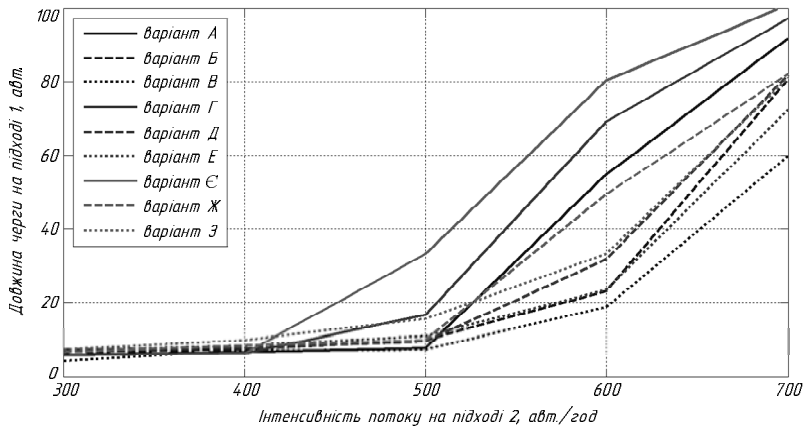


Рис. 3.14. Зміна довжини черги на підході 1 для різних варіантів функцій належності (інтенсивність потоку 1000 авт./год)

Однак за різних значень інтенсивності мінімальній довжина черги досягають за різних варіантів параметрів функцій належності. За менших значень інтенсивності кращим є варіант, коли графіки функцій належності для вхідних та вихідної змінної розташовані ближче одна до одної, а за більшої – коли більш розосереджено (за інтенсивності 300 авт./год на підході 1 кращими є варіанти а, г та є, за інтенсивності 700 авт./год – варіанти а, б, г, д, за

інтенсивності 1000 авт./год – варіанти *б*, *в*, *е*). Тобто, існує такий варіант параметрів функцій належності, який забезпечує ефективніше керування за певної інтенсивності ТП на підходах до перехрестя.

З наведеного видно також, що на ефективність роботи перехрестя впливає і ширина зони визначення нечітких змінних алгоритму (за рахунок чого змінюється перекриття графіків функцій належності), причому коли перекриття є великим (варіанти параметрів функцій належності *є*, *ж* та *з*), результати є гіршими для всіх значень інтенсивності ТП на підходах до перехрестя незалежно від розташування графіків функцій належності (близько чи розосереджено).

Твердження про вплив інтенсивності ТП на підході до перехрестя, а також форми графіків функцій належності на ефективність роботи перехрестя підтверджується, наприклад, значенням довжини черги за інтенсивності 1200 авт./год на підході 1 та 300 авт./год на підході 2 (рис. 3.15). Видно, що керування з використанням трьох останніх варіантів (коли перекриття графіків функцій належності є найбільшим) є найменш ефективним. Найкращим є керування у разі використання варіанта *в* параметрів функцій належності, коли їхні графіки розміщені розосереджено (інтенсивність на підході 1 є значною).

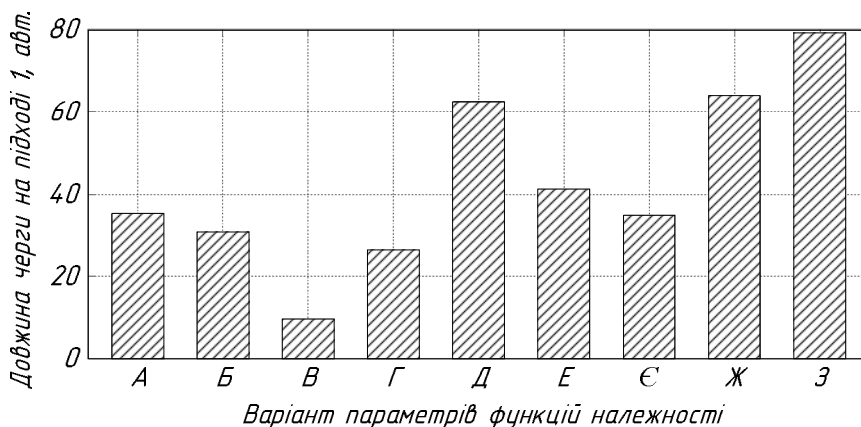


Рис. 3.15. Зміна середньої довжини черги на підході 1 за інтенсивності ТП 1200 авт./год (інтенсивність ТП на підході 2 – 300 авт./год)

Оскільки на практиці інтенсивність ТП має різні коливання, для перевірки того, чи вловлюватиме нечіткий алгоритм такі коливання, проведено

дослідження роботи перехрестя протягом години за змінної інтенсивності ТП для таких ситуацій:

- інтенсивність ТП протягом години незмінна (ситуація 1);
- один із потоків має незначне зростання інтенсивності протягом 30 хв (ситуація 2 та 4);
- один із потоків має різке зростання інтенсивності протягом 30 хв (ситуація 3 та 5);
- два потоки мають незначне зростання інтенсивності протягом 30 хв (ситуація 6);
- два потоки мають різке зростання інтенсивності протягом 30 хв (ситуація 7).

Інтенсивність ТП, які прибувають до перехрестя протягом години, наведено інтервалами по 10 хв (табл. 3.4). Жорстке керування розраховане для незмінної інтенсивності прибуття (ситуація 1). Тривалість дозвільного сигналу в першій фазі становить 18 с, у другій – 8 с. Дослідження проведено для усіх варіантів параметрів функцій належності, а також для жорсткого керування, розрахованого на ці умови руху.

Таблиця 3.4

Інтенсивність потоків на підходах до перехрестя

Ситуація	Потік підході 1, авт./год	Потік на підході 2, авт./год
1	700-700-700-700-700-700	300-300-300-300-300-300
2	700-700- 1000-1000-1000 -700	300-300-300-300-300-300
3	700-700- 1200-1200-1200 -700	300-300-300-300-300-300
4	700-700-700-700-700-700	300-300- 500-500-500 -300
5	700-700-700-700-700-700	300-300- 700-700-700 -300
6	700-700- 1000-1000-1000 -700	300-300- 500-500-500 -300
7	700-700- 1200-1200-1200 -700	300-300- 700-700-700 -300

За незмінної інтенсивності прибуття автомобілів до перехрестя прийнятним є використання жорсткого режиму СФР, розрахованого на ці умови руху. Використання нечіткого алгоритму призводить до більших значень середньої та максимальної черги на підході з більшою інтенсивністю. У такому разі близьке за ефективністю керування забезпечують з використанням варіантів параметрів функцій належності a , b та c (див. рис. 3.10).

За незначного зростання інтенсивності ТП протягом години на підході 1 використання жорсткого керування є задовільним, як і за варіантів параметрів

функцій належності A та Γ (рис. 3.16). У разі використання варіанта B за рахунок незначного зростання порівняно з жорстким керуванням середньої черги на підході 1 (на 0,2 ТЗ) зменшується черга на підході 2 (на 0,5 ТЗ). Використання інших варіантів параметрів функцій належності є менш ефективним порівняно із жорстким керуванням.

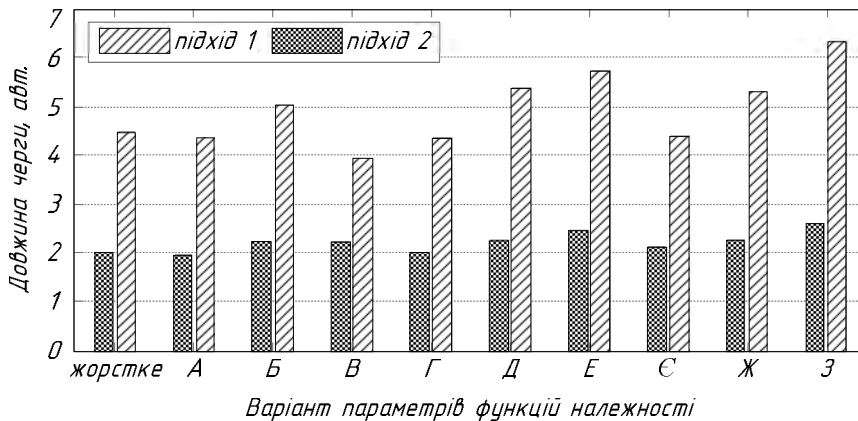


Рис. 3.16. Середня довжина черги на підходах до перехрестя за незначної зміни інтенсивності ТП на підході 1 (ситуація 2)

За ситуацій 3, 4, 5 та 6 використання жорсткого керування не є ефективним, оскільки різко зростають черги на одному з підходів. За використання нечіткого керування з будь-яким варіантом параметрів функцій належності черги є меншими.

У разі різкого зростання інтенсивності ТП на підході 1 найефективніше керування (середня черга на підході 1 становить 6,60 ТЗ, на підході 2 – 2,46 ТЗ) забезпечують за використання варіанта B параметрів функцій належності, коли перекриття між їх графіками є невеликим, а самі вони розташовані розосереджено (рис. 3.17). Задовільних результатів досягають і в разі використання варіантів параметрів функцій належності A , B та Γ (середня черга на підході 1 – 9,8–12,3 ТЗ, на підході 2 – 2,3–2,5 ТЗ).

У разі змін інтенсивності ТП на підході 2 (ситуації 4 та 5) варіант параметрів функцій належності фактично не впливає на ефективність роботи перехрестя. За незначного зростання інтенсивності черги є в межах 2,5–4,5 ТЗ, за значного – 4,0–5,0 ТЗ.

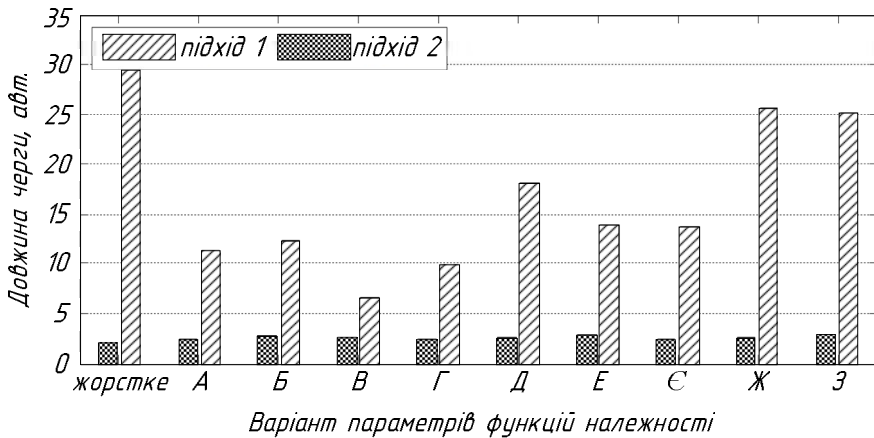


Рис. 3.17. Середня довжина черги на підходах до перехрестя за значної зміни інтенсивності ТП на підході 1 (ситуація 3)

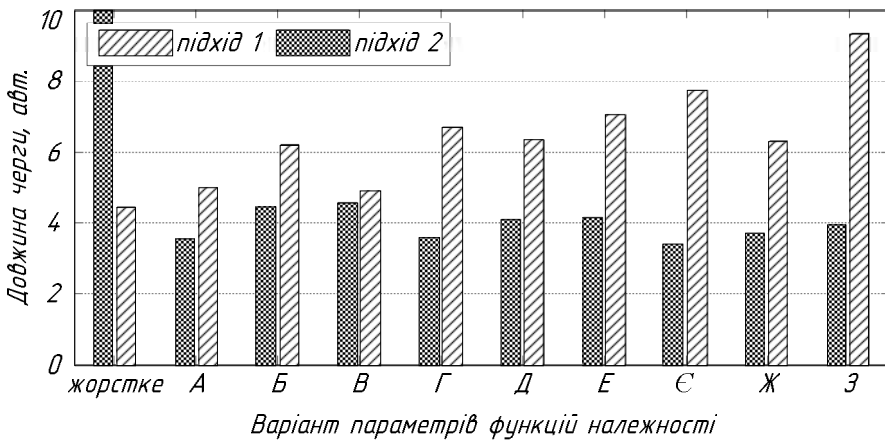


Рис. 3.18. Середня довжина черги на підходах до перехрестя за незначної зміни інтенсивності ТП на двох підходах (ситуація 6)

За незначного зростання інтенсивності ТП на обох підходах одночасно кращим є варіант В параметрів функцій належності, за якого середня черга на першому підході становить 4,88 ТЗ, на другому – 4,51 ТЗ (рис. 3.18). Хоча за інших варіантів середня довжина черги на підході 2 є меншою на 0,1–1,0 ТЗ, однак на підході 1 вона є значно довшою (на 1,4–4,7 ТЗ). Тобто, за варіанта в,

коли графіки функцій належності є розосередженими (інтенсивність ТП у такому разі є високою) та мають мале перекриття, забезпечується найкращий перерозподіл тривалості циклу між дозвільними сигналами на обох підходах.

У розглянутих ситуаціях, коли сумарна інтенсивність ТП на підходах до перехрестя є меншою за пропускну здатність перехрестя, нечіткий алгоритм вловлює умови руху на перехресті, забезпечуючи ефективне керування. Однак, коли сумарна інтенсивність ТП перевищує пропускну здатність (ситуація 7), робота алгоритму є незадовільною (середні черги на підході 1 перевищують 50–60 ТЗ). Робота жорсткого керування в цьому разі є ефективнішою. Це вказує на потребу перемикання роботи контролера в жорсткий режим у разі значних перевантажень або застосування інших алгоритмів керування, призначених для керування в умовах затору.

Отже, здебільшого кращої роботи нечіткого алгоритму керування досягають за варіантів параметрів функцій належності, коли графіки функцій належності розташовані близько один до одного (варіанти *a* та *z*), а також, коли перекриття цих графіків є невеликим (варіанти *a*, *b* та *в*). Коли перекриття графіків є значним (варіанти *є*, *ж* та *з*), керування є менш ефективним.

3.3.3. Дослідження роботи перехрестя з нечітким алгоритмом керування рухом. Для подальшого дослідження нечіткого алгоритму керування рухом обрано перехрестя вул. Левицького – вул. Тершаковців. Оскільки визначена під час натурних досліджень інтенсивність ТП на підходах до перехрестя не є високою, для дослідження вибрано варіант параметрів функцій належності Г, за якого графіки цих функцій розташовані близько один до одного, а їхнє перекриття є середнім.

Оскільки протягом доби інтенсивність ТП змінюється у широкому діапазоні, то доцільно дослідити роботу перехрестя протягом доби. Початковими даними для моделювання в такому разі є значення інтенсивності ТП, що прибувають до нього. На рис. 3.19 наведено графіки їхні зміни протягом дня на вул. Левицького та на вул. Тершаковців. Значення інтенсивності ТП отримано з використанням результатів дослідження на цьому самому перехресті, а також із використанням результатів, отриманих у [14]. Помітно явно виражений ранковий та розтягнутий у часі вечірній піки. У період від 09:00 до 16:00 інтенсивність руху фактично не змінюється.

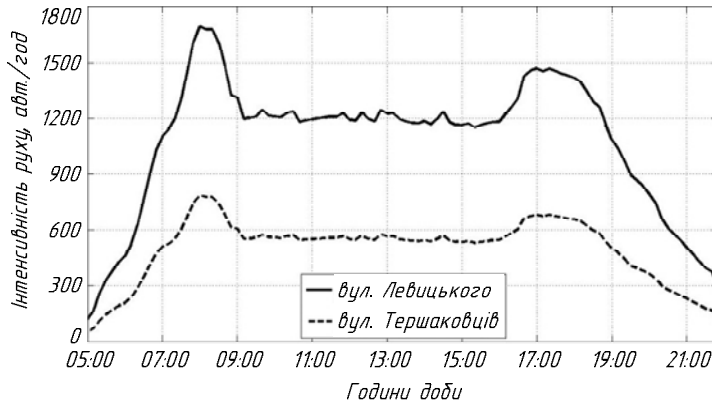


Рис. 3.19. Зміна інтенсивності ТП, що прибувають до перехрестя, протягом дня

Оскільки інтенсивність ТП на підході до перехрестя не постійна, очевидно, що використання однопрограмного жорсткого керування неефективне. Доцільніше застосувати багатопрограмне жорстке або адаптивне керування. З графіка зміни інтенсивності видно, що протягом дня потрібно використати 5 жорстких програм роботи світлофорів для:

- ранкового зростання інтенсивності (05:00–07:00);
- ранкового піка (07:00–09:00);
- усталеної інтенсивності протягом дня (09:00–16:00);
- вечірнього піка (16:00–19:00);
- вечірнього спадання інтенсивності (19:00–22:00).

Кожну з програм роботи світлофорів розраховано для усередненої інтенсивності протягом періоду її дії за методикою, наведеною в [198]. Оскільки інтенсивність ТП у період від 22:00 до 05:00 є незначною, і в цей період доцільно переводити світлофори у режим жовтого миготливого сигналу, для цього періоду дослідження роботи перехрестя не проводили.

Значення середніх та максимальних довжин черг, отриманих у результаті моделювання роботи перехрестя вул. Левицького–Тершаковців, наведено в табл. 3.5. Під час ранкового зростання та вечірнього спадання інтенсивності руху середня та максимальна довжини черг за різних систем керування фактично не відрізняються (різниця між значеннями середньої довжини черги

не перевищує 10 %). Проте впродовж періоду від ранкового до вечірнього піка значення середньої та максимальної довжини черги за адаптивного керування є меншими, ніж за багатопрограмного жорсткого (середня довжина черги зменшується на 0,5–2,5 автомобілі або 15–45 %, максимальна – на 2–3 ТЗ). Переваги адаптивного керування з нечітким алгоритмом особливо помітні за різкого зростання інтенсивності під час ранкового піка, коли максимальна довжина черги на вул. Левицького зменшується на 6–8 ТЗ.

Таблиця 3.5

Значення середньої та максимальної довжини черги

Тип черги	Період доби	Довжина черги в момент ввімкнення дозвільного сигналу, авто					
		вул. Левицького (права смуга)		вул. Левицького (ліва смуга)		вул. Тершаковців	
		жорстке багато-програмне	адаптивне (нечіткий алгоритм)	жорстке багато-програмне	адаптивне (нечіткий алгоритм)	жорстке багато-програмне	адаптивне (нечіткий алгоритм)
середня	05:00–07:00	0,934	1,052	1,024	1,109	0,932	1,005
	07:00–09:00	7,717	5,113	7,363	4,801	7,161	5,026
	09:00–16:00	3,771	3,297	3,604	3,137	3,502	2,995
	16:00–19:00	5,606	3,923	5,404	3,759	5,308	3,648
	19:00–22:00	1,210	1,390	1,262	1,427	1,178	1,329
	за добу	2,994	2,831	2,920	2,730	2,819	2,642
	максимальна	05:00–07:00	6	6	5	5	5	5
07:00–09:00		26	18	25	19	8	9
09:00–16:00		10	11	9	7	8	8
16:00–19:00		12	10	12	9	12	10
19:00–22:00		7	6	6	5	6	6
за добу		26	18	25	19	12	10

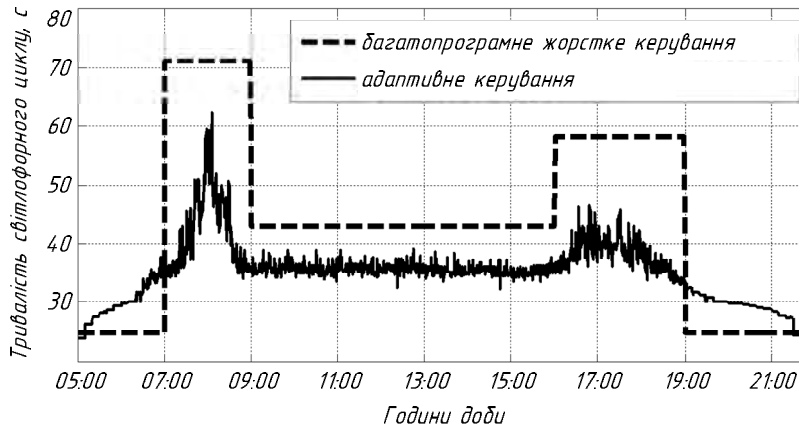


Рис. 3.20. Зміна тривалості світлофорного циклу протягом доби

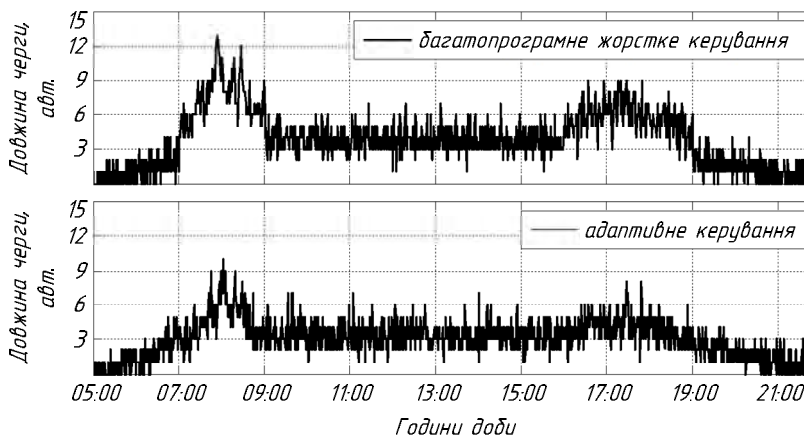


Рис. 3.21. Зміна довжини черги на правій смузі вул. Левицького в момент ввімкнення дозвільного сигналу

Для жорсткого багатопрограмного керування тривалість світлофорних циклів та їхня кількість протягом доби завжди будуть однаковими, а змінюватиметься лише довжина черги. Для адаптивного керування тривалість та кількість світлофорних циклів щоразу є іншими. Зважаючи на це, для однієї з імітацій на рис. 3.20 наведено графік зміни тривалості світлофорного циклу протягом доби за двох типів керування. Видно, що за адаптивного керування з

нечітким алгоритмом тривалість циклу змінюється за зростання та спадання інтенсивності ТП, але є фактично незмінною за усталеної інтенсивності протягом дня від 09:00 до 16:00. Тривалість циклу за адаптивного керування, порівняно з жорстким, є більшою за малої інтенсивності ТП та меншою – за великої. Це призводить до того, що кількість циклів у першому випадку буде меншою, а в другому – більшою.

Зміну довжин черг в момент ввімкнення дозвільного сигналу на правій смузі вул. Левицького для однієї з імітацій наведено на рис. 3.21. Видно, що протягом доби за адаптивного керування з нечітким алгоритмом досягають менших довжин черг.

Зважаючи на те, що інтенсивність реальних ТП не є постійною як протягом коротких періодів, так і протягом доби, використання розробленого нечіткого алгоритму керування дасть змогу покращити якість та ефективність роботи перехрестя.

3.4. Оптимізація режимів світлофорного регулювання під час організації руху за окремими напрямками

3.4.1. Формалізація схеми руху на перехресті. Після ухвалення рішення про введення СФР постає питання про кількість регульованих напрямків руху на перехресті. У наявних методиках зазвичай на першому етапі встановлюють, що кількість напрямків регулювання дорівнює кількості під'їздів до перехрестя та регульованих пішохідних переходів [76, 87, 95, 129]. У разі наявності інтенсивних поворотних ТП, для яких виділяються смуги руху, можуть вводитися додаткові напрямки, регулювання яких забезпечується додатковими секціями світлофорів або світлофорами типу 2 [82]. Також додаткові напрямки регулювання руху можуть вводити, як впливає із принципів пофазового роз'їзду [77], за організації пішохідного переходу частинами за наявності розділової смуги або острівця безпеки.

Пропоновані рекомендації є, однак, загальними, тому зумовлюють багатоваріантність підходу до визначення кількості напрямків регулювання. Порівняти ці варіанти з метою вибору оптимальнішого на етапі, що передуює розрахункам параметрів циклу регулювання, є неможливим. Тому унеможливується і автоматизація цього етапу під час проектування регульованого перехрестя.

Пропонують схему руху на перехресті формалізувати за допомогою матриці можливих траєкторій (ММТ) руху ТП, що складається на основі схеми можливих траєкторій (СМТ) – рис. 3.22. СМТ викреслюють на плані перехрестя з урахуванням вимог ПДР та наявного поділу підходів до перехрестя на смуги руху. Для неї ММТ чотиривимірна. Її порядок визначається сумою кількостей смуг руху на всіх під'їздах до перехрестя та виїздах з нього. Елементи ММТ – це відстані від стоп-ліній на проїзних частинах під'їздів до перехрестя до конфліктних точок перетину або злиття траєкторій руху. За схемою можна визначити, що будь-які дві траєкторії можуть мати одну конфліктну точку перетину або злиття чи не мати конфліктних точок. Коли траєкторії не мають конфліктних точок, елемент ММТ дорівнює нулю.

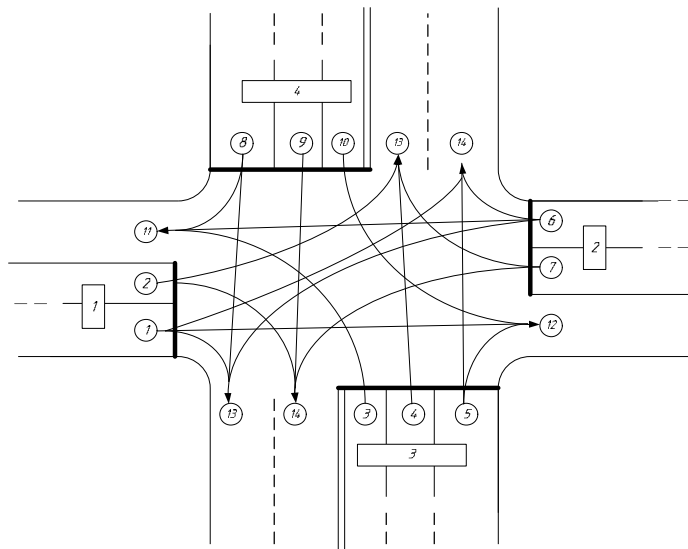


Рис. 3.22. Схема можливих траєкторій руху ТП

Для точнішого визначення тривалостей мінімальних часових проміжків між дозвільними 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. Тоді 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 потреба за наявності елемента $ММТ[i, j, m, n]$ вилучати елемент $ММТ[j, i, m, n]$, що відповідає за зворотний напрямок руху цією самою траєкторією. Проте, задля можливості формалізації схем руху на перехрестях з реверсивними траєкторіями ця потреба відхиляється, і частина даних ММТ, що відповідає зворотним напрямкам руху траєкторіями, не визнається надмірною.

Дані про інтенсивність ТП 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 ТП з під'їзду i до виїзду j . Якщо $N[i, j] > 0$, то $N[j, i] = 0$, окрім ситуацій, коли на під'їздах наявні реверсивні смуги.

Дані про розташування смуг на під'їздах до перехрестя і виїздах з нього розміщуються у двовірній матриці PS . У рядках її записують номери смуг, які розташовані на під'їздах чи виїздах. Номери смуг записують у рядки матриці, починаючи від крайньої правої смуги під'їзду чи виїзду. Наприклад, для СМТ матриця PS матиме вигляд табл. 3.6.

Таблиця 3.6

Матриця PS

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

Розрахункова швидкість руху по траєкторіях задається у квадратній матриці V . Формалізація схеми організації руху ТП на перехресті за допомогою запропонованої схеми дає змогу проводити автоматизовану селекцію напрямків світлофорного регулювання за конфліктністю та визначати мінімальні часові проміжки, які необхідні між дозвільними світлофорними сигналами конфліктних напрямків регулювання.

Крім того, такий спосіб формалізації дає змогу визначати мінімальні часові проміжки між дозвільними сигналами конфліктних напрямків регулювання з урахуванням більшості чинників, що впливають на тривалість цих проміжків: швидкості руху (для кожної траєкторії окремо), типів ТЗ, наявності

реверсивного та трамвайного руху. У цьому перевага з наявною методикою [76], яка передбачає визначення лише відстаней від стоп-ліній напрямків регулювання до дальніх конфліктних точок.

3.4.2. Визначення перехідних інтервалів. Під час застосування принципу визначення тривалості перехідних інтервалів, що враховує мінімальні часові проміжки на доїзд до дальніх конфліктних точок під час вибору означених точок, беруть до уваги те, що найвіддаленіша від стоп-лінії конфліктна точка дає максимальну тривалість мінімального часового проміжку до проїзду її ТЗ.

Проте, використовуючи формули (3.16) [76], можна довідатись, що залежність між відстанню до найдалшої точки та тривалістю часового проміжку не є прямою. Крім того, як видно з рис. 3.23, тривалості часових проміжків істотно змінюються залежно від швидкості руху.

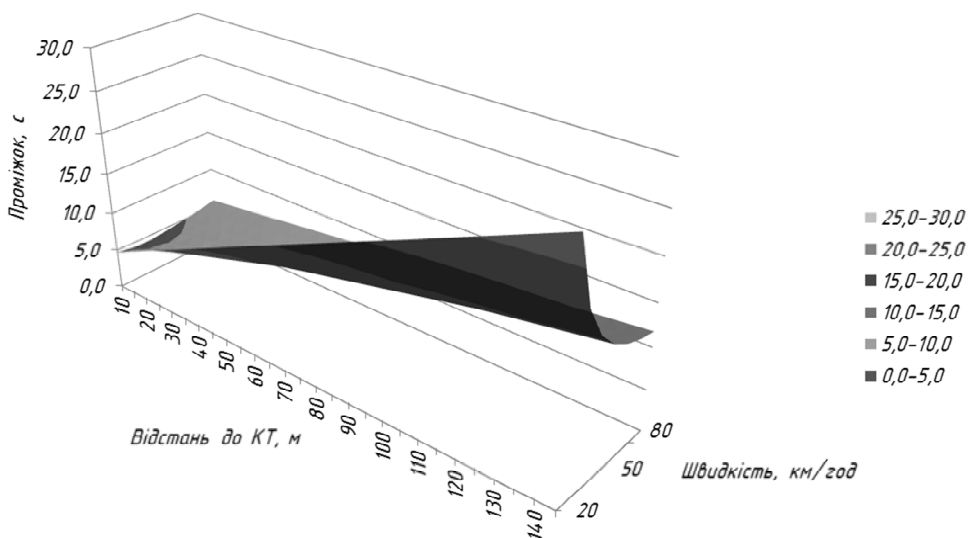


Рис. 3.23. Залежність тривалості мінімального часового проміжку від відстані до конфліктної точки та швидкості руху ТЗ

Відповідно до [76], у разі, якщо траєкторія руху ТЗ 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 в разі врахування, як цього вимагає методика [129], також і часу, необхідного на доїзд до цієї самої точки транспортного засобу, що розпочинає рух на дозвільний сигнал далі за структурою світлофорного циклу.

Отже, оперування під час визначення «дальніх конфліктних точок» відстанями, а не часом, необхідним на проїзд цих відстаней від критичної точки та від стоп-лінії, вносить неточність у розрахунок тривалостей перехідних інтервалів. Задля її уникнення пропонують під час визначення конфліктних точок оперувати не напрямками регулювання, а траєкторіями руху на перехресті.

Застосування такого підходу дає змогу: формалізувати об'єднання траєкторії у напрямки; точно визначати тривалості перехідних інтервалів і, як наслідок, отримувати можливість оптимізувати структуру світлофорного циклу за параметром мінімізації втраченого часу для більшої кількості регульованих параметрів; робити обґрунтовані висновки про розподіл смуг між напрямками регулювання, каналізування руху.

Для визначення мінімальних часових проміжків між дозвільними сигналами на основі методу дальніх конфліктних точок пропонують таку послідовність.

1. Визначення тривалості проїзду ТЗ, який завершує рух від критичної точки до конфліктної точки [130]:

$$t_3 = t_p + \frac{V_3}{2a^k} + \frac{B_3 + l_a}{V_3}, \quad (3.11)$$

де t_p – тривалість реакції водія, $t_p = 0,8-1,2$ с; V_3 – швидкість руху ТЗ, який завершує рух, м/с; a^k – прискорення (уповільнення), $a^k = 2,5-3,0$ м/с²; B_3 – відстань від стоп-лінії до дальньої конфліктної точки, м; l_a – довжина зведеного автомобіля, $l_a = 5$ м.

2. Визначення тривалості проїзду ТЗ, який розпочинає рух від стоп-лінії до конфліктної точки:

$$t_{pn} = \frac{B_{pn}}{V_{pn}}, \quad (3.12)$$

де B_{pn} – відстань від стоп-лінії до ближньої конфліктної точки, м; V_{pn} – швидкість руху ТЗ, який розпочинає рух, м/с.

Під час визначення тривалості за останньою формулою розглядають найнесприятливіші умови, коли ТЗ під'їхав до стоп-лінії з розрахунковою швидкістю в момент ввімкнення дозвільного сигналу (черга на цій смузі в цей момент була повністю відсутня):

$$t = t_p + \frac{V_3}{2a^k} + \frac{B_3 + l_a}{V_3} - \frac{B_{pn}}{V_{pn}}. \quad (3.13)$$

Під час застосування цієї формули для переведення матриці можливих траєкторій ММТ у матрицю мінімальних часових проміжків ММП отримуємо:

$$ММП[i, j, m, n] = t_p + \frac{V[i, j]}{2a^k} + \frac{ММТ[i, j, m, n] + l_a}{V[i, j]} - \frac{ММТ[m, n, i, j]}{V[m, n]}. \quad (3.14)$$

Отже, отримане значення мінімального часового проміжку враховує всі характеристики руху ТЗ.

3.4.3. Зв'язок між основними тактами та перехідними інтервалами. Тривалість світлофорного циклу визначається тривалістю головної послідовності. Тривалість головної послідовності складається з відносної тривалості дозвільних сигналів та абсолютної тривалості мінімальних проміжків. Тривалість абсолютного значення дозвільних сигналів прямо пропорційна до значенням коефіцієнтів завантаження рухом смуг напрямків регулювання [140], що утворюють головну послідовність.

Відносну тривалість дозвільних сигналів можна перевести в абсолютну через помноження на часовий коефіцієнт.

$$T_y = \sum (y_i K + t[i, j]). \quad (3.15)$$

Оптимальні тривалості дозвільних сигналів повинні бути такими, щоб за тривалість дозвільного сигналу встигала роз'їхатися черга, що накопичилася протягом циклу регулювання.

Якщо N_i – інтенсивність руху (од/год), а S_i – потік насичення (од/год), то для роз'їзду цієї інтенсивності потрібен час

$$T = \frac{N_i}{S_i}, \text{ год.} \quad (3.16)$$

Якщо значення N_i та S_i перевести в од/с, то

$$t = \frac{n_i}{s_i}, \text{ с.} \quad (3.17)$$

Тривалість дозвільного сигналу буде такою:

$$t_i = y_i K = \frac{n_i \cdot T_u}{s_i} \quad (3.18)$$

або

$$t_i = y_i K = \frac{n_i \cdot \sum (y_i K + t[i, i+1])}{s_i}, \quad (3.19)$$

$$\frac{n_i}{s_i} K = \frac{n_i \cdot \sum \left(\frac{n_i}{s_i} K + t[i, i+1] \right)}{s_i}. \quad (3.20)$$

Потрібно врахувати, що під час роз'їзду черги кожен наступний ТЗ затримується перед початком руху на певний інтервал. Так, під час роз'їзду черги часові інтервали між автомобілями зростають зі зростанням дозвільного сигналу [119]. Тому для мінімізації цих непродуктивних інтервалів потрібно мінімізувати значення тривалості дозвільних сигналів, що дають змогу роз'їхатися черзі, яка нагромадилася протягом циклу регулювання.

Якщо мінімальним значенням тривалості зеленого світлофорного сигналу є 7 с [67], то можна стверджувати:

$$t_{i_min} = y_{i_min} K = 7, \quad (3.21)$$

$$t_{i_min} = y_{i_min} K = \frac{n_{i_min} \cdot \sum (y_i K + t[i, i+1])}{s_{i_min}}, \quad (3.22)$$

$$y_{i_min} K = \frac{n_{i_min} \cdot (YK + \sum t[i, i+1])}{s_{i_min}}, \quad (3.23)$$

$$y_{i_min} K = \frac{n_{i_min} \cdot YK + n_{i_min} \sum t[i, i+1]}{s_{i_min}}, \quad (3.24)$$

$$K = \frac{n_{i_min} \cdot YK + n_{i_min} \sum t[i, i+1]}{s_{i_min} y_{i_min}}, \quad (3.25)$$

$$K = \frac{n_{i_min} \times YK + n_{i_min} \sum t[i, i+1]}{s_{i_min} y_{i_min}}, \quad (3.26)$$

$$n_{i_min} \times YK + n_{i_min} \sum t[i, i+1] = K s_{i_min} y_{i_min}, \quad (3.27)$$

$$K = \frac{n_{i_min} \times YK + n_{i_min} \sum t[i, i+1]}{s_{i_min} y_{i_min} - n_{i_min} \times Y}, \quad (3.28)$$

$$K = \frac{\sum t[i, i+1]}{\frac{s_{i_min}}{n_{i_min}} y_{i_min} - Y}, \quad (3.29)$$

$$K = \frac{\sum t[i, i+1]}{1 - Y}. \quad (3.30)$$

Виведений коефіцієнт дає змогу зіставляти тривалості мінімальних часових проміжків і дозвільних сигналів під час визначення головної послідовності світлофорного циклу. Хоча в поширеній методиці пофазного управління світлофорного сигналізацією зіставляють лише значення основних тактів і перехідних інтервалів, а тривалості дозвільних сигналів у межах перехідних інтервалів не враховують [76, 86, 87].

Зважаючи на викладене, можна зробити висновок, що для ефективнішого розподілу часу в світлофорному циклі необхідно зіставляти значення тривалостей дозвільних сигналів світлофорного регулювання, що мають максимальне значення.

3.4.4. Синтез структури світлофорного циклу. Щоб визначити структуру світлофорного циклу, потрібно згрупувати напрямки СФР так, щоб рух транспорту і пішоходів за неконфліктними напрямками відбувався одночасно, а за конфліктними – лише після того, як минають мінімальні часові проміжки, визначені матричним способом. Початковими даними виступають матриця тривалостей зелених сигналів за напрямками M та матриця мінімальних проміжків t .

В урахуванні тривалостей перехідних інтервалів важливим є те, що матриця мінімальних проміжків може бути несиметричною (тривалості цих мінімальних проміжків між різними напрямками можуть не збігатися). Тому залежно від послідовності чергування напрямків у циклі регулювання тривалість проміжків між ними збільшується, збільшуючи тривалість циклу.

Структуру циклу визначають за таким алгоритмом.

1. Матриця M змінюється так, щоб елементи другого рядка (тривалості) чергувалися від максимального до мінімального. Це роблять задля того, щоб напрямки з максимальною тривалістю дозвільного сигналу опинилися на початку групи неконфліктних напрямків. Розраховують сумарну тривалість дозвільних сигналів усіх напрямків регулювання. В результаті отримують матрицю MI .

2. Формується двомірна матриця структури світлофорного циклу S . У цій матриці в рядки записують послідовності конфліктних напрямків регулювання, для яких дозволяючі сигнали не можуть вмикати одночасно, натомість вмикають один за одним, збільшуючи тривалість циклу регулювання.

Структуру формують, записуючи до матриці S номери напрямків регулювання у тій послідовності, в якій вони знаходяться у матриці MI . Заповнення матриці S починають з того, що до комірки $[1;1]$ записують номер напрямку, що першим вказаний у матриці MI (цей напрямок має найбільшу тривалість дозвільного сигналу).

3. У циклі доти, поки до матриці W не будуть внесені всі номери напрямків регулювання, вписують на матриці W номери напрямків, починаючи від комірки $[1;1]$. Якщо ця комірка зайнята та напрямок регулювання конфліктний з тим, номер якого вже записаний до комірки, потрібно переміститися праворуч по матриці на 1 стовпчик (рис. 3.24, штрихова стрілка); якщо напрямок регулювання неконфліктний з тим, номер якого вже записаний до комірки, треба переміститися вниз по матриці на 1 рядок (рис. 3.24, суцільна стрілка).

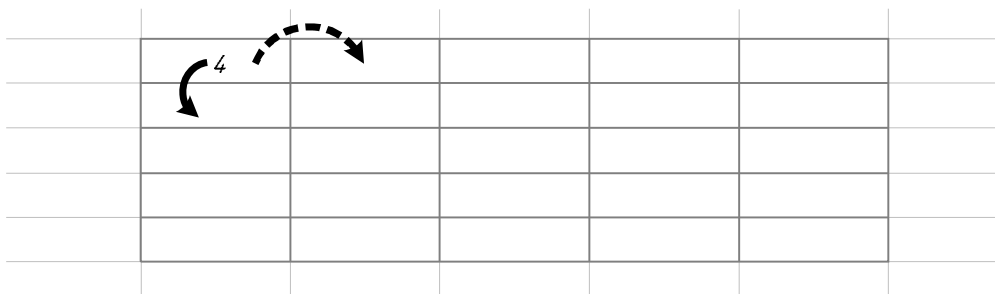


Рис. 3.24. Дії, пов'язані з формуванням матриці структури циклу

Коли запис номерів напрямків до матриці W буде завершено, у кожному з рядків буде записано послідовність конфліктних напрямків, сумарна тривалість якої перевищуватиме суму тривалостей дозвільних сигналів напрямків, що складаються у послідовність. Оскільки всі напрямки одного рядка є конфліктними між собою, тривалість циклу регулювання буде більшою або такою, що дорівнює тривалості послідовності, оскільки «стиснути» її у часі неможливо.

Оскільки напрямки регулювання, що входять до одного стовпця матриці W є попарно неконфліктними, задачу формування груп неконфліктних напрямків можна вважати задачею на розбиття множини напрямків регулювання на підмножини. У такому разі матрицю мінімальних проміжків подають у вигляді графу, вершинами якого є напрямки регулювання, а дугами – мінімальні часові проміжки. Оскільки під час розв'язування цієї задачі застосовують елементи теорії графів, потрібно провести трансформацію матриці мінімальних проміжків. Із матриці t отримаємо матрицю t' . З цією метою всі додатні елементи у матриці t замінюють на нулі, а всі нульові – на одиниці. У результаті матриця t' є протилежністю матриці інцидентів графу, створеного на основі матриці t . Якщо подати матрицю t' у вигляді графу, то у ній неконфліктні напрямки регулювання будуть поєднані ребрами.

Підмножини, що складаються з попарно неконфліктних напрямків, можна подати у вигляді повних підграфів графу на основі матриці t' . Отже, формування матриці W зводиться до розбиття графу t' на мінімальну кількість повних підграфів.

Розбиття відбувається за допомогою алгоритму, що складається з трьох блоків [39].

Блок 1

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

$$V(i) < G - 1, \quad (3.31)$$

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, у яких розв'язок знаходять гарантовано. Якщо існує одна масивна кліка (повний підграф), то алгоритм обов'язково її знайде. Якщо існує кілька масивних клік, алгоритм знайде одну з них.

2. Універсальнішим є алгоритм ітерації з видаленням. На кожному кроці цей алгоритм шукає повний підграф за алгоритмом простої ітерації (рис. 3.25). Під час переходу до наступного кроку з графа видаляють всі вершини, що належать уже знайденому повному підграфу. Так, щоразу пошук проводиться у тій частині графу, що не належить жодному з уже знайдених підграфів.

Алгоритм зупиняється тоді, коли потужність графу, що залишився після видалення, є меншою від максимальної з потужностей уже знайдених повних підграфів. Цей підграф вважається останнім. Збіжність алгоритму зумовлюється обмеженою кількістю вершин початкового графу, що видаляються.

3. На третьому кроці відбувається пошук підграфів за алгоритмом розширеної ітерації з видаленням (рис. 3.26). Для кожного знайденого підграфу g на початковому графі здійснюється перебір вершин, яких алгоритм розширеної ітерації до графу g не приєднав. Для кожної такої вершини проводять перевірку, чи не можна приєднати її до графу g на умовах початкового графу (чи існують ребра, що поєднують цю вершину з усіма вершинами, що входять до g за умови розгляду графу, з якого вершини не видалялися). Якщо приєднати вершину можна, то її приєднують до графу g .

Збіжність алгоритму забезпечується на основі раніше викладених міркувань: обмеження кількості вершин та знайдених початковими алгоритмами підграфів у будь-якому разі робить кінцевою кількість видалень та перевірок на приєднання.

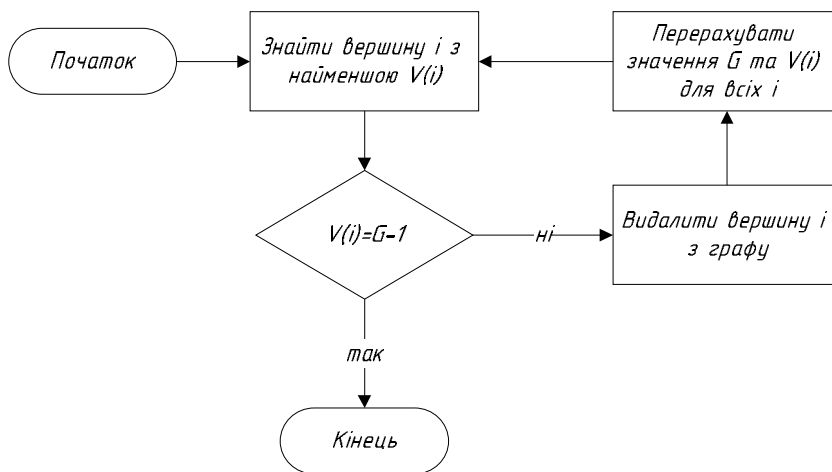


Рис. 3.25. Алгоритм простої ітерації (1)

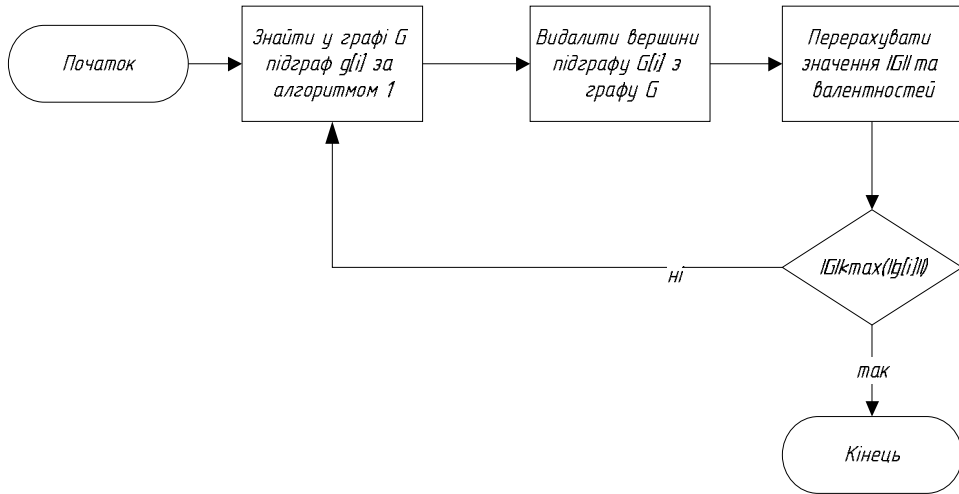


Рис. 3.26. Алгоритм розширеної ітерації з видаленням

Далі потрібно елементи у стовпчиках матриці W сортувати за зменшенням значень (елемент у першому рядку повинен мати максимальне значення). Запропонований алгоритм заповнення матриці W дає змогу одразу зарахувати до груп неконфліктних напрямків також і ті напрямки, що зараховані до попередніх груп, тобто повністю визначити склад груп неконфліктних напрямків.

4. Для кожної послідовності визначають сумарну тривалість дозвільних сигналів усіх зарахованих до неї напрямків, тобто тривалість послідовності. Послідовність із максимальним значенням суми тривалостей сигналів вважають головною.

5. Крім дозвільних сигналів, до послідовності також входять проміжки між конфліктними напрямками. Тривалість циклу регулювання визначатиметься тривалістю головної послідовності, тому для неї потрібно розв'язати оптимізаційну задачу для перехідних інтервалів – «задачу комівояжера» на основі матриці tI , до якої входять лише ті напрямки, що їх містить головна послідовність [78].

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 розглядають циклічний процес, який складається з кількох підпроцесів, які можна довільно чергувати.

Тривалості переходів між процесами є аналогією до відстаней між вершинами мережі, якою рухається комівояжер.

Зазначимо, що у разі врахування тривалостей перехідних інтервалів послідовність, для якої сумарна тривалість усіх дозвільних 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 бути винятком з наведеного вище алгоритму і на поточному кроці призвести до неповної оптимізації структури.

З метою уникнення цієї помилки потрібно проаналізувати можливі послідовності, одна з яких може бути головною. Для цього пропонують використати граф структури циклу регулювання. Кожній вершині цього графу присвоюють вагу, значення якої дорівнює тривалості сигналу, що дозволяє рух за напрямком регулювання, який позначає вершина. Дуги графу позначають мінімальні часові проміжки між напрямки регулювання. Граф на рис. 3.27 вже поділений на повні підграфи за алгоритмом «перекриття». Вершини, що становлять повні підграфи, знаходяться одна під однією. Зважаючи на те, що в стовпцях розташовані повні підграфи, кожна вершина з будь-якого стовпця інцидентна хоча б одній вершині з іншого стовпця, інакше ця вершина могла б належати до цього стовпця.

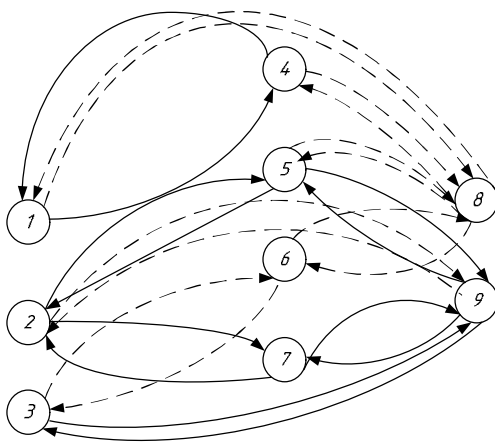


Рис. 3.27. Граф структури циклу регулювання

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

Визначення порядку виклику напрямків головної послідовності зводиться до задачі комівояжера, в якій задано транспортну мережу, що з'єднує n пунктів, а комівояжеру потрібно, виїхавши з деякого пункту, побувати у інших пунктах один раз та повернутися до початкового пункту [78, 81]. Тобто, потрібно знайти найкоротший маршрут, якщо задано матрицю найкоротших відстаней між пунктами мережі.

Блок 2

Формування структури циклу СФР здійснюється з метою врахування всіх напрямків регулювання у циклі та повернення до початку циклу.

Позначимо дії комівояжера:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо комівояжер переїжджає від пункту } i \text{ до пункту } j; \\ 0, & \text{у протилежному разі.} \end{cases} \quad (3.32)$$

Тоді математичне формулювання задачі матиме вигляд: мінімізувати довжину маршруту комівояжера

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \Rightarrow \min, \quad (3.33)$$

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

за обмежень:

- одноразового заїзду до кожного пункту

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad (j = \overline{1, n}; i \neq j); \quad (3.34)$$

- одноразового виїзду з кожного пункту

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (i = \overline{1, n}; i \neq j); \quad (3.35)$$

- заборони розриву маршрутів на декілька замкнених підмаршрутів

$$u_i - u_j + n x_{ij} \leq n - 1 \quad (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n}; i \neq j; u_i \geq 0; u_j \geq 0). \quad (3.36)$$

Блок 3

Сформульована задача є задачею цілочислового програмування. Ефективнішим з методів її розв'язання є метод «гілок і меж». За цим методом спочатку для всієї множини припустимих розв'язків задачі визначають нижню межу довжини будь-якого з маршрутів. Ця межа є числом, менше від якого значення довжини маршруту (цільової функції) заздалегідь бути не може. Потім усю множину допустимих розв'язків задачі розбивають на декілька непорожніх підмножин, і для кожної з них знову визначають нижню межу довжини маршрутів. Серед усіх підмножин вибирають підмножину з найменшим значенням нижньої межі і знову розбивають на дві непорожні підмножини, для яких знову визначають нижню межу.

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

Розв'язання цієї задачі містить низку послідовних операцій [78].

1. Зведення матриці найкоротших відстаней. Послідовно проглядають рядки матриці і в кожному з них знаходять мінімальний елемент (константа зведення). Потім з усіх елементів кожного рядка віднімається відповідна константа зведення. В отриманій матриці аналогічно проглядають стовпці, в яких також відшукують константу зведення. Ці константи віднімають від всіх елементів відповідних стовпців. Отримана матриця називається зведеною і набуває такої властивості: у будь-якому рядку і будь-якому стовпці матриці міститься не менше ніж один нульовий елемент.

2. Визначення нижньої межі характеристики (довжина, час) для всіх маршрутів – кореня «дерева». Оскільки маршрут повинен пройти через усі пункти, до кожного пункту входять і з кожного пункту виходять щонайменше 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. З цього випливає, 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 $W(u) = \sum_{i=1}^n h_i + \sum_{j=1}^n h_j$, де h_i і h_j – константи зведення відповідно рядків і стовпців.

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

4. Вибір пари пунктів для зарахування до маршруту. До маршруту зараховують пару пунктів $(k; l)$ з максимальною оцінкою нульового елемента.

5. Блокування елементів матриці. Під блокуванням розуміють заборону вибору деякого елемента, який може призвести до передчасного зациклювання маршруту. Блокування проводять на кожному етапі розв'язування задачі. Під час вибору пари $(q; p)$, яку потрібно заблокувати (заборонити зарахування до маршруту), можливі характерні випадки, подані на рис. 3.28.

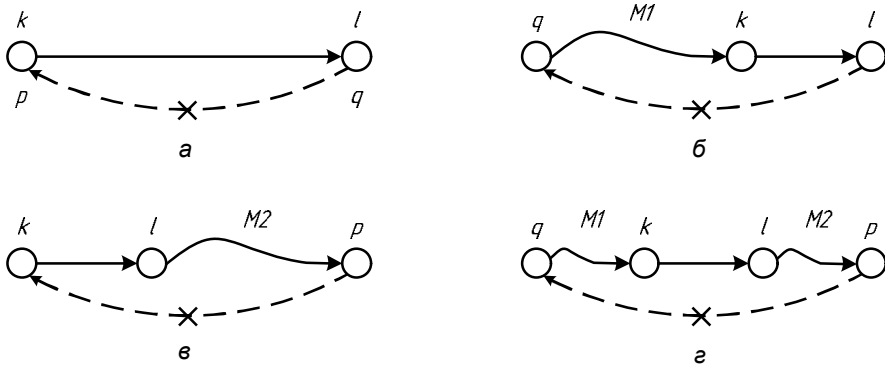


Рис. 3.28. Варіанти блокування пар пунктів

У разі схеми, що на рис. 3.28, а пара $(q; p)$ має зворотну схему нумерації відносно до пари $(k; l)$. Наприклад, пари $(1; 2)$ і $(2; 1)$ утворюють циклічний маршрут $(1-2-1)$. Пара $(q; p)$ блокується.

На рис. 3.28, б обрана на цьому 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 унеможливлення передчасного зациклювання маршруту надалі потрібно заблокувати пару $(l; q)$. Наприклад, до поточного кроку у розв'язок вже введено пару $(2; 3)$, і на цьому кроці в розв'язок вводять пару $(3; 5)$. Тоді в проміжній зведеній матриці під час переходу до наступного кроку потрібно заблокувати пару $(5; 2)$, оскільки надалі це призведе до замкненого маршруту $(2-3-5-2)$, що є неприпустимим.

На рис. 3.28, 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 відповідатиме номеру q заблокованої пари. Наприклад, нехай до цього кроку в розв'язок вже введено пару $(2; 4)$. На цьому етапі до розв'язку вводиться пара $(1; 2)$. Для запобігання передчасному зациклюванню маршруту надалі необхідно заблокувати пару $(4; 1)$, введення якої призводить до утворення замкненого маршруту $(1-2-4-1)$.

На рис. 3.28, г пара $(k; l)$ з'єднує два фрагменти $M1$ і $M2$ деякого маршруту. Наприклад, нехай до цього кроку до розв'язку вже введено пари $(3; 4)$ і $(5; 6)$. До розв'язку на цьому кроці вводиться пара $(4; 5)$. Щоб унеможливити утворення замкненого маршруту за схемою $(3-4-5-6-3)$ необхідно заблокувати пару $(6; 3)$.

Специфіка методу комівояжера потребує відсутності нульових значень у матриці $|T|$, окрім головної діагоналі, оскільки, наприклад, наявність значення $T[1,2]=0$ вказує на збіг координат вузлів 1 та 2, тоді як значення $T[1,3] \neq 0$ та $T[3,2] \neq 0$ унеможливають таке, хоча вказана комбінація значень цілком можлива на практиці. Пропонується заміна нульових елементів матриці на завідомо мінімальні, що дорівнюють 0,001.

Враховуючи порядок програмування циклу, замінені значення забезпечують пріоритет можливих переходів між напрямками (розв'язується задача на мінімум) так: спочатку розглядатимуться 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 $T[i, j] \leq 2,25$, і останньою чергою – напрямки, для яких мінімальні проміжки розраховані до дальніх конфліктних точок $T[i, j] \geq 6$).

Отриманий під час розв'язування задачі комівояжера для матриці мінімальних проміжків $|T|$ «маршрут» позначатиме структуру (послідовність) світлофорного циклу, тобто оптимальний з погляду мінімізації перехідних інтервалів порядок виклику напрямків регулювання.

6. Отримавши оптимальний порядок чергування сигналів головної послідовності, змінюємо рядок матриці W , що містить головну послідовність такою, щоб напрямки чергувалися у визначеному оптимальному порядку. Рядок, що містить головну послідовність, буде першим у матриці W .

7. Заносять номери напрямків до матриці MI з матриці W по рядках зліва направо. Тривалості дозвільних сигналів беруть з матриці M відповідно до номерів напрямків регулювання.

8. Циклограма проявляється у вигляді двовимірної матриці, номери рядків в якій відповідають номерам напрямків регулювання, номери стовпців – секундам циклу регулювання.

У циклі, що триває доти, поки не відкладено сумарну тривалість усіх напрямків регулювання, щосекундно заповнюються комірки матриці структури відповідного стовпця. У такому разі номери рядків змінюються відповідно до змін номерів напрямків у матриці MI , зліва направо.

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

3.4.5. Доповнення груп неконфліктних напрямків. Оскільки запропонований алгоритм для розділення масиву напрямків регулювання на неконфліктні групи передбачає видалення з графу неконфліктних напрямків підграфів, що відповідають групам неконфліктних напрямків, кожен напрямок враховують до структури циклу лише один раз.

Такий результат не повністю відповідає завданню зменшення затримок учасників дорожнього руху, оскільки щосекунди у циклі регулювання потрібно дозволити рух за всіма неконфліктними напрямками. У результаті може виникати можливість неодноразового введення напрямку регулювання до структури циклу, тобто доповнення повних підграфів груп неконфліктних

напрямків до максимальної потужності. З цією метою для кожного отриманого за допомогою алгоритму розширеної ітерації з видаленням підграфу потрібно повторно застосовувати цей алгоритм, доповнюючи вже сформований підграф.

У результаті роботи алгоритму до групи буде введено всі напрямки регулювання, що не є попарно конфліктними з тими, які вже було введено під час роботи алгоритму простої ітерації з видаленням. Після опрацювання всіх початкових підграфів груп неконфліктних напрямків повний склад цих груп визначають остаточно за відповідним алгоритмом (рис. 3.29).

Вище показано, що утворені граfi матимуть максимально можливу потужність. Отже, сформульовану задачу щодо складання мінімальної кількості груп неконфліктних напрямків з максимальною кількістю елементів у групі можна виконати програмним способом.

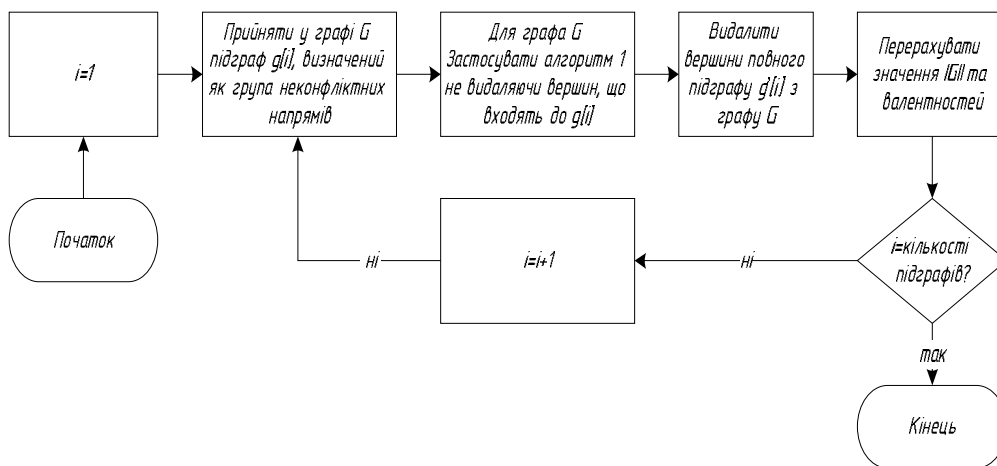


Рис. 3.29. Алгоритм доповнення групи неконфліктних напрямків

3.4.6. Формування режиму регулювання. Коли перехідні інтервали не враховуються, структуру циклу потрібно визначати так.

1. Матриця M змінюється так, щоб елементи другого рядка (тривалості) чергувалися від мінімального до максимального. Це роблять задля того, щоб напрямки найменшої тривалості відкладалися спочатку утворення структури та розривалися меншу кількість разів. Розраховується сумарна тривалість дозвільних сигналів усіх напрямків регулювання. У результаті отримують матрицю MI .

2. Структура циклу проявляється у вигляді двовимірної матриці, номери рядків у якій відповідають номерам напрямків регулювання, номери стовпців – секундам циклу регулювання.

У циклі, що триває доти, поки не відкладено сумарну тривалість усіх напрямків регулювання, щосекундно заповнюються комірки матриці структури відповідного стовпця. Номери рядків змінюються відповідно до зміни номерів напрямків у матриці MI , зліва направо.

Після переходу на наступний рядок виконують перевірку, чи не є напрямком регулювання, що відповідає номеру рядка, конфліктним із будь-яким із тих, що їх вже відкладено на поточній секунді циклу. У разі виявлення конфліктності цей напрямок не відкладається на поточній секунді.

Ця перевірка потрібна для того, щоб між дозвільними сигналами напрямків, що відкладаються по комірках матриці, були дотримані мінімальні часові проміжки, тривалість яких для кожної пари напрямків регулювання дорівнює елементу матриці ММП.

За аналізом структури світлофорного циклу у вигляді матриці можна встановити, що кількість комірок матриці задається на початку і є сумою тривалостей усіх напрямків. Площа циклограми є сумою прямокутників завширшки 1 с, а висота визначається кількістю напрямків регулювання, за якими одночасно дозволяється рух. Ця кількість наперед визначається матрицею мінімальних проміжків для кожної комбінації напрямків, проте сума цих кількостей у всіх прямокутниках є сталою величиною і дорівнює сумарному ефективному часу у циклі. Тому можна стверджувати, що без урахування перехідних інтервалів зміна послідовності введення до структури циклу напрямків регулювання не приводить до зміни тривалості циклу. Головним принципом формування структури циклу в такому разі є введення до набору напрямків на кожній секунді всіх попарно неконфліктних напрямків.

3.4.7. Визначення тривалості елементів світлофорного циклу за наявності пішохідних напрямків з урахуванням наповнення ТЗГК. Середню затримку одного ТЗ для обчислюють за спрощеною формулою Вебстера:

$$\bar{t}_m = 0,9(AT_{\psi} + \frac{1}{N_m}B), \quad (3.37)$$

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

світлофорного циклу, с; N_m – інтенсивність руху ТЗ, од./год; t_{om}^m – фазовий коефіцієнт транспортної фази.

Припустимо, що цикл складається з транспортної та пішохідної фаз:

$$T_u = t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n, \quad (3.38)$$

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.

Середню затримку одного пішохода визначають так [130]:

$$\bar{t}_n = \frac{t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{III}^n}{2}. \quad (3.39)$$

Тоді якщо N_n – інтенсивність руху пішоходів, ос./год, загальна затримка пішоходів за годину становитиме:

$$T_n = N_n \frac{t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{III}^n}{2}. \quad (3.40)$$

Загальна затримка ТЗ за годину:

$$T_m = N_m \bar{t}_m. \quad (3.41)$$

Затримка всіх пасажирів ТЗ за годину становитиме:

$$T_{nac} = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\alpha^i T_m}{k_{3\phi}^i} P_i k_{n-m}^i \right) \quad (3.42)$$

де α^i – частка в потоці ТЗ i -го типу; $k_{3\phi}^i$ – коефіцієнт зведення i -го типу ТЗ до легкового автомобіля; P_i – пасажиромісткість ТЗ i -го типу; k_{n-m}^i – коефіцієнт використання пасажиромісткості для i -го типу ТЗ; m – кількість типів ТЗ.

Умовою рівності затримок пасажирів і водіїв ТЗ та пішоходів є:

$$N_n \frac{t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{III}^n}{2} = T_m \sum_{i=1}^m \left(\frac{\alpha^i}{k_{3\phi}^i} P_i k_{n-m}^i \right) \quad (3.43)$$

Складові цього виразу, своєю чергою, дорівнюють

$$K = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\alpha^i}{k_{3\phi}^i} P_i k_{n-m}^i \right) \quad (3.44)$$

$$\bar{t}_m = 0,9(A \times (t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n)) + \frac{1}{N_m} B), \quad (3.45)$$

$$\lambda = \frac{t_{om}^m + 1}{t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n}, \quad (3.46)$$

$$x = \frac{y(t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n)}{t_{om}^m + 1}, \quad (3.47)$$

$$B = \frac{(y(t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n))^2}{2 \left(1 - \frac{y(t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n)}{t_{om}^m + 1} \right) (t_{om}^m + 1)^2}, \quad (3.48)$$

$$A = \frac{\left(1 - \frac{t_{om}^m + 1}{t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n} \right)^2}{2 \left(1 - \frac{t_{om}^m + 1}{t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n} \cdot \frac{y(t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n)}{t_{om}^m + 1} \right)}. \quad (3.49)$$

Замінивши:

$$t_{III}^m + t_{OT}^n + t_{III}^n = \Delta, \quad (3.50)$$

отримаємо:

$$N_n \frac{t_{OT}^m + t_{III}^m + t_{III}^n}{2} = 0,9 N_m K \left\{ \frac{\left(1 - \frac{t_{OT}^m + 1}{t_{OT}^m + \Delta} \right)^2}{2(1-y)} (t_{OT}^m + \Delta) + \right. \\ \left. + \frac{1}{N_m} \cdot \frac{(y(t_{OT}^m + \Delta))^2}{2 \left(1 - \frac{y(t_{OT}^m + \Delta)}{t_{OT}^m + 1} \right) (t_{OT}^m + 1)^2} \right\}. \quad (3.51)$$

Перетворюючи формулу (3.51), можна отримати повне рівняння 4-го степеня, коренями якого є тривалості основного такту світлофорного циклу, до якого введено транспортні напрямки.

Замінімо:

$$N_n = a; t_{om}^m = x; t_n^m = b; t_n^n = c; \Delta = d; K = e; \Delta = f; y = g. \quad (3.52)$$

Тоді отримане рівняння матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned} & x^4 ad(1-g)^2 + x^3 [ad(1-g)((2-g(1+f)) + (b+c+f)(1-g)) - \\ & - 0,9dge^2(1-g)] + x^2 [ad(1-g)((1-gf^2) + (b+c+f)(2-g(1+f))) + \\ & + f(b+c)(1-g) - 0,9d^2e(f-1)^2(1-g) - 0,9deg^2(1-g)3f] + \\ & + x[ad(1-g)((b+c+f)(1-gf) + f(b+c)(2-g(1+f))) - \\ & - 0,9d^2e(f-1)^2(2-g(1+f)) - 0,9de(1-g)g^23f^2] + \\ & + [ad(1-g)f(b+c)(1-gf) - 0,9d^2e(f-1)^2(1-gf) - \\ & - 0,9deg^2(1-g)f^3] = 0. \end{aligned} \quad (3.53)$$

Його можна розв'язати за методом *Феррарі* [37], який автоматизується, наприклад, за допомогою програми Microsoft Excel (корені рівняння визначають автоматично). Треба зазначити, що, оскільки йдеться про основний такт транспортної фази, мінімальне допустиме значення дорівнює 7 с, а максимальне визначають з урахуванням тривалості терплячого очікування дозвільного сигналу пішоходами. Отже, воно не може перевищувати 54 с. Серед отриманих коренів обирають мінімальний, що дасть змогу мінімізувати тривалість циклу [124]. У табл. 3.7 наведено деякі результати розв'язання рівняння (3.51), що потрапляють до допустимого діапазону.

Таблиця 3.7

Окремі результати розв'язування рівняння (3.51)

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
K	4	2	3	2,1	3,6	10	2	2	3,5
Δ	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 , с	36	28	14	18	24	23	31	53	41

Після опрацювання цих даних отримано лінійну регресійну залежність, яка дає змогу встановити ступінь впливу кожного з аргументів на корені рівняння:

$$t_{om}^m = -111,92 - 0,06N_n - 0,25t_n^m - 0,87t_n^n + 0,04N_m + 7,96K + 1,8\Delta + 306,12y. \quad (3.54)$$

Адекватність отриманої моделі підтверджується значеннями кількох характеристик: коефіцієнт кореляції 0,66; коефіцієнт детермінації 0,44; розрахункове значення критерію *Фішера* 175,09. Статистичну оцінку значущості коефіцієнтів регресійного рівняння виконано за критерієм *Стьюдента*. Розрахункові значення критерію для вільного члена регресійного рівняння та коефіцієнтів за сімох змінних відповідно дорівнювали: -2,7; -13,26; -0,54; -0,17; 11,57; 8,65; 16,52; 26,51 у разі табличного значення 2,446. Тому можна констатувати, що тривалості перехідних інтервалів не істотно впливають на значення основного такту транспортної фази.

Встановлено, крім цього, співвідношення між дозвільними сигналами для конфліктних напрямків регулювання руху ТЗ і пішоходів, що дасть змогу забезпечити однакові витрати часу для пішоходів та пасажирів ТЗ.

3.4.8. Приклад формування режиму регулювання під час управління світлофорним об'єктом за окремими напрямками. З метою формалізації схеми руху ТЗ на перехресті складають схеми траєкторій та напрямків регулювання (рис. 3.30).

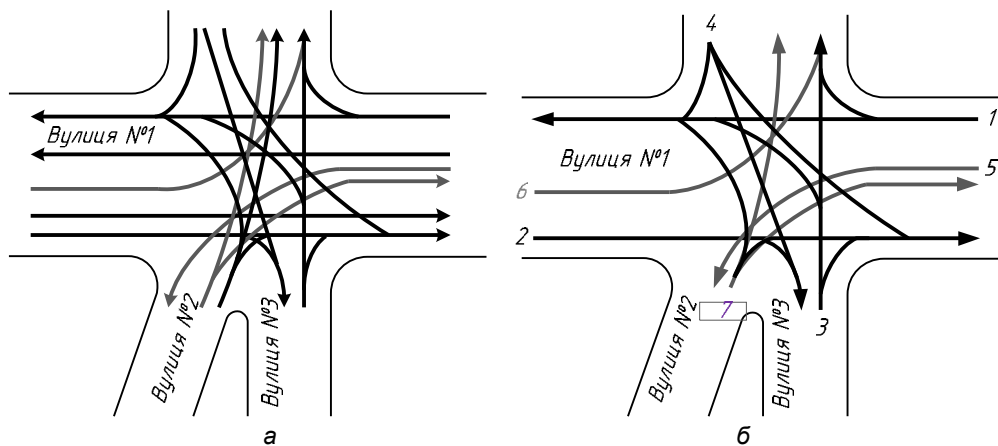


Рис. 3.30. Схема руху ТЗ на перехресті: а – траєкторії руху; б – напрямки регулювання

Після цього визначають групи неконфліктних напрямків. Формують матрицю сумісності напрямків регулювання. З цією метою в матриці мінімальних проміжків (табл. 3.8) усі числа, окрім нулів, замінюють на 1 і, в результаті, отримують матрицю сумісності (табл. 3.9).

Таблиця 3.8

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

Таблиця 3.9

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

Виконують обернення матриці сумісності (табл. 3.10). Формують групи неконфліктних напрямків за алгоритмом розширеної ітерації з видаленням. Обернену матрицю сумісності вважають матричним поданням графу структури світлофорного режиму.

Групи неконфліктних напрямків становитимуть повні підграфи у цьому графі, пошук яких виконується через застосування алгоритму визначення найбільшої кліки. Отримані підграфи (групи неконфліктних напрямків) наведено в табл. 3.11.

Таблиця 3.10

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

Таблиця 3.11

Групи неконфліктних напрямків

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

Для отриманої структури визначають тривалості дозвільних сигналів регулювання за експрес-методикою або за розрахунком на мінімальну тривалість (для трамваїв) – табл. 3.12. З кожної групи обирають напрямок з максимальною тривалістю дозвільного сигналу. З напрямків регулювання, що мають максимальні тривалості в кожній групі, утворюється головна послідовність (табл. 3.13).

Таблиця 3.12

Результати застосування експрес-методики для визначення мінімальної тривалості сигналу

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

Таблиця 3.13

Головна послідовність дозвільних сигналів за напрямками регулювання

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

Для головної послідовності розв'язують задачу комівояжера з урахуваннями тривалості мінімальних проміжків (табл. 3.14).

Таблиця 3.14

Оптимізована головна послідовність

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

Чергування груп неконфліктних напрямків регулювання руху ТЗ змінюється відповідно до зміни чергування цих напрямків, що входять у ці групи, у головній послідовності (табл. 3.15). Заповнюється циклограма відповідно до алгоритму (напрямок 6 – псевдонапрямок для раннього старту напрямку 2).

Таблиця 3.15

Групи неконфліктних напрямків

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

Оптимальність вибору чергування напрямків регулювання руху ТЗ головної послідовності за критерієм мінімізації часових проміжків між дозвільними сигналами підтверджується перебором варіантів чергування у табл. 3.16.

Таблиця 3.16

Визначення оптимальної структури циклу

Елементи головної послідовності дозвільних сигналів				Втрачений час	Мінімальні проміжки, с			
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

Мінімізація тривалостей часових проміжків між дозвільними сигналами світлофорної сигналізації, що утворюють головну послідовність структури світлофорного циклу, призведе до зменшення втраченого часу у циклі світлофорного регулювання, і, у такий спосіб, відповідно може бути критерієм оптимізації структури світлофорного циклу [114].

Отриману циклограму роботи світлофорів наведено на рис. 3.31. Наведений приклад підтверджує, що підхід до управління світлофорною сигналізацією за окремими напрямками можна реалізувати на практиці на всіх етапах визначення режиму регулювання.

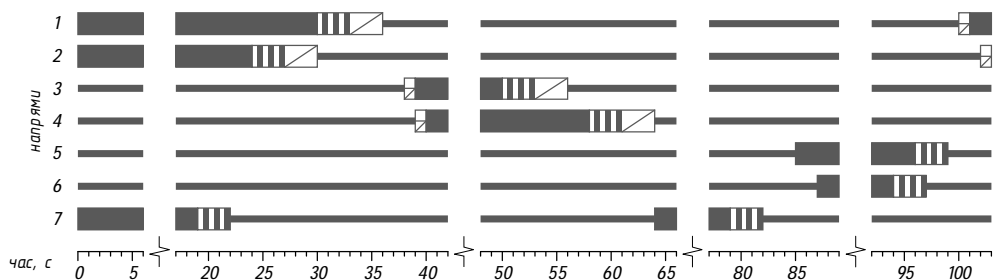


Рис. 3.31. Циклограма світлофорного регулювання, побудована за результатами мінімізації тривалостей часових проміжків між дозвільними сигналами світлофора

3.5. Удосконалення режиму роботи регульованого перехрестя з урахуванням безпеки пішоходів та пріоритету громадського транспорту

3.5.1. Застосування фазоподібних інтервалів. Збільшення інтенсивності дорожнього руху і, як наслідок, зростання завантаженості рухом підходів до регульованих перехресть потребують повнішої адаптації режимів світлофорного регулювання до дорожньо-транспортної ситуації. Апаратура АСУДР на сучасному етапі розвитку здатна забезпечити підвищення гнучкості СФР без істотного здорожчання обладнання [138].

Сучасні дорожні контролери дають змогу керувати сигнальними групами світлофорних об'єктів незалежно одна від одної, реалізуючи принцип відповідності тривалості дозвільного сигналу регулювання рівню завантаження підходу до перехрестя за цим напрямком регулювання. Крім того, на практиці

набувають широкого застосування транспортні детектори, під'єднання яких до дорожніх контролерів, що використовують адаптивні алгоритми керування, уможливує визначення тривалості сигналів регулювання, враховуючи реальну дорожньо-транспортну ситуацію [80]. За окремими дослідженнями [75] встановлено, що небезпека виконання певних маневрів ТЗ на регульованих перехрестях є високою, оскільки ці маневри пов'язані з виникненням небезпечних конфліктів між пішоходами і ТЗ, а також ТЗ між собою. До таких маневрів належить, зокрема, виконання повороту ліворуч. У [129] рекомендують за інтенсивності лівоповоротного маневру, більша, ніж 120 зведених транспортних одиниць на годину, забезпечити безконфліктність лівоповоротної траєкторії із зустрічним потоком.

Виконання цієї вимоги призводить під час формування структури світлофорного циклу за методом поєднання неконфліктних напрямків регулювання [67] до уведення в структуру циклу додаткової фази регулювання. Коли інтенсивність лівоповоротного транспортного потоку незначно перевищує 120 одиниць за годину, величина фазового коефіцієнта додаткової фази регулювання, призначеної для пропускання лівоповоротного потоку, буде невеликою. Це призведе до того, що у розрахунках тривалості циклу світлофорного регулювання за формулою *Вебстера* [200] значення тривалості основного такту фази, що містить лівоповоротний напрямок, буде меншим за 7 с. Під час коригування основних тактів потрібно пропорційно збільшити всі тривалості основних тактів, що призведе до невиправданого збільшення тривалості циклу світлофорного регулювання та, як наслідок, збільшення тривалості затримок ТЗ перед стоп-лініями регулювання.

Для уникнення такої ситуації пропонують перевірити можливість заміни фази регулювання, що містить лівоповоротний напрямок фазоподібним інтервалом, наявність якого в структурі світлофорного циклу забезпечить збільшення тривалості дозвільного світлофорного сигналу з того підходу, з якого виконується поворот ліворуч відносно тривалості дозвільного сигналу зустрічного напрямку.

З метою забезпечення можливості застосування такого підходу за пофазового принципу управління СФР у розрахунках тривалостей елементів циклу регулювання (за формулою *Вебстера*) пропонується кілька формальних ходів.

Припустимо, що лівоповоротний потік з інтенсивністю руху N_d , більший ніж 120 зведених транспортних одиниць за годину (120 зв. од./год),

рухається з першого напрямку регулювання. Під час формування першої фази регулювання вважатимемо, що інтенсивність лівого повороту за першим напрямком регулювання становить 120 зв. од./год. Таке припущення дає можливість ввести зустрічні напрямки 1 та 2 у першій фазі регулювання, і разом із ними додати до цієї фази пішохідні напрямки, за якими рухаються пішоходи, що переходять проїзні частини, на які ТЗ виконують повороти. Частина потоку лівоповоротних ТЗ, що за годину наблизиться до 120 зведених одиниць, зможе виконати поворот ліворуч упродовж першої фази регулювання. Інша частина потоку з інтенсивністю, більшою ніж 120 зв. од./год (надмірна інтенсивність) $N_{над}$, залишатиметься перед стоп-лінією напрямку 1 в очікуванні наступного дозвільного сигналу. Значення цієї інтенсивності можна встановити за виразом:

$$N_{над} = N_{л} - 120, \text{ од} / \text{ год}. \quad (3.55)$$

Для пропускання цієї інтенсивності пропонують виділити псевдонапрямок регулювання 5, що може входити до структури світлофорного циклу, проте не відповідає жодному зеленому сигналу на світлофорах перехрестя. Цей псевдонапрямок лівого повороту можна безконфліктно увести у наступну фазу регулювання для забезпечення максимальної пропускної здатності перехрестя для надмірної інтенсивності. Так, складають формальну схему пофазового роз'їзду, у другу фазу якої вводять безконфліктний псевдонапрямок 5 та повністю неконфліктні з ним напрямки 1 та 12 (конфліктні точки з напрямком 5 відсутні). У третю фазу вводять транспортні та пішохідні напрямки з підходів іншої вулиці (рис. 3.32). Потік насичення для напрямку 1 в першій фазі регулювання пропонують визначати з урахуванням наявності повороту ліворуч з крайньої лівої смуги. У другій фазі напрямок регулювання 1 вже не рухатиметься крайньою лівою смугою, оскільки для кожного напрямку регулювання потрібно виділяти як мінімум одну смугу руху [86], і крайня ліва смуга буде виділена для напрямку 5. З цієї смуги поворот виконуватиметься безконфліктно і лише в одному напрямку, тому потік насичення визначатиметься залежно від радіуса поворотної траєкторії руху [67].

Зважаючи на те, що псевдонапрямок регулювання не має відповідного йому зеленого сигналу на світлофорі, реальна схема пофазового роз'їзду матиме вигляд, наведений на рис. 3.33. За цією схемою можна зробити висновок, що фаза I¹ не містить напрямків регулювання, що входять лише до неї. Так, її застосування призводить до збільшення тривалості дозвільного

сигналу у напрямку 1 відносно дозвільного сигналу у зустрічному напрямку регулювання 2. Це збільшення складатиметься з часу, необхідного для виїзду з перехрестя ТЗ, що завершують рух у першій фазі за напрямком 2 (напрямки 2 і 5 конфліктні, отже між їх ввімкненням необхідна наявність додаткового такту), а також часу, протягом якого лівоповоротний потік надмірної інтенсивності, що в середньому припадає на один цикл регулювання, мінає стоп-лінію та виїздить з перехрестя. Крім того, немає потреби у проведенні перевірки тривалості основного такту цієї фази на мінімум 7 с. У виконанні такої перевірки для напрямку 1 потрібно враховувати, що тривалість дозвільного сигналу цього напрямку складається з тривалості першої фази регулювання та основного такту другої фази регулювання [147].

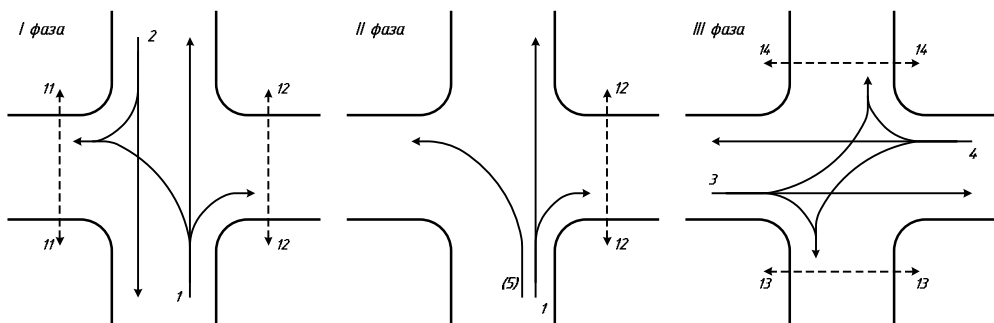


Рис. 3.32. Формальна схема пофазового роз'їзду ТЗ на перехресті з інтенсивністю лівого повороту більшою 120 зв. од./год

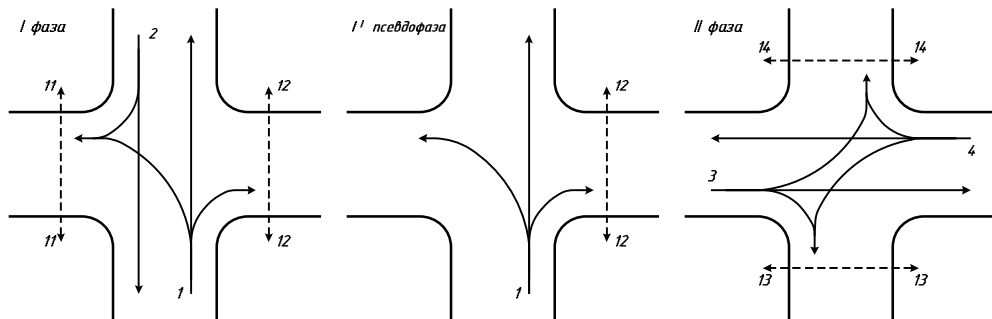


Рис. 3.33. Реальна схема пофазового роз'їзду

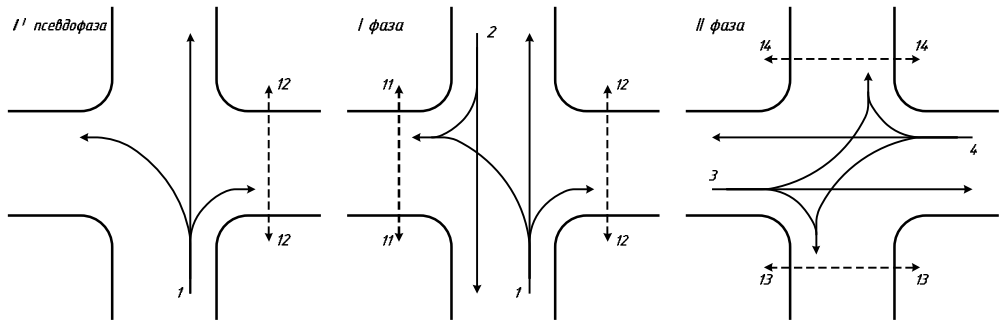


Рис. 3.34. Схема пофазового роз'їзду з уведенням раннього старту ТЗ

За зміни порядку чергування фаз регулювання у циклі можливе переміщення у часі фазоподібного інтервалу, призначеного для виконання повороту ліворуч, відносно фази регулювання, у якій рухаються прямий і зустрічний напрямки по вулиці, з якої виконується поворот ліворуч з інтенсивністю ТП, більшою за 120 зв. од./год. У такому разі можливі два варіанти розташування фазоподібного інтервалу: зелений додатковий та ранній старт ТЗ (на рис. 3.33 і 3.34 відповідно).

Зміна структури циклу в такому разі, як і звичайно, може призвести до зміни його тривалості за рахунок оптимізації перехідних інтервалів, а також до зміни параметрів графіків координованого регулювання за рахунок переміщення рядків безперервного часу. Однак на практиці застосування раннього старту є менш поширеним, ніж зеленого додаткового, оскільки небезпечним моментом у цьому є час переходу з фази I' на фазу I , про який водії, що повертають ліворуч за напрямком 1, ніяк не проінформовані, хоча з моменту початку першої фази регулювання втрачають перевагу у русі.

Оскільки відповідно до наведених вище принципів надмірна лівопоротна інтенсивність належить до псевдонапрямку, то

$$N_{5(l)}^{II} = N_l - 120, \text{ зв. од./год}, \quad (3.56)$$

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

Завантаження смуг напрямків регулювання, що об'єднані в одну фазу, повинно бути однаковим, отже:

$$\frac{N_{5(i)}^{II}}{S_5^{II}} = \frac{N_1^{II}}{S_1^{II}}, \quad (3.57)$$

де S_j^i – коригований потік насичення за напрямком 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 напрямком регулювання, оскільки співвідношення між прямими та поворотними інтенсивностями не залежить від номера фази:

$$N_{I(nm)}^{II} = \frac{N_{nm}}{N_{nm} + N_{np}} \cdot \frac{N_5^{II} S_1^{II}}{S_5^{II}}; \quad N_{I(np)}^{II} = \frac{N_{np}}{N_{nm} + N_{np}} \cdot \frac{N_5^{II} S_1^{II}}{S_5^{II}}, \quad (3.58)$$

де N_{nm} , N_{np} , N_l – інтенсивності руху ТЗ на під'їзді до стоп-лінії, з якої виходять напрямки 1 та 5, відповідно прямо, праворуч, ліворуч, зв. од./год.

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

$$N_{I(l)}^I = 120; \quad N_{I(nm)}^I = N_{nm} - N_{I(nm)}^{II}; \quad N_{I(np)}^I = N_{np} - N_{I(np)}^{II}. \quad (3.59)$$

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

Застосування означених формальних кроків дасть змогу за можливості замінити введення додаткової фази до структури світлофорного циклу з метою пропускання 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.

3.5.2. Застосування переходоподібних інтервалів. Перехрестя з рознесеними стоп-лініями утворюються в разі перетинання вулиць з бульварами та в разі віддалення пішохідних переходів, коли пішохідні потоки перетинають проїзну частину на відстані від перехрестя або у випадках організації віддалених поворотів ліворуч.

За принципом конфігурації перехрестя з рознесеними стоп-лініями можна поділити на дві групи:

- із синхронним відпрацюванням циклограми сигнальними групами в перерізах рознесених стоп-ліній;
- із затримкою зеленого сигналу на вихідних стоп-лініях з іншими схемами регулювання (наприклад, затримками в одному з напрямків).

На рис. 3.35 наведено схему пофазного роз'їзду типового перехрестя з бульваром. Напрямки, що розпочинають рух від рознесених стоп ліній в одному напрямку, мають різні номери для можливості відпрацювання різних циклограм сигнальними групами одного напрямку, що працюють на рознесених стоп-лініях. Через це до першої фази входять чотири напрямки, які попарно становлять прямий та зворотний напрямок для магістралі загалом. До другої фази входять напрямки з проїзних частин бульвару. Водії, що рухаються цими напрямками, на виконання вимоги ПДР, зупиняються перед стоп-лініями напрямків 5 та 6. Цю вимогу поширюють і на водіїв, що прямують за напрямками 1 та 2.

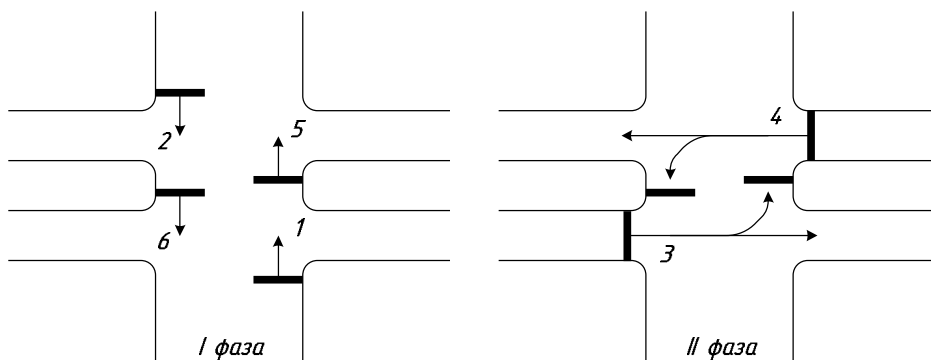


Рис. 3.35. Групи неконфліктних напрямків на перехресті з рознесеними стоп-лініями

Якщо перехрестя належить до першої з означених вище груп за схемою організації роботи світлофорного об'єкта, то для уведення даних по ньому треба користуватися звичайними принципами утворення конфліктної матриці. Геометричне визначення напрямків до НКТ наведено на рис. 3.36. Якщо бульварні проїзди матимуть однакову ширину, відстані до дальніх точок для напрямків 1, 2, 5, 6 будуть однаковими, або попарно однаковими відповідно до

розташування рознесених стоп-ліній. Тому мінімальні проміжки для означених напрямків будуть однаковими, а відпрацювання переходів «зелений – червоний» у перехідному інтервалі з першої на другу фазу також однаковим.

Коли інтенсивність руху ліворуч на напрямках 3 та 4 буде високою, на виконання вимоги ДСТУ 4092-2002 [13] про обов'язкову локальну координацію світлофорів на лініях регулювання потрібно забезпечити відсутність сталої черги у перехідному інтервалі з першої на другу фазу перед лініями регулювання напрямків 5 та 6, а за подальшого зростання інтенсивності і змінити схему пофазного роз'їзду. Для забезпечення відсутності залишкової черги необхідно, щоб ТЗ першого та другого напрямків не зупинялися перед стоп-лініями напрямків 5 та 6, а, отже, проїздили перехрестя повністю.

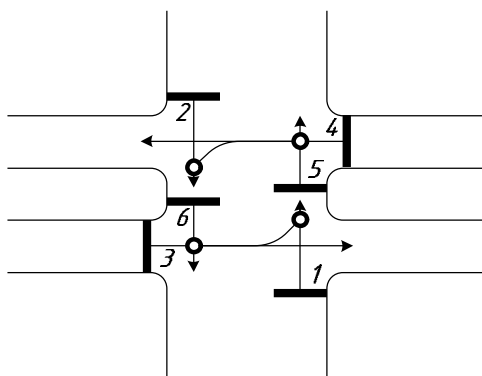


Рис. 3.36. Схема для визначення відстаней до дальніх конфліктних точок

Найвіддаленіші конфліктні точки напрямків 1 та 2 виникнуть на місцях НКТ, напрямків 5 та 6 відповідно. Особливістю програмування режимів для перехресть другого виду з рознесеними стоп-лініями є зміна відстаней до НКТ для напрямків перших стоп-ліній. На перехрестях з іншими схемами регулювання розрахунок відстаней до НКТ провадять залежно від розташування місць на складному перехресті, де необхідна зупинка на заборонний сигнал, або враховуючи припущення, що в певних напрямках ТП має проходити перехрестя без зупинки (метод локальної координації «Турбіна» [130]).

Отже, введення додаткових стоп-ліній дає змогу гарантувати безпечний проїзд ТЗ перехрестя на напрямку регулювання, для якого відстань до НКТ є великою.

На основі матриці відстаней до НКТ напрямків регулювання розраховують матрицю мінімальних часових проміжків $t[i, j]$, елементи якої, окрім елементів головної діагоналі, що дорівнюють нулю, визначають за формулою

$$t[i, j] = t_p + \frac{V_i}{2a} + \frac{B[i, j] + l_a}{V_i} - \frac{B'[j, i]}{V'_j}, \quad (3.60)$$

де t_p – тривалість реакції водія, с (0,8–1,2 с); V_i – швидкість руху ТЗ, м/с; a – прискорення (уповільнення), $a^k = 2,5\text{--}3,0$ м/с²; $B[i, j]$ – елемент матриці відстаней до НКТ, м; l_a – довжина зведеного автомобіля, м ($l_a = 5$ м); $B'[i, j]$ – елемент матриці відстаней до БКТ, м; V' – максимально дозволена швидкість руху, м/с.

За швидкість руху ТЗ приймається швидкість 85 % забезпечення, а в реальних умовах швидкість залежить від складу потоку [123]. Якщо ТЗ рухається з іншою швидкістю, він може не встигнути доїхати від критичної точки до дальньої конфліктної точки до моменту приїзду туди ТЗ з конфліктного напрямку. Назвемо швидкість, рухаючись з якою, автомобіль не встигне досягти конфліктної точки, критичною швидкістю $V_{кр}$. Тоді:

$$t_p + \frac{V_{кр.i}}{2a} + \frac{B[i, j] + l_a}{V_{кр.i}} - \frac{B'[j, i]}{V'_j} > t_p + \frac{V_i}{2a} + \frac{B[i, j] + l_a}{V_i} - \frac{B'[j, i]}{V'_j}; \quad (3.61)$$

$$\frac{V_{кр.i}}{2a} + \frac{B[i, j] + l_a}{V_{кр.i}} > \frac{V_i}{2a} + \frac{B[i, j] + l_a}{V_i}. \quad (3.62)$$

Після перетворень отримуємо:

$$V_i V_{кр}^2 - (V_i^2 + 2a(B[i, j] + l_a))V_{кр} + 2aV_i (B[i, j] + l_a) > 0; \quad (3.63)$$

$$V_{кр}^2 - \left(V_i + \frac{2a(B[i, j] + l_a)}{V_i} \right) V_{кр} + 2a(B[i, j] + l_a) > 0. \quad (3.64)$$

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

$$(V_{кр} - V_i) \left(V_{кр} - \frac{2a(B[i, j] + l_a)}{V_i} \right) > 0. \quad (3.65)$$

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

Оскільки миттєві швидкості руху ТЗ розподіляються за нормальним законом, можливо визначити імовірність того, що миттєва швидкість будь-якого ТЗ не буде критичною, тобто не потрапить до наведених вище інтервалів [22]:

$$P(\alpha \leq V \leq \beta) = \Phi\left(\frac{\beta - \bar{V}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - \bar{V}}{\sigma}\right), \quad (3.66)$$

де α та β – межі інтервалів швидкостей; Φ – функція Лапласа; \bar{V} – середнє значення швидкості ТЗ, м/с; σ – середньоквадратичне відхилення швидкості руху ТЗ, м/с.

У розглядуваному випадку, якщо $V_i^2 > 2a(B[i, j] + L_a)$, то $\alpha = \frac{2a(B[i, j] + L_a)}{V_i}$; $\beta = V_i$. Якщо ж $V_i^2 < 2a(B[i, j] + L_a)$, 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 черга ТЗ, що виїхали з другорядних напрямків (на рис. 3.36 це напрямки 3 і 4) ліворуч. Ширина бульвару та кількість смуг за напрямками 5 і 6 повинні відповідати довжині черги, що утворюється, інакше вказані ТЗ заблокують перехрестя. Якщо перехрестя належить до першої групи за наведеною вище класифікацією, то між вхідними та додатковими стоп-лініями нагромаджуватися черга з тих ТЗ, що в'їхали на перехрестя в кінці дозвільних сигналів за напрямками 1 та 2.

Зважаючи на зазначене, зарахування перехрестя до однієї з груп за режимом роботи напрямків регулювання основних (вхідних) і додаткових стоп-ліній потрібно виконувати, зокрема, з урахуванням розміщення черги ТЗ перед додатковими стоп-лініями. У разі повністю насиченої фази ТЗ проїздять переріз стоп-лінії з інтенсивністю, що дорівнює потоку насичення під'їзду до перехрестя.

Оскільки черга перед додатковою стоп-лінією формується із ТЗ, що проїхали вхідну на дозвільний сигнал та зупинилися перед додатковою на заборонний, її довжина становитиме:

$$l_q = \frac{\frac{B}{V} \sum_{e=1}^f S_e - \Delta t \sum_{j=1}^n S_j + \sum_{k=1}^h t_{зел.k} S_k}{3600n} \sum_{i=1}^r \frac{\alpha_i (l_{ai} + \Delta l)}{k_{npi}}, \quad (3.67)$$

де B – відстань між вхідною та додатковою стоп-лініями, м; V – швидкість руху ТЗ 85 % забезпечення за вхідним напрямком, м/с; f , n , h – кількість смуг руху відповідно через вхідну магістральну, додаткову та вхідну другорядну стоп-лінії; S_e – потік насичення e -ої смуги на магістральному в'їзді, зв. од./год; Δt – різниця тривалостей дозвільних сигналів світлофорів за напрямками магістральної вхідної та додаткової стоп-ліній, с; S_j – потік насичення p -ої смуги на виїзді, зв. од./год; $t_{зел.k}$ – ефективна тривалість дозвільного сигналу за вхідним другорядним напрямком, яким прямують ТЗ k -ою смугою руху, с; S_k – потік насичення k -ої смуги на другорядному в'їзді, зв. од./год; r – кількість груп ТЗ у потоці через вихідну стоп-лінію; α_i – частка ТЗ i -го типу у вихідному потоці; l_{ai} – габаритна довжина ТЗ i -го типу, м; Δl – мінімальна дистанція між ТЗ, що зупинилися один за одним, м; k_{npi} – коефіцієнт зведення ТЗ до легкового автомобіля.

Частку ТЗ i -го типу визначають з виразу

$$\alpha_i = \sum_{v=1}^t \beta_{iv} \chi_v, \quad (3.68)$$

де t – кількість в'їздів; β_v – частка ТЗ i -го типу у v -му вхідному потоці; χ_v – частка v -го вхідного потоку у вихідному потоці.

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

3.5.3. Визначення тривалості елементів циклу для гарантованого проходу пішоходів. З урахуванням фіксованої у [13] тривалості дозвільного миготливого сигналу (3 с), а також фіксованого діапазону

тривалості заборонного пішохідного сигналу у перехідному інтервалі (3–5 с) , тривалість мінімального інтервалу пішохідного напрямку становитиме:

$$t[i, j] = 3 + (3 \dots 5) = 6 \dots 8 \text{ с.} \quad (3.69)$$

Тривалість мінімального інтервалу повинна відповідати тривалості, необхідної для проходу проїзної частини останнім пішоходом, який вийшов на неї до увімкнення дозвільного миготливого сигналу. Ця тривалість розраховується за співвідношенням:

$$t'[i, j] = \frac{B}{V_n}, \quad (3.70)$$

де B – ширина проїзної частини, м; V_n – швидкість руху пішохода, м/с (за [13] приймається 1,3 м/с).

Отримане значення потрібно округлити у більший бік до цілого числа та перевірити його входження до діапазону (2.87).

Відповідно до [13], мінімальну тривалість, що відводять пішоходам для проходу проїзної частини у світлофорному циклі, визначають за виразом

$$t_{niu} = \frac{B}{V_n} + 5. \quad (3.71)$$

Число 5 враховує тривалість червоного пішохідного сигналу (3.70). Проте у наведеному виразі не враховано тривалість, необхідну для сходження на проїзну частину кількох рядів пішоходів, що можуть накопичуватися перед переходом в очікуванні дозвільного сигналу.

Тривалість, необхідну для перетину проїзної частини групою пішоходів, визначають за формулою

$$T_{niu} = \frac{B}{V_{niu}} + t_{zn} + \frac{d_{niu} \cdot (n-1)}{V_{niu}}, \quad (3.72)$$

де B – довжина пішохідного переходу, м; V_{niu} – швидкість пішохода, м/с; t_{zn} – тривалість реакції і затримки першого ряду пішоходів (приймають 2,5 с); d_{niu} – дистанція між рядами пішоходів (приймають 0,2 м); n – кількість рядів пішоходів.

З урахуванням цього, отримують мінімальну тривалість проходу пішоходами проїзної частини:

$$t_{niu} = \frac{B}{V_n} + t_{zn} + \frac{d_{niu}(n-1)}{V_n} + 5. \quad (3.73)$$

Кількість рядів пішоходів визначають за співвідношення (отриманий результат округляють у бік більшого цілого числа) [163]:

$$n = \frac{n_{zp}}{H/2}, \quad (3.74)$$

де n_{zp} – кількість пішоходів у групі, ос.; H – ширина пішохідного переходу, м.

Кількість пішоходів у групі визначають за формулою (отриманий результат округляють у бік більшого цілого числа) [163]

$$n_{zp} = \frac{N_{niu}}{3600} (T_{\psi} - (t_{OT}^k + t_{III}^k - t_{\max}[i, j])), \quad (3.75)$$

де N_{niu} – інтенсивність пішохідного руху, ос./год; T_{ψ} – тривалість світлофорного циклу, с; t_{OT}^k – тривалість основного такту фази, до якої входить пішохідний напрямок, с.

З урахуванням входження до перехідних інтервалів мінімальних проміжків пішохідних напрямків, формула (3.76) [146], що застосовується для визначення тривалості втраченого часу, підлягає заміні на формулу (3.77), тобто

$$\bar{L} = \sum_{k=1}^m (t_{III}^k - 1) \quad (3.76)$$

на

$$L = \sum_{k=1}^m (t_{\max}^k [i, j] - 1). \quad (3.77)$$

Якщо розрахована тривалість основних тактів регулювання менша від тривалості, що потрібна для гарантування безпечного проходу проїзної частини пішоходами, тривалості основних тактів підлягають коригуванню. Крім того, тривалості інших основних тактів, тривалості яких не коригувалися, потрібно пропорційно збільшити [76, 77].

Для формалізації вказаних процедур пропонують застосовувати коефіцієнти корекції основних тактів регулювання \bar{k}'' , що визначають для кожного пішохідного напрямку регулювання за співвідношенням

$$\bar{k}'' = \frac{t_{niu}^i}{t_{om}^k}. \quad (3.78)$$

Під час підстановки до формули (2.96) формули (2.89) отримаємо:

$$\bar{k}'' = \frac{\frac{B}{V_n} + 5 - t_{ni}^k}{t_{om}^k}; \quad (3.79)$$

$$k'' = \frac{t_{niu} - t_{ni}^k}{t_{om}^k}. \quad (3.80)$$

Формула (3.79) з урахуванням виразів (3.72)–(3.77) матиме вигляд:

$$k'' = \frac{B + d_{niu} \frac{N_{niu} (T_u - (t_{om}^k + t_{ni}^k - t[i, j])) - 1}{1800H} - 1}{V_{niu}} + t_{zn} + 5 - t_{ni}^k}{t_{om}^k}. \quad (3.81)$$

Після перетворення отримуємо:

$$k'' = \frac{d_{niu} N_{niu} (T_u - (t_{om}^k + t_{ni}^k - t[i, j])) - 1}{1800H V_{niu}} + \frac{B - 1}{V_{niu}} + t_{zn} - t_{ni}^k + 5}{t_{om}^k}. \quad (3.82)$$

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

На рис. 3.37 наведено залежності тривалості, необхідної пішоходу для проходження всієї проїзної частини та її половини з нормативною швидкістю [13], а також максимальні та мінімальні значення часу, що відводять для цього відповідно до формули (3.69).

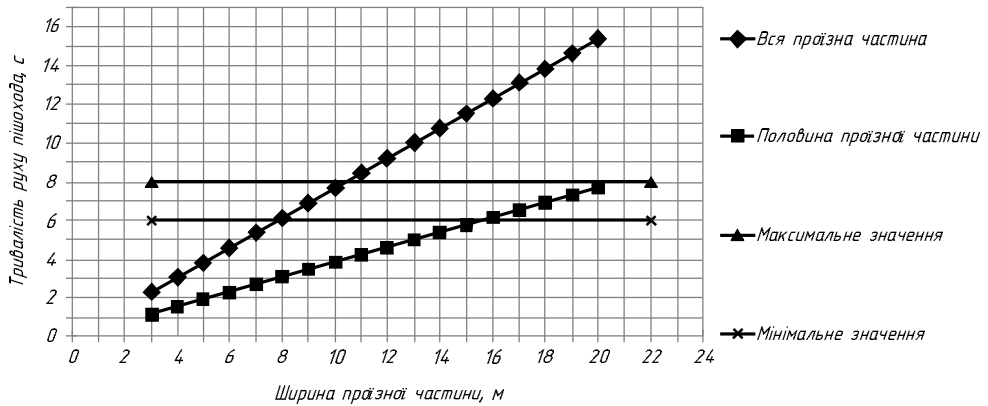


Рис. 3.37. Розрахункові та нормативні тривалості проходу пішоходів через проїзну частину

Якщо значення тривалості, необхідної для залишення проїзної частини пішоходами, перевищує максимальне нормативне значення, рекомендують застосовувати табло зворотного відліку часу дозвільного сигналу для пішоходів. Під час вирішення питання про доцільність застосування табло потрібно зважати на динаміку аварійності на досліджуваному пішохідному переході, на формулювання пункту 8.7.3, в ПДР [44], що визначає зелений миготливий сигнал (зокрема і для світлофорів типу II [13]) як дозвільний, а також те, що застосування такого табло часто є неможливим за використання адаптивних алгоритмів керування.

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

3.5.4. Врахування напрямку руху трамваїв та тролейбусів під час їх наближення до перехрестя. Сьогодні набула актуальності проблема підвищення ефективності використання пропускнув здатності міських регульованих перехресть. Невідповідність параметрів світлофорних режимів

динамічним ТП призводить до утворення заторів, що погіршують екологічну ситуацію, призводить до простоїв транспортних засобів та втрат часу пасажирями, є непрямим причинами ДТП [148].

Під час застосування АСУДР на ВДМ виникає потреба корекції координуваних світлофорних режимів з огляду на транспортні засоби громадського користування – ТЗГК (автобуси, тролейбуси, трамваї), для яких через особливі динамічні характеристики та наявність зупинок характерні особливі режими руху, відмінні від режимів загального ТП. Водночас через високу, порівняно з легковим автомобілем, пасажиромісткість простої ТЗГК призводять до значних сукупних втрат часу учасниками дорожнього руху, передовсім тими пасажирями цих ТЗГК та, через збільшення інтервалів руху, тими пасажирями, що чекають на зупинках [122].

У системах ізольованого СФР та в АСУДР ефективно коригувати параметри регулювання, залежно від прибуття до зони регулювання ТЗГК, дають змогу системи авторегулювання, що переважно діють за алгоритмами, які залежать від прийнятих стратегій регулювання. Системи пріоритетного пропускання ТЗГК можна класифікувати за трьома стратегіями: пасивна, активна та адаптивно-оперативна [181]. Пасивні стратегії працюють безперервно, незалежно від того, чи наявні перед перехрестям ТЗГК, чи ні, та не вимагають системи виявлення цих ТЗ. Активні стратегії використовують системи виявлення ТЗГК для того, щоб виявити ТЗ, які підлягають пріоритету. Адаптивно-оперативна стратегія забезпечує пріоритет, одночасно випробовуючи та оптимізуючи задані критерії роботи.

Для ефективного застосування алгоритмів активної стратегії необхідно надійно та своєчасно виявляти наближення ТЗГК до зони регулювання. З цією метою використовують детектори різної конструкції та різного принципу дії.

Такий вид ТЗГК як тролейбус має деякі особливості режиму руху, що більшою мірою проявляються поблизу перехресть. Наявність контактної мережі зумовлює потребу проходження спеціальних частин ліній (зокрема, стрілок) зі зниженою швидкістю. Крім того, ці спеціальні частини є ключовими елементами, які визначають режим руху тролейбусів у всій зоні регулювання [9].

Тролейбусна стрілка в місцях розходження лінії працює так: якщо тролейбус проїздить стрілку праворуч, водій під час проходження стрілки вмикає тролейбусний двигун, сильно знижуючи витрату струму з контактної мережі тролейбусом (рис. 3.38). Привід стрілки, що є електромагнітом, який перенапрямає штанги ліворуч, спрацьовує лише в тому разі, коли обмоткам електромагнітів, під'єднаним у стрілці послідовно до електричного ланцюга

тролейбуса, для спрацювання достатньої сили струму, що проходить через них. Спрацювання приводу і переведення штанг ліворуч досягають за рахунок увімкнення тролейбусного двигуна під час проходження стрілки та збільшення у такий спосіб сили струму, який проходить через електромагніти.

Зауважимо, що переведення штанг тролейбуса ліворуч супроводжується проходженням через електромагніти, що є виконавчими елементами стрілки, струму з силою, яка дорівнює струмові спрацювання електромагнітної систем (30–60 А) залежно від налаштування стрілки. Під час проходження штанг праворуч через мережу магнітів проходить струм, що дорівнює струмові власних потреб тролейбуса та до спрацювання електромагнітної системи стрілок не призводить. Тоді, коли струмознімачі на стрілці відсутні, струм через мережу електромагнітів не проходить взагалі. Тому поява електричного струму 30–60 А на стрілці є ознакою прибуття до перехрестя тролейбуса, що рушить ліворуч; поява струму менше ніж 30 А свідчатиме про прибуття тролейбуса, що рушить прямо або ж праворуч [145].

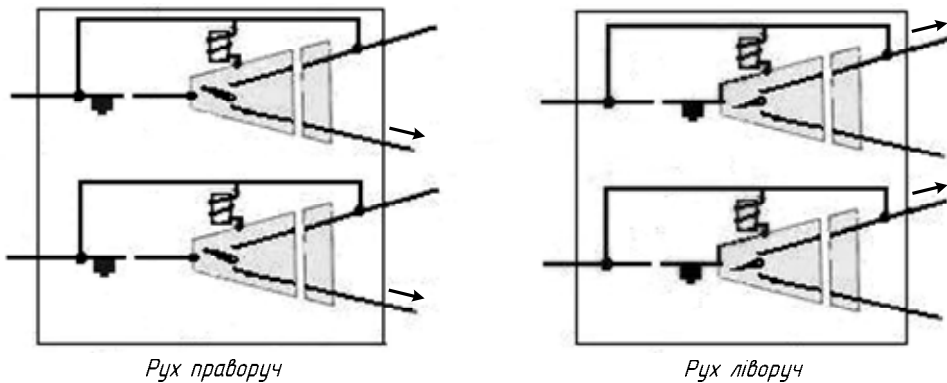


Рис. 3.38. Варіанти положень тролейбусної стрілки

Для перетворення цього сигналу на сигнал виклику на світлофорі, продовження чи пропускання певних елементів циклу світлофорного регулювання пропонують використати пасивний давач (рис. 3.39). Він складається з двох реле струму та електромагнітного реле. Під час розроблення цього приладу дотримані норми електробезпеки (контактна тролейбусна мережа напругою 600 В гальванічно ізольована від сигнальної мережі дорожнього контролера напругою 5–12 В).

Виходи 1, 2 та 3 під'єднуються до викичного блоку дорожнього контролера замість кнопок, які застосовуються для виклику фаз регулювання. Виходи 4 та 5 під'єднуються до мінусового та плюсового провідників контактної мережі відповідно (якщо плюсовий та мінусовий провідник розташовані в іншому порядку, змінюється полярність під'єднання реле струму). Виходи 6 та 7 під'єднують до ізолюваних повітряними проміжками пластин, на яких розміщені напрямні та крила стрілок.

Якщо тролейбус проходить стрілку праворуч, від плюсового провідника 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 провідника проходить струм величиною більше ніж 1 А та менше ніж 30 А. Оскільки всі перелічені елементи мережі під'єднано паралельно, то 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. Тоді реле 11 спрацює та замкне клему 1 і 2 через нормально замкнені контакти реле 12.

Якщо тролейбус проходить стрілку ліворуч, від плюсового провідника через описаний вище ланцюг до мінусового провідника проходить струм величиною більше ніж 30 А. Оскільки всі перелічені елементи мережі під'єднано паралельно, то 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 крила стрілки змінюють своє положення, і тролейбусні штанги переводяться на ліву лінію, а спрацювання реле струму 8 та 11 спричиняє замикання між собою контактів 1, 2 і 3. Проте, за рахунок різниці потенціалів на контактах 2 і 3, спрацює реле 12, і тому струм між клемами 1 і 2 не проходитиме.

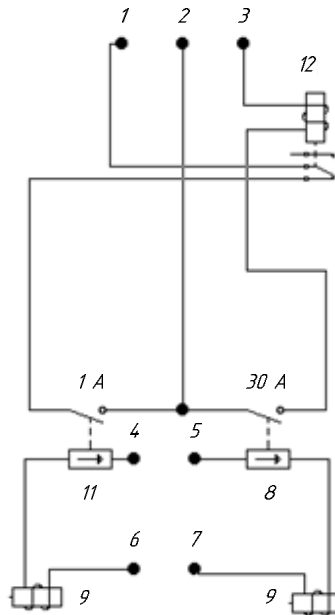


Рис. 3.39. Принципова електрична схема пасивного давача

Так, тролейбуси, що проходять стрілку ліворуч і праворуч подаватимуть до дорожнього контролера сигнали про появу перед перехрестям та про напрямок подальшого руху, що дасть змогу скоротити простої ТЗГК перед перехрестями, зменшить затримки пасажирів та позитивно вплине на загальну транспортну ситуацію за рахунок скорочення тривалостей фаз регулювання, розрахованих на пропускання громадського транспорту.

Наявність у циклі регулювання трамвайних напрямків, а також напрямків, куди введено траєкторії руху трамваїв, передбачає певні особливості під час розрахунку параметрів світлофорного регулювання [110].

Сумарна тривалість основного такту та проміжного інтервалу фази регулювання з трамвайним рухом не повинна бути нижчою за тривалість проїзду через перехрестя трамвайного поїзда. Зважаючи на малу швидкість руху трамваїв, для виконання цієї вимоги за значної відстані до конфліктних точок з трамваєм, потрібно виділяти на цю фазу значну частину світлофорного циклу. За наявності кількох напрямків руху трамваїв, що входять до різних фаз, проблема ускладнюється.

У трамвайних стрілках управління ними працює від напруги 600 В постійного струму. Серієсний (С) електропривід стрілки ввімкнений до електричного ланцюга послідовно мережі трамвайного вагону, шунтовий (Ш) – ввімкнений до електричної мережі паралельно.

На контактному провіднику перед стрілкою розташовані серієсні повітряні контакти (СК), що опускають струмознімач трамваю, поступово відриваючи його від контактного провідника (КД). За стрілкою на лівому напрямку в одному рівні з контактним провідником встановлені шунтові повітряні контакти (ШК).

Якщо трамваю потрібно 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. 3.40).

Якщо трамваю треба їхати ліворуч, то водій за допомогою контролера вмикає двигуни. Коли поїзд проходить під стрілкою з увімкненими двигунами, виникає електричний ланцюг: контактний провідник – серієсний електропривод – серієсні повітряні контакти – двигуни вагона – рейки – тягова підстанція (Т П/С) (рис. 3.41).

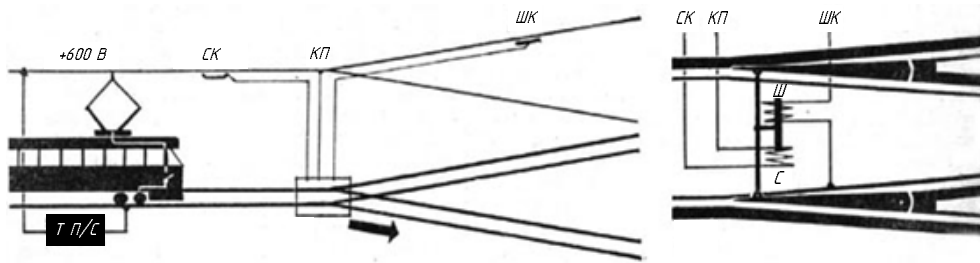


Рис. 3.40. Проходження трамваю праворуч

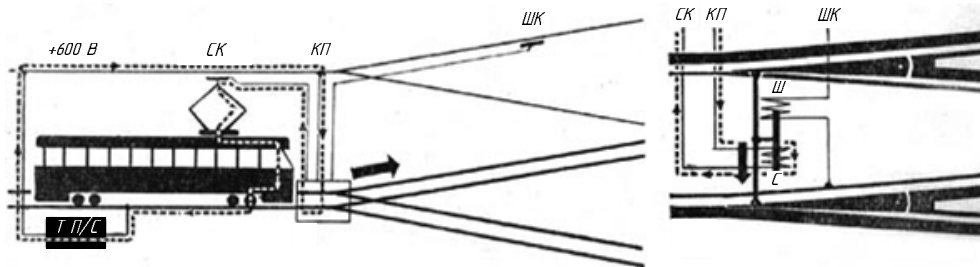


Рис. 3.41. Спрацювання серісного приводу для проїзду трамваю ліворуч

Отже, контролер трамвайного поїзда є вимикачем, що замикає серісний електричний ланцюг стрілки.

Після того, як вагони трамвая минули стрілку, під шунтовими контактами автоматично виникає інша електрична мережа: контактний провідник – шунтові повітряні контакти – шунтовий електропривод – рейки – тягова підстанція. У результаті шунтовий електропривод повертає стрілку у початковий стан (рис. 3.42).

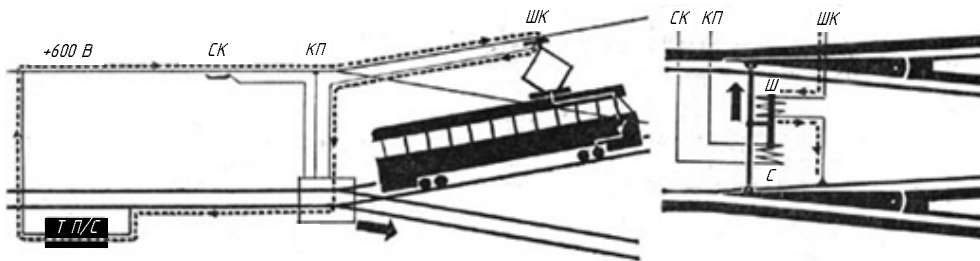


Рис. 3.42. Спрацювання шунтового приводу

У результаті дослідження інтенсивності дорожнього руху на перехрестях встановлено, що частота прибуття до стоп-лінії трамвайних вагонів часто є меншою, ніж один трамвай за цикл регулювання. Тому доцільно застосувати авторегулювання для груп напрямків з рухом трамваїв. З цією метою як давачі можна використати серієсний та шунтовий контакти автоматизованої трамвайної стрілки, а також додати детекторний контакт, функцією якого є виявлення трамваїв незалежно від напрямку руху.

Будову та принцип дії запропонованої схеми зображено на рис. 3.43. Електричний струм протікає від плюсового провідника контактної мережі 1 через серієсний соленоїд 2, давач струму серієсного соленоїда 3, серієсний електричний контакт, розташований на контактному провіднику та електрично ізольований від нього 4, трамвайний пантограф 5, трамвайний контактор 6, трамвайний електродвигун 7 і до рейки 8.

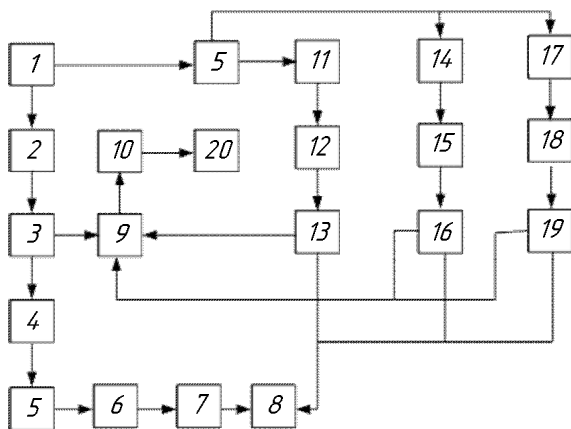


Рис. 3.43. Принципова схема управління світлофорним об'єктом для пропускання трамваїв

Якщо сила струму через соленоїд 2 перевищує нормативну величину, він спрацює та переводить стрілку для руху ліворуч. Електричний струм, що проходить через соленоїд 2, фіксується давачем 3, під'єднаним послідовно до електричного ланцюга соленоїда. Перевищення силою струму нормативного значення призводить до спрацювання давача та подання електричного сигналу до блоку логіки 9, який спрямовує трамвай на стрілку для повороту ліворуч. Цей сигнал блок логіки передає до дорожнього контролера 10 для виклику відповідної фази світлофорного регулювання.

За серієсним електричним контактом 4 на контактній мережі міститься детекторний електричний контакт 11. У разі проходження його трамвайним пантографом 5 струм від плюсового провідника 1 проходить через пантограф 5, детекторний контакт 11, детекторний реостат 12, детекторний давач сили струму 13 і до рейки 8. Давач 13 фіксує проходження струму і подає сигнал до блоку логіки 9. Останній передає сигнал до контролера про виклик фази лише тоді, коли попередньо не було отримано сигнал від давача 3.

На контактному провіднику лівого відгалуження стрілки знаходиться шунтовий контакт 14, на який під час проходження його пантограф 5 подає струм від плюсового провідника 1. Цей струм приводить у дію шунтовий соленоїд 15 та фіксується давачем сили струму 16 і йде до рейок 8. Давач сили струму 16 подає сигнал до блоку логіки 9, який за цим сигналом визначає, що трамвай по лівому відгалуженню залишив перехрестя. На контактному провіднику правого відгалуження стрілки міститься шунтовий контакт 17, який пантограф замикає з плюсовим контактним провідником 1 під час проходження цього контакту. Струм далі йде на шунтовий реостат 18 та його фіксує давач струму шумового реостату 19 і спрямовується до рейок 8. Давач струму шумового реостату 19 подає сигнал до блоку логіки 9, який фіксує залишення трамваєм перехрестя по правому відгалуженню стрілки.

У момент залишення трамваєм перехрестя, що фіксується давачами 16 та 19, виклик відповідних фаз контролером світлофора завершується і наступний трамвай може заїздити на стрілку. Дорожній контролер 10 керує дорожніми світлофорами 20, зокрема і трамвайними.

Застосування цієї схеми уможливорює використання обладнання трамвайної стрілки як детектора для фіксації наближення поїзда до зони СФР, перебування в цій зоні та залишення її, а також дає змогу реалізувати активну стратегію пріоритету ТЗГК.

Варто зазначити, що сучасні трамвайні та тролейбусні стрілки перемикаються з використанням радіосигналу, якого надсилає або водій вручну (натисканням кнопки), або бортовий комп'ютер автоматично залежно від маршруту руху. Для інформування водія про положення стрілки використовують спеціальні службові світлофори, контролер яких може передавати цифровий сигнал про напрямок руху у контролер світлофорного об'єкта. Для виявлення автобусів, які наближаються до перехрестя, та визначення напрямку подальшого їхнього руху можна використовувати сигнали з GPS-трекерів, які містять інформацію про поточне розташування ТЗГК, його швидкість та маршрут руху.

3.5.5. Перехідні алгоритми між жовтим миготінням світлофора та режимом зміни сигналів. Відповідно до ДСТУ 4092-2002, перехід світлофорних об'єктів на режим жовтого миготіння можна застосовувати під час тривалого і значного зменшення інтенсивності дорожнього руху порівняно з розрахунковими параметрами. Переведення на режим жовтого миготіння можна виконувати і під час виходу на перехрестя регулювальника, ремонтних робіт на ВДМ тощо. Дорожній контролер у такому разі переводить об'єкт на спеціальну програму жовтого миготіння.

Принцип роботи дорожніх контролерів передбачає такі зміни режимів між програмою та режимом жовтого миготіння (рис. 3.44) [64]: у разі переходу з режиму на жовте миготіння в останню секунду програмного режиму увімкнені світловипромінювачі відповідно сигналів програмного режиму; у першу півсекунду режиму жовтого миготіння вимкнено всі світловипромінювачі; протягом другої півсекунди режиму миготіння увімкнено жовті випромінювачі й далі з періодичністю 1 с повторюються півсекундні інтервали вимкнення та увімкнення випромінювачів жовтих сигналів; під час переходу з режиму жовтого миготіння на програмний протягом передостанньої півсекунди режиму миготіння вимкнено всі випромінювачі; протягом останньої півсекунди увімкнено жовтий випромінювач; від 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, ввімкнених у першій фазі регулювання, та червоний за іншими напрямками регулювання, зокрема і за пішохідними.

Розглянемо регламентований ПДР [44] порядок проїзду перехресть у періоди, що містять моменти зміни режиму СФР з програмного на жовте миготіння і навпаки. ТЗ, що виїхав на перехрестя (проїхав стоп-лінію) на сигнал світлофора, що дозволяє рух, повинен рухатися далі, незалежно від сигналів інших світлофорів, якщо перед ними не позначено стоп-лінії (п. 16.8 ПДР). З погляду водія цього ТЗ, перехрестя є регульованим. Отже, вимоги знаків пріоритету на нього не поширюються. Тому, навіть рухаючись прямо другорядною дорогою, він (за умови відсутності трамвайного руху) не має поступатися дорогою будь-яким ТЗ, окрім тих, що в'їхали на перехрестя протягом сигналу, що дозволяє рух з іншого напрямку, і покидають перехрестя. Остання умова актуальна лише на початку періодів ввімкнення сигналів світлофора, що дозволяють рух.

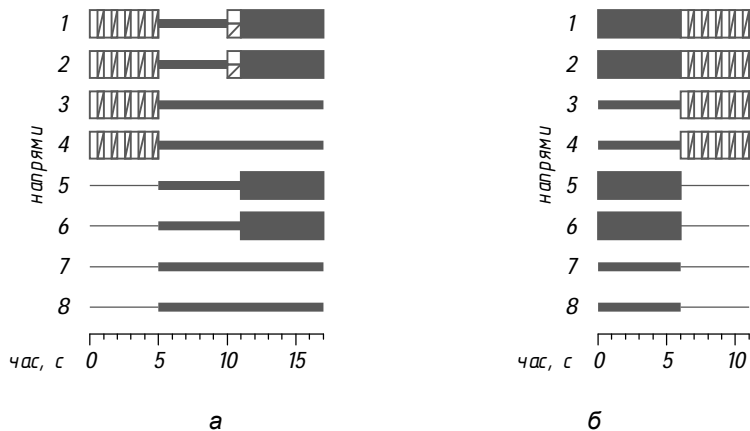


Рис. 3.44. Наявний порядок переходу з жовтого миготіння світлофора на програмний режим (а) та з програмного на жовте миготіння (б)

Так, під час переведення світлофорного об'єкта на режим жовтого миготіння за відсутності дублювальних світлофорів на перехресті водій буде певен, що в'їхав на перехрестя на сигнал, який дозволяє рух. А у разі переведення на жовте миготіння в момент знаходження ТЗ у перерізі стоп-лінії, водій вимушений буде дати дорогу або зупинитися за наявності відповідного дорожнього знаку. Проте ані часу, ані запасу шляху для цього у ПДР не передбачається.

Водій ТЗ, який рухається головною дорогою і в момент переходу на режим жовтого миготіння наближається до перехрестя, керується вимогами ПДР щодо проїзду нерегульованих перехресть, і зупинитися для пропускання ТЗ, що знаходяться на перехресті або заїздять на нього, не повинен. Вимога ПДР про обов'язок дати дорогу ТЗ, що завершують рух через перехрестя, у разі увімкнення сигналу світлофора, що дозволяє рух, не є для цього водія актуальною, оскільки знаходиться в підрозділі розділу 16 ПДР «Регульовані перехрестя», а на момент прийняття рішення перехрестя не регулюють.

Так, провокуються умови для створення водіями ТЗ, що рухалися у фазі, яка відповідає напрямкам другорядної дороги, аварійних ситуацій під час переходу з програмного режиму на жовте миготіння, оскільки пріоритет миттєво передається напрямкам головної дороги. У такому разі не передбачено жодного перехідного інтервалу для залишення перехрестя, хоча порівняно з переходами між фазами регулювання, ступінь небезпеки є більшим, оскільки

немає вимоги щодо пропускання ТЗ з другорядних напрямків, які не мають часу та відстані для виконання вимоги щодо надання пріоритету.

Під час переходу з режиму жовтого миготіння на програму створюється небезпека для ТЗ, що рухаються напрямками головної дороги, які не відповідають напрямкам, що належать до першої фази 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 ТЗ, водії яких бачать сигнал «довкола червоний», а потім прискорюються під час ввімкнення зеленого сигналу.

Водії ТЗ, які рухаються в момент переходу на програмний режим головною дорогою, захищені вимогою п. 16.5 ПДР, проте сигнал «довкола червоний» для ТЗ, що рухаються ввімкненими в першу фазу регулювання напрямками, має ефект, схожий з проходженням основного такту регулювання, щоправда у дзеркальному відображенні: спочатку потік їде, потім зупиняється і потім знову їде. Варто нагадати, що, відповідно до чинної методики розрахунку параметрів світлофорного регулювання, тривалість основного такту потрібно обмежувати значенням 7 с у меншій бік, а тривалість сигналу «довкола червоний», як правило, не перевищує 3–4 с [64].

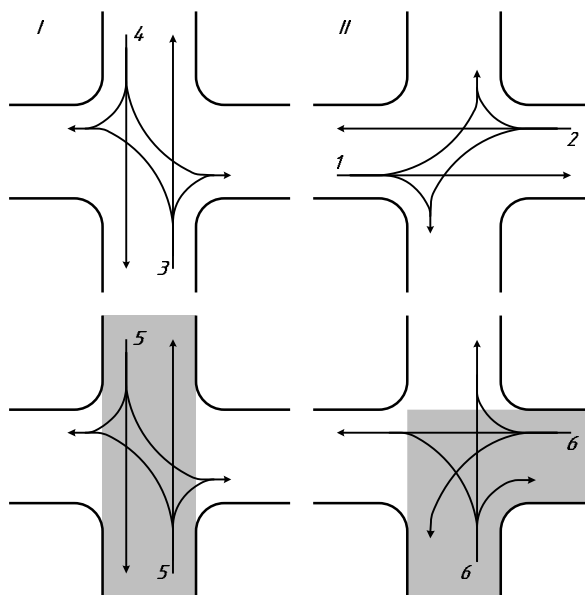
Для ліквідації більшості, пов'язаних з переходом, небезпек пропонують не вважати режим жовтого миготіння програмою і ввести до контролера псевдонапрямок регулювання, який відповідно до спеціальної процедури вмикає жовті випромінювачі в режимі миготіння (рис. 3.45). Означений псевдонапрямок містить траєкторії, які відповідають пріоритетним напрямкам руху ТЗ для умов нерегульованого перехрестя (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 [93]:

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

2) елемент, що позначає перехід з псевдонапрямку на напрямок регулювання у разі застосування «довкола червоного» дорівнює сумі тривалості «довкола червоного» та червоно-жовтого сигналів, якщо траєкторії, що становлять псевдонапрямок, повністю відповідають траєкторіям, які позначають означений напрямок регулювання;

3) під час розрахунку відстаней до НКТ при переході зі звичайних напрямків на псевдонапрямок, потрібно враховувати вимогу п. 16.14 ПДР [44] (якщо головна дорога на перехресті змінює напрямок, водії ТЗ, які рухаються по ній, повинні керуватися між собою правилами проїзду перехресть рівнозначних доріг) та розраховувати відстань до конфліктної точки лише для випадку, коли напрямок, що відповідає номеру рядка конфліктної матриці позбавлений пріоритету в НКТ; в іншому разі точка виключається з розрахунку.

Рис. 3.45. Схема пофазного роз'їзду та схема псевдонапрямоків за умови змінності та незмінності напрямку головної дороги (1–4 – напрямки регулювання; 5, 6 – псевдонапрямки жовтого миготіння; сірим кольором показано напрямок головної дороги)



У табл. 3.17 та 3.18 показано елементи конфліктних матриць мінімальних часових проміжків. Для переходів з режиму жовтого миготіння на програмний режим прийнято 6-секундний інтервал, який складається з трьох секунд сигналу «довкола червоний» та 3 секунд червоно-жовтого сигналу. Трьма крапками позначено відстані, які треба розрахувати за схемою перехрестя у масштабі. На прикладі напрямків 3 та 6, видно, що через врахування пріоритету, принцип конфліктності чи неконфліктності двох напрямків, незалежно від напрямку переходу, не виконується.

Застосування цього підходу до формалізації переходів, пов'язаних з режимом жовтого миготіння, повністю узгоджується з наявними принципами та нормативами функціонування апаратури систем АСУДР.

Таблиця 3.17

Матриця конфліктів для перехрестя з незмінним напрямком головної дороги

Напрямки	1	2	3	4	5
1	0	0	...	...	...
2	0	0	...	...	...
3	...	...	0	0	0
4	...	...	0	0	0
5	...	...	б	б	0

Таблиця 3.18

Матриця конфліктів для перехрестя з головною дорогою, що змінює напрямки

Напрямки	1	2	3	4	б
1	0	0	...	...	...
2	0	0	...	...	0
3	...	...	0	0	...
4	...	...	0	0	...
б	...	б	...	...	0

Застосування розробленого підходу дає змогу підвищити рівень безпеки руху ТЗ і пішоходів на регульованих перехрестях у момент зміни режимів роботи світлофорного об'єкта за рахунок уникнення ДТП, причиною яких є швидка зміна статусу перехрестя з регульованого на нерегульоване, та навпаки, що не передбачає можливості проїзду перехрестя учасниками руху, які розпочали рух під час дії попереднього світлофорного режиму.

Розділ 4

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

4.1. Оцінка ефективності коригування світлофорного циклу

Ефект від впровадження (використання) результатів науково-прикладних досліджень, інженерно-технічних заходів щодо покращення (змін) ОДР можна отримати, насамперед, внаслідок скорочення затримок ТЗ (підвищення швидкості сполучення), зменшення їхнього перепробігу і скорочення кількості (недопущення) ДТП. Для зіставлення різних методів і режимів регулювання дорожнього руху необхідно прорахувати загальну кількість та вартість втраченого часу на всіх підходах до регульованих перехресть, беручи до уваги середню вартість машино-години [106].

Для визначення ефекту за рахунок скорочення затримок ТЗ, які проїжджають ізольовані регульовані перехрестя, потрібно оцінити їхню тривалість до (за наявних умов і режимів роботи світлофорних об'єктів) і після проведення заходів (змінених за результатами досліджень). На підставі порівняння цих тривалостей визначають загальну річну економію за формулою [106, 129]

$$E_p = \frac{365(d_{\text{сум}}^{\text{до}} - d_{\text{сум}}^n)C_{\text{м-г}}}{K_{\text{д-н}}}, \quad (4.1)$$

де $d_{\text{сум}}^{\text{до}}$, $d_{\text{сум}}^n$ – тривалості сумарних затримок, відповідно, «до» і «після» проведення заходів, год; $C_{\text{м-г}}$ – середня вартість однієї машино-години, грн; $K_{\text{д-н}}$ – коефіцієнт добової нерівномірності руху (у розрахунках для міських умов рекомендовано приймати $K_{\text{д-н}} = 0,1$) [129].

Вартість однієї машино-години ($C_{\text{м-г}}$) потрібно визначати, враховуючи додаткові витрати власників ТЗ, у розрахунку на одну годину втраченого часу. До складу цих витрат входять додаткові заробітна плата водія (крім ТЗ, які належать фізичним особам), амортизаційні відрахування, додаткові витрати на паливо-мастильні матеріали [106].

Заробітну плату $З_{zn}$ можна визначити на підставі даних про середньомісячний заробіток водіїв $ЗП_{міс}$ і місячного фонду робочого часу $\Phi_{міс}$, який у середньому становить 170–180 годин:

$$З_{zn} = \kappa \frac{ЗП_{міс}}{\Phi_{міс}}, \quad (4.2)$$

де $\kappa=1,26$ – коефіцієнт, який враховує відрахування за єдиним соціальним внеском [106].

Амортизаційні відрахування за одну годину розраховують на основі нормативного терміну служби ТЗ T_{κ} (є у межах 6–7 років), річного фонду робочого часу Φ_p (1800–2000 годин) та ринкової вартості ТЗ B_p :

$$З_a = \frac{B_p}{T_{\kappa} \Phi_p}. \quad (4.3)$$

Додаткові витрати на паливо-мастильні матеріали у розрахунку на одну годину роботи ТЗ визначають з урахуванням норм витрати палива на 100 км пробігу H_n , середньої технічної швидкості руху V_m та вартості 1 л палива B_n :

$$З_n = \frac{H_n V_m B_n}{100}. \quad (4.4)$$

З метою отримання реальних значень $З_{zn}$, $З_a$, $З_n$ опрацьовано статистичні дані щодо цих величин за 2014 рік на прикладі Львівського комунального автобусного АТП № 1. Для цього підприємства вартість однієї машино-години роботи автобусів LAZ-183D (вони переважають серед спискового складу 178 од.) становить $C_{M-2}^{авт} = 317,07$ грн. Щодо вартості однієї машино-години роботи легкових автомобілів можна скористатися даними, наведеними у [107], $C_{M-2}^{лег} = 98,36$ грн (за офіційним курсом валют станом на 26.11.2015 року).

Середню вартість однієї машино-години роботи ТЗ з урахуванням складу ТП визначають за сумою [106]:

$$C_{M-2} = C_{M-2}^{лег} n_{лег} + C_{M-2}^{авт} n_{авт}, \quad (4.5)$$

де $n_{лег}$, $n_{авт}$ – частки в ТП, відповідно легкових автомобілів та автобусів.

За цією сумою можна визначити вартість однієї машино-години роботи ТЗ для складу ТП, у якому, наприклад, 65 % (70 %) легкових автомобілів та 35 % (30 %) автобусів (вантажних ТЗ):

$$C_{M-2}^{65-35} = 0,65 \cdot 98,36 + 0,35 \cdot 317,07 = 174,91 \text{ грн};$$

$$C_{M-2}^{70-30} = 0,7 \cdot 98,36 + 0,3 \cdot 317,07 = 163,97 \text{ грн.}$$

Наведемо приклад розрахунку економічного ефекту за рахунок скорочення затримок ТЗ для перехрестя з 2×1 смуги руху (характерне для ізольованих регульованих перехресть м. Львова) з інтенсивністю ТП 700 авт./год по головному (магістральному) напрямку та 200 авт./год по другорядному. Склад ТП – 70 % легкові автомобілі, 30 % – автобуси (вантажні ТЗ). Отримані у дослідженні тривалості дозвільних сигналів у світлофорному циклі враховують технічний стан ТЗ та рівність проїзної частини. Ці тривалості порівнювали з базовим варіантом, для якого дозвільні сигнали розраховані з використанням лише коефіцієнтів зведення за *О. Г. Левашевим* [85–87].

З урахуванням наведеного, річний економічний ефект становитиме:

$$E_p = \frac{365(21087 / 3600 - 18651 / 3600)163,97}{0,1} = 404985,98 \text{ грн.}$$

Для перехресть з 2×1 смуги руху й різними інтенсивностями ТП та їхнього складу результати розрахунку ефекту наведено у табл. 4.1.

На підставі викладеного можна зробити висновок, що застосування запропонованого методу коригування тривалостей дозвільних сигналів у циклі регулювання дає змогу заощадити понад 500 тис. грн на рік на окремих ізольованих перехрестях за рахунок скорочення сумарних затримок ТЗ. Середнє значення (з усіх наведених варіантів) економічного ефекту за даними табл. 4.1 становить 255501,8 грн/рік.

4.2. Оцінка ефективності застосування адаптивних алгоритмів керування

4.2.1. Розрахунок затримок на перехресті. Використання запропонованого нечіткого алгоритму керування дає змогу зменшити черги ТЗ перед перехрестям. Це вказує і на зменшення затримок. Імітаційна модель не визначає їхніх значень, однак їх можна розрахувати.

Розрахунок виконували для пікової інтенсивності ТП від 07:00 до 09:00. Усереднена інтенсивність прибуття ТЗ до перехрестя вул. Левицького –

Тершаковців (м. Львів) становить: по вул. Левицького $N_1 = 1360$ авт./год = 0,38 авт./с; по вул. Тершаковців – $N_2 = 620$ авт./год = 0,17 авт./с (табл. 4.2). Потік насичення на правій смузі на вул. Левицького становить $S_{1П} = 1582$ авт./год, на лівій – $S_{1Л} = 1769$ авт./год (усереднене значення – $S_1 = 1675$ авт./год = 0,47 авт./с), на вул. Тершаковців – $S_2 = 1627$ авт./год = 0,45 авт./с.

Таблиця 4.1

Економічний ефект від скорочення сумарних затримок ТЗ, які проїжджають ізольовані регульовані перехрестя

Співвідношення інтенсивностей ТП на головному та другорядному напрямках, $\frac{\text{авт./год}}{\text{Кількість смуг руху на перехресті, шт.}}$	Економічний ефект за рахунок скорочення сумарних затримок ТЗ порівняно з базою, з урахуванням, грн:		
	технічного стану ТЗ	рівності ПЧ	технічного стану ТЗ і рівності ПЧ
Склад ТП на перехресті: 65 % – легкові автомобілі, 35 % – вантажні ТЗ (автобуси)			
$\frac{500 \times 100}{2 \times 1}$	89910,26	206243,84	244726,14
$\frac{500 \times 200}{2 \times 1}$	221140,22	304843,65	380921,56
$\frac{700 \times 100}{2 \times 1}$	108530,72	226637,69	278420,32
$\frac{700 \times 200}{2 \times 1}$	212982,68	453452,72	517294,32
Склад ТП на перехресті: 70 % – легкові автомобілі, 30 % – вантажні ТЗ (автобуси)			
$\frac{500 \times 100}{2 \times 1}$	132834,07	217621,78	257521,87
$\frac{500 \times 200}{2 \times 1}$	98420,24	319034,52	355443,36
$\frac{700 \times 100}{2 \times 1}$	65668,91	289774,45	323523,28
$\frac{700 \times 200}{2 \times 1}$	86616,46	335493,31	404985,98

Максимальна тривалість заборонного сигналу в період від 07:00 до 09:00 по вул. Левицького становить $t_{q1 \max} = 28$ с (відповідає стану $t_{31 \min}$, імовірність якої становить $p_{t_{31 \min}} = 0,15$), по вул. Тершаковців – $t_{q3} = 30$ с (відповідає стану $t_{33 \min}$, імовірність якої становить $p_{t_{33 \min}} = 0,15$).
Мінімальна тривалість заборонного сигналу в період від 07:00 до 09:00 по вул. Левицького становить $t_{q1 \min} = 12$ с (відповідає стану $t_{31 \max}$), по вул. Тершаковців – $t_{q3 \min} = 18$ с (відповідає стану $t_{33 \max}$).

Отже, тривалість сумарної затримки за цикл по вул. Левицького для стану $t_{31 \min}$ становить:

$$Z_i = \int_0^{T_u} n_{оч}(t) dt = \frac{t_q^2 S_i N_i}{2(S_i - N_i)}, \quad (4.6)$$

де $n_{оч}(t)$ – кількість ТЗ у черзі; T_u – тривалість світлофорного циклу, с; t_q – тривалість заборонного сигналу, с; S_i – потік насичення для напрямку i , авт./с; N_i – інтенсивність ТП на напрямку i , авт./с.

$$Z_{t_{31 \min}} = \frac{28^2 \cdot 0,47 \cdot 0,38}{2 \cdot (0,47 - 0,38)} = 778 \text{ с.}$$

Кількість ТЗ, які прибувають до перехрестя за цикл:

$$N_{u1} = N_1 \cdot T_u = 0,38 \cdot 61 = 23.$$

Отже, середня затримка за цикл по вул. Левицького для стану $t_{31 \min}$ становитиме:

$$d_{t_{31 \min}} = \frac{Z_{t_{31 \min}}}{N_{u1}} = \frac{778}{23} = 33 \text{ с.}$$

Середні затримки для іншого стану та іншої вулиці визначають аналогічно (табл. 4.2). В останньому рядку наведено середньозважену затримку для кожного з підходів, визначену за формулою

$$d = d_{t_{3 \min}} p_{t_{3 \min}} + d_{t_{3 \max}} (1 - p_{t_{3 \min}}), \quad (4.7)$$

де $d_{t_{3 \min}}$, $d_{t_{3 \max}}$ – середня затримка для станів $t_{3 \min}$ та $t_{3 \max}$ відповідно, $p_{t_{3 \min}}$ – імовірність стану $t_{3 \min}$.

Аналогічно за довжиною черги можна визначити затримку у разі жорсткого багатопрограмного керування на перехресті. Інтенсивність прибуття ТЗ та потік насичення є такими самими, як у попередньому випадку. Тривалість циклу, розрахованого на ці умови руху ТЗ, становить 71 с, а тривалість червоного сигналу для вул. Левицького становить 31 с, для вул. Тершаковців – 34 с. Результати розрахунку наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.2

Результати розрахунку тривалості затримок за адаптивного керування

Параметр	Підхід	
	вул. Левицького	вул. Тершаковців
Сумарна затримка для стану $t_{3\min}$, с	778	123
Кількість ТЗ, які прибувають за цикл, авт.	23	10
Середня затримка для стану $t_{3\min}$, с	33,56	11,86
Сумарна затримка для стану $t_{3\max}$, с	143	44
Кількість ТЗ, які прибувають за цикл, авт.	14	6
Середня затримка для стану $t_{3\max}$, с	9,90	6,85
Середньозважена затримка, с	13,45	7,60

Таблиця 4.3

Результати розрахунку тривалості затримок за багатопрограмного жорсткого керування

Параметр	Підхід	
	вул. Левицького	вул. Тершаковців
Сумарна затримка, с	953	158
Кількість ТЗ, які прибувають за цикл, авт.	27	12
Середня затримка, с	35,34	13,08

Отже, за адаптивного керування затримки на обох підходах істотно знижуються (на 62 % по вул. Левицького і на 42 % по вул. Тершаковців), що, своєю чергою, призведе до зменшення витрат палива та шкідливого впливу на довкілля. Таке різке зниження затримок пов'язане з тим, що ефективність роботи нечіткого алгоритму проявляється найбільше під час ранкового піку. В інші періоди доби зменшення черг, а, відповідно, затримок, є меншим.

4.2.2. *Витрати на експлуатацію світлофорного об'єкта.* На перехресті вул. Левицького – Тершаковців – Дороша наявне обладнання морально та фізично застаріле (використовують від 1982 року). Тому виникає фактична потреба у заміні обладнання на сучасне, яке має можливість багатопрограмного жорсткого або адаптивного керування. Рішення про доцільність влаштування певного типу керування можна прийняти за результатами розрахунку поточних витрат на перехресті та річного економічного ефекту. Розрахунок проведемо для нового обладнання, яке використовують на інших регульованих перехрестях м. Львова. У табл. 4.4 наведено перелік обладнання, потрібного для влаштування певного типу керування (вважаємо, що кількість світлофорних консолей та стійок, кріплень, кабелів, будівельно-монтажних та запусконаладжувальних робіт у двох варіантах є однаковою, тому їх не враховуємо). Балансова вартість обладнання, яке забезпечує багатопрограмне жорстке керування, становить 82770 грн, адаптивне керування – 194000 грн.

Таблиця 4.4

Обладнання для влаштування певного типу керування

Обладнання	Тип керування					
	Адаптивне			Багатопрограмне жорстке		
	Марка	Кількість	Ціна, грн	Марка	Кількість	Ціна, грн
Контролер	Swarco Actros	1	110000	КДК-16-02	1	26610
Транспортний світлофор	Futura	4	6820	СТД 1.3	4	5700
Пішохідний світлофор	Futura	8	3890	СПД 1.1	8	4170
Табло відліку часу	–	–	–	ТВЧ	8	
Кнопка для пішоходів	Push-button	8	1260	–	–	–
Відеодетектор	Traficam	2	7760	–	–	–

Поточні витрати на регульованому перехресті визначаються за формулою

$$C_{ПВ} = C_{ТЗ} + C_{ПАС} + C_{ПШ} + C_{ДТП} + C_{СО}, \quad (4.8)$$

де $C_{ТЗ}$ – вартість витрат часу на перехресті, грн; $C_{ПАС}$ – вартість витрат часу, що втрачається пасажирями, грн; $C_{ПШ}$ – вартість витрат часу, що втрачається

пішоходами, грн; $C_{ДТП}$ – збитки від ДТП, грн; C_{CO} – витрати на експлуатацію світлофорного об'єкта, грн.

Вважаємо, що тип керування (жорстке чи адаптивне) за однакової схеми пофазового роз'їзду та однакових перехідних інтервалів не впливає на безпеку руху на регульованому перехресті, тому під час розрахунку та порівняння витрат доданком $C_{ДТП}$ знехтуємо.

Загалом витрати на експлуатацію світлофорного об'єкта визначають за виразом [91]

$$C_{CO} = c_p + c_{ел} + c_a, \quad (4.9)$$

де c_p – витрати на виконання поточного і профілактичного ремонтів, грн; $c_{ел}$ – витрати на електроенергію, грн; c_a – амортизаційні відрахування, грн.

Витрати на виконання поточного і профілактичного ремонтів визначають за формулою [91]

$$c_p = \frac{B_{\delta} n_p}{100}, \quad (4.10)$$

де B_{δ} – балансова вартість світлофорного об'єкта, грн; n_p – норма відрахувань на поточний ремонт і утримання світлофорного об'єкта, % (приймають 5 % [91]).

Витрати на електроенергію визначають за добутком [91]:

$$c_{ел} = C_{ел} k_n P T_{роб}, \quad (4.11)$$

де $C_{ел}$ – вартість 1 кВт·год електроенергії, грн (вартість електроенергії для непромислових споживачів I класу становить 0,81 грн/кВт·год); k_p – коефіцієнт використання встановленої потужності (приймають 1,0 [91]); P – потужність одночасно увімкнених секцій світлофорного об'єкта (потужність однієї лампи, що використовують у світлофорах м. Львова, становить 100 Вт, потужність однієї світлодіодної секції – 15 Вт; приймаємо, що одночасно увімкнено по одній секції на кожному транспортному і пішохідному світлофорі); $T_{роб}$ – тривалість роботи світлофорного об'єкта протягом року, год (за цілодобової роботи світлофорного об'єкта – це 8760 год).

Витрати на амортизаційні нарахування визначаються за формулою [91]

$$c_a = \frac{B_{\delta} n_a}{100}, \quad (4.12)$$

де n_a – норма відрахувань на поточний ремонт і утримання світлофорного об'єкта, % (для технічних засобів регулювання руху приймають 12 % [91]).

Середньозважена затримка для перехрестя визначається за формулою:

$$d_{cep} = \frac{\sum_{j=1}^n (d_j N_j)}{\sum_{j=1}^n N_j}, \quad (4.13)$$

де j – напрямки руху на перехресті, $j=1\dots n$ (середньодобова інтенсивність на вул. Левицького становить $N_{1доб} = 17520$ авт./год, $N_{2доб} = 7840$ авт./год).

Річні витрати часу на перехресті:

$$T_{pич}^{TЗ} = \frac{365 \cdot \sum_{j=1}^n N_j d_{cep}}{3600}. \quad (4.14)$$

Вартість витрат часу на перехресті визначають з добутку:

$$C_{TЗ} = T_{pич} \sum_{i=1}^m (c_{пост\ i} k_i), \quad (4.15)$$

де $c_{пост\ i}$ – постійні витрати i -ї групи ТЗ, грн/год (2,5 грн/год – для легкових автомобілів; 3,2 грн/год – для вантажних автомобілів; 3,9 грн/год – для автобусів); k_i – частка i -ї групи ТЗ у потоці (частка легкових автомобілів у потоці становить 97 %, частка вантажних автомобілів – 3 %).

Витрати часу пішоходів за рік на регульованому перехресті визначають за формулою [91]

$$T_{pич}^{пiш} = \frac{365 \sum_{i=1}^k \left(N_{пiш\ i} (T_y - t_{oi})^2 \right)}{3600 \cdot 2T_y}, \quad (4.16)$$

де $N_{пiш\ i}$ – інтенсивність пішохідного руху через перехрестя в i -й фазі регулювання, осіб/добу ($N_{пiш\ 1} = N_{пiш\ 2} = 5000$ осіб/доба); T_y – тривалість циклу регулювання, с (за адаптивного керування, $T_y = 55$ с); t_{oi} – тривалість основного такту в i -й фазі, с (за адаптивного керування, $t_{o1} = 27$ с та $t_{o2} = 22$ с).

Вартість витрат часу, що втрачається пішоходами на регульованому перехресті, визначається за добутком:

$$C_{ПШ} = T_{річ}^{пш} S_{ПШ}, \quad (4.17)$$

де $S_{ПШ}$ – середні годинні витрати, пов’язані з перебуванням у дорозі пасажирів та пішоходів, грн/год (0,2 грн/год).

Вартість витрат часу, що втрачається пасажирами за рік на регульованому перехресті, визначають за формулою

$$C_{ПАС} = T_{річ}^{ТЗ} S_{ПШ} (k_a B_a \gamma_a + k_l B_l \gamma_l), \quad (4.18)$$

де k_a , k_l – відповідно частки автобусів та легкових автомобілів у ТП, %; B_a , B_l – відповідно номінальні місткості автобусів та легкових автомобілів, пас (приймаємо $B_a = 90$ осіб, $B_l = 5$ осіб); γ_a , γ_l – відповідно середні коефіцієнти використання місткості автобусів та легкових автомобілів (приймаємо $\gamma_a = 0,8$, $\gamma_l = 0,4$).

Числові значення усіх витрат наведено у табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Розрахунок витрат на регульованому перехресті

Показник	Позначення	Тип керування	
		Багатопрограмне жорстке	Адаптивне
Витрати на виконання поточного і профілактичного ремонту, грн	c_p	4138,50	9700,00
Витрати на електроенергію, грн	$c_{ел}$	1277,21	1277,21
Амортизаційні відрахування, грн	c_a	9932,40	23280,00
Витрати на експлуатацію світлофорного об’єкта, грн	C_{CO}	15348,11	34257,21
Середньозважена затримка для перехрестя, с	$d_{сер}$	28,458	11,641
Річні витрати часу на перехресті, год	$T_{річ}^{ТЗ}$	73172,77	29932,84
Вартість витрат часу на перехресті, грн	$C_{ТЗ}$	184468,55	75640,69
Витрати часу пішоходів за рік, год	$T_{річ}^{пш}$	10599,42	8631,88
Вартість витрат часу, що втрачається пішоходами, грн	$C_{ПШ}$	2119,89	1726,38
Вартість витрат часу, що втрачається пасажирами за рік, грн	$C_{ПАС}$	29269,11	11973,14

Поточні витрати на регульованому перехресті з багатопрограмним жорстким керуванням становлять $C_{ПВ1} = 231205,64$ грн, з адаптивним керуванням – $C_{ПВ2} = 123417,41$ грн.

Коефіцієнт економічної ефективності становить:

$$E = \frac{C_{ПВ1} - C_{ПВ2}}{B_{\sigma}} = \frac{231205,64 - 123417,41}{194000,00} = 0,556. \quad (4.19)$$

Термін окупності витрат становить:

$$T = \frac{1}{E} = \frac{1}{0,556} = 1,8 \text{ року}. \quad (4.20)$$

Річний економічний ефект становить:

$$\begin{aligned} E_{річ} &= C_{ПВ1} - C_{ПВ2} - B_{\sigma} E_n = \\ &= 231205,64 - 123417,41 - 194000,00 \cdot 0,12 = 84508,24 \text{ грн}, \end{aligned} \quad (4.21)$$

де E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень, $E_n = 0,12$.

Отже, впровадження адаптивного керування із запропонованим нечітким алгоритмом керування на перехресті вул. Левицького – Тершаковців, незважаючи на значну вартість обладнання, дасть змогу істотно скоротити поточні витрати та отримати значний економічний ефект.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що технічний стан транспортних засобів, особливо вантажних автомобілів та автобусів, впливає на динаміку проїзду регульованих перехресть, знижуючи її на понад 25 % за значної тривалості їхньої експлуатації. У такому разі існує лінійна залежність між пробігом транспортних засобів та розгінною швидкістю під час проїзду регульованого перехрестя. Для врахування впливу технічного стану транспортних засобів під час розрахунку режиму роботи світлофорного регулювання запропоновано нові значення коефіцієнтів зведення до легкового автомобіля, використання яких дає змогу знизити середні затримки на магістральних напрямках перехресть на 7,6 % та загальні затримки на всьому перехресті на 3,6 %.

2. Для визначення потоку насичення під час розрахунку режиму роботи світлофорного регулювання запропоновано використовувати значення швидкості проїзду перехрестя, на яку впливають геометрично-планувальні характеристики перехрестя, стан дорожнього покриття, умови руху на перехресті, склад потоку, технічний стан ТЗ тощо. Встановлено, що такий вплив описують степеневою залежністю.

3. Розроблено імітаційну модель роботи ізольованого регульованого перехрестя, в якій розбіжність між кількістю автомобілів, що проїжджають перехрестя, не перевищує 6 %, між довжинами середніх черг – 10 % порівняно з натурними дослідженнями. Найкращих результатів досягають за використання гамма-розподілу інтервалів між автомобілями, які прибувають до перехрестя.

4. Запропоновано нечіткий алгоритм керування дорожнім рухом на ізольованому регульованому перехресті, який генерує значення тривалості дозвільного сигналу на основі інтенсивності транспортного потоку на підході до перехрестя та довжини черги перед стоп-лінією. Показано, що в таких алгоритмах неможливо використати відомі методи їхнього навчання через неможливість формувати навчальну вибірку. За результатами моделювання роботи перехрестя з розробленим алгоритмом встановлено, що параметри функцій належності впливають на ефективність роботи алгоритму керування. Кращих результатів досягають, якщо графіки функцій належності мають порівняно мале перекриття. За незначної інтенсивності ці графіки потрібно розташувати поруч один з одним, а за великої – розосереджено.

5. Застосування нечіткого алгоритму керування, порівняно з жорстким регулюванням, дає змогу зменшити довжини черг перед перехрестям впродовж доби на 10–45 %, а в ранковий пік – до 40–60 %. За розрахунком витрат на експлуатацію світлофорного об'єкта встановлено, що, незважаючи на більшу вартість обладнання, використання цього алгоритму керування дасть змогу зменшити поточні витрати порівняно з багатопрограмним жорстким керуванням.

6. Удосконалено підхід до розрахунку режимів світлофорного регулювання за окремими напрямками для автоматизування визначення параметрів світлофорного циклу. Розроблено механізм формалізації схем руху транспортних засобів та пішоходів, який дає змогу відобразити весь набір характеристик, що надалі застосовуватимуть під час визначення структури та параметрів режиму світлофорного регулювання. Обґрунтовано принципи оптимізації структури циклу обслуговування напрямків регулювання, з використанням теорії графів. Визначено оптимальну структуру світлофорного циклу та параметри режиму регулювання, що дає змогу знизити тривалості фактичних часових проміжків між дозвільними світлофорними сигналами на 11 %.

7. Удосконалено підхід до регулювання руху на перехрестях, зокрема з рознесеними стоп-лініями, розщепленими фазами та з наявністю напрямків регулювання руху трамваїв і тролейбусів, що, зокрема, дає змогу знизити затримки трамваїв удвічі та оптимізувати співвідношення між тривалістю дозвільних сигналів конфліктних транспортних та пішохідних напрямків регулювання. У результаті це зумовлює збільшення середнього відношення тривалості дозвільного сигналу до циклу регулювання на 6 %.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Абрамова Л. С. Аналіз методів визначення складу транспортного потоку / Л. С. Абрамова, І. С. Наглюк, Г. Г. Птиця // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2012. – № 17. – С. 35–41.
2. Абрамова Л. С. Модели управления дорожным движением для АСУДД / Л. С. Абрамова // Вестник ХНАДУ. – 2010. – Вып. 50. – С. 57–63.
3. Абрамова Л.С. Напрямки розвитку сучасного управління дорожнім рухом / Л. С. Абрамова // Матер. III Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми підвищення рівня безпеки, комфорту та культури дорожнього руху». – Харків : ХНАДУ, 2013. – С. 33–35.
4. Абрамова Л. С. Обоснование выбора показателей эффективности контурного управления дорожным движением / Л. С. Абрамова, Н. С. Чернобаев // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2010. – № 4/3 (46). – С. 58–61.
5. Абрамова Л. С. Формализация задачи управления транспортными потоками на улично-дорожной сети крупных городов / Л. С. Абрамова, Н. С. Чернобаев, В. В. Ширин // Прикладная радиоэлектроника. – 2009. – Т. 8. – № 2. – С. 188–192.
6. Автомобильные перевозки и организация дорожного движения: справочник: пер. с англ. / [В. Рэнкин, П. Клафи, С. Халберт и др.]. – М. : Транспорт, 1981. – 592 с.
7. Автомобільні дороги: ДБН В.2.3-4:2007. – [чинні від 2008-03-01]. – К. : Міжрегіонбуд України, 2007. – 91 с. – (Державні будівельні норми України).
8. Алексієв О. П. Інструментальні засоби інформаційно-комунікаційної технології моніторингу руху автомобілів / О. П. Алексієв, С. М. Неронов // Матер. III Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми підвищення рівня безпеки, комфорту та культури дорожнього руху». – Харків : ХНАДУ, 2013. – С. 212–213.
9. Афанасьев А. С. Контактные сети трамвая и троллейбуса: учебник для СПТУ / А. С. Афанасьев. – М. : Транспорт, 1988. – 264 с.
10. Ахмадинуров М. М. Обзор методов моделирования транспортной сети / М. М. Ахмадинуров // Транспорт Урала: научно-технический журнал. – Екатеринбург : УРГУПС, 2009. – № 3 (22). – С. 39–44.
11. Ахмадинуров М. М. Оптимизация светофорного регулирования с помощью программы моделирования транспортных потоков / М. М. Ахмадинуров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – Челябинск, 2010. – № 22 (198). – С. 26–30.
12. Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги, вулиці та залізничні переїзди. Вимоги до експлуатаційного стану: ДСТУ 3587-97. – [Чинний від 1997-07-31]. – К. : Держстандарт України, 1997. – 23 с. – (Державний стандарт України).

13. Безпека дорожнього руху. Світлофори дорожні. Загальні технічні вимоги, правила застосування та вимоги безпеки: ДСТУ 4092-2002. – [Чинний від 2003-01-01]. – К. : Держстандарт України, 2002. – 27 с. – (Державний стандарт України).
14. Білоус А. Б. Прогнозування інтенсивності руху з використанням часових рядів / А. Б. Білоус, І. А. Могила, Я. Р. Крамажєвський // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2011. – № 3. – С. 15–25.
15. Боровской А. Е. Реальный поток насыщения в зависимости от класса легкового автомобиля / А. Е. Боровской, А. Г. Шевцова, В. Г. Шухова // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2012. – № 2. – С. 4–9.
16. Боярский С. Н. Повышение эффективности функционирования пересечений автомобильных дорог с высоким значением коэффициента загрузки движением : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 «Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте» / Сергей Николаевич Боярский. – Екатеринбург, 2014. – 117 с.
17. Брайловский Н. О. Управление движением транспортных средств / Н. О. Брайловский, Б. И. Грановский. – М. : Транспорт, 1975. – 112 с.
18. Брегеда С. Ю. Система управления потоком транспортных средств на основе аппарата нечеткой логики / С. Ю. Брегеда, В. Л. Бурковский, О. Н. Чопоров // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – № 5, Т. 5. – С. 17–21.
19. Васильева Г. Ю. Методи мінімізації затримок транспорту на магістральній вулично-дорожній мережі міст України : автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.20 «Містобудування та територіальне планування» / Ганна Юріївна Васильєва. – Київ, 2007. – 19 с.
20. Введения в математическое моделирование транспортных потоков : учеб. пособ. / [С. Л. Кленов, Е. А. Нурминский, Я. А. Холодов и др.] ; под ред. А. В. Гасникова. – М. : МФТИ, 2010. – 362 с.
21. Вероятностные и имитационные подходы к оптимизации автодорожного движения / [А. П. Буслаев, А. В. Новиков, А. Г. Таташев и др.]; под. ред. чл.-корр. РАН В. М. Приходько. – М. : Мир, 2003. – 368 с.
22. Витолин С. В. Совершенствование транспортных потребительских свойств изолированных регулируемых перекрестков улично-дорожной сети города : автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, аэродромов, метрополитенов, мостов и транспортных тоннелей» / Сергей Владимирович Витолин. – Волгоград, 2014. – 19 с.
23. Власов А. А. Эволюционный метод расчета режимов работы светофорной сигнализации / А. А. Власов, В. Ю. Акимова, М. В. Широков // Вестник ХНАДУ. – 2009. – Вып. 47. – С. 97–99.
24. Вовк О. Л. Исследование алгоритмов нечеткого вывода в системах управления трудноформализуемыми объектами: [Электронный ресурс] / О. Л. Вовк,

- О. И. Федяев. – 2002. – Режим доступа: <http://masters.donntu.edu.ua/publ2002/fvti/vovk.pdf> (07.10.17). – Загл. с экрана.
25. Врубель Ю. А. Координированное управление дорожным движением / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Д. В. Рожанский и др. – Минск : БНТУ, 2011. – 230 с.
26. Врубель Ю. А. Определение потерь в дорожном движении : монография / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. – Минск : БНТУ, 2006. – 240 с.
27. Врубель Ю. А. Организация дорожного движения : в 2-х ч. / Ю. А. Врубель. – Минск : Белорусский фонд БДД, 1996. – 634 с.
28. Врубель Ю. А. Потери в дорожном движении / Ю. А. Врубель. – Минск : БНТУ, 2003. – 380 с.
29. Врубель Ю. А. Специфика расчета экономических издержек при координированном управлении при различных условиях дорожного движения / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Д. В. Навой // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния: науч. матер. XVI Междунар. (19-ой екатеринбургской) науч.-практ. конф. (16–17 июня 2010 г.) – Екатеринбург, 2010. – С. 204–212.
30. Вулиці та дороги населених пунктів: ДБН В.2.3-5-2001. – [чинні від 2001-10-01]. – К. : Держбуд України, 2001. – 50 с. – (Державні будівельні норми України).
31. Гаврилов А. А. Моделирование дорожного движения / А. А. Гаврилов. – М. : Транспорт, 1980. – 189 с.
32. Гілевич В. В. Вплив змін динамічних характеристик транспортних засобів на значення коефіцієнтів зведення / В. В. Гілевич, І. А. Могила // Тези доповідей Всеукр. наук.-теор. конф. «Проблеми з транспортними потоками і напрямки їх розв'язання». – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2015. – С. 27–29.
33. Гілевич В. В. Моделювання проїзду регульованого перехрестя з урахуванням впливових чинників / В. В. Гілевич, І. А. Могила // Збірник тез доповідей LXXI Наук. конф. професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К. : НТУ, 2015. – С. 534.
34. Гілевич В. В. Підвищення ефективності роботи регульованих перехресть з жорсткими світлофорними циклами : дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.22.01 «Транспортні системи» / Володимир Васильович Гілевич. – Львів, 2016. – 169 с.
35. Годяев А.И. Применение нечеткой логики при моделировании функционирования железнодорожных переездов / А. И. Годяев // Наука и техника транспорта. – 2004. – № 4. – С. 44–49.
36. Голуб Д. И. Метод статистической оптимизации циклов светофорного регулирования / Д. И. Голуб // Вестник Краснояр. гос. техн. ун-та. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. – Вып. 43. – С. 332–336.

37. Гордиенко Н. А. Комплексные числа и их приложение к решению уравнений 3-й и 4-й степени: учебное пособие для студентов физико-математического факультета / Н. А. Гордиенко. – Воронеж : ВГПД, 2010. – 92 с.
38. Горшкова Н. Г. Методика определения потока насыщения транспортных средств в зависимости от радиуса поворота направления движения / Н. Г. Горшкова, В. Г. Шухова, И. А. Новиков // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах : сбор. докл. 9-й Междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2010. – С. 161–163.
39. Грибков М. А. Вычислительный подход к решению задачи о поиске максимальной клики / М. А. Грибков, А. В. Алексеевский, С. А. Спиринов // Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2006. – Т. 25. – С. 185–192.
40. Григоров М. А. Проблемы моделирования и управления движением транспортных потоков в крупных городах : монография / М. А. Григоров, А. Ф. Дашенко, А. В. Усов. – Одесса : Астропринт, 2004. – 272 с.
41. Денисенко О. В. Некоторые аспекты определения коэффициентов приведения к легковому автомобилю / О. В. Денисенко, А. С. Филимонова // Автомобильный транспорт. – 2010. – Вып. 26. – С. 115–118.
42. Денисенко О. В. Повышение эффективности определения потоков насыщения / О. В. Денисенко // Автомобильный транспорт. – 2009. – № 25. – С. 134–137.
43. Денисенко О. В. Повышение эффективности расчета параметров цикла светофорного регулирования / О. В. Денисенко // Вестник ХНАДУ. – 2009. – Вып. 47. – С. 104–107.
44. Дерех З. Д. Экспрес-курс з правил дорожнього руху / З. Д. Дерех, О. Є. Заворницький. – К. : Арії, 2008. – 206 с.
45. Джетенова С.Н. Анализ методов управления движением транспортных потоков: [Электронный ресурс] / С. Н. Джетенова. – 2014. – Режим доступа: <http://www.krsu.edu.kg/vestnik/2014/v12/a36.pdf> (07.10.17). – Загл. с экрана.
46. Джонс М. Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях: пер. с англ. / М. Тим Джонс – М. : ДМК Пресс, 2004. – 312 с.
47. Дзюба О. П. Элементи теорії масового обслуговування в організації дорожнього руху / О. П. Дзюба, Н. Т. Кунда. – К. : УТУ, 1996. – 28 с.
48. Дзюба А. П. Повышение пропускной способности регулируемых пересечений в одном уровне : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.14 «Строительство автомобильных дорог» / Александр Петрович Дзюба. – К. : КАДИ, 1989. – 176 с.
49. Довгулевич О. А. Процесс образования задержек транспорта на регулируемом перекрестке при перезагрузке / О. А. Довгулевич // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния : науч. матер. XVII Междунар. (20-ой екатеринбургской) науч.-практ. конф. (16–17 июня 2011 г.). – Екатеринбург, 2011. – С. 147–152.

50. Долгушин Д. Ю. Многофакторное моделирование автотранспортных потоков на основе клеточных автоматов : автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» / Дмитрий Юрьевич Долгушин. – Омск, 2011. – 20 с.
51. Дороги автомобільні та аеродроми. Методи вимірювання нерівностей основ і покриттів: ДСТУ Б В.2.3-3-2000. – [Чинний від 2000-02-23]. – К. : Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 2000. – 16 с. – (Державний стандарт України).
52. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими / Д. Дрю. – М. : Транспорт, 1972. – 424 с.
53. Енглезі І. П. Ефективність координованого управління транспортними потоками : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 «Транспортні системи» / Ірина Павлівна Енглезі. – К. : НТУ, 2004. – 120 с.
54. Ермаков В. В. Математическое моделирование многополосных транспортных потоков / В. В. Ермаков, С. Г. Журавлев // Математическое моделирование и дифференциальные уравнения: сб. ст. 3-й Междунар. науч. конф. – Минск : БГУ, 2012. – С. 133–145.
55. Єресов В. І. Комплексна оцінка ефективності світлофорного регулювання на перехрестях / В. І. Єресов, О. В. Христенко // Вісник НТУ. – К., 2009. – № 19, ч. 2. – С. 72-77.
56. Єресов В. І. Оцінка стабільності потоків надходження в інтелектуальних технологіях світлофорного регулювання / В. І. Єресов, Л. С. Дідківська // Вестник ХНАДУ. – 2009. – Вып. 47. – С. 108–112.
57. Єресов В. І. Шляхи підвищення ефективності управління дорожнім рухом / В. І. Єресов // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 1984. – № 34. – С. 95–99.
58. Живоглядов В. Г. Теория движения транспортных и пешеходных потоков : монография / В. Г. Живоглядов. – Ростов н/Д. : Изд-во журн. «Изв. вузов Сев.-Кавк. регион», 2005. – 1082 с.
59. Завалицин Д. С. Исследования математической модели регулируемого перекрестка / Д. С. Завалицин, Г. А. Тимофеева // Труды института математики и механики УрО РАН. – Екатеринбург, 2009. – Т. 15, № 4. – С. 108–119.
60. Заклинский А. Д. Управление транспортными потоками при заторах : пособие / А. Д. Заклинский, В. Т. Капитанов. – М. : ВНИИБДР МВД СССР, 1980. – 28 с.
61. Иващенко Н. И. Исследование влияния износа деталей цилиндропоршневой группы на мощностные и экономические показатели двигателей / Н. И. Иващенко, И. М. Гульченко // Автомобильная промышленность. – М. : Машиностроение, 1973. – № 6. – С. 14–15.
62. Измеритель динамических характеристик автомобиля Sprint SG-2: руководство пользователя / Авто Тюнинг Группа. – К., 2010. – 56 с.

63. Иносэ Х. Управление дорожным движением : пер. с англ. / Х. Иносэ, Т. Хамада; под ред. М. Я. Блинкина – М. : Транспорт, 1983. – 248 с.
64. Инструкция по пользованию программой конфигурирования дорожного контроллера «СИМВОЛ-01». – Запорожье, 2001. – 62 с.
65. Кадасев Д. А. Повышение системной безопасности транспортных потоков оптимизацией светофорного регулирования их движения : автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта» / Дмитрий Анатольевич Кадасев. – М. : 2008. – 19 с.
66. Капитанов В. Т. Методика расчета светофорных циклов: пособие / В. Т. Капитанов, С. В. Шауро. – М. : ВНИИБДР МВД СССР, 1979. – 44 с.
67. Капитанов В. Т. Расчет параметров светофорного регулирования : науч.-практ. пособ. / В. Т. Капитанов. – М. : МВД СССР ВНИИБДД. – 1981. – 95 с.
68. Капитанов В. Т. Управление транспортными потоками в городах / В. Т. Капитанов, Е. Б. Хилажев. – М. : Транспорт, 1985. – 94 с.
69. Капский Д. В. Методика определения экономических потерь при координированном регулировании движения транспортных и пешеходных потоков / Д. В. Капский, Д. В. Навой // Вестник БНТУ. – 2010. – № 4. – С. 60–70.
70. Кір'янов О. Ф. Напрямки вирішення проблеми перевантаження транспортних вузлів ВДМ / О. Ф. Кір'янов, Г. Г. Переверзева // Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту залізничного транспорту. – Дніпропетровськ, 2011. – № 36. – С. 181–184.
71. Клинковштейн Г. И. Организации дорожного движения: учебник для вузов / Г. И. Клинковштейн, М. Б. Афанасьев. – М. : Транспорт, 1991. – 183 с.
72. Кокорева А. В. Гидродинамические модели автотранспортных потоков : дис. ... канд. физ.-мат. наук: спец. 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» / Анастасия Владимировна Кокорева. – М., 2007. – 123 с.
73. Колесников А. Е. Модель управления светофорными объектами для улиц с двусторонним движением / А. Е. Колесников // Труды Одесского политехнического университета. – Одесса, 2003. – № 1(19). – С. 140–144.
74. Колесніков О. Є. Моделювання руху сучасних автомобілів через регульовані перехрестя / О. Є. Колесніков // Труды Одесского политехнического университета. – Одесса, 2006. – Спецвыпуск. – С. 76–79.
75. Кот Е. Н. Исследование взаимодействия конфликтующих пешеходных и поворотных транспортных потоков методом конфликтных ситуаций: [Электронный ресурс] / Е. Н. Кот // Проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния. – 2006. – Режим доступа: <http://towntraffic.narod.ru/Russian/2006/II/ko1.htm> (07.10.17). – Загл. с экрана.
76. Кременец Ю. А. Инженерные расчеты в регулировании дорожного движения : учеб. пособ. / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский. – М. : Высш. шк., 1977. – 110 с.

77. Кременец Ю. А. Технические средства организации дорожного движения : учебник для вузов / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский, М. Б. Афанасьев. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2005. – 279 с.
78. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Н. Кристофидес. – М. : Мир, 1978. – 432 с.
79. Круглов В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – М. : Физматлит, 2001. – 220 с.
80. Кузмичева Л. А. Проблемы организации движения общественного транспорта в центре Москвы: [Электронный ресурс] / Л. А. Кузмичева // Матер. VIII международной (одиннадцатой екатеринбургской) науч.-практ. конф. – 2002. – Режим доступа: http://towntraffic.narod.ru/Russian/Streets_net/Kuzmicheva.htm (07.10.17). – Загл. с экрана.
81. Кузькін О. Ф. Пошук шляхів у маршрутних мережах міст методом відгалужень і меж / О. Ф. Кузькін // Комунальне господарство міст. – Харків, 2012. – № 103. – С. 378–388.
82. Кухаренок Г. М. Применение многофункциональных дополнительных секций светофоров / Г. М. Кухаренок, В. Ю. Карпилович, Е. Н. Пустовойт // Коммунальное хозяйство городов. – Харьков, 2006. – С. 233–244.
83. Лагереv Р. Ю. Анализ алгоритмов оценки показателей функционирования регулируемых пересечений в условиях перенасыщения сети / Р. Ю. Лагереv, А. Г. Левашев // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах : сб. докл. 8-й Междунар. конф. – СПб., 2008. – С. 110–117.
84. Левашев А. Г. Идеальный поток насыщения на регулируемом пересечении [Электронный ресурс] // Транспортная лаборатория ИрГТУ: [сайт] / А. Г. Левашев, И. М. Головных. – Режим доступа: http://transport.istu.edu/downloads/satur_flow.pdf (07.10.17). – Загл. с экрана.
85. Левашев А. Г. Модели определения коэффициентов приведения к легковому автомобилю для регулируемых пересечений [Электронный ресурс] // Транспортная лаборатория ИрГТУ: [сайт] / А. Г. Левашев, А. Ю. Михайлов. – Режим доступа: <http://transport.istu.edu/downloads/pcu.pdf> (07.10.17). – Загл. с экрана.
86. Левашев А. Г. Повышение эффективности организации дорожного движения на регулируемых пересечениях : автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта» / Алексей Георгиевич Левашев. – Иркутск, 2004. – 17 с.
87. Левашев А. Г. Проектирование регулируемых пересечений : учеб. пособие / А. Г. Левашев, А. Ю. Михайлов, И. М. Головных. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2007. – 216 с.
88. Левтеров А. И. Определение зависимости времени проезда перекрестка от величины очереди транспортных средств и параметров дорожной сети / А. И. Левтеров, А. Н. Ярута // Автомобильный транспорт. – 2011. – № 29. – С. 264–267.

89. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
90. Лобанов Е. М. Пропускная способность автомобильных дорог / Е. М. Лобанов, В. В. Сильянов, Ю. М. Ситников, Л. Н. Сапегин. – М. : Транспорт, 1970. – 152 с.
91. Лобашов О. О. Практикум з дисципліни «Організація дорожнього руху» : навч. посіб. / О. О. Лобашов, О. В. Прасоленко. – Харків : ХНАМГ, 2011. – 221 с.
92. Магопечь С. О. Динаміка зношування деталей циліндро-поршневої групи двигунів автомобілів ВАЗ залежно від напрацювання / С. О. Магопечь, О. В. Бевз, С. С. Романенко // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – 2011. – № 4(69). – С. 43–48.
93. Малишев А. В. Врахування складу транспортного потоку при визначенні потоків насичення для світлофорного регулювання / А. В. Малишев, О. М. Дудніков, В. В. Нужний // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. – 2010. – № 1(10). – С. 69–75.
94. Манькут А. А. Моделювання роботи світлофора методом нечіткої логіки з врахуванням пішоходів / А. А. Манькут, О. О. Смолянкін // Наукові нотатки: зб. наук. пр. – 2009. – Вип. 25. Т. 2. – С. 147–149.
95. Методические рекомендации по регулированию пешеходного движения. – М. : ВНИИБД МВД СССР, 1977. – 55 с.
96. Метсон Т. М. Организация движения / Т. М. Метсон, У. С. Смит, Ф. В. Хард; сокр. пер. с англ. А. П. Алексеева. – М. : Автотранзисдат, 1960. – 464 с.
97. Михайленко В. И. Управление движением на автомобильных дорогах / В. И. Михайленко, Б. М. Четверухин. – К. : Урожай, 1991. – 200 с.
98. Михайлов А. Ю. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей городов: монография / А. Ю. Михайлов, И. М. Головных. – Новосибирск : Наука, 2004. – 267 с.
99. Могила І. А. Адаптивний алгоритм керування рухом на регульованому Т-подібному перехресті та його ефективність / І. А. Могила, М. А. Дяк, І. Є. Шварик // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2013. – № 1. – С. 61–68.
100. Могила І. А. Оцінювання довжини черги перед стоп-лінією за інформацією з точкових детекторів транспорту / І. А. Могила, І. Є. Шварик // Тези доповідей Всеукр. наук.-теор. конф. «Проблеми з транспортними потоками і напрямі їх розв'язання». – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. – С. 30–32.
101. Могила І. А. Підвищення ефективності функціонування ізольованих регульованих перехресть з адаптивним алгоритмом керування : дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.22.01 «Транспортні системи» / Ігор Андрійович Могила. – Львів, 2014. – 168 с.
102. Могила І. А. Розрахунок інтенсивності потоку насичення залежно від швидкості проїзду перехрестя та його довжини / І. А. Могила, В. В. Гілевич // Тези доповідей XX Всеукр. наук.-техніч. конф. молодих учених і спеціалістів «Актуальні

проблеми життєдіяльності суспільства». – Кременчук : КрНУ ім. Остроградського, 2013. – С. 144–145.

103. Наумов В. С. Автоматизация управления дорожным движением на автомобильном транспорте в городах Украины / В. С. Наумов // Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 26. – С. 150–153.

104. Никитин А. С. Применение автоматного программирования для имитационного моделирования разезда машин на нерегулируемом перекрестке равнозначных дорог / А. С. Никитин, М. Ю. Чураков, А. А. Шальто // Сборник докладов третьей Всероссийской научно-технической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. – СПб., 2007. – С. 296–301.

105. Нутович О. А. Пошук оптимального управління світлофорними об'єктами за допомогою генетичних алгоритмів / О. А. Нутович, О. Є. Колесніков, В. Д. Гогунський // Безпека дорожнього руху України. – К. : ТОВ «Журнал «Радуга», 2004. – № 4. – С. 83–87.

106. Организация дорожного движения : справочное пособие / [А. Л. Рыбин, И. Ф. Живописцев, А. А. Шевяков, В. А. Аксенов] ; под общ. ред. С. В. Федотова. – М. : ФГУП «РОСДОРНИИ», 2010. – 416 с.

107. Організація та регулювання дорожнього руху : підручник / [О. О. Бакуліч, О. П. Дзюба, В. І. Єресов та ін.] ; за заг. ред. В. П. Поліщука. – К. : Знання України, 2012. – 467 с.

108. Пальчик А. М. Транспортні потоки / А. М. Пальчик. – К. : Національний транспортний університет, 2010. – 172 с.

109. Петровский А. В. Клеточные автоматы в моделировании работы перекрестка / А. В. Петровский, С. С. Голощапов // Науковий вісник ХДМІ. – Херсон, 2010. – № 1(2). – С. 78–83.

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

111. Печерский М. П. Кибернетика и регулирование уличного движения / М. П. Печерский, Б. Г. Хорович. – М. : Знание, 1971. – 48 с.

112. Полищук В. П. Проектирование автоматизированных систем управления движением на автомобильных дорогах / В. П. Полищук. – К. : КАДИ, 1983. – 362 с.

113. Поліщук В. П. Теорія транспортного потоку: методи та моделі організації дорожнього руху : навч. посіб. / В. П. поліщук, О. П. Дзюба. – К. : Знання України, 2008. – 175 с.

114. Полозенко П. М. Комплексна оцінка режимів світлофорного регулювання на перехрестях : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 «Транспортні системи» / Павло Миколайович Полозенко. – К., 1999. – 160 с.

115. Полозенко П. М. Щодо питання оптимізації режимів світлофорного регулювання на перехрестях вулично-шляхової мережі / П. М. Полозенко // Безпека

дорожного руху України: науково-технічний вісник. – К. : НДЦ БР МВС України, 1998. – № 1. – С. 90–97.

116. Поляков А. А. Организация движения на улицах и дорогах / А. А. Поляков. – М. : Транспорт, 1965. – 376 с.

117. Пономаренко Л. А. Управління нестационарними транспортними потоками на регульованих перехрестях : дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.22.01 «Транспортні системи» / Любов Анатоліївна Пономаренко. – К., 2006. – 145 с.

118. Пржибыл П. Телематика на транспорте; пер. с чешского / П. Пржибыл, М. Свитек // под ред. проф. В. В. Сильянова. – М. : МАДИ (ГТУ), 2003. – 540 с.

119. 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.

120. Пруненко Д. О. Визначення загальної інтенсивності руху на підходах до перехрестя / Д. О. Пруненко, О. В. Голубцова // Комунальне господарство міст : наук.-техн. зб. – Харків, 2011. – № 101. – С. 251–258.

121. Пугачёв И. Н. Организация и безопасность дорожного движения: учеб. пособие для студ. учеб. заведений / И. Н. Пугачёв, А. Э. Горев, Е. М. Олещенко. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 272 с.

122. Рейцен Е. А. Задержки транспорта в городах, как экономический фактор / Е. А. Рейцен, А. Ю. Васильева // Градостроительство и территориальное планирование. – К., 2001. – № 9. – С. 229–233.

123. Рейцен Е. А. Исследование задержек транспорта в городах: [Электронный ресурс] / Е. А. Рейцен, А. Ю. Васильева // Матер. VIII международной (одинадцатой екатеринбургской) науч.-практ. конф. – 2002. – Режим доступа: http://towntraffic.narod.ru/Russian/Streets_net/Reyzen.htm (07.10.17). – Загл. с экрана.

124. Рейцен Е. А. Оптимизация цикла работы светофора с использованием методов линейного программирования / Е. А. Рейцен, А. Г. Богданов // Містобудування та територіальне планування. – К., 2003. – № 14. – С. 143–151.

125. Рожанский Д. В. Специфика определения издержек при координированном регулировании транспортно-пешеходных потоков / Д. В. Рожанский, Ю. А. Врубель, Д. В. Капский [и др.] // Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов: междунар. науч.-практич. конф. (23–24 окт. 2009 г.): сборник научных статей. – Минск : БНТУ, 2009. – С. 190–212.

126. Романов А. Г. Дорожное движение в городах: закономерности и тенденции / А. Г. Романов. – М. : Транспорт, 1984. – 80 с.

127. Руководство пользователя программы VISSIM 5.10 [Электронный ресурс]. – СПб. : А+С Консалт, 2009. – 542 с.

128. Руководство по проектированию городских улиц и дорог. – М. : Стройиздат, 1980. – 80 с.

129. Руководство по регулированию дорожного движения в городах. – М. : Стройиздат, 1974. – 97 с.
130. Самойлов Д. Ф. Организация и безопасность городского движения : учебник для вузов / Д. Ф. Самойлов, В. А. Юдин, П. В. Рушевский. – М. : Высш. шк., 1981. – 256 с.
131. Сватко В. В. Методика визначення коефіцієнтів приведення до легкового автомобіля з використанням моделі ефективного транспортного засобу [Електронний ресурс] / В. В. Сватко. – 2013. – Режим доступу до статті: <http://www.sworld.com.ua/konfer30/1005.pdf> (07.10.17). – Назва з екрана.
132. Семенов В. В. Математическое моделирование автотранспортных потоков: (обзорный реферат) [Электронный ресурс] / В. В. Семенов. – 2003. – Режим доступа: <http://www.trizland.ru/trizba/pdf-books/IPMreview.pdf> (07.10.17). – Загл. с экрана.
133. Семенов В. В. Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса / Семенов В. В. – М., 2004. – 44 с. – (Препринт / Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН).
134. Семченко Н. А. Моделирование движения транспортных потоков на перекрестках / Н. А. Семченко // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков : НТУ ХПИ, 2011. – № 58. – С. 90–93.
135. Сильянов В. В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения / В. В. Сильянов. – М. : Транспорт, 1977. – 303 с.
136. Системологія на транспорті. Організація дорожнього руху : кн. 4 / [Е. В. Гаврилов, В. К. Доля, О. Т. Лановий, В. П. Поліщук та ін.] ; за заг. ред. М. Ф. Дмитриченка. – К. : Знання України, 2005. – 452 с.
137. Сисюк Г. Ю. Імітаційна модель транспортного потоку на перехресті / Г. Ю. Сисюк, О. М. Мотолига, І. К. Скриль // Вісник Кременчуцького держ. політехн. ун-ту ім. М.Остроградського. – 2009. – № 1 (59). – С. 28–32.
138. Славич В. П. Методи і моделі системи автоматизованого управління транспортними потоками міста : дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 «Інформаційні технології» / В'ячеслав Петрович Славич. – Херсон : ХНТУ, 2009. – 193 с.
139. 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.
140. Страментов А. Е. Городской транспорт и организация движения / А. Е. Страментов, В. Г. Сосянц, М. С. Фишельсон. – М. : Изд-во Министерства коммун. хоз-ва РСФСР, 1960. – 352 с.
141. Сысоев А. С. Моделирование и оптимизация систем с переменной структурой методами идемпотентной математики и анализа конечных изменений : дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» / Антон Сергеевич Сысоев. – Липецк, 2013. – 129 с.

142. Тарасов О. В. Оптимизация режимов работы объектов светофорного регулирования методами нечеткой логики / О. В. Тарасов // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2012. – № 2. – С. 139–143.

143. Технічні правила ремонту та утримання міських вулиць та доріг: КТМ 204 України 010-94. – К. : Держжитлокомунгосп, 1994. – 34 с.

144. Тимофеева Г. А. Математическая модель регулируемого перекрестка / Г. А. Тимофеева, Д. С. Завалишин // Транспорт Урала : науч.-техн. журнал. – Екатеринбург : УрГУПС, 2008. – № 2(17). – С. 92–97.

145. Трушевський В. Е. Застосування автоматичних стрілок тролейбусу як детекторів в системах світлофорного авторегулювання / В. Е. Трушевський // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. – № 1. – С. 29–32.

146. Трушевський В. Е. Особливості введення додаткових стоп-ліній на регульованих перехрестях / В. Е. Трушевський // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2013. – № 4. – С. 44–49.

147. 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.

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

149. Трушевський В. Е. Удосконалення світлофорного регулювання при організації руху за окремими напрямками : дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.22.01 «Транспортні системи» / В'ячеслав Едуардович Трушевський. – К., 2015. – 150 с.

150. Указания по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах: ВСН 25-86. – [Введено 1988-01-01]. – М. : Министерство автомобильных дорог РСФСР, 1986. – 140 с.

151. Ульрих С. А. Разработка алгоритма определения потока насыщения на регулируемых пересечениях г. Барнаула / С. А. Ульрих, В. И. Ведяшкин, Д. Ю. Каширский // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4/3. – С. 129–135.

152. Форнальчик Є. Ю. Актуалізація локального управління транспортними потоками міста / Є. Ю. Форнальчик, В. В. Гілевич // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2010. – № 6. – С. 24–28.

153. Форнальчик Є. Ю. Взаємозв'язок між технічним станом автобусів та їх розгінними швидкостями під час проїзду перехресть / Є. Ю. Форнальчик, В. В. Гілевич // Автошляховик України: науково-виробничий журнал. – К. : ДСАДУ (Укравтодор), 2013. – № 6 (236). – С. 5–7.

154. Форнальчик Є. Ю. Вплив технічного стану транспортних засобів на динаміку проїзду перехресть / Є. Ю. Форнальчик, В. В. Гілевич // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2011. – № 3/4 (51). – С. 4–6.

155. Форнальчик С. Ю. Вплив швидкості проїзду регульованого перехрестя на інтенсивність потоку насичення / С. Ю. Форнальчик, І. А. Могила, В. В. Гілевич // Комунальне господарство міст. – 2012. – № 103. – С. 355–366.
156. Форнальчик С. Ю. До поняття потоку насичення та його інтенсивності / С. Ю. Форнальчик, І. А. Могила, В. В. Гілевич // Транспортные проблемы крупнейших городов : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Х. : ХНАГХ, 2012. – С. 51–53.
157. Форнальчик С.Ю. Зміна інтенсивності потоку насичення залежно від швидкості проїзду регульованого перехрестя / С. Ю. Форнальчик, І. А. Могила, В. В. Гілевич // Транспортные проблемы крупнейших городов: матер. Междунар. научно-практической конференции. – Харків : ХНАМГ, 2012. – С. 38–42.
158. Форнальчик С. Ю. Порівняльна характеристика деяких показників проїзду регульованих і нерегульованих перехресть / С. Ю. Форнальчик, В. В. Гілевич // Вестник ХНАДУ. – 2010. – Вып. 50. – С. 48–51.
159. Форнальчик С. Ю. Проблема з вибором параметрів функцій належності у нечітких алгоритмах керування рухом на регульованих перехрестях / С. Ю. Форнальчик, І. А. Могила // Вісник СевНТУ, серія «Машинобудування і транспорт». – 2013. – № 143. – С. 96–101.
160. Форнальчик С. Ю. Сучасний стан і проблеми з організацією дорожнього руху у місті Львові / С. Ю. Форнальчик, В. В. Гілевич, С. Я. Фіалковський // Зб. наук. пр. за матер. Міжнар. наук.-практ. конф. «Логістика промислових регіонів». – Донецьк : ДААТ, 2010. – С. 179–182.
161. Форнальчик С. Ю. Техніко-технологічний аналіз регульованих перехресть з магістральними вулицями / С. Ю. Форнальчик, В. В. Гілевич // Наукові нотатки: міжвузівський збірник. – Луцьк : ЛНТУ, 2014. – № 46. – С. 558–564.
162. Хилажев Е. Б. Микропроцессорная техника в управлении транспортными потоками / Е. Б. Хилажев, В. Д. Кондратьев. – М. : Транспорт, 1987. – 174 с.
163. Хомяк Я. В. Организация дорожного движения: учебник для вузов / Я. В. Хомяк. – К. : Вища шк., 1986. – 272 с.
164. Цариков А. А. Развитие методов расчета регулируемых узлов на улично-дорожной сети города : автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.22.01 «Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте» / Алексей Алексеевич Цариков. – Екатеринбург, 2010. – 19 с.
165. Швецов В. И. Математическое моделирование транспортных потоков / В. И. Швецов // Автоматика и телемеханика: журнал. – М. : Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова, 2003. – № 11. – С. 3–46.
166. Шевель О. А. Модели расчета удельных задержек транспорта на регулируемом перекрестке / О. А. Шевель // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния : науч. матер. XVI Междунар. (19-й Екатеринбургской) науч.-практ. конф. (16–17 июня 2010 г.). – Екатеринбург, 2010. – С. 212–216.

167. Штовба С. Д. Вплив кількості нечітких правил на точність бази знань Мамдані / С. Д. Штовба, В. В. Мазуренко, О. Д. Панкевич // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – № 2. – С. 182–185.
168. Штовба С. Д. Дослідження навчання компактних нечітких баз знань типу Мамдані / С. Д. Штовба, В. В. Мазуренко // Штучний інтелект. – 2011. – № 4. – С. 521–529.
169. Штовба С. Д. Идентификация нелинейных зависимостей с помощью нечеткого логического вывода в системе MATLAB / С. Д. Штовба // Математика в приложениях. – 2003. – № 2 (2). – С. 9–15.
170. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
171. Шуть В. Н. Расширение возможностей оптимального управления транспортными потоками в улично-дорожной сети города: [Электронный ресурс] / В. Н. Шуть. – 2013. – Режим доступа: http://elit.lnu.edu.ua/pdf/3_20.pdf (07.10.17). – Загл. с экрана.
172. Abrams C. Selection of Pedestrian Signal Phasing / C. Abrams // Transportation Research Record, 1977. – No. 629. – pp. 1–6.
173. Akcelik R. Queue discharge flow and speed models for signalized intersection / R. Akcelik, M. Besley // Proceedings of 15th International Symposium on transportation and traffic flow theory. – Adelaide, 2002. – pp. 1–20.
174. Branston D. Comparison of Observed and Estimated Queue Lengths at Oversaturated Traffic Signals / D. Branston // Traffic Engineering and Control, 1978. – Vol. 19. – No. 7. – pp. 322–327.
175. Cheng D. X. Development of an Improved Cycle Length Model over the Highway Capacity Manual 2000 Quick Estimation Method / D. X. Cheng, T. Z. Zong, C.J. Messer // Journal of Transportation Engineering. – 2005. – No. 12. – pp. 890–897.
176. Fornalchyk Ye. The influence of dynamic characteristics of vehicles on the passenger car equivalent and traffic delay / Ye. Fornalchyk, I. Mohyla, V. Hilevych // An International Quarterly Journal «ECONTECHMOD». – 2015. – Vol. 4. – No. 2. – pp. 45–50.
177. Fornalchyk Ye. The saturation flow volume as a function of the intersection passing speed / Ye. Fornalchyk, I. Mohyla, V. Hilevych // International Scientific Journal «Transport Problems». – 2013. Vol. 8. – Issue 3. – pp. 43–51.
178. Guo H. Reliability analysis of pedestrian safety crossing in urban traffic environment / H. Guo // Safety Science. – 2012. – Vol. 50, Issue 4. – pp. 968–973.
179. Highway Capacity Manual / Washington: TRB, 2000. – 1134 p.
180. Inose H. Road traffic control / H. Inose, T. Hamada, E. Posner. – 1975. – 320 p.
181. 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. – T. 1925. – No. 1. – pp. 205–214.

182. Kosonen I. Multi-agent fuzzy signal control based on real-time simulation / I. Kosonen // *Transportation Research, Part C*. – 2003. – Vol. 11. – pp. 389–403.
183. Luttinen R. Tapio. Statistical analysis of vehicle time headway: Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology / R. Tapio Luttinen. – Otaniemi, 1996. – 193 p.
184. Madhavan Nair B. A fuzzy logic controller for isolated signalized intersection with traffic abnormality considered / B. Madhavan Nair, J. Cai // *Proceedings of 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. – 2007. – pp. 1229–1233.
185. Miller A. J. Setting for Fixed-cycle Traffic Signals / A. J. Miller // *Operational Research Quarterly*. – 1963. – No. 4. – pp. 373–386.
186. Miller A. J. The Capacity of Signalized Intersections in Australia / A. J. Miller // *Australian Road Research Board, ARRB Bulletin*. – 1968. – 95 p.
187. Murat Y. Sazi. A fuzzy logic multi-phased signal control model for isolated junctions / Y. Sazi Murat, Ergun Gedizlioglu // *Transportation Research, Part C*. – 2005. – Vol. 13. – pp. 13–36.
188. Newell G. Quenes for Vehicle Actuated Traffic Lights / G. Newell, J. Darroch, R. Morris // *Operations Research*. 1964. – No. 6. – pp. 882–895.
189. Niittymäki J. Fuzzy traffic signal control. Principles and applications: Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology / Jarkko Niittymäki. – Helsinki University of Technology, 2002. – 71 p.
190. Niittymäki J. Installation and experiences of field testing a fuzzy signal controller / J. Niittymäki // *European Journal of Operational Research*. – 2001. – Vol. 131. – pp. 273–281.
191. Noland R. Pedestrian travel times and motor vehicle traffic signals / R. Noland // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 1996. – T. 1553. – No. 1. – pp. 28–33.
192. Pappis C. A fuzzy logic controller for a traffic junction / C. Pappis, E. Mamdani // *IEEE transactions on systems, man and cybernetics*. – 1977. – Vol. SMC, No. 10. – pp. 707–717.
193. Pranevicius H. Knowledge based traffic signal control model for signalized intersection / H. Pranevicius, T. Kraujalis // *Transport*. – 2012. – Vol. 27 (3). – pp. 263–267.
194. Sosin J. A. Delays at Intersections Controlled by Fixed-Cycle Traffic Signals / J. A. Sosin // *Traffic Engineering and Control*. – 1980. Vol. 21. – No. 8. – pp. 407–413.
195. Staniek M. The crossroads lights fuzzy controller development principles in VISSIM environment / M. Stainek // *Zeszyty Naukowe Politechniki Slaskiej, seria Transport*. – 2011. – z. 73 (1861). – pp. 87–95.
196. Stotsko Z. Simulation of signalized intersection functioning with fuzzy control algorithm / Z. Stotsko, Ye. Fornalchyk, I. Mohyla // *Transport Problems*. – 2013. – Vol. 8. – Is. 1. – pp. 5–16.

197. Syed Masiur R. Review of the fuzzy logic based approach in traffic signal control: prospects of Saudi Arabia / Rahman Syed Masiur, Ratrout Nedat T. // *Journal of transportation Systems engineering and information Technology*. – 2009. – Vol. 9 (5). – pp. 58–70.
198. 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.
199. *Traffic Signal Timing Manual* / P. Koonce [and others] – McLean: US Department of Transportation, 2008. – 264 p.
200. Webster F. V. *Traffic signal Settings and Expected Delay* / F.V. Webster. – Italy: International Study Week in Traffic Engineering, 1956. – pp. 315.
201. Webster F. V. *Traffic Signals: Technical Paper No. 56* / F.V. Webster, B.M. Cobbe. – London : Road Research Laboratory, 1966. – 111 p.
202. Yulianto B. Application of fuzzy logic to traffic signal control under mixed traffic conditions / B. Yulianto // *Traffic Engineering and Control*. – October, 2003. – pp. 332–336.
203. Zarandi M. A fuzzy signal controller for isolated intersections / M. Zarandi, S. Rezapour // *Journal of Uncertain Systems*. – 2009. – Vol. 3. No. 3. – pp. 174–182.
204. Zhang L. Signal control for oversaturated intersections using fuzzy logic / L. Zhang, L. Honglong, P. Panos // *Proceedings of the First International Symposium on Transportation and Development Innovative Best Practices*. – 2008. – 23 p.

ДОДАТОК

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Нехай E – універсальна множина, x – елемент цієї множини, а R – певна властивість елемента множини. Звичайна (чітка) підмножина A універсальної множини E , елементи якої задовольняють властивості R , визначається як множина впорядкованих пар:

$$A = \{\mu'_A(x)/x\}, \quad (1)$$

де μ'_A – характеристична функція, що набуває значення 1, якщо x задовольняє властивості R , і 0 – якщо не задовольняє.

Нечітка підмножина відрізняється від звичайної тим, що для елементів x із E немає однозначної відповіді «так–ні» відносно властивості R . Тому нечітка підмножина A універсальної множини E визначається як множина впорядкованих пар:

$$A = \{\mu_A(x)/x\}, \quad (2)$$

де $\mu_A(x)$ – характеристична функція належності, що набуває значень у певній впорядкованій множині M , наприклад $M = [0;1]$, і використовується для визначення ступеня належності довільного елемента універсальної множини до нечіткої множини [170].

Серед відомих методів побудови функцій належності є прямий метод, коли експерт задає для кожного $x \in E$ значення $\mu_A(x)$. Як правило, прямі методи задавання функцій належності використовують для таких понять, як швидкість, час, відстань, тиск, температура тощо. Підвидом прямих методів є групові прямі методи, коли групі експертів ставлять запитання з полярними відповідями. Тоді кількість позитивних відповідей, поділена на кількість експертів, дає значення функції належності. Непрямі методи визначення значень функцій належності використовують у випадках, коли немає елементарних властивостей, які можна виміряти (поширеним непрямим методом є метод попарного порівняння).

Функції належності задають часто у параметричній формі. У цьому разі задача побудови функцій належності зводиться до визначення її параметрів, якими є її форма та числові значення, що характеризують розташування нечіткої множини на універсальній множині. Поширеними є трикутна, трапецієподібна, гауссова, сигмоїдна та синглетонна функції належності, що характеризуються 2–4 числовими значеннями [170].

Для опису об'єктів та явищ за допомогою нечітких множин використовують нечіткі та лінгвістичні змінні [89, 170]. Наприклад, розглянемо швидкість руху ТЗ у населеному пункті. Хоч значення миттєвої та середньої швидкостей є визначеними, водії часто дають суб'єктивну оцінку швидкості руху, використовуючи такі поняття, як «мала швидкість», «середня швидкість» та «велика швидкість» руху. Така оцінка швидкості руху може належати до діапазону від 0 км/год до певного, достатньо великого значення. Припустимо, що верхньою межею є 100 км/год. Формалізацію суб'єктивної оцінки швидкості руху можна виконати за допомогою лінгвістичної змінної $\langle \beta, T, X, G, M \rangle$, де β – швидкість руху автомобіля; T – {«мала швидкість», «середня швидкість», «велика швидкість»}; $X = [0; 100]$; G – процедура утворення нових термів за допомогою логічних зв'язків «І», «АБО» та модифікаторів типу «дуже», «НЕ», «трохи» тощо («мала або середня швидкість», «дуже велика швидкість»); M – процедура задавання на X нечітких змінних $\alpha_1 = \text{мала швидкість}$, $\alpha_2 = \text{середня швидкість}$, $\alpha_3 = \text{велика швидкість}$.

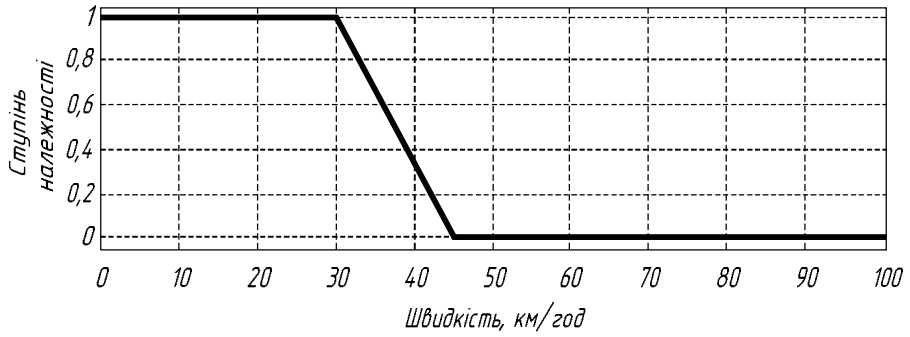
Для цього прикладу нечіткі множини A_1 , A_2 та A_3 , що відповідають нечітким змінним α_1 , α_2 та α_3 , зручно задавати графічно. Один із можливих варіантів цих нечітких множин наведено на рис. 1.

Для наочності функції належності декількох нечітких змінних, що використовують для задавання однієї лінгвістичної змінної, зображають на одному рисунку (рис. 2). Це дає змогу порівнювати значення функцій належності відповідних нечітких змінних для різних значень області визначення.

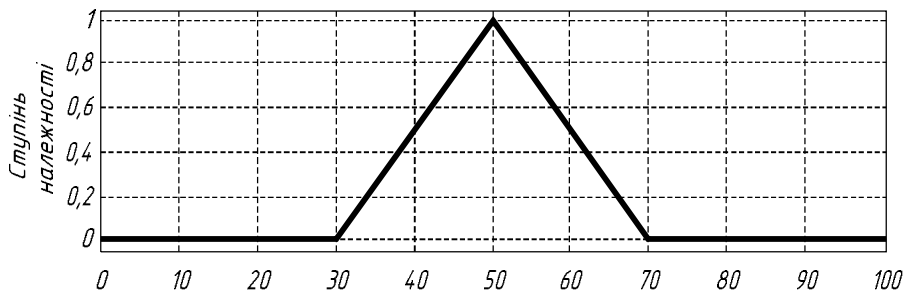
У нечіткій логіці істинність тверджень оцінюється певною мірою, яка може набувати інших значень, крім «істина» та «хиба». У запропонованому Л. Заде варіанті нечіткої логіки множина істинності значень висловлювань є інтервалом дійсних чисел $[0; 1]$. Ці числові значення є кількісною оцінкою ступеня істинності висловлювання, відносно якого не можна цілком певно ствердити про його істинність чи хибу.

Системи нечіткого висновку призначені для перетворення значень вхідних змінних процесу керування на вихідні змінні. З цією метою вони повинні містити базу нечітких правил і реалізовувати нечіткий висновок на основі умов, наведених у вигляді нечітких лінгвістичних висловлювань.

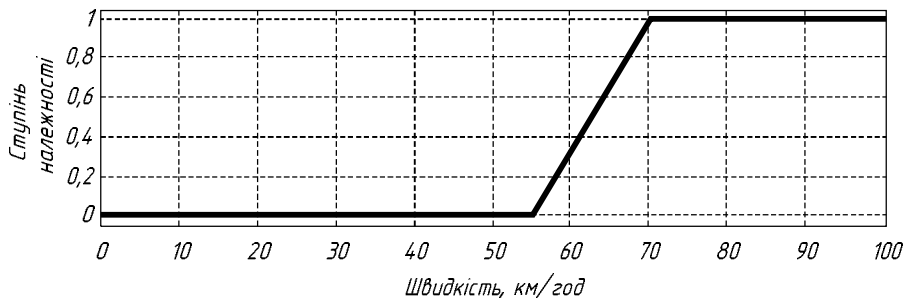
Основні етапи нечіткого висновку: формування бази правил; введення нечіткості; агрегування умов кожного правила; активізація висновків кожного правила; акумулювання висновків усіх правил; зведення до чіткості [195].



а



б



в

Рис. 1. Графіки функцій належності множин A_1 , A_2 та A_3 , що відповідають нечітким змінним α_1 = «мала швидкість» (а), α_2 = «середня швидкість» (б) та α_3 = «велика швидкість» (в)

База правил системи нечіткого висновку призначена для формального подання емпіричних знань експертів. Найчастіше базу правил наводять у вигляді структурованого тексту:

$$\begin{aligned}
 & \Pi_1 : \text{якщо } x \in A_1 \text{ та } y \in B_1, \text{ то } z \in C_1; \\
 & \Pi_2 : \text{якщо } x \in A_2 \text{ та } y \in B_2, \text{ то } z \in C_2; \\
 & \quad \quad \quad \mathbf{L} \\
 & \Pi_n : \text{якщо } x \in A_n \text{ та } y \in B_n, \text{ то } z \in C_n,
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

де x, y – вхідні лінгвістичні змінні; z – вихідна лінгвістична змінна; A, B та C – терм-множини відповідних лінгвістичних змінних; n – кількість нечітких правил.

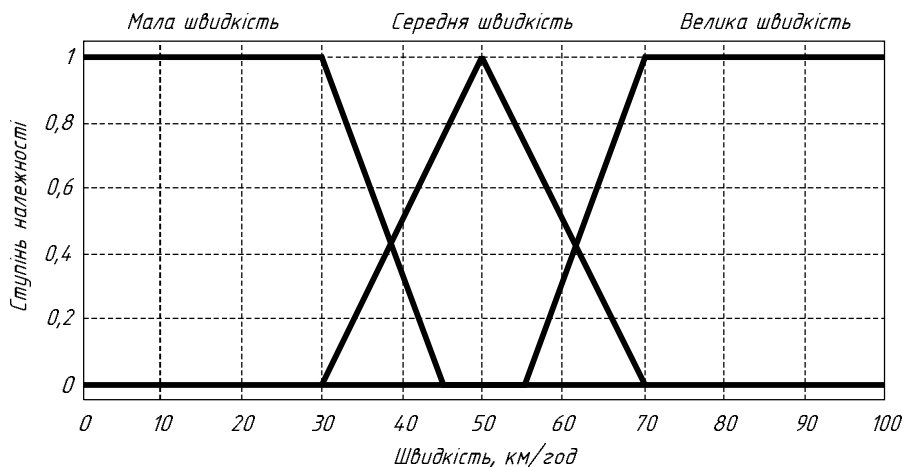


Рис. 2. Графіки функцій належності множин A_1, A_2 та A_3 лінгвістичної змінної «швидкість руху автомобіля»

Кожне правило може мати ваговий коефіцієнт, що набуває значення з інтервалу $[0;1]$. Якщо вагові коефіцієнти відсутні, то приймають їхні значення, що дорівнюють 1. База правил повинна складатись лише з нечітких висловлювань, до того ж у кожному з них повинні бути визначені функції належності значень терм-множин для кожної з лінгвістичних змінних.

Введення нечіткості (fuzzification) – процедура пошуку значень функції належності нечітких множин на основі звичайних (чітких) даних. Метою цього етапу є встановлення відповідності між конкретним значенням окремої вхідної змінної системи нечіткого висновку та значенням функції належності відповідного їй терму

вхідної лінгвістичної змінної. Після завершення цього етапу для всіх вхідних змінних потрібно визначити конкретні значення функцій належності для кожного терму, що використовують в умовах бази правил.

Агрегування (aggregation) – процедура визначення ступеня істинності умов для кожного з правил системи нечіткого висновку.

Активізація (activation) – процедура знаходження ступеня істинності висновків для кожного з правил системи нечіткого висновку.

Акумуляування (accumulation) – процедура знаходження функцій належності для кожної з вихідних лінгвістичних змінних. Метою акумуляування є об'єднання всіх ступенів істинності висновків для кожного з правил для отримання функцій належності для кожної з вихідних змінних.

Зведення до чіткості (defuzzification) – процедура знаходження конкретних (чітких) значень для кожної з вихідних лінгвістичних змінних, які можна використати пристроями, зовнішніми відносно системи нечіткого висновку. Основними методами зведення до чіткості є метод центру тяжіння, метод центру площі, метод лівого та правого модального значень.

За методом центра тяжіння, або центроїда (*COG, Centre of Gravity*) чітке значення вихідної змінної дорівнює абсцисі центру тяжіння площі, обмеженої графіком кривої функції належності відповідної вихідної змінної. Центроїд визначають за співвідношенням

$$y = \frac{\int_{min}^{max} x\mu(x) dx}{\int_{min}^{max} \mu(x) dx}, \quad (4)$$

де y – чітке значення; x – змінна, що відповідає вихідній лінгвістичній змінній; min та max – ліва та права точки області визначення нечіткої змінної; $\mu(x)$ – функція належності нечіткої множини, що відповідає вихідній змінній після етапу акумуляування.

Для точкових множин центр тяжіння (*COGS, Centre of Gravity for Singletons*) визначають також за співвідношенням

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot \mu(x_i))}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)}, \quad (5)$$

де n – кількість точкових (одноеlementних) нечітких множин, кожна з яких характеризує єдине значення вихідної лінгвістичної змінної.

За методом центру площі (*COA, Centre of Area*) чітке значення вихідної змінної дорівнює абсцисі, яка ділить площу, обмежену графіком функції належності, на дві однакові частини. Центр площі визначають за формулою

$$\int_{\min}^u \mu(x) dx = \int_u^{\max} \mu(x) dx. \quad (6)$$

За методом лівого модального значення (*LM, Left Most Maximum*) чітке значення вихідної змінної дорівнює найменшій з мод (крайній лівій) нечіткої множини для вихідної змінної.

За методом правого модального значення (*RM, Right Most Maximum*) чітке значення вихідної змінної дорівнює найбільшій з мод (крайній правій) нечіткої множини для вихідної змінної. Для зведення до чіткості можна використовувати й інші методи.

Ілюстрацію основних етапів нечіткого висновку наведено на рис. 3.

Наведені етапи нечіткого висновку можна реалізувати неоднозначно, оскільки вони містять окремі параметри, які повинні бути фіксованими. Тобто, вибір конкретних параметрів кожного з етапів визначає певний алгоритм, який повною мірою реалізує нечіткий висновок. Сьогодні найчастіше використовують алгоритми *Мамдані, Цукамото, Ларсена, Сугено*, а також спрощений нечіткого висновку [170].

Ідентифікування нелінійних залежностей – встановлення закономірностей між входами X та виходом y – є важливим завданням. Нехай існує певна нелінійна залежність $y = f(X)$, яка описується нечіткою базою знань *Мамдані*. Крім цього, є навчальна вибірка з M пар експериментальних даних (X_r, y_r) , де $X_r = (x_{r1}, x_{r2}, \mathbf{K}, x_{rm})$ – вхідний вектор в r -тій парі навчальної вибірки; y_r – відповідний вихід.

Нехай: P – вектор параметрів функцій належності термів вхідних та вихідних змінних; W – вектор вагових коефіцієнтів правил бази знань; $F(P, W, X_r)$ – результат виведення за нечіткою базою знань *Мамдані* з параметрами (P, W) за значення входів X_r . Навчання нечіткого алгоритму передбачає знаходження таких параметрів функцій належності, які мінімізують розбіжність між фактичними даними та результатами моделювання.

Згідно з методом найменших квадратів, налаштування нечіткої бази знань *Мамдані* зводиться до задачі математичного програмування [170]: знайти такий вектор (P, W) , щоб

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{r=1}^M (y_r - F(P, W, X_r))^2} \rightarrow \min. \quad (7)$$

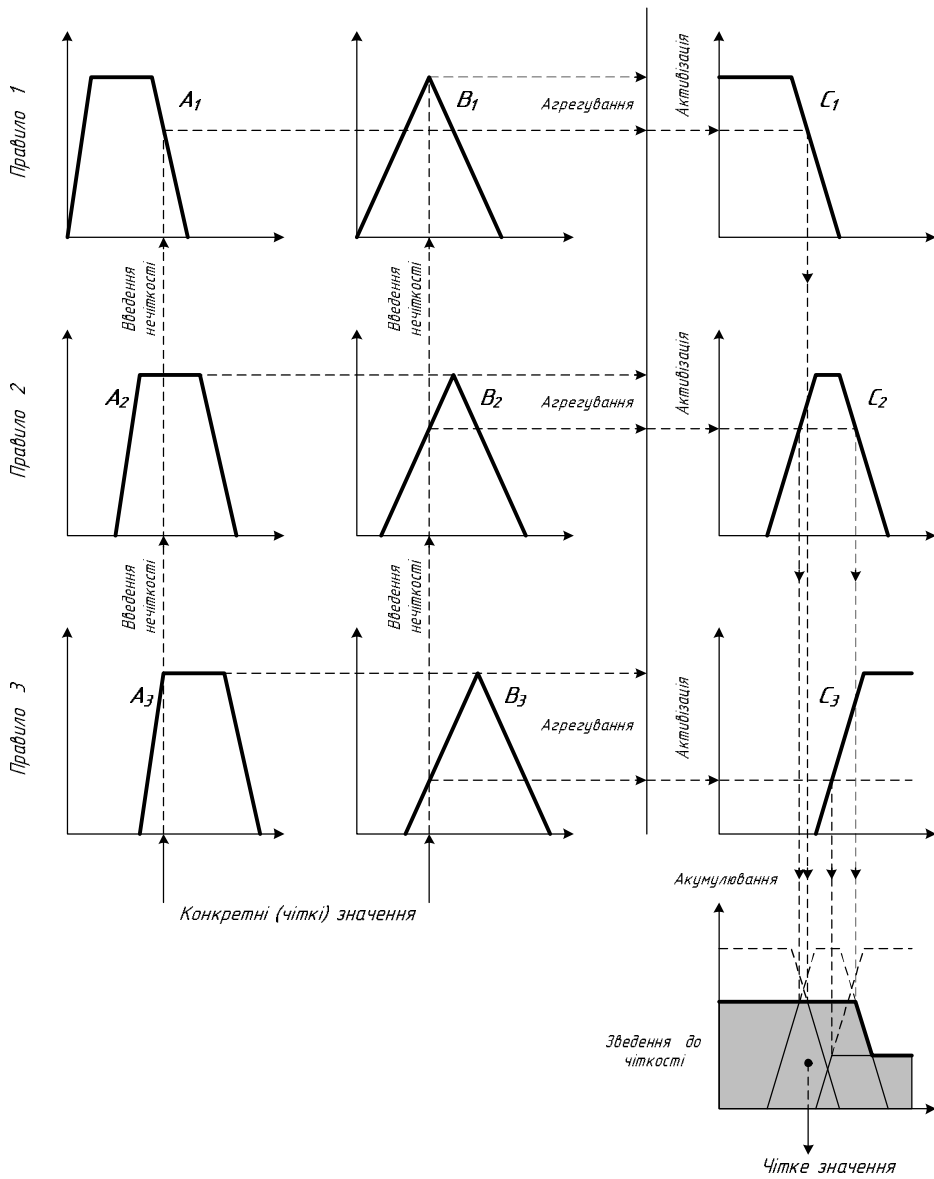


Рис. 3. Ілюстрація основних етапів нечіткого висновку з використанням бази нечітких правил

У цій задачі мінімізації на керовані змінні P накладають обмеження, які забезпечують лінійну впорядкованість елементів терм-множин. Такі обмеження не дають змоги алгоритмам оптимізації зробити, наприклад, нечітку множину «короткий» більшою, ніж «довгий». У такому разі забезпечують «прозорість» нечіткої бази знань після налаштування. Координати вектора W повинні бути в межах $[0,1]$. Задачу (7) можна розв'язати різними алгоритмами оптимізації, проте найчастіше використовують метод найшвидшого спуску, квазіньютонівські методи та генетичні алгоритми [89, 169, 170].

Якщо певна залежність описується нечіткою базою знань *Сугено*, то її налаштування зводиться до задачі математичного програмування [170]: знайти такий вектор (P, B) , щоб

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{r=1}^M (y_r - F(P, B, X_r))^2} \rightarrow \min, \quad (8)$$

де B – вектор коефіцієнтів лінійних функцій у висновках правил бази знань *Сугено*.

На практиці задачу (7) розв'язують як за стандартними алгоритмами оптимізації (наприклад, *Левенберга–Марквардта*), так і за спеціально розробленими швидкими алгоритмами на основі фільтра *Калмана* і методу зворотного поширення похибки. Алгоритм на основі фільтра *Калмана* оптимізує лише лінійні параметри нечіткої бази знань – коефіцієнти у висновках правил, а ANFIS-алгоритм оптимізує як лінійні, так і нелінійні параметри [170].

Книги для навчання і роботи!



За ред. Г. П. Петришин, Б. С. Посацького, Ю. В. Ідак

МІСТОБУДІВНЕ ПРОЕКТУВАННЯ. Частина I: МІСТО ЯК ОБ'ЄКТ ПРОЕКТУВАННЯ

Навчальний посібник. – 2016. – 328 с.
ISBN 978-617-607-966-8

У навчальному посібнику окреслено місто як феномен розвитку людської цивілізації, висвітлено питання розвитку системи розселення, визначено проблеми функціонування сучасного міста та описано принципи просторово-планувальної організації міської території, визначено роль транспорту у планувальній організації та функціонування громадських центрів у структурі сучасного міста; розкрито естетичний аспект формування міського середовища, виокремлено поняття та подано завдання управління містом, підкреслено роль історичного середовища та культурної спадщини у сучасному міському середовищі, проаналізовано екологічний аспект. Підготовлено за літературними та Інтернет-джерелами, нормативними документами; використано сучасні закордонні наукові дослідження та проектний досвід.

Для студентів і викладачів архітектурних та інженерних спеціальностей вищих навчальних закладів.



За ред. Г. П. Петришин, Б. С. Посацького, Ю. В. Ідак

МІСТОБУДІВНЕ ПРОЕКТУВАННЯ. Частина II: ПРОЕКТУВАННЯ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МІСТА

Навчальний посібник. – 2017. – 288 с.
ISBN 978-966-941-079-5

У другій частині навчального посібника виділено структурні елементи міста та визначено особливості їх проектування. До основних зараховано сільбищну, виробничу та ландшафтно-рекреаційну територію. Також висвітлено питання, що стосуються організації громадських просторів та благоустрою міста і його цивільної оборони.

Матеріали підготовлено за літературними та Інтернет-джерелами, нормативними документами, використано сучасні закордонні наукові дослідження та проектний досвід.

Видання розраховано для студентів і викладачів архітектурних та інженерних спеціальностей вищих навчальних закладів.

Дмитриченко М. Ф. та ін.

МІЖНАРОДНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ

Навчальний посібник. – 2012. – 308 с.
ISBN 978-617-607-368-0

У навчальному посібнику висвітлено формування міжнародних транспортних коридорів, особливості організації міжнародних перевезень вантажів і пасажирів на автомобільному та залізничному транспорті, їх правове регулювання, тенденції розвитку і шляхи покращення якості й ефективності різних видів міжнародних перевезень та їх економічної доцільності з урахуванням новітніх тенденцій розвитку міжнародних перевезень, а також наведено практичних прикладів щодо покращення транспортного процесу у міжнародному сполученні.

Призначений для студентів, магістрів та аспірантів з напрямку підготовки “Транспортні технології”.

*Рекомендувало Міністерство освіти і науки,
молоді та спорту України як навчальний посібник для
студентів напрямку підготовки “Транспортні технології”.*

Олісевич Мирослав

ОРГАНІЗАЦІЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ.

Частина 1. ВАНТАЖНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ

Навчальний посібник: у 2-х ч. – 2017. – 336 с.
ISBN 978-966-941-084-9

У посібнику викладено засади організації транспортного процесу. Подано характеристику сучасної матеріально-технічної бази вантажних автомобільних перевезень, класифікацію та властивості вантажів. Формалізовано підходи дослідження транспортної мережі, описано основні експлуатаційні властивості автотранспортних засобів, дано критичний аналіз продуктивності вантажівок на простих транспортних циклах та у середніх і великих транспортних системах. Описано технології навантажувально-розвантажувальних робіт. Показано методологію розв’язування основних типових задач організації транспортного процесу.

Для студентів, що вивчають курс “Організація автомобільних перевезень” за фахом “Автомобільний транспорт” і “Транспортні технології”.





Форнальчик Є. Ю., Качмар Р. Я.
**ОСНОВИ ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

Навчальний посібник. – 2-ге вид., змін. та допов. –
2017. – 324 с.
ISBN 978-966-941-002-3

Викладено навчальний матеріал, який охоплює повний курс дисципліни “Основи технічного сервісу транспортних засобів”. Супроводжується відповідними ілюстраціями, прикладами, тестовими питаннями для самоконтролю.

Для студентів спеціальності “Транспортні технології, а також для інженерно-технічних працівників галузі технічного сервісу автомобілів.



Вікович І. А.
ТЕОРИЯ РУХУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Підручник. – 2013. – 672 с.
ISBN 978-617-607-486-1

У підручнику висвітлено питання теорії руху транспортних засобів. Розглянуто функціональні характеристики систем транспортних засобів: тягово-швидкісні властивості, прохідність, стійкість руху, кінематику і динаміку прямолінійного і криволінійного руху, коливання та плавність ходу, особливості гальмування, паливну ощадливість конструкції та розрахунок підвісок, а також основи теорії плавання спеціальних транспортних засобів, руху транспортних засобів на гусеничному ході та основні аспекти теорії руху транспортних засобів з ємкостями, частково заповненими рідиною.

Для студентів і аспірантів вищих технічних навчальних закладів освіти напряму підготовки транспортних технологій. Підручник може бути корисним для інженерно-технічних працівників у галузі знань “Транспорт і транспортні інфраструктури”.

*Затвердило Міністерство освіти і науки України як підручник
для студентів вищих навчальних закладів.*

Горбай О. З. та ін.

МІЦНІСТЬ ТА ПАСИВНА БЕЗПЕКА АВТОБУСНИХ КУЗОВІВ

Монографія. – 2013. – 276 с.
ISBN 976-617-607-396-3

У монографії висвітлено основні аспекти теорії пасивної безпеки та рівномірності кузовів, методи комплексного їх дослідження стосовно сучасних нормативних вимог щодо її забезпечення під час перевезення пасажирів в автобусах. Викладено загальні питання забезпечення життєвого простору та міцності конструкцій каркасів кузовів автобусів у разі ДТП. Розглянуто проблеми пасивної безпеки автобусів різних типів на етапах проектування, виготовлення та сертифікаційних випробувань. Наведено методику та розраховано рамний і несівний тип кузова на рівномірність конструкції методами комп'ютерного моделювання варіанта виконання вимог правил ДСТУ UN/ECE R 66. Висвітлено методи реєстрації, вимірювання та обробки експериментальних даних при випробуваннях автобусів на відповідність вимогам пасивної безпеки.

Монографія призначена для інженерів-дослідників і конструкторів проектних бюро автобусобудівної галузі, вишів, що готують бакалаврів та магістрів для автомобільної промисловості, а також технічних працівників автобусних підприємств, функціональні обов'язки яких пов'язані з безпекою дорожнього руху.

Мовчан М. І., Собко Ю. М.

ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Навчальний посібник. – 2012. – 116 с.
ISBN 978-617-607-323-9

Наведено основні відомості про автомобільні дороги, викладено основи проектування автомобільних доріг, подано необхідні довідкові матеріали. Способи проектування проілюстровано прикладами. Особливу увагу зосереджено на питаннях гарантування безпеки руху.

Для студентів спеціальностей “Автомобільні дороги та аеродроми”, “Мости та транспортні тунелі” й “Організація і регулювання дорожнього руху”.





Солодкий С. Й. та ін.

ПРОЕКТУВАННЯ РОЗВ'ЯЗОК НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ

Навчальний посібник. – 2012. – 200 с.
ISBN 978-617-607-435-9

Викладено дані про історію розвитку, класифікацію, особливості різних типів перехрещень і примикань на автомобільних дорогах. Наведено методи вишукувань і проектування транспортних розв'язок в одному, двох та більше рівнях. Зосереджено увагу на розрахунку геометричних елементів різного типу вузлів автомобільних доріг і гарантуванні безпеки руху на транспортних вузлах.

Для студентів спеціальностей “Автомобільні дороги та аеродроми”, “Мости і транспортні тунелі”, “Організація та регулювання дорожнього руху”, а також для інженерів-проектувальників автомобільних доріг.



Солодкий С. Й.

ДОРОЖНІ ОДЯГИ

Навчальний посібник. – 2015. – 164 с.
ISBN 978-617-607-826-5

У навчальному посібнику подано інформацію про загальні поняття, класифікацію, сучасні принципи конструювання і розрахунок дорожніх одягів автомобільних доріг, вулиць і аеродромів, вимоги до будівельних матеріалів, що використовуються для їх влаштування.

Посібник проілюстровано прикладами конструкцій дорожнього одягу, які узагальнюють сучасний вітчизняний, європейський і світовий досвід проектування. Наведено приклад розрахунку конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу. Значну увагу приділено дорожнім та аеродромним одягам жорсткого типу, актуальність будівництва яких в Україні невідносно зростає. Автор посібника зробив спробу узагальнити сучасні тенденції і систематизувати великий матеріал щодо проектування дорожніх конструкцій як за

критеріями міцності, так і за критеріями морозозахисту та осушення. Після кожного розділу подано перелік наукової і нормативно-технічної літератури з певної проблематики.

Видання розраховано на студентів спеціальностей “Автомобільні дороги та аеродроми”, “Мости і транспортні тунелі” для ОКР “спеціаліст” і “магістр”.

Солодкий С. Й.

ІННОВАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ І ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА ТА РЕМОНТУ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Навчальний посібник. – 2013. – 140 с.
ISBN 978-617-607-434-2

Описано дорожньо-будівельні матеріали і технології для влаштування і ремонту дорожніх одягів автомобільних доріг, що призводять до значного техніко-економічного ефекту. Розглянуто технологічні аспекти модифікації дорожніх бігумів, впровадження щебенево-мастикового асфальтобетону, виготовлення та укладання литих емульсійно-мінеральних сумішей. Викладено технології холодного і гарячого ресайк-лінгу дорожніх одягів, армування та ремонту асфальтобетонних покриттів. Після кожного розділу подано перелік наукової і нормативно-технічної літератури з цієї проблематики.

Навчальний посібник буде корисним для студентів ВНЗ дорожнього профілю всіх рівнів акредитації; інженерно-технічних працівників дорожньої галузі.

Солодкий С. Й., Толмачов С. М.

БЕТОННІ ДОРОЖНІ ТА АЕРОДРОМНІ ПОКРИТТЯ

Навчальний посібник. – 2016. – 132 с.
ISBN 978-966-941-030-6

Посібник присвячено питанням конструювання, розрахунку, будівництва і контролю якості цементобетонних дорожніх та аеродромних покриттів із урахуванням сучасних світових тенденцій будівництва дорожніх одягів і досягнень у галузі технології дорожнього цементобетону.

Для студентів та аспірантів, які навчаються за спеціальністю “Будівництво та цивільна інженерія”, спеціалізаціями “Автомобільні дороги та аеродроми”, “Мости і транспортні тунелі”, а також для інженерно-технічних працівників, які займаються проектуванням, будівництвом та утриманням дорожніх одягів.



Видавництво Львівської політехніки

вул. Ф. Колесси, 4, корп. 23А, м. Львів, 79013
тел. +380 32 2582146, факс +380 32 2582136, <http://vlp.com.ua>, vmr@vlp.com.ua



НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**Форнальчик Євген Юліанович,
Могила Ігор Андрійович,
Трушевський Вячеслав Едуардович,
Гілевич Володимир Васильович**

**УПРАВЛІННЯ ДОРОЖНІМ
РУХОМ НА РЕГУЛЬОВАНИХ
ПЕРЕХРЕСТЯХ У МІСТАХ**

Монографія

Редактор *Олеся Косик*
Коректор *Наталія Колтун*
Технічний редактор *Лілія Саламін*
Комп'ютерне верстання *Наталії Максимюк*
Художник-дизайнер *Уляна Келеман*

Здано у видавництво 18.10.2017. Підписано до друку 27.01.2018.
Формат 70×90¹/₁₆. Папір офсетний. Друк офсетний.
Умовн. друк. арк. 18,7. Обл.-вид. арк. 13,7.
Наклад 1000 прим. Зам. 171688.

Видавець і виготівник: Видавництво Львівської політехніки.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4459 від 27.12.2012 р.

вул. Ф. Колесси, 4, Львів, 79013
тел. + 380 32 2582146, факс +380 32 2582136
vlp.com.ua, ел. пошта: vmr@vlp.com.ua