

Євчук Ю.Ю.

*Національний університет «Львівська політехніка», вул. Бандери 12, м. Львів, Україна***ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ ЧАСОВИХ ПАРАМЕТРІВ СВІТЛОФОРНОГО ЦИКЛУ
У СИСТЕМАХ З КООРДИНОВАНИМ УПРАВЛІННЯМ РУХОМ**

У даній роботі проаналізовано методику та результати досліджень, проведених на основі натурних вимірювань на магістральній вулиці з метою визначення ключових параметрів транспортних потоків, що характеризуються значною нерівномірністю руху, в умовах координованого управління. Застосування методу імітаційного моделювання дозволило оптимізувати часові параметри світлофорного регулювання, які сприяють мінімізації затримок руху в обох напрямках шляхом адаптації тривалості дозвільного сигналу відповідно до інтенсивності транспортного потоку. Зміна (подовження) тривалості зеленого сигналу забезпечує безперервний рух груп транспортних засобів під час перетину стоп-ліній на суміжних світлофорних об'єктах. Запропонований метод є доцільним для впровадження на ділянках вулично-дорожньої мережі з координованим управлінням та значною неоднорідністю транспортних потоків, оскільки він запобігає розпаду груп та пачок транспортних засобів, які мають різні динамічні характеристики.

Такого результату можна досягти в умовах використання системи автоматизованого управління рухом, яка об'єднує кілька суміжних світлофорних об'єктів на магістральній вулиці та функціонує на основі жорсткого програмного керування світлофорами. Така система дозволяє синхронізувати тривалість сигналів світлофорних груп, здійснюючи корекцію ширини (тривалості зеленого сигналу) та кута нахилу (швидкості руху) часової смуги в графіках координації. Наукова новизна дослідження полягає у подальшому розвитку методу, що знижує затримки транспортних засобів у межах координованого управління, суть якого полягає в регульованій зміні діапазону тривалості дозвільного сигналу в поєднанні з управлінням швидкістю руху транспортних засобів між суміжними світлофорними об'єктами. Практична цінність полягає в можливості використання різних програм керування світлофорною сигналізацією на ділянках магістральних вулиць у транспортних районах, де в години пік спостерігаються значні коливання інтенсивності транспортних потоків у різних напрямках.

Ключові слова: транспортний потік, транспортні дослідження, інтенсивність руху, координоване управління рухом, магістральна вулиця, імітаційне моделювання, жорсткий світлофорний цикл.

ВСТУП

Важливою складовою покращення якості транспортного обслуговування у великих та особливо великих містах є впровадження сучасних автоматизованих систем управління дорожнім рухом на магістральних вулицях, які здатні забезпечити пропуск інтенсивних транспортних потоків. За своїм функціональним призначенням магістральні вулиці мають забезпечувати швидке введення у місто або виведення із нього місцевого та зовнішнього транспорту з найменшими затримками, а також покращувати транспортний зв'язок між окремими великими транспортними районами та функціональними зонами.

У нових містах, що почали активно розвиватись у минулому столітті, закладались нові транспортні мережі, які мають значно більший рівень адаптації під існуючу інтенсивність руху, а ніж міста, де конфігурація вулично-дорожньої мережі склалась історично. У «старих» містах до 2/3 території мають щільні забудову та транспортну мережу, яка створює додаткові обмеження для розвитку існуючих або впровадження нових способів організації руху його учасників, а також управління цим рухом. Незважаючи на те, що транспортні проблеми відчувають усі міста, оскільки рівень автомобілізації та мобільність мешканців стрімко зростає, в «старих» містах особливо відчутними є такі критичні (з погляду ефективності транспортного обслуговування) чинники: недостатньо вільної території для облаштування транспортних розв'язок; практично немає місць для паркування автомобілів поза вулично-дорожньою мережею; малі (до 100 м) відстані між перехрестями; вузькі вулиці, що не дозволяють повноцінно задовільнити попит на різні способи переміщень; насичені пішохідні потоки з наближенням до центру міста; переважний радіальний тип конфігурації транспортної мережі тощо. Виходячи із переліченого, особливу увагу організатори руху зосереджують на удосконаленні автоматизованих систем управління рухом та впровадженні елементів інтелектуальних транспортних систем. Враховуючи значні інтенсивності транспортних та пішохідних потоків, а також невелику площу перехрестя, найчастіше єдиним рішенням є введення світлофорного регулювання. Найбільша його ефективність досягається за умови злагодженої роботи суміжних світлофорних об'єктів та побудови систем координованого управління рухом.

Передумовою для цього є проведення натурних досліджень з вивчення основних показників учасників дорожнього руху, серед яких інтенсивність транспортних потоків та пішоходів, її нерівномірність протягом періоду найбільш інтенсивного руху (денна пора), а також склад транспортного потоку. Такі відомості є початковими даними для визначення часових параметрів світлофорного регулювання, а також моделювання, яке найчастіше проводять у спеціалізованих імітаційних програмних середовищах. Важливе значення має нерівномірність транспортних потоків за годинами періоду найбільш інтенсивного руху, оскільки зумовлює перегляд програм управління за окремими напрямками з метою забезпечення балансу тривалості дозвільного сигналу відповідно до співвідношення попиту (інтенсивності руху) і пропозиції (граничної пропускної здатності напрямку) та мінімізації затримки перед стоп-лінією на регульованих перехрестях. Розв'язок цієї проблеми для одного ізольованого перехрестя є відносно простим завданням, проте в умовах координованого управління, коли існує система перехресть, таке завдання реалізувати складніше.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Під час впровадження координованого управління рухом значну увагу зосереджують на вивченні груп транспортних засобів, а саме їх формуванні та розпаді. Як відомо, група формується на стоп-лінії під час ввімкненого заборонного сигналу. Після ввімкнення дозвільного сигналу розпочинається роз'їзд групи. У міру неоднорідності транспортного потоку під час руху ділянкою така група починає розпадатись. На цей процес впливають експлуатаційні характеристики транспортних засобів. Виходячи із цього, важливо проаналізувати, яким чином в процесі руху розпадається група транспортних засобів на ділянках вулиць за неоднакової відстані між стоп-лініями з метою подальшого збалансованого розподілу дорожнього простору, що зроблено у роботах [1,2]. Результатом цих досліджень є визначення граничних значень довжини перегону, на якому інтервал часу між групами не перевищує середнього інтервалу між транспортними засобами у групі. Це означає, що транспортний потік стає стаціонарним за певних параметрів перегону транспортної мережі (170 – 1200 м), що забезпечує його сталий рух.

У роботі [3] наведено методику та проведено натурні дослідження на магістральній транспортній мережі за умови, що відстань між сусідніми стоп-лініями не перевищує 300 м, а інтенсивність руху на одну смугу становить 400 – 600 авт./год. Результатом цього дослідження є те, що «стійкість» груп транспортних засобів забезпечується за умови досягнення однаковими фазовими зсувами з урахуванням особливостей транспортного потоку. До особливостей транспортного потоку тут відносять нерівномірність руху, швидкість, випередження та обгони, а також вплив складу потоку та дорожніх умов. На відміну від роботи [2], у роботі [3] дослідження проводиться на транспортній мережі зі значною щільністю.

Зсувом фаз в системах координації також займались дослідники у роботі [4], який вони проаналізували із використанням графоаналітичного методу. Його суть полягає у побудові графіку руху групи транспортних засобів в системі координат «час – відстань». Автори будували «стрічки часу» для прямого та зустрічного напрямків руху, в яких аналізували перетворення на трьох стадіях: утворення групи транспортних засобів під час роз'їзду черги від стоп-лінії на першому перехресті; розпад групи під час її руху перегonom; формування групи на підході до наступного перехрестя у випадку дії заборонного сигналу або за наявності на шляху руху черги автомобілів, які в'їхали на магістраль з другорядних напрямків першого перехрестя і вимушено зупинились на заборонний сигнал. У роботі [4] стверджується, що під час руху ділянкою магістральної вулиці за різних значень довжини черги, яка перешкоджає руху у «стрічці часу», відбувається зміна миттєвого значення інтенсивності транспортного потоку. За такого випадку виникає зона, у якій водії змушені знижувати швидкість аж до повної зупинки. Такі зони є «вузькими місцями», де суттєво знижується пропускна здатність. Виходячи із викладеного у роботі [4], суттєвий вплив на ефективність координованого управління за критерієм мінімізації затримки руху має інтенсивність транспортного потоку не лише за головним (координованим) напрямком, але й за другорядним.

У більшості відомих досліджень під час оцінювання ефективності координації основна увага зосереджується на планувальних особливостях проїзної частини, зокрема її геометрії. Поряд із цим, важливим також є врахування випадкового характеру транспортного потоку. Одночасного врахування і геометрії, і поведінки транспортних засобів можна досягти із використанням імітаційного моделювання. У таких моделях, що відображено у роботі [5], враховується реальна випадковість процесів на транспортній мережі міста. Це відображено через відповідні поведінкові моделі. Особливої уваги заслуговує застосування моделі Вебстера, яка ґрунтується на випадковому прибутті транспортних засобів до перехрестя, що враховано для систем координації у роботах [6,7].

Тут визначено тривалості циклів регулювання із врахуванням геометричного принципу розрахунку зсуву фаз для всіх світлофорних об'єктів, які утворюють систему координації. Усі перелічені методики акцентують увагу на застосуванні жорстких алгоритмів управління, які, на відміну від адаптивних, створюють можливість змінювати розподіл часу циклу між різними фазами, а також їх порядок відповідно до реальної дорожньо-транспортної ситуації [8].

Враховуючи, що досягти однакової кількості транспортних засобів, які прибувають до кожного наступного регульованого перехрестя, на практиці вдається рідко, то найточнішим буде припущення, що вхідний транспортний потік на перехресті матиме пуассонівський (випадковий) характер [9]. Це наслідок взаємодії значної кількості подій. Автори [9] стверджують, що складання планів координації на основі безпосереднього завдання оцінювання довжини групи транспортних засобів у системі координації (зеленій хвилі) вимагає оцінювання ймовірності виникнення неповної групи за різних умов, оскільки така подія означає зниження ефективності використання тривалості світлофорного циклу на всіх регульованих перехрестях координованої ділянки, а наявні методи організації координованої роботи світлофорних об'єктів, як і методи оцінювання довжини черги на ізольованих перехрестях, не забезпечують цього процесу.

Значної уваги під час складання графіків координації слід приділяти дослідженням швидкості та інтенсивності дорожнього руху. Одні дослідники акцентують увагу на миттєвих значеннях швидкості руху [10]. Тут із використанням цього показника обґрунтовуються режими руху. У цьому дослідженні використовуються GPS треки, які облаштовано у транспортних засобах, що здійснюють у транспортному потоці. За такою методикою вдається визначити градієнт швидкості на різних ділянках транспортної мережі. Інші дослідники [11–13] значну увагу зосереджують на показнику інтенсивності та «дифузії» групи транспортних засобів.

Незалежно від методологічних підходів, проаналізовані тут методики ґрунтуються на підвищенні ефективності функціонування автоматизованих систем управління дорожнім рухом, що підтверджується роботами [13,14]. Відмінність між ними полягає у відмінностях ділянок транспортної мережі, які досліджуються (конфігурація, специфіка розміщення відносно території міста), характер зміни показників транспортного потоку, дорожні умови тощо.

Виходячи з цього аналізу визначено, що існуючі теоретичні та практичні підходи щодо управління транспортними потоками засобами світлофорного регулювання потребують постійного удосконалення, суть якого полягає в одночасному врахуванні великої кількості дорожньо-планувальних, транспортних та містобудівних чинників. В умовах координованого управління важливим аспектом є побудова таких алгоритмів керування, які б задовольняли високий рівень надійності транспортної системи. Під надійністю транспортної системи тут розуміємо забезпечення безупинного проїзду групи транспортних засобів через всі стоп-лінії системи координації. Таке завдання можна досягти, управляючи одночасно тривалістю дозвільного сигналу на світлофорних об'єктах та швидкістю руху, оскільки управляти інтенсивністю руху, як похідною від попиту на переміщення, досить складно. Враховуючи, що у системах координованого управління застосовуються жорсткі алгоритми керування, які зав'язані і залежні від «ведучого» (ключового) перехрестя, то необхідно визначити таку межу прийнятних значень тривалості дозвільного сигналу на координованому напрямку залежно від інтенсивності та складу руху, яка матиме найменший вплив на балансування тривалості фаз, які утворюють світлофорний цикл на кожному із перехресть системи. При цьому, одночасне управління швидкістю руху має передбачати встановлення такого її значення, за якого досягатиметься найменший розпад групи транспортних засобів під час проходження нею (групою) всіх стоп-ліній координованого напрямку. Тобто, забезпечення мінімального рівня «дифузії» у транспортному потоці, враховуючи його інтенсивність та склад. Раціональне співвідношення цих показників дозволить мінімізувати затримки на магістральних вулицях, не порушуючи вимог критеріїв до введення координованого управління.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою цього дослідження є визначення меж зміни величини затримки в русі транспортних потоків при зміні часових параметрів світлофорного регулювання із жорсткими програмами управління в умовах координації руху транспортних потоків залежно від показників транспортного потоку та відстані між суміжними стоп-лініями.

Для досягнення мети дослідження необхідно розв'язати такі завдання: визначити основні чинники, які спричиняють затримки в русі транспортного потоку в умовах дії систем координованого управління; визначити закономірності зміни часових параметрів світлофорного циклу залежно від показників транспортного потоку (інтенсивності руху і складу потоку) та параметрів проїзної

частини, за яких досягаються найменші значення затримки руху транспорту; розробити рекомендації щодо впровадження систем координованого управління рухом на магістральній транспортній мережі, де спостерігається значна інтенсивність та нерівномірність транспортного потоку.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальною ділянкою обрано ділянку проспекту Червоної Калини у м. Львові від перехрестя з вулицею Довженка (стоп-лінія I) до перехрестя з вулицею Сихівська (стоп-лінія V). Довжина ділянки – близько 600 м. Тут розміщено 5 стоп-ліній, що відображено на рисунку 1.

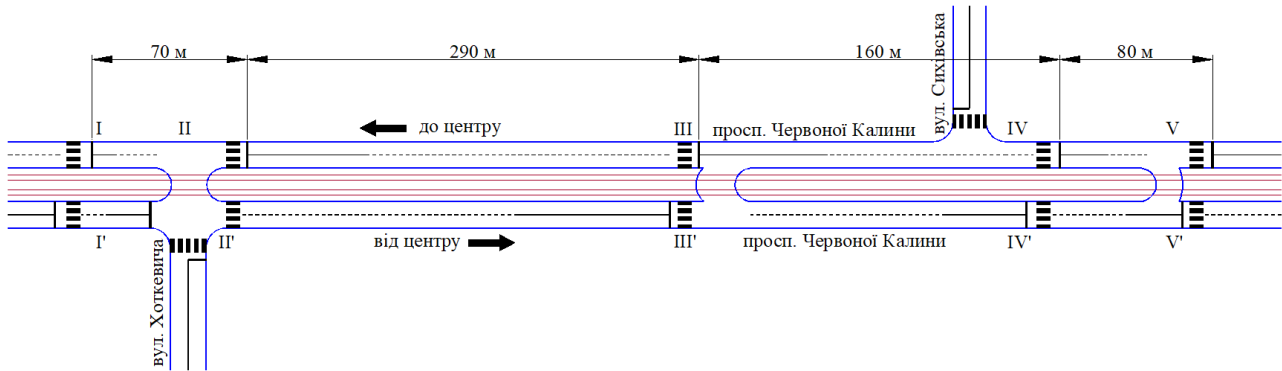


Рисунок 1 – Розміщення стоп-ліній на ділянці проспекту Червоної Калини:

I...V – номери стоп-ліній у напрямку до центру

I'...V' – номери стоп-ліній у напрямку від центру

Застосовуючи методіку натурних досліджень, на кожній стоп-лінії виміряно інтенсивність руху з розподілом за напрямками та визначено склад транспортного потоку. Вимірювання проводились методом оперативного обліку руху по 15 хв протягом пікових періодів. У цьому дослідженні склад транспортного потоку буде виражено через рівень його однорідності (частку легкових автомобілів), оскільки на вулиці існує заборона вантажного транспорту, динамічні габарити якого суттєво б впливали на стійкість групи в умовах координованого управління, окрім такого впливу від міського громадського транспорту. Результати досліджень зазначених показників на всіх стоп-лініях наведено у таблиці 1. Оскільки стоп-лінії I–I' – це регульований пішохідний перехід, то показники транспортного потоку для нього приймаються аналогічною стоп-лінії II–II'.

Таблиця 1 – Результати дослідження інтенсивності руху та рівня його однорідності

Підхід	Напрямок руху	Інтенсивність руху, од/год	Рівень однорідності транспортного потоку ¹	Інтенсивність руху, од/год	Рівень однорідності транспортного потоку ¹
		Ранковий піковий період		Вечірній піковий період	
1	2	3	4	5	6
Стоп-лінія II (II')					
До центру	Прямо	424	82 %	225	85 %
	Ліворуч	68		116	
	Розворот	23		38	
Від центру	Прямо	173		491	
	Праворуч	36		133	
	Розворот	55		91	
Другорядний (вул. Хоткевича)	Ліворуч	123	66		
	Праворуч	58	197		
Стоп-лінія III (III')					
До центру	Прямо	525	82 %	372	84 %
	Розворот	98		104	
Від центру	Прямо	248		737	

Стоп-лінія IV (IV')					
До центру	Прямо	383	83 %	206	82 %
	Праворуч	152		287	
Від центру	Прямо	352		836	
Другорядний (вул. Сихівська)	Праворуч	274		265	
Стоп-лінія V (V')					
До центру	Прямо	384	83 %	193	82 %
Від центру	Прямо	204		531	
	Розворот	146		311	

Примітка ¹ частка легкових автомобілів у потоці

Результати аналізу інтенсивності руху на досліджуваній ділянці магістральної вулиці – проспекті Червоної Калини вказують на значну її нерівномірність у ранковий та вечірній піковий періоди. Тут додатково відзначимо, що проспект має по 2 смуги руху у кожному напрямку, відокремлені між собою розділовою смугою. У ранковий піковий період інтенсивність змінюється: у напрямку до центру від близько 400 авт./год. до близько 650 авт./год.; у напрямку від центру – від близько 200 авт./год. до близько 350 авт./год. У вечірній піковий період маємо таку зміну значень інтенсивності: у напрямку до центру від близько 200 авт./год. до близько 500 авт./год.; у напрямку від центру – від близько 700 авт./год. до близько 850 авт./год. Таке асиметричне завантаження притаманне для транспортних районів, які мають переважаючу житлову забудову.

Вказані результати натурних вимірювань є початковою інформацією для внесення у імітаційне програмне середовище PTV VISSIM, у якому створено модель досліджуваної ділянки проспекту. Основним завданням є отримати змінні значення затримки руху для всього транспортного потоку в умовах координації на стоп-лініях I–V (I'–V') з урахуванням визначеної інтенсивності руху (таблиця 1), складу транспортного потоку (83% легкових автомобілів; 6% автобусів та 11% вантажних автомобілів середньої вантажності), розрахованої тривалості циклу регулювання для ведучого (найбільш завантаженого) перехрестя (пішохідного переходу), яка становить 70 с. Таку тривалість циклу встановлено для всіх перехресть системи координації. Іншою змінною у цьому дослідженні є швидкість руху транспортного потоку, величина якої почергово внесена у модель з такими значеннями 40, 45, 50, 55 та 60 км/год.

Результати моделювання подано у вигляді таблиць 2 та 3.

Таблиця 2 – Результати моделювання затримки в русі транспортного потоку на координованій ділянці за різних значень рекомендованої швидкості у стрічці часу (ранковий піковий період)

Середня затримка в русі ТП на кожній стоп-лінії досліджуваної ділянки, с	Швидкість, км/год				
	40	45	50	55	60
Рух у напрямку до центру	192	199	204	206	219
Рух у напрямку від центру	29	31	30	30	33

Таблиця 3 – Результати моделювання затримки в русі транспортного потоку на координованій ділянці за різних значень рекомендованої швидкості у стрічці часу (вечірній піковий період)

Середня затримка в русі ТП на кожній стоп-лінії досліджуваної ділянки, с	Швидкість, км/год				
	40	45	50	55	60
Рух у напрямку до центру	33	34	35	35	37
Рух у напрямку від центру	154	156	156	162	164

Аналізуючи результати досліджень (моделювання), наведені у таблицях 2 та 3 робимо висновок, що у напрямку «до центру» (ранковий пік) за збільшення швидкості на 20 км/год середнє значення затримки зростає на 10%, а у протилежному напрямку (вечірній пік) за такого ж збільшення швидкості затримка збільшується на 6%. Відмінність у залежностях для двох протилежних напрямків

пояснюється неоднаковими частками транспортних засобів, які їдуть прямо, оскільки при значній частці поворотних – затримка зростатиме.

Поряд із цим, виникає запитання, чому зі збільшенням швидкості руху середня затримка в русі транспортних засобів також зростає. Насамперед таке явище є характерним для груп транспортних засобів на багатосмугових напрямках, коли відбуваються часті маневри зміни смуги руху, неоднорідністю транспортного потоку, впливом громадського транспорту, який немає просторового пріоритету (виділених смуг руху) та довжиною прогону, коли за великої відстані між стоп-лініями група розпадається. Зауважу, що швидкість у таблицях 2 та 3 – це встановлена величина для стрічки часу у графіках координації, яка при величині 60 км/год може досягатися легковими автомобілями на прямих ізольованих смугах руху без передбачених поворотів, але поряд із цим таку швидкість не зможуть досягати транспортні засоби, у смугах яких є міський громадський транспорт або поворотні транспортні засоби.

У системах координації важливим завданням є забезпечення беззупинного руху магістральних транзитних транспортних потоків. Виходячи із цього, у PTV VISSIM було змодельовано процес проїзду транспортного потоку із вимірними показниками за встановленою швидкості руху 40, 50 та 60 км/год. та змінної тривалості дозвольного сигналу на головному напрямку, починаючи зі значення 40 с, за якого отримано результати моделювання у таблицях 2 та 3. Таке моделювання проведено для ранкового пікового періоду у напрямку до центру, коли затримка є найбільшою.

Метою цього експерименту є визначення потреби збільшеного основного (дозвольного) сигналу на наступній стоп-лінії (відстань до якої є змінною), щоб пройшов останній ТЗ з черги, яка виїхала на першому перехресті, з урахуванням зупинок міського громадського транспорту. Результати моделювання наведено на рисунку 2.

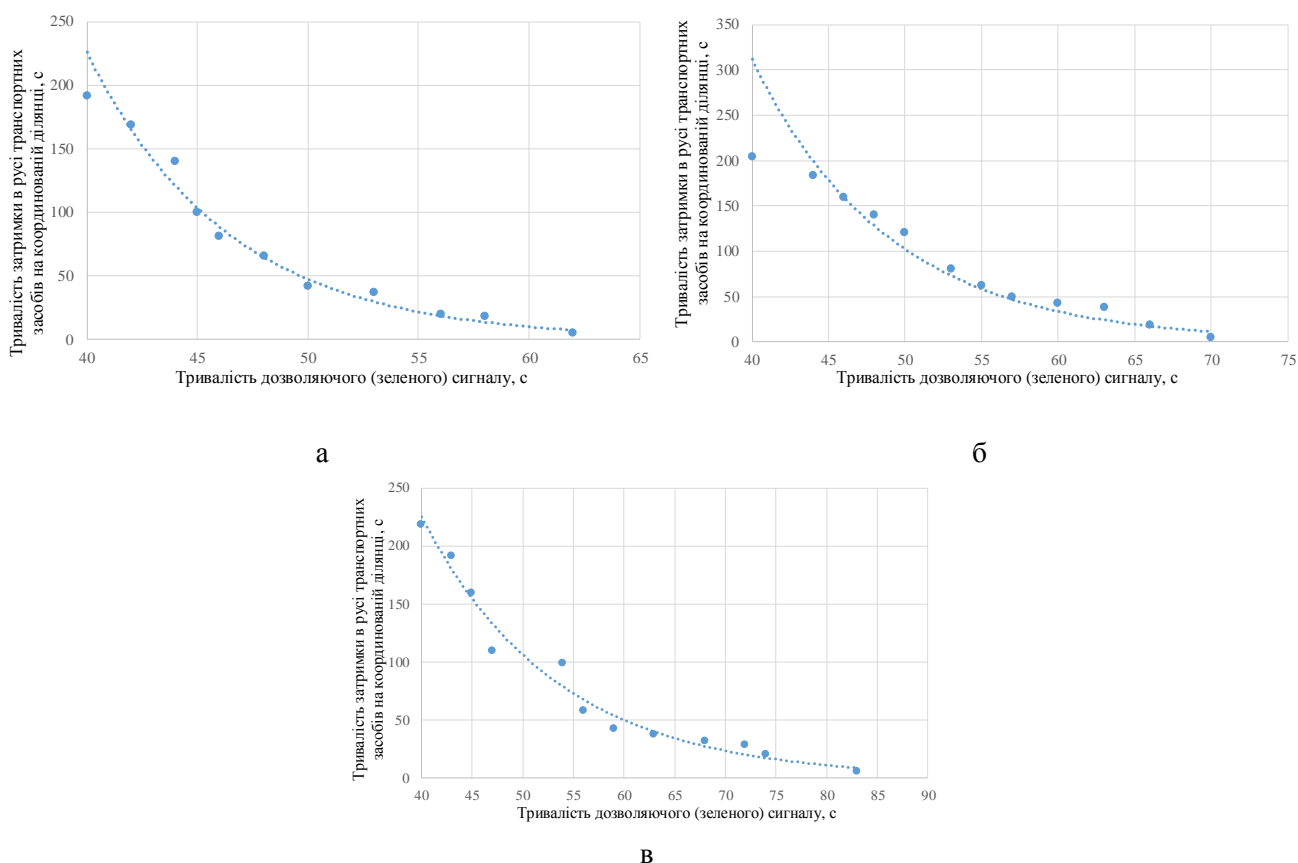


Рисунок 2 – Результати моделювання зміни тривалості дозволяючого (зеленого) сигналу на стоп-лініях головного напрямку при координованому управлінні за критерієм мінімізації затримки транспортних засобів: а – за швидкості руху 40 км/год; б – за швидкості руху 50 км/год; в – за швидкості руху 60 км/год

У результаті моделювання визначено, що найстабільнішим (за критерієм швидкості) є транспортний потік, який керується обмеженням швидкісного режиму регулювання 40 км/год. За

таких умов, з урахуванням всіх чинників «дифузії» у транспортному потоці, беззатримний проїзд всіх транспортних засобів у координованій групі відбуватиметься за максимального значення тривалості дозволяючого (зеленого) сигналу близько 62 с. При швидкості руху 50 км/год такий ефект досягатиметься за тривалості дозволяючого (зеленого) сигналу близько 70 с, а при 60 км/год – 83 с. Виходячи із результатів цього дослідження, обґрунтовується доцільність облаштування проміжних стоп-ліній у системі координації, а також підтверджується високий рівень стабільності транспортного потоку за швидкості 40 км/год. Звісно, таке твердження справедливе для міських магістральних вулиць із значною неоднорідністю транспортного потоку та за наявності мінімум двох смуг руху в одному напрямку.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

На практиці встановлення дозволяючого (зеленого) сигналу таких великих тривалостей, як 60–80 с в одній фазі є вкрай рідкісним випадком і може застосовуватись в системах координованого управління рухом виключно при двофазному регулюванні. За трифазного регулювання це спричинятиме значні затримки на другорядних напрямках. Такі результати зумовлені тим, що у моделі враховувались простої транспортних засобів міського громадського транспорту на зупинкових пунктах. Відповідно, за іншої тривалості дозволяючого сигналу автобуси та (або) тролейбуси не завжди встигатимуть проїхати всіх стоп-ліній беззупинно на ділянці з координованим управлінням рухом і таким чином «руйнуватимуть» групу транспортних засобів. Головним завданням під час вирішення проблем із затримками є досягнення результату зменшення витрат часу на переміщення не лише з розрахунку на кількість транспортних засобів, але й на кількість пасажирів, які у них перебувають. Виходячи з цього, у системах координації необхідно досягати спеціалізації смуг руху з метою вирівнювання складу транспортного потоку, в тому числі облаштування виділених смуг для міського громадського транспорту, а також обмеження маневрів поворотів ліворуч.

ВИСНОВКИ

За результатами цього наукового дослідження можна зробити такі висновки:

1) основними чинниками, які впливають на ефективність (за критерієм мінімізації затримки руху) координованого управління є: інтенсивність та склад транспортного потоку, швидкість руху, відстань між стоп-лініями, тривалість зеленого сигналу на координованому напрямку. Другорядними чинниками є стан дорожнього покриття та частка зеленого сигналу у циклі регулювання на координованому напрямку.

2) за результатами імітаційного моделювання встановлено, що на ділянці двосмугової магістральної вулиці з координованим рухом за максимальної інтенсивності транспортного потоку 850 авт./год. зі складом 83% легкових автомобілів, 6% автобусів та 11 % вантажних під час зміни проектної швидкості (кута нахилу стрічки часу) від 40 до 60 км/год з кроком 5 км/год величина затримки у потоці змінюється від 154 до 219 с. Причому, найменші її значення виникають при швидкості руху 40 км/год;

3) найстабільнішим є транспортний потік, який керується обмеженням швидкісного режиму регулювання 40 км/год, за якого, з урахуванням всіх чинників «дифузії» у транспортному потоці, беззатримний проїзд всіх транспортних засобів у координованій групі потребуватиме найменших значень тривалості дозволяючого сигналу задля забезпечення проїзду всіх транспортних засобів групи.

4) з метою зменшення впливу міського громадського транспорту на стійкість груп в системах з координованим управлінням рухом, цьому виду транспорту необхідно забезпечувати просторовий (облаштування виділених смуг руху) та часовий пріоритет.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Currie, G., Sarvi, M., & Young, W. (2007). Balanced Road Space Allocation: A Comprehensive Approach. *ITE Journal on the Web*, 75-83.
2. Абрамова Л. С. Особливості моделювання групового руху транспортних засобів у містах / Л. С. Абрамова. // Міжнародна науково-практична конференція «Наукові досягнення сучасного суспільства». Ліверпуль, Велика Британія: Видавництво Cognum. – 2019. – №1. – С. 8–16.
3. Кристопчук М. Є. Дослідження координованого управління транспортними потоками в центральній частині міста / М.Є. Кристопчук, І. О. Хітров, О. П. Цьонь, О. Д. Почужевський. // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. – 2021. – №1(16) – С. 82–90.
4. Кулик М. М. Забезпечення сталої швидкості транспортних потоків в режимі координованого управління на міських магістралях / М. М. Кулик, В. В. Ширін. // Матеріали IV міжнародної науково-

практичної конференції «Безпека на транспорті – основа ефективної інфраструктури: проблеми та перспективи». Харків, Україна: ХНАДУ. – 2019. – С. 238–241.

5. Chen, C., Che, X., Huang, W., & Li, K. (2019). A two-way progression model for arterial signal coordination considering side-street turning traffic. *Transportmetrica B*, 1627-1650.

6. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. (2008). Ottawa: Institute of Transportation Engineers .

7. Signal Timing Manual. (2015). Second Edition. NCHRP Report 812. National Cooperative Highway Research Program. In Cooperation with U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.

8. Gartner, N., Pooran, F., & Andrews, C. (2002). Implementation and Field Testing of the OPAC Adaptive Control Strategy in RT-TRACS, Proc. Of 81st Annual Meeting of the TRB. Oakland, CA, USA: IEEE, 148-156 doi :10.1109/ITSC.2001.948655.

9. Горбачов П. Ф. Імовірність виникнення неповної пачки автомобілів під час координованому керуванні на міській магістралі / П. Ф. Горбачов, О. В. Макарічев, В. В. Шевченко. // Вісник ХНАДУ. – 2021. – Випуск 92 Том 1 – С. 214–225. doi :10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.1.214.

10. Рябушенко О. В. Дослідження режиму руху автомобіля в умовах міста за даними GPS треку / О. В. Рябушенко, І. С. Наглюк, Д. Д. Шевцов. // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. – 2019. – Вип. 198 «Механізація сільськогосподарського виробництва» – С. 448–456.

11. Ji, Y., Tang, Y., Wang, W., & Du, Y. (2018). Tram-Oriented Traffic Signal Timing Resynchronization. *Journal of Advanced Transportation*. Volume 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/8796250>.

12. 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*. Volume 83. 104-119. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.07.014>.

13. Zhou, L., Wang, Yi., & Liu, Ya. (2017). Active signal priority control method for bus rapid transit based on Vehicle Infrastructure Integration. *International Journal of Transportation Science and Technology*. Volume 6(2). 99-109. <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2017.06.001>.

14. Scheffler, R., & Strehler, M. (2017). Optimizing traffic signal settings for public transport priority. Proc. of the 17th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (pp. 9:1-9:15) - Vienna, Austria. <https://doi.org/10.4230/OASICS.ATMOS.2017>.

REFERENCES

1. Currie, G., Sarvi, M., & Young, W. (2007). Balanced Road Space Allocation: A Comprehensive Approach. *ITE Journal on the Web*, 75-83 (in English).

2. Abramova, L. (2019). Osoblyvosti modelyuvannya hrupovoho rukhu transportnykh zasobiv u mistakh, International scientific and practical conference “Scientific achievements of modern society”. Liverpool, United Kingdom: Cognum Publishing House. Pp. 8-16 (in Ukrainian).

3. Krystopchuk, M., Khitrov, I., Tson, O., & Pochuzhevskyy, O. (2021). Doslidzhennya koordynovanoho upravlinnya transportnymy potokamy v tsentral'niy chastyni mista. *Suchasni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni ta transporti*, Volume 1(16). 82-90 doi :10.36910/automash.v1i16.511 (in Ukrainian).

4. Kulyk, M., & Shyrin, V. (2019). Zabezpechennya staloyi shvydkosti transportnykh potokiv v rezhymy koordynovanoho upravlinni na mis'kykh mahistryakh, *Materialy IV mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi “Bezpeka na transporti – osnova efektyvnoyi infrastruktury: problemy ta perspektyvy”*. Kharkiv, Ukraine: KhNADU. Pp. 238-241 (in Ukrainian)

5. Chen, C., Che, X., Huang, W., & Li, K. (2019). A two-way progression model for arterial signal coordination considering side-street turning traffic. *Transportmetrica B*, 1627-1650 (in English).

6. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. (2008). Ottawa: Institute of Transportation Engineers (in English).

7. Signal Timing Manual. (2015). Second Edition. NCHRP Report 812. National Cooperative Highway Research Program. In Cooperation with U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration (in English).

8. Gartner, N., Pooran, F., & Andrews, C. (2002). Implementation and Field Testing of the OPAC Adaptive Control Strategy in RT-TRACS, Proc. Of 81st Annual Meeting of the TRB. Oakland, CA, USA: IEEE, 148-156 doi :10.1109/ITSC.2001.948655 (in English).

9. Gorbachov, P., Makarichev, O., & Shevchenko, V. (2021). Imovirnist' vynyknennya nepovnoyi pachky avtomobiliv pry koordynovanomu keruvanni na mis'kiy mahistrali. *Visnyk KhNADU*, 214-225 doi :10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.1.214 (in Ukrainian).

10. Ryabushenko, O., Hagluk, I., Shevtsov, D. (2019). Doslidzhennya rezhymu rukhu avtomobilya v umovakh mista za danymy GPS treku. *Visnyk KhNTUSG*, 448-456 (in Ukrainian).

11. Ji, Y., Tang, Y., Wang, W., & Du, Y. (2018). Tram-Oriented Traffic Signal Timing Resynchronization. *Journal of Advanced Transportation*. Volume 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/8796250> (in English).

12. 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*. Volume 83. 104-119. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.07.014> (in English).

13. Zhou, L., Wang, Yi., & Liu, Ya. (2017). Active signal priority control method for bus rapid transit based on Vehicle Infrastructure Integration. *International Journal of Transportation Science and Technology*. Volume 6(2). 99-109. <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2017.06.001> (in English).

14. Scheffler, R., & Strehler, M. (2017). Optimizing traffic signal settings for public transport priority. *Proc. of the 17th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (pp. 9:1-9:15) - Vienna, Austria*. <https://doi.org/10.4230/OASICS.ATMOS.2017> (in English).

Yevchuk Y.Y. Regularities of changes in traffic light cycle parameters in systems with coordinated control

This paper analyzes the methodology and research results based on field measurements on an arterial street to determine the main parameters of traffic flows characterized by significant traffic irregularities under coordinated control. Using the simulation modeling method made it possible to optimize the time parameters of traffic light control, which helps minimize traffic delays in both directions by adapting the duration of the permissive signal to traffic flow volumes. Changing (lengthening) the duration of the green signal ensures the continuous movement of groups of vehicles when crossing stop-lines at adjacent traffic signal objects. The proposed method is appropriate for implementation on sections of the road network with coordinated control and significant heterogeneity of traffic flows, as it prevents the breakup of groups and platoons of vehicles with different dynamic characteristics.

This result can be achieved using an automated traffic control system that combines several adjacent traffic signal facilities on arterial streets and operates based on the fixed-time program control of traffic lights. Such a system allows for synchronizing the duration of signals of traffic light groups by correcting the width (duration of the green signal) and angle (speed) of the time lane in the coordination schedules. The scientific novelty of the study is the further development of a method that reduces vehicle delays within the framework of coordinated control, the essence of which is an adjustable change in the range of the duration of the permissive signal in combination with the control of vehicle speed between adjacent traffic lights. The practical value is in the possibility of using different traffic signal control programs on sections of arterial streets in transport areas where there are significant fluctuations in traffic flow volumes in different directions during rush hours.

Keywords: traffic flow, transport research, traffic volume, coordinated traffic control, arterial street, simulation modeling, fixed-time traffic light cycle.

ЄВЧУК Юрій Юрійович, аспірант, асистент кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка», e-mail: yurii.y.yevchuk@lpnu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-8705-3791>

Yurii YEVCHUK, PhD student, assistant department of transport technologies Lviv Polytechnic National University e-mail: yurii.y.yevchuk@lpnu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-8705-3791>

DOI 10.36910/automash.v2i23.1529