DOI: https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-228-234
УДК 656.13:656.021

В.Є. Титаренко, к.т.н., доц.
В.П. Шумляківський, к.т.н.
Державний університет «Житомирська політехніка»

Вимірювання та аналіз затримок транспорту перед регульованими перехрестями на основі зйомок квадрокоптером

Наведено результати досліджень завантаженості регульованого перехрестя міста на основі використання технологій квадрокоптерних зйомок динаміки потоків транспортних засобів у часи пікових навантажень, коли може бути проблемним визначення параметрів транспортних затримок через обмеженість оглядовості стаціонарних засобів відеоспостережень. Вибрана розрахункова методика для адекватності розрахунків затримок транспорту потребує уточнених даних геопозиціювання множини машин на перехресті, що повною мірою забезпечує квадрокоптерна зйомка. Результати розрахунків можуть бути використані для коректування параметрів регулювання перехрестя або оцінки його екологічності та економічних втрат у часи найбільших транспортних навантажень. Транспортні затримки на регульованих перехрестях великих і навіть середніх міст призводять до накопичення значних концентрацій шкідливих викидів, що можуть баготоразово перевищувати гранично допустимі концентрації, і це загострює вже існуючі екологічні проблеми. Слід зазначити, що використання технологій квадрокоптерних зйомок є методом перехідного періоду до впровадження сучасних геоінформаційних технологій та інтелектуальних електронних систем на основі даних супутникової навігації, яким можуть бути адаптивні системи регулювання дорожнім рухом. Перехід до адаптивних систем регулювання дорожнім рухом є перспективним напрямом оптимального керування дорожнім рухом, що забезпечує локальне адаптивне управління найбільш складними і важливими перетинами транспортної мережі.

Ключові слова: *транспортні затримки; регульоване перехрестя; квадрокоптерна зйомка; пікові навантаження; достовірна оцінка; розрахункова методика; екологічність; адаптивні системи.*

Актуальність досліджень. Транспортні затримки негативно впливають на транспортний процес, призводячи не тільки до зниження швидкості руху та зростання тривалості перевезень, а як наслідок – до економічних збитків [1]. Тому нагальною проблемою багатьох сучасних міст є оптимальне керування дорожнім рухом [2]. Матеріали досліджень відповідають напряму державної політики транспортної стратегії України до 2030 року, пов'язаного з проявами можливих ускладнень екологічної ситуації, особливо на перехрестях, від зростання автомобілізації [3].

Теоретичний аналіз досліджень. Перевантаження міських перехресть руху автомобільного транспорту середніх і великих міст України стало проблемою у зв'язку з швидкими темпами автомобілізації. Для дослідження параметрів транспортних потоків, зокрема довжини заторів, використовується фізіологічна модель слідування за транспортним засобом, який пересувається попереду. Аналіз моделей руху транспортних потоків на ділянках показує, що основними параметрами для характеристики групового руху є інтервали між автомобілями, динамічний габарит транспортних засобів, швидкість руху автомобіля в групі, їх кількість, розмір групи і його зміна під час руху перегонами [1]. Затримки автотранспорту на регульованому перехресті є пропорційними довжині черг, які визначаються дорожньо-планувальними, транспортними та регуляторними чинниками, навколишнім середовищем та психофізіологічними якостями водіїв. Пропускна здатність на перехресті від дії цих чинників коливається протягом доби, місяця та сезону року [4]. Нагромадження груп транспортних засобів на регульованих перехрестях залежить також від факторів, які визначаються типом режимів руху транспортних потоків за напрямами перехрестя. Встановлено, що при зміні параметру інтенсивності руху транспортного потоку від 300 авт./год до значень інтервалу 301–600 авт./год і потім до перевищення межі інтенсивності руху більше за 650 авт./год часові інтервали між автомобілями змінюються відповідно: з 8 с до значень 2,5–8 с і менше 2,5 с, що визначає три типи режимів руху груп автомобілів: 1) вільний рух (коли відсутній взаємовплив автомобілів при їх русі); 2) частково зв'язаний рух (маневрування окремих автомобілів у потоці стає ускладненим); 3) зв'язаний (груповий) режим руху – при часовому інтервалі між рухом автомобілів у потоці меншим за 2,5 с. У дослідженнях зроблено висновок про те, що за зростання питомої інтенсивності модальні значення часових інтервалів руху автомобілів зміщуються в область малих значень і, що зв'язаний (груповий) потік характерний для максимальної інтенсивності руху та найчастіше має місце на вуличній мережі магістрального

© В.Є. Титаренко, В.П. Шумляківський, 2023

призначення і дорогах безперервного та регульованого руху [1]. Регулювання таких транспортних потоків світлофорними засобами формує черговість пропуску для проїзду, що утворює певну множину зупинених транспортних засобів з працюючими двигунами. Це може створювати локальні екологічні проблеми за викидами двигунів внутрішнього згорання та шумовим забрудненням, що доведено експериментальними дослідженнями [5, 6]. Достовірність оцінки затримок транспорту на регульованих перехрестях багато в чому залежить від розрахункової методики та наявних технічних засобів відеоспостереження, які використовуються. Найпростіші методи оцінки затримок базуються на спостереженнях за рухом транспорту в загальному потоці або відслідковуванні конкретних маршрутів чи підрахунках кількості транспортних одиниць, що проїжджають – зупиняються на перехресті за кожен цикл світлофорного регулювання. Оцінка множинного утворення груп автомобілів на регульованому міському перехресті не завжди можлива засобами відеоспостереження через обмеженість їх оглядовості. Не завжди оглядовість відеокамери дозволяє зафіксувати край черги зупинених автомобілів і це унеможливлює оцінку повної картини затримок. Однак ця проблема спрощується під час використання технології спостережень на основі зйомок з квадрокоптера, де забезпечується достатня оглядовість геопозиціювання транспортних засобів усього перехрестя протягом певного часового відрізка, що забезпечує отримання достовірних даних для виконання необхідних розрахунків. Метод безпосереднього визначення кількості транспортних засобів у черзі перед регульованим перехрестям вибраний нами як імовірнісно найбільш ефективний [4]. Транспортні засоби, які знаходяться на одній смузі руху у черзі, починаючи з першого автомобіля, що зупинений сигналом світлофору перед стоп-лінією, при включенні дозвільного сигналу будуть мати різні тривалості часу на початок руху: $t_1 > t_2 > t_3 > \ldots > t_n$ ($t_1 \ldots t_n$ – втрачений час запуску на початок руху). Така динаміка запуску зупиненої черги транспортних засобів пояснюється тим, що водій першого транспортного засобу в черзі має помітити зміну сигналу на зелений і відреагувати на це відпуском гальм і прискоренням автомобіля через перехрестя. Другий та наступні транспортні засоби виконують аналогічні дії початку реакції та прискорення після початку руху попереднього, що і зменшує час на початок руху. Перший крок відновлення руху визначається часом t_1, що минув у секундах між включенням зеленого сигналу і перетином передніми колесами стоп-лінії першим транспортним засобом. Другим кроком вперед буде час, що минув між перетином стоп-лінії передніх коліс першого та другого транспортного засобів. Методика передбачає таку послідовність розрахунку показників транспортних затримок на перехресті за даними експериментальних досліджень [4]:

а) визначення зупинених автотранспортних засобів за один цикл світлофорного регулювання:

$$n_{тз} = \frac{N_{зуп}}{n_c \cdot n_ц}, \quad (1)$$

де $N_{зуп}$ – кількість автомобілів, які зупинились перед стоп-лінією, авт.;

n_c – кількість смуг за даним напрямком руху; $n_ц$ – кількість циклів регулювання, взятих до уваги під час дослідження;

б) визначення частки автомобілів зупинених перед стоп-лінією перехрестя:

$$p_{зуп} = \frac{N_{зуп}}{N_{приб}}, \quad (2)$$

де $N_{приб}$ – загальна кількість прибулих на перехрестя транспортних засобів, авт.;

в) визначення затримки транспорту від прискорення та сповільнення:

$$d_2 = p_{зуп} \cdot k_1, \quad (3)$$

де k_1 – коефіцієнт затримки, що враховує прискорення та сповільнення транспортних засобів (табл. 1);

Таблиця1

Поправочний коефіцієнт для оцінки транспортної затримки на перехресті

Швидкість вільного руху транспортного потоку, км/год	Кількість транспортних засобів в черзі, в одиницях приведених до легкового автомобіля		
	≤ 7	8–19	20–30
≤ 60	5	2	1
> 60–71	7	4	2
> 71	9	7	5

г) визначення тривалості черги одного транспортного засобу (с/авт.):

$$d_1 = \delta t \cdot \frac{N_{дослід}}{N_{приб}} \cdot 0{,}9\,, \tag{4}$$

де δt – інтервал вимірювання, с; $N_{дослід}$ – загальна кількість транспортних засобів у черзі протягом досліджуваного періоду, авт.; 0,9 – корегувальний коефіцієнт (емпіричний);

д) визначення загальної транспортної затримки, що припадає на один автомобіль (с/авт.):

$$d = d_1 + d_2\,. \tag{5}$$

Для розрахунку транспортних затримок перед регульованим перехрестям, тобто світлофорами, необхідно знати властивості світлофорних об'єктів (повний світлофорний цикл, час дозвільного сигналу, час заборонного сигналу). Також слід врахувати фази, які можуть встановлюватися в режимах роботи світлофорів. Наприклад, робота світлофора в годину пік і в простий незавантажений час можуть значно відрізнятися один від одного. І для розрахунку потрібно досліджувати найбільш завантажений проміжок, тобто годину пік.

Метою статті є показ можливості застосування відеозйомок з квадрокоптера, як технологій перехідного періоду, для вирішення нагальної зараз проблеми оцінки затримок транспортних засобів. Це пов'язано з тим, що достовірна оцінка затримок транспортних засобів на регульованих міських перехрестях для оптимізації руху транспорту не завжди можлива наявними засобами відеоспостережень через обмеженість їх оглядовості.

Завдання дослідження. Дослідження параметрів транспортних потоків на регульованому перехресті на основі спостереження даних, отриманих технологіями відеозйомок з квадрокоптера. Проведення розрахунків транспортних затримок на регульованому перехресті за вибраною методикою та значеннями параметрів транспортних потоків за відеозйомкою з квадрокоптера, для розробки заходів можливої оптимізації режимів регулювання або самих систем регулювання.

Викладення основного матеріалу. Дані для експериментальних досліджень затримок транспортних засобів на регульованому перехресті вул. Східна – вул. Грушевського, отримані за технологією відеозйомки з квадрокоптера DJI Mavic 2 Pro і зазначені на рисунку 1. Зйомка відбувалася в період години пік з 17:00 до 18:00.

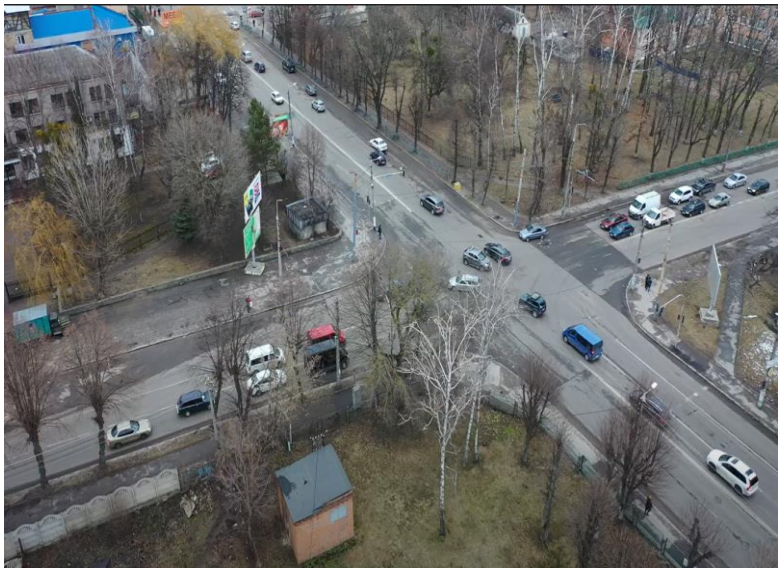

Рис. 1. Геопозиціювання транспортних засобів
на регульованому перехресті вул. Східна – вул. Грушевського

Для розрахунку транспортних затримок перед регульованим перехрестям слід знати параметри, що визначають регулювальні властивості світлофорних об'єктів цього перехрестя (рис. 2).

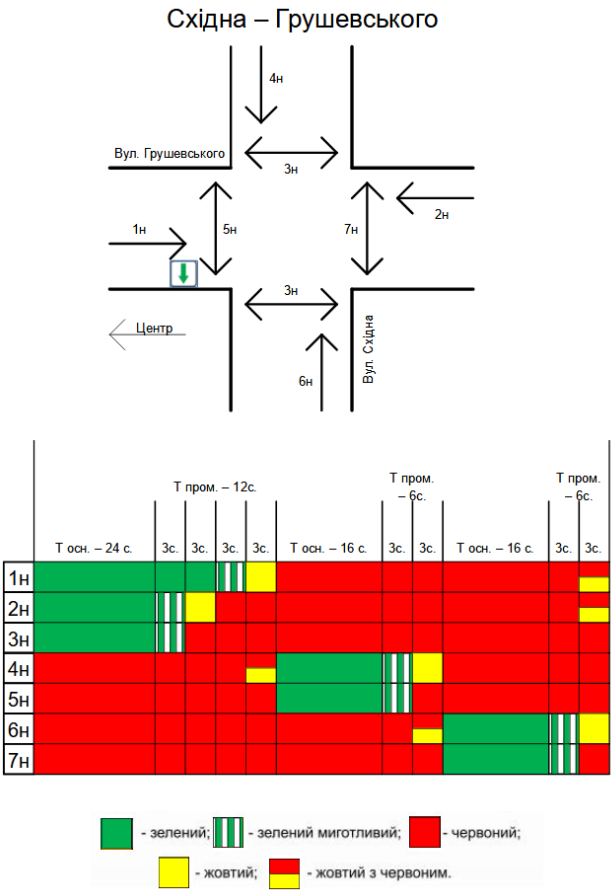

Рис. 2. Циклограма роботи світлофорів на перехресті вул. Східна – вул. Грушевського

Для зручності проведення розрахунків виконаємо розбиття досліджуваного перехрестя на 4 підходи, так як це показано на рисунку 3.

Рис. 3. Послідовність розбиття перехрестя на підходи

За циклограмою роботи світлофорного обладнання на перехресті (рис. 2) нами було визначено тривалість загального регулювального циклу, тривалість заборонних і дозвільних сигналів за встановленими підходами. За відеозйомкою з квадрокоптера підраховано кількість зупинених автомобілів, загальну кількість прибулих автомобілів і кількість їх у черзі протягом восьми інтервалів спостереження, протяжністю 10 с. Результати спостережень наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати дослідження вхідних параметрів для розрахунку транспортних затримок

Підхід	Кількість смуг руху	Тривалість циклу, с	Час заборонного сигналу, с	Час дозвільного сигналу, с	Кількість автомобілів, що зупинилися	Загальна кількість автомобілів, що прибули	Кількість транспортних засобів у черзі							
							інтервал спостереження – 10 с							
							1	2	3	4	5	6	7	8
I	2	80	58	19	8	17	2	3	4	5	12	11	4	2
II	2		58	19	9	19	3	4	5	7	11	9	7	3
III	3		50	27	7	24	8	11	12	14	11	7	6	5
IV	3		44	33	11	25	5	8	6	10	6	4	5	2

Параметри затримки руху на досліджуваному регульованому перехресті розраховані за формулами (1–5) методики представлені в таблиці 3.

Таблиця 3

Результати розрахунків параметрів транспортних затримок

Підхід	Кількість транспортних засобів, що зупинились за 1 цикл регулювання	Частка транспортних засобів, що зупинилася перед стоп-лінією	Затримка транспортного засобу від прискорення та сповільнення, с	Тривалість перебування одного транспортного засобу в черзі, с	Загальна транспортна затримка на один автомобіль, с
I	4	0,47	0,47	6,35	6,82
II	4	0,47	0,47	5,21	5,68
III	2	0,29	0,29	5,25	5,54
IV	3	0,44	0,44	3,60	4,04

Оптимізацію руху транспорту на дорожній мережі, зокрема і на перехрестях міста, яка проводиться в м. Житомирі за участю кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка», згідно з угодою з міськрадою на основі засобів інтелектуальних транспортних систем, пропонується здійснювати з врахуванням параметрів інтенсивності руху транспортних потоків на сумісних територіях міста, на яких є залежність взаємовпливу. Це завдання вимагає створення єдиного центру управління дорожнім рухом, куди буде інтегруватися вся інформація про зміну параметрів трафіка міських магістралей для оперативного реагування. Використання вибраної розрахункової методики визначення затримок транспорту на регульованих перехрестях у поєднанні з технологією квадрокоптерних зйомок дозволить більш достовірно оцінювати картини затримок транспорту для більшої об'єктивності оцінки екологічної ситуації на перехрестях міста з інтенсивним рухом [7]. Однак варто зазначити, що використання технологій квадрокоптерних зйомок є методом перехідного періоду до впровадження геоінформаційних технологій та інтелектуальних електронних систем на основі даних супутникової навігації, що є одним з перспективних напрямків вирішення багатьох проблем дорожнього руху [8, 9]. Системи управління дорожнім рухом, побудовані на геоінформаційних даних електронних карт, забезпечують учасників і організаторів руху інформацією про просторове уявлення розміщення множини машин на дорожньому полотні. Такими системами можуть бути адаптивні системи регулювання дорожнього руху. Адаптивна система регулювання дорожнього руху – це система управління з центрально-розподільним інтелектом, яка може містити такі складові: центральний пункт управління; точки адаптивного управління, обладнані інтелектуальними контролерами і детекторами транспорту [2, 8, 10]. Детектори транспорту в цій системі забезпечують локальне адекватне управління найбільш складними і важливими перетинами та ділянками транспортної мережі, а також інформаційну взаємодію центрального пункту управління з системними детекторами та контролерами, через інформування про транспортні потоки.

Висновки. Встановлено, що на досліджуваному регульованому перехресті при тривалості світлофорного циклу протягом 80 с за сумарної інтенсивності транспортного потоку 85 зв. од./год, кількість транспортних засобів у черзі, що утворилася, склала 13 одиниць (табл. 3). Визначено, що протягом однієї години, за 45 циклів світлофорного регулювання, кількість транспортних засобів, що знаходилися в черзі для проїзду у всіх напрямках перехрестя, за підрахунками склала 585 одиниць, що здійснює додатковий негативний екологічний вплив на навколишнє середовище та впливає на час доставки вантажів і пасажирів. Показана можливість використання технології квадрокоптерних відеозйомок для уточнення розрахунків затримок транспортних засобів на регульованих перехрестях міста при оптимізації транспортних потоків як технології перехідного періоду до впровадження інформаційних систем супутникової навігації, якими можуть бути адаптивні системи регулювання дорожнього руху.

Список використаної літератури:

1. *Семченко Н.О.* Дослідження параметрів руху груп транспортних засобів на вулично-дорожній мережі міст / *Н.О. Семченко, Є.Б. Решетніков* // Комунальне господарство міст. – 2018. – № 7 (146). – С. 12–19.
2. *Сирота С.В.* Модель адаптивної системи регулювання дорожнім рухом на перехресті з використанням нечіткої логіки / *С.В. Сирота, О.С. Душин* // Прикладна математика та компютинг : зб. тез. доп., 15–17 квіт. – К. : Просвіта, 2015.
3. Про затвердження плану заходів з реалізації національної транспортної стратегії України на період до 2030 року : Розпорядження КМУ, від 7 квітня 2021 р. № 321-р. – Київ.
4. *Грицунь О.М.* Дослідження транспортних затримок перед регульованими перехрестями / *О.М. Грицунь, С.М. Середюк* // Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту : Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції, 21–23 жовтня. – 2019. – С. 68–71.
5. *Титаренко В.Є.* Дослідження екологічного стану транспортних перехресть за викидами автомобільних двигунів в місті Житомирі / *В.Є. Титаренко, В.А. Нестеренко* // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Сер. : Технічні науки. – 2016. – № 2 (77). – С. 267–273.
6. Оцінка екологічного стану транспортних перехресть доріг за шумовим навантаженням від автотранспорту в місті Житомирі / *В.Є. Титаренко, В.П. Шумляківський, В.І. Корніков та ін.* // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Сер. : Технічні науки. – 2018. – № 1 (81). – С. 12–16.
7. Управління автомобільним транспортом : навч. посіб. / *П.Р. Левковець, Д.В. Зеркалов, О.І. Мельниченко, О.Г. Козаченко* ; за ред. *Д.В. Зеркалова*. – К. : Арістей, 2006. – 416 с.
8. *Кашканов А.А.* Організація дорожнього руху : навч. посіб. / *А.А. Кашканов, В.П. Кужель*. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 125 с.
9. 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. – 2014. – 467 с.
10. *Клебанова Т.С.* Нечітка логіка та нейронні мережі в управлінні підприємством : монографія / *Т.С. Клебанова, Л.О. Чаговець, О.В. Панасенко.* – Х. : ВД «ІНЖЕК», 2011. – 240 с.

References:

1. Semchenko, N.O. and Reshetnikov, Ye.B. (2018), «Doslidzhennia parametriv rukhu hrup transportnykh zasobiv na vulychno-dorozhnii merezhi mist», *Komunalne hospodarstvo mist*, No. 7 (146), pp. 12–19.
2. Syrota, S.V. and Dushyn, O.S. (2015), «Model adaptyvnoi systemy rehuliuvannia dorozhnim rukhom na perekhresti z vykorystanniam nechitkoi lohiky», *Prykladna matematyka ta kompiutynh*, zb. tez. dop., 15–17 kvit., Prosvita, K.
3. KMU (2021), *Pro zatverdzhennia planu zakhodiv z realizatsii natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku*, Rozporiadzhennia, vid 7 kvitnia No. 321-r., Kyiv.
4. Hrytsun, O.M. and Serediuk, S.M. (2019), «Doslidzhennia transportnykh zatrymok pered rehulovanymy perekhrestiamy», *Suchasni tekhnolohii ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu*, Materialy XII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 21–23 zhovtnia, pp. 68–71.
5. Tytarenko, V.Ie. and Nesterenko, V.A. (2016), «Doslidzhennia ekolohichnoho stanu transportnykh perekhrest za vykydamy avtomobilnykh dvyhuniv v misti Zhytomyri», *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*. Ser. *Tekhnichni nauky*, No. 2 (77), pp. 267–273.
6. Tytarenko, V.Ie., Shumliakivskyi, V.P., Kornikov, V.I. et al. (2018), «Otsinka ekolohichnoho stanu transportnykh perekhrest dorih za shumovym navantazhenniam vid avtotransportu v misti Zhytomyri», *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*. Ser. *Tekhnichni nauky*, No. 1 (81), pp. 12–16.
7. Levkovets, P.R., Zerkalov, D.V., Melnychenko, O.I. and Kozachenko, O.H. (2006), *Upravlinnia avtomobilnym transportom*, navch. posib., in Zerkalov, D.V. (ed.), Aristei, K., 416 p.
8. Kashkanov, A.A. and Kuzhel, V.P. (2017), *Orhanizatsiia dorozhnoho rukhu*, navch. posib., VNTU, Vinnytsia, 125 p.
9. Bakulich, O.O., Dziuba, O.P., Ieresov, V.I. et al. (2014), *Orhanizatsiia ta rehuliuvannia dorozhnoho rukhu*, pidruchnyk, in Polishchuk, V.P. (ed.), Znannia Ukrainy, K., 467 p.
10. Klebanova, T.S., Chahovets, L.O. and Panasenko, O.V. (2011), *Nechitka lohika ta neironni merezhi v upravlinni pidpryiemstvom*, monohrafiia, VD «INZhEK», Kh., 240 p.

Титаренко Володимир Євгенійович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

https://orcid.org/0000-0003-4677-2535.

Наукові інтереси:

– надійність і міцність машин, проблеми вібронавантажуваності несучих систем;
– екологічні проблеми автомобільного транспорту;
– сучасні енергозберігаючі технології.

E-mail: Voldtit@gmail.com.

Шумляківський Володимир Петрович – кандидат технічних наук, завідувач кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

https://orcid.org/0000-0002-5418-4736.

Наукові інтереси:

– інтелектуальні транспортні системи, організація і безпека дорожнього руху, транспортні дослідження, комп'ютерне мікромоделювання транспортних потоків.

E-mail: shumliakivskyiv@ztu.edu.ua.

Tytarenko V.E., Shumliakivskyi V.P.

Measurement and analysis of traffic delays in front of controlled intersections based on quadcopter images

The paper presents the results of studies of the congestion of a regulated intersection of the city based on the use of quadcopter technologies for recording the dynamics of vehicle flows during times of peak traffic, when it can be problematic to determine the parameters of traffic delays due to the limited visibility of stationary means of video observation. The selected calculation method for the adequacy of transport delay calculations requires precise geo-positioning data of a number of cars at the intersection, which is fully provided by quadcopter surveying. The results of the calculations can be used to adjust the parameters of the intersection regulation, or to assess its environmental friendliness and economic losses at times of the highest traffic loads. Transport delays at regulated intersections of large and even medium-sized cities lead to the accumulation of significant concentrations of harmful emissions, which can many times exceed the maximum permissible concentrations, and this exacerbates already existing environmental problems. It should be noted that the use of quadcopter surveying technologies is a method of the transition period to the introduction of modern geo-information technologies and intelligent electronic systems based on satellite navigation data, which can be adaptive traffic control systems. The transition to adaptive traffic control systems is a promising direction of optimal traffic management, which provides local adaptive control of the most complex and important intersections of the transport network.

Keywords: transport delays; regulated intersection; quadcopter survey; peak loads; reliable assessment; calculation method; environmental friendliness; adaptive systems.

Стаття надійшла до редакції 06.04.2023.