



АНАЛИЗ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ГРАФОАНАЛИЧНИТЕ МОДЕЛИ ЗА КООРДИНИРАНО УПРАВЛЕНИЕ НА ТРАФИКА В ГРАДОВЕТЕ

Мирена Тодорова, Васил Копривщенов
mtodorova@vtu.bg, vasil1koprivshenov@gmail.com

*Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“
София, ул. Гео Милев № 158
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ*

***Ключови думи:** координирано управление, светофари, трафик, графоаналитични модели*

***Резюме:** През последните десетилетия населението многократно се урбанизира, с което паралелно се разрастват градовете и нарастват броят на превозните средства, които причиняват задръствания в основните пътни артерии. Затова се търсят проектни решения за оптимизация на трафика по вече изградената пътна инфраструктура. Засиленото движение е трудно решим казус на много места по света, като навсякъде води до едни и същи негативни ефекти, като замърсяване на въздуха, шумово замърсяване, вибрации, вредни емисии, загуба на време за служители на фирми или бизнес в задръствания, изхабяване на пътната настилка и друга инфраструктура, както и ръст на катастрофи с или без жертви. В момента входът в центъра на София е безплатен, както и по най-натоварените пътни артерии, а това води до претоварването им. Затова е необходимо да се синхронизират светофарните уредби, така че да се осигурят минимални задръжки на превозните средства и да се повиши средната скорост на придвижване. В доклада се анализират графоаналитичните модели за координирано управление на трафика с цел да се избере подходящ метод, който да се приложи при обучението на студентите. Използвайки диаграмата „време-пространство“, за избрания метод е разработен алгоритъм за координиране на управлението на светофари по булевард при различни разстояния между тях, което е типично за уличната мрежа в столицата. Верифицирането на алгоритъма е реализирано чрез прилагането му в конкретен участък от пътната мрежа на София.*

ВЪВЕДЕНИЕ

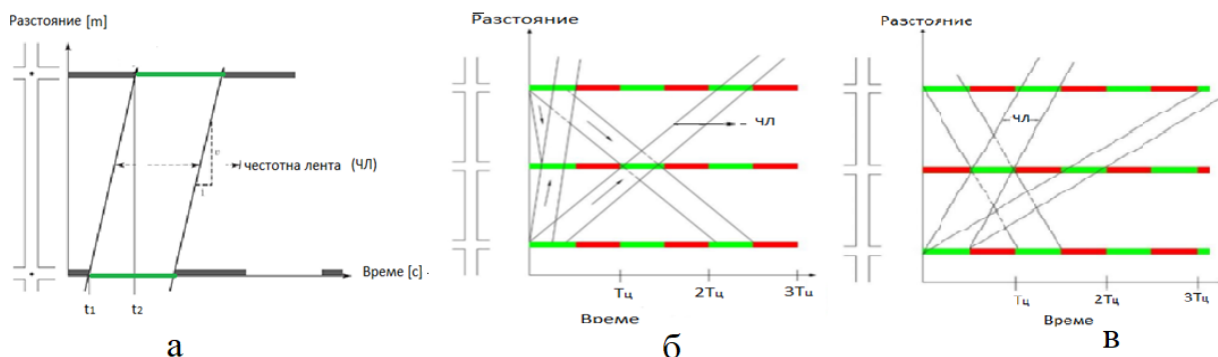
В съвременния градски транспорт, задръстванията са често срещан проблем, който води до загуба на време, повишено ниво на замърсяване и стрес за водачите. За да се справи с този проблем, се прилагат различни методи за регулиране на трафика, включително "координирано управление". "Координирано управление" е синхронизирана система за управление на светофарите, която координира светофарите по определени маршрути, за да се осигури непрекъснато движение на трафика [3]. При правилно проектиране и изпълнение, "координирано управление" може да спомогне за

намаляването на времето за изчакване на светофари, да се оптимизира скоростта на движение на превозните средства и да подобри общия капацитет на пътя. Намалените задръствания и по-плавното движение на трафика водят до по-ниско потребление на гориво и намаляване на емисиите на вредни вещества в атмосферата. Проектирането и изпълнението на ефективна система за "координирано управление" може да бъде сложно и трудоемко, тъй като изисква задълбочено разбиране на моделите на трафика, които могат да се променят в зависимост от времето на деня, деня от седмицата и други фактори и координация на множество светофари. Прилагането им не винаги е подходящо за всички маршрути, особено за тези с ниско ниво на трафик или с непредсказуеми модели на движение. "Координирано управление" се прилага по дължината на булеварди и все повече навлиза при управление на трафика в големите градове, защото може да доведе до намаляване на задръстванията, подобряване на капацитета на пътя и намаляване на емисиите.

ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР НА МЕТОДИТЕ ЗА „КООРДИНИРАНО УПРАВЛЕНИЕ“ НА ТРАФИКА В ГРАДОВЕТЕ

В градовете с интензивно движение на автомобили е от съществено значение да се оптимизират системите за управление на трафика, за да се намалят задръстванията, да се повиши ефикасността и да се подобри качеството на въздуха. Сигнализирането на "координирано управление" е ключов инструмент за постигане на тези цели, като координира светофарите по начин, който позволява на групи от превозни средства да се движат без спиране през кръстовищата. Известни са два основни метода използвани за "координирано управление": метод на "честотната лента" и метод на "неустойчивост".

Метод на "честотната лента"[3,7,9]. Концепцията за широчината на честотната лента е много популярна в практиката на пътното инженерство и основната цел е да се максимизира "ширината на лентата" на движение, т.е. броят на превозните средства, които могат да преминат през кръстовището без спиране. За да се оптимизира продължителността на показанията за зелена светлина трябва да се изгради диаграма от време - пространство. Диаграмата за времево пространство е проста графика на сигналните индикации, като функция на времето за две или повече светофара по даден булевард и тя се мащабира по отношение на разстоянието, така че човек лесно да очертава позициите на превозното средство като функция на времето. Настройките за време и сигнал (изразени в секунди) са посочени по хоризонталната ос чрез подходяща скала, докато разстоянието между сигналите (изразено в метър или километър) се начертава вертикално, чрез подходящ мащаб (фиг. 1, а).

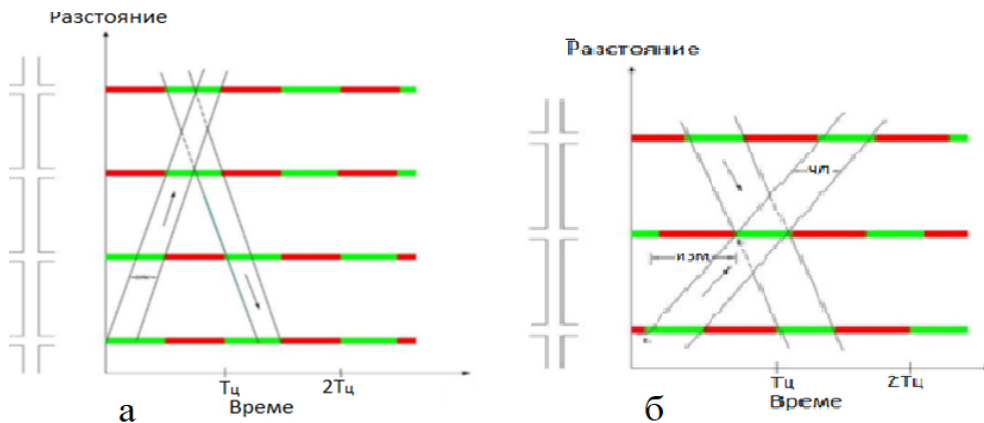


Фиг.1. Диаграма на а) „време-пространство“ б) едновременна система на сигнализиране в) последователна система на сигнализиране

В зависимост от синхронизирането на показанията на светофарите може да се използва някоя от следните системи:

◆ Едновременна: Всички светофари по дадена булевард показват зелено едновременно. Подходяща е за близко разположени кръстовища и висока скорост на движение. (фиг.1, б). Недостатъци са: водачите повишават скоростта с цел да преминат повече кръстовища без спиране и разделението на времето на цикъла е едно и също във всички пресечни точки и неефективността е неизбежна в някои от тях.

◆ Последователна (ограничена прогресивна/алтернативна): Светофарите показват противоположни сигнали (зелено-червено) последователно, създавайки "вълна" от превозни средства. Подходяща е за по-дълги разстояния между кръстовища. (фиг.1, в). При тази система последователните светофарни уредби по протежение на булеварда показват противоположни индикации едновременно(зелено-червено), като идеята е превозните средства да пропътуват отделните отсечки в пакет и за време, равно на половината на цикъла $T_{ц}$. Ако водачите не спазват проектната скорост, ще се наложи да спират на всички кръстовища и това води до определена възможност за контрол на скоростта, тъй като шофьорите при превишена скорост ще спират при всяко кръстовище.



Фиг.2. Диаграма на а) двойна алтернативна б) проста последователна

◆ Двойна алтернативна: Светофарите показват зелено за две противоположни посоки едновременно, последвано от зелено за перпендикулярните посоки. Подходяща е за близко разположени кръстовища и висока скорост на движение. (фиг.2, а).

◆ Проста прогресивна: Сигналите се адаптират към желаната скорост на движение по пътя. Може да се използва за предпочитане на една посока пред другата. (фиг.2, б). Предимства са, че се осигурява по-плавно движение на превозните средства и се намаляват задръстванията. Не е подходяща за всички ситуации, например при неравномерно разположени кръстовища трудно се постига оптимизиране и синхронизиране. Не е устойчива на динамични промени в трафика.

Метод на "неустойчивост" [3,6,8]. Този метод се фокусира върху минимизирането на общите разходи, свързани със закъснения, спиране, замърсяване на околната среда и други фактори. Обичайно е да се вземат предвид ползите от координационния план по отношение на функция „разходи“ или „неустойчивост“. Общата функция за неустойчивост има следното уравнение включва сумата от числова оценка на общо спиране, общи закъснения и други условия, които са избор на инженера или анализатора. На практика числовите стойности за намаление на спирането и закъснението обикновено се получават с планове за синхронизиране, направени с компютърни пакети за оптимизация на сигнала. Сумите (с помощта на които се отчитат

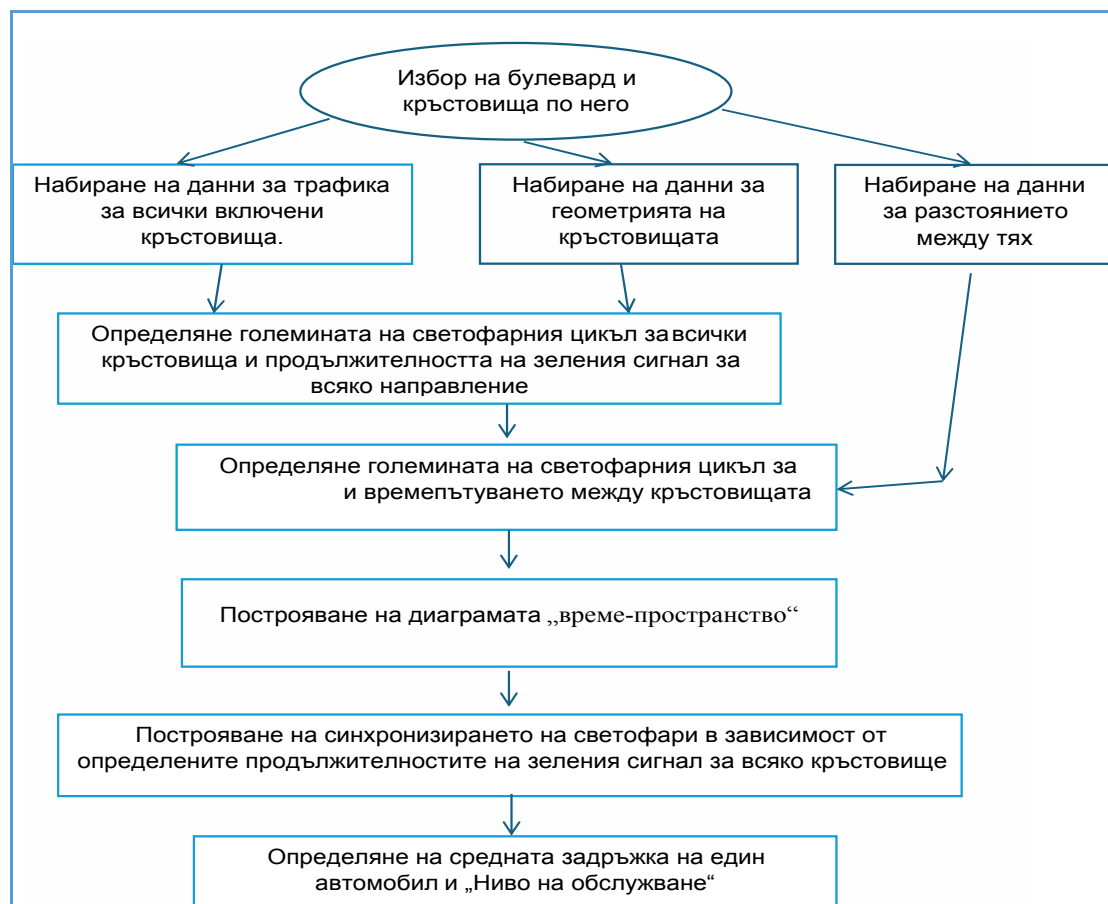
различните аспекти за намаляване на разходите влизачи в уравнението) могат да бъдат използвани в анализа на разходите и ползите за оценка на алтернативни планове.

Изборът на най-подходящия метод за сигнализиране на "координирано управление" зависи от конкретните условия на трафика, целите и наличните ресурси. Важно е да се вземат предвид както предимствата, така и недостатъците на всеки подход, за да се оптимизира управлението на трафика и да се осигури по-ефективно и екологично движение в градовете. За конкретното разглеждане няма да се използват програми за моделиране на трафика, а ще разработим алгоритъм за оптимизиране на сигналните показатели чрез метода на "честотната лента".

АЛГОРИТЪМ ЗА ПРИЛАГАНЕ НА КООРДИНИРАНО УПРАВЛЕНИЕ ПО БУЛЕВАРД С РАЗЛИЧНИ РАЗСТОЯНИЯ МЕЖДУ СВЕТОФАРИТЕ

Разработен е алгоритъм за координирано управление по булевард с различни разстояния между светофарите с цел запознаване на студентите със спецификата и особеностите на този подход при управление на трафика в градовете. Разработеният алгоритъм е даден на Фиг.3. Алгоритмът е облекчен, за да може студентите да успеят да построят диаграма „време-пространство“ за включени разглежданите кръстовища и ще се реализира при следните предварително приети условия:

- ◆ продължителността на цикъла за всички кръстовища ще е еднакъв и равен на продължителността на най-натовареното кръстовище;
- ◆ Оптимизацията се оценява в зависимост от „Ниво на обслужване“ по основния булевард



Фиг. 3. Алгоритъм за координирано управление по булевард с различни разстояния между светофарите

За този алгоритъм трябва да се избере булевард, по който се движи голям поток от автомобили и участък от него, който ще осигури транзитно преминаване на основния поток без спиране – без големи криви и еднакъв брой ленти. Както се вижда от разработения алгоритъм първата стъпка е да се направи основно проучване и съберат база от данни за: потока от превозни средства преминаващи през разглеждания участък и кръстовищата му за определен диапазон от време и геометричните параметри на участъка включващ броя на кръстовищата, техните параметри като брой ленти, ширината им, големината на радиуса на кривите и разстоянието между кръстовищата.

Втората стъпка е определянето на големината на цикъла и продължителността на зелената светлина за всяко кръстовище и направлението му използвайки методиката описана в източник [2]. За това може да се използват и редица програмни продукти, които да подпомогнат иначе трудоемката изчислителна част.

В зависимост от натоварването на кръстовището и броя на фазите се определя големината на продължителността на цикъла и затова при най-натовареното кръстовище с преминаващи превозни средства от градския транспорт продължителността е най-голяма и именно нея избираме за координирането на показанията по булеварда [2,3,4,5]. Другата част от третата стъпка е определянето на времепътуването на потока от превозни средства между кръстовищата използвайки ограничението на скоростта в зависимост от Закона за движение по пътищата.

Четвъртата стъпка е построяването на диаграма от време и пространство като по хоризонталната ос се нанася времето изразени в секунди, а по вертикала чрез подходяща скала, се нанася разстоянието между кръстовищата изразено в метри или километри в подходящ мащаб.

Петата стъпка е синхронизиране на светофарите, като се започва от най-натоварения светофар и се включва зеленото в момент T_0 . Следващият светофар се включва зелено след изтичане на времето за пътуване от първия светофар, плюс времето за жълт сигнал. Този процес се повтаря за всички светофари по булеварда. В зависимост от продължителността на зеления сигнал може да се наложи леко разместване около описаните начални моменти така че да се получи плавно движение на потока от превозни средства.

Критерий за оптимално синхронизиране е средната задръжка на един автомобил и оценката в зависимост от „Ниво на обслужване“ да е минимална.

ПРИЛАГАНЕ НА РАЗРАБОТЕНИЯ АЛГОРИТЪМ

Разработеният алгоритъм е приложен за потока на транзитно движение на превозни средства по бул. „Тодор Александров“ от бул. „Димитър Петков“ до ул. „Опълченска“ и обратно, наличните светофарни уредби регулиращи движението са при бул. „Димитър Петков“, ул. „инж. Иван Иванов“, ул. „Одрин“ и ул. „Опълченска“. Натовареното кръстовище по избрания булевард е пресичането с ул. „Опълченска“, по която се движат автобуси и тролейбуси и то ще е избрано за основно [1].

Кръстовището на бул. „Тодор Александров“ с ул. „Опълченска“ е четириклонно и е на разстояние 505 метра от ул. „Одрин“. Движението се регулира от 8 светофарни обекта оборудвани с камери. Пешеходния поток се осъществява през подлеза при метростанция „Опълченска“. Платното за движение по булеварда към Центъра е трилентово, а направлението са: наляво, направо, направо – надясно, в обратна посока са: направо – надясно, направо, наляво. По ул. „Опълченска“ платното за движение също е трилентово. В посока към бул. „Сливница“ направлението са: наляво, направо и направо – надясно, а в обратна посока две ленти са за направо и една направо – надясно. Скоростта на движение е 50 км/ч. Следващото кръстовище е на ул. „Одрин“, което е оборудвано с 6 светофарни стълба и 2 с пешеходен бутон. Пешеходните

светофари тук също са със звукова сигнализация и камери за видеонаблюдение. Платното за движение по бул.“Тодор Александров“ към Центъра се осъществява в три ленти, като две от тях са с направление направо и една направо – надясно. В обратна посока лентите са с направление направо –надясно, направо и третата само наляво. Платното за движение по ул.“Одрин“ е двупосочно. Разстоянието до следващото кръстовище, а именно до ул.“инж. Иван Иванов“ е 110 метра. Разпределението на платната по бул.“Тодор Александров“ са същите както при предишното кръстовище. Платната за движение по бул.“инж.Иван Иванов“ са двулентови за всяко направление и са разделени от река Владайска. Последното кръстовището на бул.“Тодор Александров“ с бул.“Димитър Петков“ е четириклонно и е оборудвано с 9 стълба светофарна уредба, както и два нови стълба за пешеходни бутони. Платното за движение по бул.“Тодор Александров“ към Центъра е трилентово, с ленти за наляво, направо, направо - надясно, а в обратна посока две от лентите са за направо и една за направо - надясно. По цялото протежение на булеварда и в двете посоки е изградена велосипедна алея, също регулирана със светофарна уредба. Платната за движение по бул.“ Димитър Петков“ са двулентови за всяко направление и са разделени от пазара.

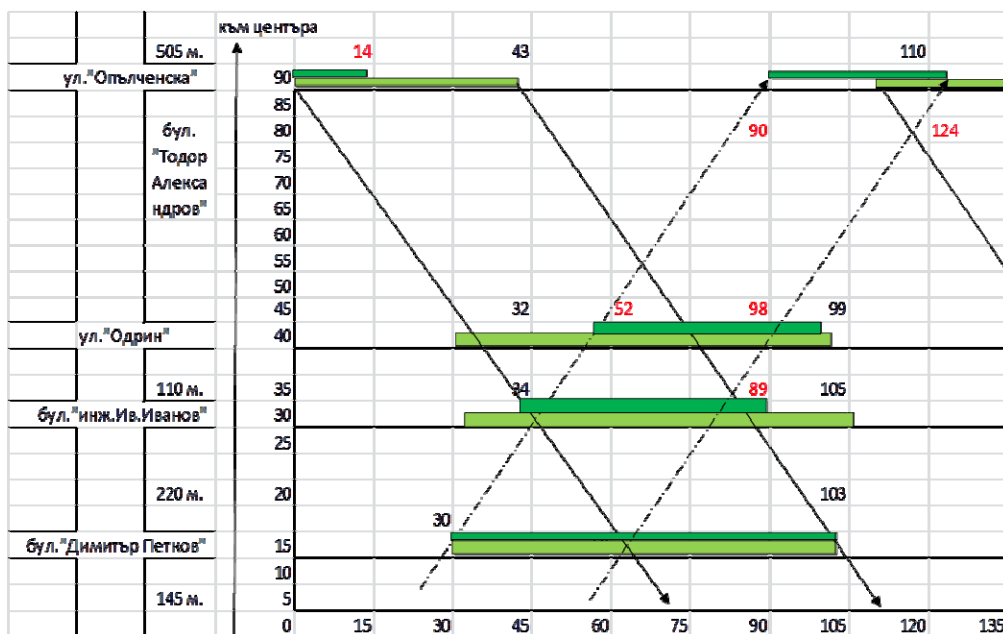
Данните за интензивността на движение по избрания участък по продължението на бул.“Тодор Александров“ са предоставени от „Дирекция за анализ и управление на трафика“. Определя се продължителността на цикъла на избраното за основно кръстовище и разглеждайки всяко едно от включените кръстовища се определя продължителността на зелената светлина по основния булевард, като резултатите са дадени в табл.1 съдържаща данни за участъка по бул.“Тодор Александров“ - разстояния, времепътуване и светофарен цикъл от 17:00 часа.

Таблица 1.

| Кръстовище | Разстояние/m. | Направление | Времепътуване/s. | Тц /tz |
|----------------------|---------------|-------------|------------------|--------|
| ул. "Опълченска" | 505 | 4Н | 36,36 | 110/43 |
| | | 5Н | | 110/29 |
| ул. "Одрин" | 110 | 7Н | 7,92 | 110/67 |
| бул. "инж.Ив.Иванов" | 15 | 5Н | 1,08 | 110/71 |
| | 205 | 1Н | 14,8 | 110/70 |
| бул. "Д.Петков" | 145 | 2Н | 10,44 | 110/67 |

Графичното построяване на диаграмата за избрания участък започва с първоначалното построяване на мащабното разположение на светофарите по вертикала и времето по хоризонтала. Започваме с основното кръстовище и нанасяме продължителността на зеления сигнал от момент T_0 , след което преминаваме към следващите кръстовища и в момент T_0 +времепътуване до съответното кръстовище изчисляваме точките, в които се нанасят съответните продължителности на зеления сигнал по булеварда (табл.1). В обратното направление се започва от точката на започване на зелената светлина в кръстовището на пресичането с ул.“Димитър Петков“ и по аналогичен начин нанасяме продължителност на зеления сигнал от това кръстовище към Центъра. На основното кръстовище зеления сигнал съвпада за едновременните завои на ляво за двете направления, а зеленото за направо в двете направления не съвпада (Фиг.4).

В зависимост от осигурената пропускателна способност по бул.“Тодор Александров“ се установява, че с изключение на часовия интервал 8-9 часа за направление към центъра и за часовия интервал 17-19 за посока кв.Люлин няма задръжка на превозни средства на разглежданите кръстовища.



Фиг. 4. Диаграма „време-пространство“ за участък по бул. „Тодор Александров“

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разгледаните графоаналитични методи са по облекчени от изчислителна част в сравнение с разработването на аналитичен модел. Затова краткото им описание позволява запознаване на студентите с основните възможности при построяването им и дава добра основа за разработване на моделиране на движението на превозните средства по избраните участъци от булевардите и пресичащите ги улици. Разработеният аналитичен модел е лесно приложим за управлението на трафика в българските градове, при които разположението на кръстовищата са на различни разстояния и това определя и по-малката възможност да се прилагат повечето от описаните графоаналитични модели, които са разработени за близки или равномерно по размери отстояния на светофари като американските градове. Наличието на изчислителни процедури на MS Ексел или софтуерни продукти за определяне на големината на светофарния цикъл и големината на зеления интервал на кръстовищата подпомагат прилагането на модела. За верифицирането на алгоритъма е необходимо не само аналитичното определяне на „Ниво на обслужване“ по основния булевард, но и разработването на имитационен модел, който да потвърди направените изводи включвайки и останалите направления при движението на превозните средства.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Георгиева Сн., „Изследване на прилагането на „зелени вълни“ при регулирането на трафика в градовете“ – дипломна работа 2022, ВТУ“Т.Каблешков“, кат. ТОУТ
- [2] Тодорова М., Гюров Б. „Моделиране на сигнализирането на четириклонно кръстовище чрез разработване на EXCEL ADD-INS“, Научно електронно списание Механика, Транспорт, Комуникация“, ISSN:1312- 3823, том 16, брой 3/1, 2018 г., статия ID 1600, София, <https://mtc-aj.com/library/1600.pdf>
- [3] Тодорова М. – лекции по „Управление на трафика в градовете“, <https://moodlenuw.vtu.bg/>, 2021

- [4] Тодорова М., Определяне на броя и вида на фазите по „Метод на сумата на фазовите коефициенти”, Научно електронно списание „Механика Транспорт Комуникации” ISSN:1312-3823, бр.3/2017, статия ID 1444, София
- [5] Трендафилов З., „Анализ на методите за определяне на фазите на светофарните уредби“, научно електронно списание „Механика, Транспорт, Комуникация“, ISSN:1312- 3823, бр.3/2017, статия ID 1446, София
- [6] Changze Li, Hao Wang, Yunxue Lu, A multi-path arterial progression model with variable signal structures, 2023, *Transportmetrica A: Transport Scienc*, Volume 19, Issue 3, March 2023, <https://doi.org/10.1080/23249935.2022.2101708>
- [7] Huimin Yan and all, Network-level signal predictive control with real-time routing information, 2023, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 107, October 2019, Pages 266-286, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.08.014>
- [8] Truong, L. T., Currie, G., & Sarvi, M. (2017). Analytical and simulation approaches to understand combined effects of transit signal priority and road-space priority measures. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 74, 275-294. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.11.020>
- [9] Xianyu Wua*, Zong Tianb , Peifeng Hub , Zhenzhou Yuana, Bandwidth Optimization of Coordinated Arterials Based on Group Partition Method, 8th International Conference on Traffic and Transportation Studies Changsha, China, August 1–3, 2012, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 43 (2012) 232 – 244,

ANALYSIS AND STUDY ON GRAPH-ANALYTICAL MODELS FOR COORDINATED TRAFFIC MAINTENANCE IN CITIES

Mirena Todorova, Vasil Koprivshenov
mtodorova@vtu.bg, vasil1koprivshenov@gmail.com

Todor Kableshkov University of Transport
158 Geo Milev Str., Sofia,
THE REPUBLIC OF BULGARIA

Key words: *coordinated control, traffic signals, traffic, graph-analytical models, time-space diagram*

Abstract: *In recent decades the population has repeatedly been urbanized, which is parallel with the growth of cities and increase of the number of vehicles that cause traffic jams on main road arteries. Therefore, project solutions for traffic optimization on the already built road infrastructure has been sought. The increased traffic is an intractable case in many places all over the world leading to one and the same negative effects include air pollution, noise pollution, vibrations, harmful emissions, time losses of employees due to traffic jams, wear and tear of road pavements and other infrastructure damages as well as increase of fatal and non-fatal accidents. As it is still free to enter the city center of Sofia as well as to use the busiest arterials, that leads to congestions. Therefore, it is necessary to coordinate signals to minimise vehicle delays and increase the average speed of running. The paper analyses the graph-analytical models for coordinated traffic maintenmnce by choosing an appropriate method to apply. Using the time-space diagram, an algorithm has been developed to select a method of coordinated signal control in a boulevard with different distances between traffic lights, which is typical for the capital of Bulgaria. The algorithm has been verified through its application in a specific section of the street network of Sofia.*