

*А.А. Ренкас, Д.В. Руденко, В.І. Товарянський
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності*

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПЕРЕХРЕСТЬ З ВИСОКОІНТЕНСИВНИМИ ТРАНСПОРТНИМИ ТА ПІШОХІДНИМИ ПОТОКАМИ

Постановка проблеми. Проблемними ділянками вулично-дорожньої мережі є перехрестя з високою інтенсивністю руху конфліктуючих пішоходних та транспортних потоків, зокрема тих, що роблять поворот. На таких перехрестях, навіть із світлофорним регулюванням, спостерігаються значні транспортні затримки. Суть проблеми полягає у такому: у разі здійснення транспортними засобами повороту ліворуч чи праворуч на перехресті при проїзді на сигнал світлофора, що дозволяє рух, повинні дати дорогу пішоходам, що здійснюють перехід через проїжджу частину по пішоходному переході, яким також одночасно надано пріоритет у русі. У разі високої інтенсивності пішоходного руху завершити поворот таким транспортним засобом неможливо, вони залишаються на перехресті, тому за такими транспортними засобами виникають суттєві затримки руху.

Мета. Тому метою роботи є дослідження взаємодії транспортних та пішоходних потоків з високою інтенсивністю на регульованих перехрестях для покращення пропускнувності таких перехресть.

Методи. Для дослідження параметрів транспортних потоків, зокрема, довжини заторів, використано модель транспортного потоку, що включає психофізіологічну модель слідування за транспортним засобом, який пересувається попереду, для поздовжнього руху транспортних засобів та модель, яка базується на правилах дорожнього руху, для бокового руху. Для моделювання пішоходних потоків також застосована модель Відемана, яка передбачає не вільний рух пішоходів, а цілеспрямований, за аналогією з транспортними потоками. Для отримання емпіричних нелінійних залежностей довжини заторів від інтенсивностей конфліктуючих пішоходних та транспортних потоків використано метод найменших квадратів.

Результати. У роботі застосовано відомі методи вирішення прикладних завдань у сфері дорожнього руху для окремих унікальних випадків, а саме перехрестя із високоінтенсивними транспортними і пішоходними потоками. Дослідження параметрів дорожнього та пішоходного руху на перехресті показали, що довжина заторів суттєво залежить від інтенсивності руху транспортного потоку, проте із зростанням інтенсивності руху пішоходного потоку до більше 1000 осіб /год довжина заторів змінюється несуттєво. У випадку наявності на під'їздах до перехрестя нереєстрованих транспортних засобів довжина заторів зростає в середньому на 1,14 % та суттєво залежить від інтенсивностей руху транспортного та пішоходного потоків.

Запропоновано на таких ділянках вулично-дорожньої мережі введення трифазного світлофорного регулювання, коли одна із фаз дозволяє рух лише пішоходам. Результати моделювання показали, що довжина заторів у випадку, якщо на підходах до перехрестя немає реєстрованих транспортних засобів, зменшується в середньому на 45,3 % і мало залежить від інтенсивності пішоходних потоків. У випадку, якщо на підходах до перехрестя є реєстровані транспортні засоби, довжина заторів зменшується в середньому на 13,7 %, проте у деяких випадках може зростати.

Висновок. Методика проведення досліджень, що представлена у цій роботі, може бути використана для перехрестя із іншою схемою організації дорожнього руху з метою обґрунтування доцільності введення трифазного світлофорного регулювання, коли одна із фаз дозволяє рух лише пішоходам.

Ключові слова: транспортні технології, організація дорожнього руху, транспортні затримки, довжина заторів, інтенсивність пішоходного руху, інтенсивність руху транспортного потоку.

Renkas A.A., Rudenko D.W., Tovaryansky V.I. (Lviv State University of Life Safety)

ENHANCING THE EFFECTIVE FUNCTIONING OF INTERSECTIONS WITH INTENSIVE TRAFFIC AND PEDESTRIAN FLOWS

Introduction. Problematic sections of the road network are intersections with high traffic intensity of conflicting pedestrian and traffic flow, in particular, right and left turns. At such crossings, there are significant traffic delays. In the case of vehicles turning left or right at an intersection when passing at a traffic light signal that allows traffic, should give way to pedestrians crossing the roadway on the crosswalk. In the case of high intensity of pedestrian traffic, it is impossible to complete the turn of such vehicles, they remain at the intersection, so there are significant traffic delays for returning vehicles.

Purpose. Therefore, the work aims to study the interaction of traffic and pedestrian flows with high intensity at regulated intersections to improve their capacity.

Methods. To study the parameters of traffic flows, in particular, the length of congestion, we used traffic flow models, which include a psychophysiological model of following a vehicle moving in front, and a model based on traffic rules. To model pedestrian flows the Wiedemann model was used. The least-squares method was used to obtain empirical nonlinear dependences of congestion length on the intensities of conflicting pedestrian and traffic flows.

Results. The paper uses known methods for solving applied problems in the field of traffic for some unique cases, namely the intersection of intensive traffic and pedestrian flows. Studies of road and pedestrian traffic parameters at crossings have shown that the length of congestion significantly depends on the intensity of traffic flow, but with increasing intensity of pedestrian traffic more than 1000 people/h, the length of congestion changes insignificantly. If there are trams at the intersection, the length of congestion increases by an average of 1.14% and depends significantly on the intensity of traffic and pedestrian flows.

It is proposed to introduce three-phase traffic light regulation on such sections when one of the phases allows traffic only for pedestrians. The simulation results showed that the length of congestion in the absence of rail vehicles on the approaches to the intersection decreases by an average of 45.3% and is weakly dependent on the intensity of pedestrian flows. If there are rail vehicles at the crossing, the length of congestion can reduce by an average of 13.7%. But in some cases may increase.

Conclusion. The research methodology presented in this paper can be used for intersections with another traffic organization scheme to justify the feasibility of introducing three-phase traffic light control when one of the phases allows traffic only to pedestrians.

Keywords: transport technologies, traffic organization, traffic delays, congestion length, pedestrian intensity, traffic flow intensity.

Вступ. Транспортні затримки негативно впливають на транспортний процес, призводячи не лише до зниження швидкості та зростання тривалості перевезень, а, як наслідок, до економічних збитків. Найбільші за тривалістю затримки у місті спостерігаються у його центральній частині, де зосереджено велику кількість місць генерації та тяжіння пішохідних та транспортних потоків, таких як заклади вищої освіти, торгові центри, розважальні заклади, театри, кінотеатри, музеї тощо. Проблеми можуть виникнути у разі підвищення інтенсивності пішохідного руху через регульовані перехрестя, оскільки в цьому разі утруднюється проїзд перехрестя автомобілями, що рухаються по правоталівоповоротних напрямках. У такому разі транспортні засоби, що здійснюють поворот ліворуч чи праворуч на перехресті, при проїзді перехрестя на сигнал світлофора, що дозволяє рух, повинні дати дорогу пішоходам, що здійснюють перехід через проїжджу частину по пішохідному переході. У разі високої інтенсивності пішохідного руху завершити поворот цим транспортним засобам неможливо, тому за цими транспортними засобами виникають суттєві затримки руху [1].

Дослідження транспортних потоків на регульованих перехрестях з метою оптимізації світлофорного регулювання досліджено, зокрема у роботі [2]. Автори розглядають вплив наявності вантажних автомобілів у складі транспортних потоків на тривалість дозвільного сигналу світлофора для цього напрямку. Автори статті [3] орієнтують роботу світлофорів на скорочення часу проїзду регульованого перехрестя трамваями шляхом надання їм пріоритету транзиту з урахуванням роз-

кладу руху. Незважаючи на ефективність застосування методів, які дозволяють підвищити пропускну здатність перехрестя для окремих напрямків, у цих роботах не враховано потреби усіх учасників дорожнього руху. Тому автори роботи [4] пропонують прогнозувати параметри дорожнього руху на перехресті на основі статистичних даних про нього для впровадження багатoprogramного світлофорного регулювання на ізольованому перехресті. Проте більшої ефективності можна досягнути використавши адаптивне світлофорне регулювання. Так, у роботі [5] запропоновано методику, засновану на визначенні параметрів дорожнього руху на усіх напрямках руху, що дозволяє ефективно контролювати умови руху на перехресті, а потім динамічно регулювати максимальний зелений час світлофора. Крім цього, оптимізацію пропускну здатності перехрестя розглядають і інші автори, зокрема, у роботі [6] – із використанням мультиагентного підходу, у роботі [7] – ієрархічних нечітких систем, у роботі [8] – методу детектування маршрутних транспортних засобів при координованому світлофорному регулюванні тощо. Проте у цих роботах не враховано взаємодію транспортних та пішохідних потоків. Це явище досліджено у ряді інших робіт, зокрема [9] та [10], проте у них не розглянуто вплив пішохідних потоків на транспортні затримки.

У вітчизняній літературі проблемі зниження транспортних затримок на пішохідних переходах присвячена праця [11], у якій отримано аналітичні залежності для визначення витрат часу пішоходів і транспортних засобів на регульованих пішохідних переходах із виключними прист-

роями. Проте затримки виникають і на регульованих перехрестях, що досліджено у роботі [12], у якій розглянуто вплив поведінки пішоходів на довжину черг транспортних засобів. Для підвищення безпеки та зниження транспортних затримок пропонується змінювати тривалість фаз. Незважаючи на це, збільшення тривалості пішохідної фази може вплинути на утворення заторів.

Тому метою роботи є дослідження взаємодії транспортних та пішохідних потоків з високою інтенсивністю на регульованих перехрестях для покращення пропускної здатності таких перехресть.

Методи досліджень. Для дослідження параметрів транспортних потоків, зокрема, довжини заторів, використано модель транспортного потоку, що включає психофізіологічну модель слідування за транспортним засобом, який пересува-

є світлофорне двофазне регулювання. Перша фаза дозволяє рух транспортним засобам у напрямку I-II, I-III та I-IV, а також пішоходам у напрямку I-II та II-I. Друга фаза дозволяє рух у напрямках III-IV, IV-III, III-II та IV-II, а також пішоходам у напрямку III-IV та IV-III. При здійсненні правого повороту при русі у напрямку I-III та лівого у напрямку I-IV виникають транспортні затримки,



Рисунок 1 – Схема руху на перехресті

ється попереду, для повздовжнього руху транспортних засобів та модель, яка базується на правилах дорожнього руху, для бокового руху. Ці моделі розроблені за результатами досліджень Відемана [13, 14]. Для моделювання пішохідних потоків також застосована модель Відемана, яка передбачає не вільний рух пішоходів, а цілеспрямований, за аналогією з транспортними потоками. Для отримання емпіричних нелінійних залежностей довжини заторів від інтенсивностей конфліктуючих пішохідних та транспортних потоків використано метод найменших квадратів.

Результати досліджень

Для покращення пропускної здатності регульованих перехресть із високою інтенсивністю конфліктуючих пішохідних та транспортних потоків слід провести дослідження довжини транспортних затримок та виявити фактори, що впливають на формування заторів. Для цього розглянемо чотиристороннє регульоване перехрестя (рис. 1). Схема пофазного роз'їзду представлена на рис. 2. У напрямку I-II передбачено три смуги руху. У напрямку III-IV та IV-III передбачено по одній смузі для руху в кожному напрямку. На досліджуваному перехресті встановлено жорстке

пов'язані із неможливістю проїзду через пішохідний перехід у зв'язку із високою інтенсивністю пішохідного руху.

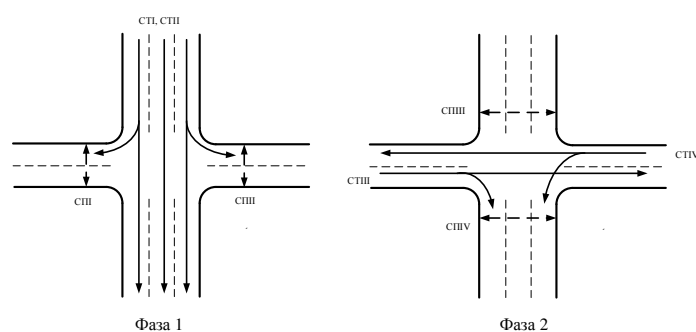


Рисунок 2 – Схема пофазного роз'їзду на перехресті

Така схема організації дорожнього руху відповідає перехрестю на проспекті Свободи та вулиці Гнатюка у місті Львові. На цій ділянці вулично-дорожньої мережі міста Львова спостерігається висока інтенсивність пішохідного та транспортного руху. Циклограма для такого перехрестя має вигляд, представлений на рис. 3.

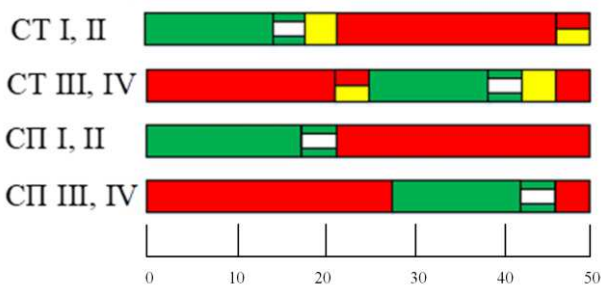


Рисунок 3 – Циклограма світлофорного регулювання на перехресті

Для дослідження залежності довжини заторів від інтенсивності транспортних та пішохідних потоків розглянуто конфліктуючі транспортний потік I-III та пішохідний – I-II, II-I. У середовищі PTV Vissim 2021.00-06 змодельовано це перехрестя із такими параметрами: ширина смуги для руху – 3,5 м; ширина пішохідних переходів – 4 м; цикл світлофорного регулювання – 50 с; дозвільний сигнал світлофора для напрямку I-II – 20 с; сумарна інтенсивність транспортного потоку у напрямку I-II, I-III та I-IV – 1500 авт./год; сумарна інтенсивність транспортного потоку у напрямку III-IV, III-II – 30 авт./год; сумарна інтенсивність транспортного потоку у напрямку IV-III та IV-II – 600 авт./год. Інтенсивність правоповоротного транспортного потоку I-III під час моделювання змінювалася у діапазоні від 100 до 700 авт./год із кроком 100 авт./год. Інтенсивність пішохідного потоку I-II, II-I під час моделювання змінювалася у діапазоні від 500 до 2000 осіб/год із кроком 500 осіб/год. Вихідними даними була інформація про довжину затору у напрямку I-II. Результати моделювання представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Довжина заторів, м, залежно від інтенсивності конфліктуючих транспортних та пішохідних потоків

Інтенсивність пішохідного потоку I-II, II-I, осіб/год	Інтенсивність транспортного потоку I-III, авт./год				
	100	250	400	550	700
500	78	161	182	288	362
1000	95	163	255	318	406
1500	98	172	262	320	410
2000	98	172	262	333	410

Як бачимо із таблиці 1 довжина заторів суттєво залежить від інтенсивності транспортного потоку. Також спостерігається залежність зміни цього параметра від інтенсивності пішохідного потоку. Проте із зростанням інтенсивності пішохідного потоку понад 1000 осіб /год довжина заторів змінюється несуттєво.

Обробивши результати моделювання із застосуванням методу найменших квадратів, отримана така емпірична залежність для визначення довжини заторів, м, залежно від інтенсивності конфліктуючих транспортних та пішохідних потоків:

$$L_z = 1,1N_n^{0,137}(0,01 \cdot \alpha \cdot N_{tr})^{0,743}, \quad (1)$$

де N_n – інтенсивність пішохідного потоку, осіб/год; N_{tr} – інтенсивність транспортного потоку на підході до перехрестя, поворотна частка якого конфліктує із пішохідним потоком, авт./год; α – частка поворотного потоку, що конфліктує із пішохідним потоком, %.

На рисунку 4 представлена графічна залежність довжини заторів від інтенсивності конфліктуючих транспортних та пішохідних потоків.

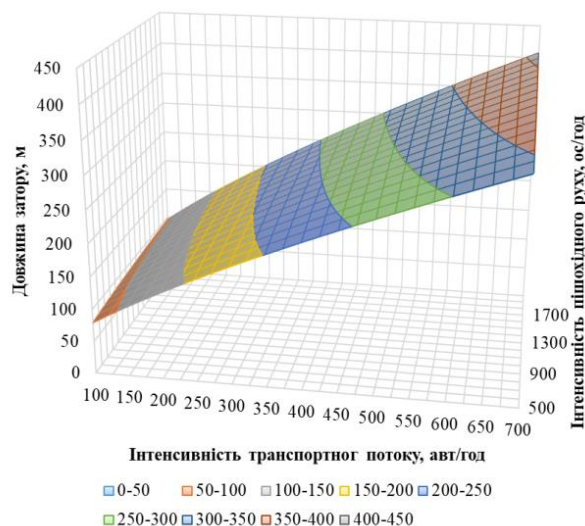


Рисунок 4 – Графічна залежність довжини заторів від інтенсивності конфліктуючих транспортних та пішохідних потоків

Також слід розглянути вплив наявності у складі транспортного потоку рейкових транспортних засобів, оскільки їх присутність може суттєво вплинути на пропускну здатність перехрестя. Нерідко виникає ситуація, коли трамваї не встигають завершити проїзд через перехрестя на дозвільний сигнал світлофора у зв'язку із присутністю попереду пішоходів, яким уже на цей момент увімкнулось зелене світло, та зупиняються на перехресті, блокуючи рух у дозволених світлофорним регулюванням напрямках. Тому проведено моделювання перехрестя, зображеного на рисунку 1, із врахуванням наявності у складі транспортних потоків у напрямках III-IV та IV-III трамваїв. Результати моделювання представлені у таблиці 2.

Таблиця 2

Довжина заторів, м, залежно від інтенсивності конфліктуючих транспортних та пішохідних потоків з урахуванням наявності трамваїв

Інтенсивність пішохідного потоку I-II, II-I, осіб/год	Інтенсивність транспортного потоку I-III, авт./год				
	100	250	400	550	700
500	72	147	214	296	407
1000	97	159	282	326	415
1500	104	165	262	315	408
2000	121	149	265	314	411

Якщо порівняти результати моделювання заторів у випадку із врахуванням наявності нерейкових транспортних засобів і з їх відсутністю, можна зробити висновок, що можливість появи трамвая на перехресті суттєво впливає на довжину затору і напрямку I-II.

Обробивши результати моделювання із застосуванням методу найменших квадратів, отримана така емпірична залежність для визначення довжини заторів, м, у залежності від інтенсивності конфліктуючих транспортних та пішохідних потоків із врахуванням наявності нерейкових транспортних засобів:

$$L_{з\ tr} = 1,31N_{п}^{0,117}(0,01 \cdot \alpha \cdot N_{tr})^{0,741} \quad (2)$$

На рис. 5 представлено графічну залежність довжини заторів від інтенсивності конфліктуючих транспортних та пішохідних потоків із врахуванням наявності нерейкових транспортних засобів.

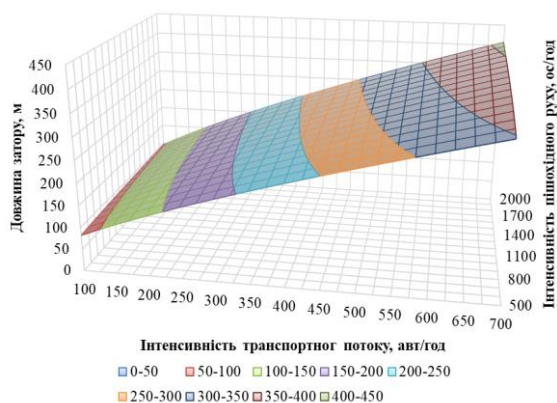


Рисунок 5 – Графічна залежність довжини заторів від інтенсивності конфліктуючих транспортних та пішохідних потоків із врахуванням наявності нерейкових транспортних засобів

З метою зменшення заторів на конфліктуючих напрямках транспортних потоків при високих інтенсивностях транспортного та пішохідного рухів пропонується змінити програму світлофорного регулювання із внесенням додаткової фази, яка б

дозволяла рух пішоходам у всіх напрямках, у той час, як для транспортних засобів у всіх напрямках рух заборонений. При цьому під час двох наступних фаз рух дозволяється лише транспортним засобам, пішоходам – забороняється. Відомо, що суміщати в одній фазі поворотний потік та потік пішохідів рекомендується за умови, якщо інтенсивність такого потоку не перевищує 120 авт./год, а інтенсивність пішохідного потоку не перевищує 900 чол./год. Тому для забезпечення «безконфліктного» пропуску пішохідів пропонується ввести додаткову 3-ю фазу. Циклограма для такого перехрестя із урахуванням наявності третьої фази для пішохідів матиме вигляд, представлений на рис. 6.

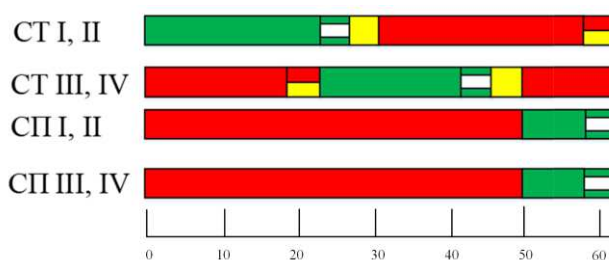


Рисунок 6 - Циклограма трифазного світлофорного регулювання на перехресті

При моделюванні у середовищі PTV Vissim 2021.00-06 цикл світлофорного регулювання був збільшений на 13 с, 10 з яких для пропуску пішохідів у всіх напрямках, 3 – на додатковий такт. Результати моделювання із урахуванням введення трифазного світлофорного регулювання, коли одна із фаз дозволяє рух лише пішоходам наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

Довжина заторів, м, залежно від інтенсивності конфліктуючих транспортних та пішохідних потоків після введення трифазного світлофорного регулювання, коли одна із фаз дозволяє рух лише пішоходам

Інтенсивність пішохідного потоку I-II, II-I, осіб/год	Інтенсивність транспортного потоку I-III, авт./год				
	100	250	400	550	700
Без рейкових транспортних засобів					
500	29	44	147	232	322
1000	29	46	155	213	305
1500	29	48	131	253	294
2000	29	47	155	235	294
Із рейковими транспортними засобами					
500	63	113	230	280	345
1000	90	135	240	342	387
1500	79	125	223	292	391
2000	68	115	206	289	353

Як бачимо, при введенні трифазного світлофорного регулювання, коли одна із фаз дозволяє рух лише пішоходам, довжина заторів у випадку без наявності рейкових транспортних засобів на перехресті зменшується в середньому на 45,3 % і мало залежить від інтенсивності пішохідних потоків. При цьому, слід зауважити, що застосування трифазного світлофорного регулювання, у випадку наявності рейкових транспортних засобів не завжди дає позитивний результат. Так, наприклад, для інтенсивності транспортного потоку 400 авт/год та пішохідного – 500 осіб/год, такий захід спричинить зростання довжини заторів на 7,5 %. Тому за наявності рейкових транспортних засобів на перехресті слід обґрунтувати застосування такого заходу на основі моделювання схеми організації дорожнього руху на перехресті із введенням параметрів дорожнього руху, отриманих на підставі натурних досліджень.

Висновки. Дослідження параметрів дорожнього та пішохідного руху на перехресті показали, що довжина заторів суттєво залежить від інтенсивності руху транспортного потоку, проте із зростанням інтенсивності руху пішохідного потоку понад 1000 осіб /год довжина заторів змінюється несуттєво. У випадку наявності на під'їздах до перехрестя нерейкових транспортних засобів довжина заторів зростає в середньому на 1,14 % та суттєво залежить від інтенсивностей руху транспортного та пішохідного потоків.

При введенні трифазного світлофорного регулювання, коли одна із фаз дозволяє рух лише пішоходам, довжина заторів у випадку, якщо на підходах до перехрестя немає рейкових транспортних засобів, зменшується в середньому на 45,3 % і мало залежить від інтенсивності пішохідних потоків. У випадку, якщо на підходах до перехрестя є рейкові транспортні засоби, довжина заторів зменшується в середньому на 13,7 %, проте у деяких випадках може зростати.

Методика проведення досліджень, що представлена у даній роботі, може бути використана для перехрестя із іншою схемою організації дорожнього руху з метою обґрунтування доцільності введення трифазного світлофорного регулювання, коли одна із фаз дозволяє рух лише пішоходам. Вихідними даними для визначення доцільності введення трифазного світлофорного регулювання є інтенсивність транспортних та пішохідних потоків на підході до перехрестя, а також частка повертучого транспортного потоку, що конфліктує з пішохідним. Отримане значення довжини затору, розраховане за формулами (1) чи (2) залежно від того, чи наявний рух рейкових транспортних засобів на перехресті, слід порівняти із табличними значеннями з таблиці 3. У разі отри-

мання проміжних значень інтенсивності транспортних та пішохідних потоків слід застосувати метод лінійної інтерполяції. Якщо табличне значення довжини затору буде меншим від значення, яке розраховане за залежностями (1) чи (2), на перехресті доцільно вводити третю фазу світлофорного регулювання для пропуску пішоходів.

Список літератури

1. Ренкас, А. та Товаряньський, В. (2020). Дослідження організації дорожнього руху на регульованих перехрестях з інтенсивним пішохідним рухом. *Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту» Матеріали конференції*, КрНУ, 11-13 листопада 2020 р., с. 170-172. <https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/7190/3/%d0%9a%d1%80%d0%b5%d0%bc%d0%b5%d0%bd%d1%87%d1%83%d0%ba%20%d1%82%d0%b5%d0%b7%d0%b8.pdf>
2. Novikov, A., Katunin, A., Novikov, I., & Shevtsova, A. (2017). Research of influence of dynamic characteristics for options controlled intersection. *Procedia Engineering*, 187, 664-671. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.429>
3. Shi, J., Sun, Y., Schonfeld, P., & Qi, J. (2017). Joint optimization of tram timetables and signal timing adjustments at intersections. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 83, 104-119. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.07.014>
4. Coogan, S., Flores, C., & Varaiya, P. (2017). Traffic predictive control from low-rank structure. *Transportation Research Part B: Methodological*, 97, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.11.013>
5. Shiri, M. S., & Maleki, H. R. (2017). Maximum green time settings for traffic-actuated signal control at isolated intersections using fuzzy logic. *International Journal of Fuzzy Systems*, 19(1), 247-256. <https://doi.org/10.1007/s40815-016-0143-7>
6. Xu, M., An, K., Vu, L. H., Ye, Z., Feng, J., & Chen, E. (2019). Optimizing multi-agent based urban traffic signal control system. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 23(4), 357-369. <https://doi.org/10.1080/15472450.2018.1501273>
7. Li, Runmei, and Shujing Xu. (2020). Traffic Signal Control Using Genetic Decomposed Fuzzy Systems. *International Journal of Fuzzy Systems*, 22.6, 1939-1947. <https://doi.org/10.1007/s40815-020-00840-x>
8. Yang, M., Sun, G., Wang, W., Sun, X., Ding, J., & Han, J. (2018). Evaluation of the pre-detective signal priority for bus rapid transit: coordinating the primary and secondary intersections. *Transport*, 33(1), 41-51. <https://doi.org/10.3846/16484142.2015.1004556>
9. Zheng, Y., Elefteriadou, L., Chase, T., Schroeder, B., & Sisiopiku, V. (2016). Pedestrian traffic operations in urban networks. *Transportation research*

procedia, 15, 137-149. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.06.012>.

10. Zhang, Y., Gao, K., Zhang, Y., & Su, R. (2018). Traffic light scheduling for pedestrian-vehicle mixed-flow networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(4), 1468-1483. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2852646>

11. Гришунь О. М. Обґрунтування раціональних режимів світлофорного регулювання з урахуванням характеристик транспортних потоків і поведінки пішоходів : дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : 05.22.01. – НУ «ЛП», Львів, 2019. – 167 с.

12. Горбачов, П. Ф., Макарічев, О. В., & Атаманюк, Г. В. (2019). Дослідження затримок учасників руху під час перетинання пішоходами вулиць і доріг через регульовані пішохідні переходи. *Автомобільний транспорт*, вип. 44, с. 40-49. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.40>

13. Wiedemann, R. (1974). *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität, Karlsruhe, Deutschland.

14. Wiedemann, R. (1991). *Modeling of RTI-Elements on multi-lane roads*. In: Advanced Telematics in Road Transport edited by the Commission of the European Community, DG XIII, Brussels, Belgium.

References

1. Renkas, A., & Tovaryansky, V. (2020). *Research of traffic organization at regulated intersections with heavy pedestrian traffic*. All-Ukrainian scientific and technical conference "Modern trends in the development of mechanical engineering and transport" Conference proceedings, Kremenchuk: KrNU, November 11-13, 2020, p. 170-172. <https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/7190/3/%d0%9a%d1%80%d0%b5%d0%bc%d0%b5%d0%bd%d1%87%d1%83%d0%ba%20%d1%82%d0%b5%d0%b7%d0%b8.pdf>

2. Novikov, A., Katunin, A., Novikov, I., & Shevtsova, A. (2017). Research of influence of dynamic characteristics for options controlled intersection. *Procedia Engineering*, 187, 664-671. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.429>

3. Shi, J., Sun, Y., Schonfeld, P., & Qi, J. (2017). Joint optimization of tram timetables and signal timing adjustments at intersections. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 83, 104-119. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.07.014>

4. Coogan, S., Flores, C., & Varaiya, P. (2017). Traffic predictive control from low-rank structure. *Transportation Research Part B: Methodological*, 97, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.11.013>

5. Shiri, M. S., & Maleki, H. R. (2017). Maximum green time settings for traffic-actuated signal control at isolated intersections using fuzzy logic. *International Journal of Fuzzy Systems*, 19(1), 247-256. <https://doi.org/10.1007/s40815-016-0143-7>

6. Xu, M., An, K., Vu, L. H., Ye, Z., Feng, J., & Chen, E. (2019). Optimizing multi-agent based urban traffic signal control system. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 23(4), 357-369. <https://doi.org/10.1080/15472450.2018.1501273>

7. Li, Runmei, and Shujing Xu. (2020). Traffic Signal Control Using Genetic Decomposed Fuzzy Systems. *International Journal of Fuzzy Systems*, 22.6, 1939-1947. <https://doi.org/10.1007/s40815-020-00840-x>

8. Yang, M., Sun, G., Wang, W., Sun, X., Ding, J., & Han, J. (2018). Evaluation of the pre-detective signal priority for bus rapid transit: coordinating the primary and secondary intersections. *Transport*, 33(1), 41-51. <https://doi.org/10.3846/16484142.2015.1004556>

9. Zheng, Y., Elefteriadou, L., Chase, T., Schroeder, B., & Sisiopiku, V. (2016). Pedestrian traffic operations in urban networks. *Transportation research procedia*, 15, 137-149. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.06.012>

10. Zhang, Y., Gao, K., Zhang, Y., & Su, R. (2018). Traffic light scheduling for pedestrian-vehicle mixed-flow networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(4), 1468-1483. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2852646>

11. Hrytsun O.M. (2019). Justification of rational regimes of traffic light control taking into account traffic flow characteristics and pedestrian behaviour. Dissertation Abstract for Cand. Sc. (Engineering). 05.22.01, NU «LP», Lviv, Ukraine.

12. Горбачов, П. Ф., Макарічев, О. В., & Атаманюк, Г. В. (2019). Investigation of Average Delays of Road Users at Signalized Pedestrian Crossings. *Automobile transport*, vol. 44, pp. 40-49. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.40>

13. Wiedemann, R. (1974). Simulation of road traffic flow. Series of publications by the Institute for Transport at the University, Karlsruhe, Germany.

14. Wiedemann, R. (1991). *Modelling of RTI-Elements on multi-lane roads*. In: Advanced Telematics in Road Transport edited by the Commission of the European Community, DG XIII, Brussels, Belgium.

* Науково-методична стаття