

О. В. Денисенко, А. П. Коваленко, С. М. Пашкевич

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗПОДІЛУ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ НА ПІДХОДАХ ДО РЕГУЛЬОВАНИХ ПЕРЕХРЕСТЬ

Анотація. Предметом вивчення в статті є визначення умов розподілу транспортних потоків (ТП) на підходах регульованих перехресть, при яких здійснюється комплексна оптимізація елементів циклу світлофорної сигналізації (ЦСС). **Метою** є визначення умов розподілу ТП згідно з обраним критерієм, при якому здійснюється мінімізація затримок транспортних засобів на перехресті і оптимізуються значення елементів світлофорного циклу. **Завдання:** визначення критерію і математичних моделей аналітичних умов оптимального розподілу ТП для різних схем на підході до перехрестя, при яких забезпечується оптимізація затримок транспортних засобів та елементів світлофорного циклу. Отримані наступні **результати.** Розкрито деякі особливості вирішення завдання формування напрямків руху ТП і пошуку оптимальних схем їх розподілу за фазами циклу. Визначено критерій і умови вирівнювання фазових коефіцієнтів для ряду типових схем пофазного роз'їзду, а також математичні моделі аналітичних умов розподілу ТП, що забезпечують оптимізацію затримок транспортних засобів. В ході аналізу досліджень і результатів роботи в подальшому запропонований алгоритм вибору схем організації дорожнього руху на перехресті і послідовність визначення елементів циклу регулювання. **Висновки.** Отримані умови для розподілу ТП на перехресті дають можливість вибору раціональної структури пофазного роз'їзду, істотно зменшити обсяг розрахунків при виборі комплексної схеми оптимізації режимів світлофорного регулювання. Запропонований підхід оцінки технології управління світлофорної сигналізації є комплексним і може бути основою для математичного забезпечення систем автоматизованого проектування світлофорних об'єктів. Моделі розподілу ТП на перехресті необхідні для визначення більш якісної оцінки умов руху, рівня функціонування і вибору найбільш раціональної організації руху і комплексу керуючих дій. Проведені дослідження дозволили розробити алгоритми та програмне забезпечення, які можуть застосовуватися для проектування схем організації руху на перехрестях вулично-дорожньої мережі.

Ключові слова: цикл, перехрестя, затримки, розподіл, смуга руху.

Вступ

Визначення схеми організації дорожнього руху (ОДР) і підвищення ефективності СС на перехресті є актуальним завданням управління ДР.

Автоматизація визначення циклу світлофорної сигналізації (ЦСС) з урахуванням топографії перехрестя, схем пофазного роз'їзду і раціонального розподілу ТП у стоп-лінії є не лише необхідною процедурою оптимального вибору варіанту управління перехрестя, але складовою компоненти інформації для АСУ ДР. Тому в цій статті розглядається пропозиція про можливість коригування відомої моделі визначення параметрів світлофорного циклу з метою зниження сумарних затримок транспортних засобів (ТЗ), вибору раціональної структури пофазного роз'їзду і можливості забезпечення комплексної оптимізації режимів СФР.

Аналіз публікацій. В літературі [1-4] широко освітлено питання розрахунку елементів і тривалості ЦСС ізольованих перетинів. При цьому алгоритмом розрахунку передбачається оцінка якості ОР даних варіантів роз'їзду такими показниками як середня затримка транспортних засобів \bar{t}_z і пов'язана безпосередньо з нею ступінь насичення напрямку руху X_i . Як показує практика рішення подібних завдань на ЕОМ [1], навіть при використанні найбільш прийняттого діалогового режиму не виникає серйозних складнощів в її реалізації. Завдання значно усклад-

нюється, якщо разом з розрахунком режиму регулювання ведеться пошук оптимальної схеми ОР на перехресті шляхом перебору усіх можливих варіантів за заданим критерієм ефективності, та ще і для декількох програм управління, необхідної для активного періоду доби.

Варіанти перебирають шляхом об'єднання геометричних напрямів руху в регульовані напрями і якщо врахувати, що на кожному підході до перехрестя можуть в принципі існувати 4 варіанти спеціалізації смуг руху, то для звичайного чотирьохстороннього перехрестя у пошуках оптимальної схеми і розподілу ТП по смугах виникає необхідність перебору великої кількості варіантів [2].

Мета і постановка завдання

Рішення таких завдань пов'язане з необхідністю вибору критерію ефективності управління на перехресті [1, 2]. У зв'язку з цим метою дослідження є вибір критерію, який дозволяв, з одного боку, оцінити рівень ОДР на перехресті при заданому режимі руху, причому по будь-якому з напрямів; а з іншої - дати можливість вибору способу управління для оптимізації режимів СФР. У практиці регулювання ДР країн СНД найбільше поширення отримала модель розрахунку елементів ЦСС локального перехрестя, що запропонована Вебстером [1].

Завдання розрахунку дій, що управляють, є багатоступінним і включає: розрахунок потоків наси-

чення M_{nij} і фазових коефіцієнтів Y_{ij} , розрахунок проміжних тактів t_{ni} , об'єднання і розподіл напрямів руху по фазах, розрахунок основних тактів t_{oi} , формування циклу регулювання.

Згідно з Вебстером при випадковому прибутті ТЗ до перехрестя тривалість циклу регулювання визначається [1]:

$$T_u = \frac{1,5 \cdot T_n + 5}{1 - Y}, \quad (1)$$

де T_n - сума тривалості проміжних тактів, с; Y - сумарний фазовий коефіцієнт.

Оптимальна тривалість елементів і ЦСС може визначитися за різними критеріями, проте в практиці більшості країн найчастіше використовують умова мінімізації:

$$\bar{t}_3 = \frac{\sum_{j=1}^n (t_{3j} \cdot N_{ij})}{\sum_{j=1}^n N_{ij}}, \quad (2)$$

де N_{ij} - інтенсивність руху по j - й смузі в i - й фазі регулювання, а затримка окремого автомобіля, що рухається в j - му напрямі визначається [1]:

$$t_{3j} = 0,9 \frac{M_{nij} (T_u - t_{oi})^2}{2 \cdot T_u (M_{nij} - N_{ij})}, \quad (3)$$

де M_{nij} - потік насичення j - й смузи в i - й фазі регулювання; t_{oi} - тривалість основного такту i - й фази.

Оскільки мінімум затримки відповідає випадку, коли відношення ефективних частин фаз відповідає відношенню фазових коефіцієнтів, то тривалість t_{oi} в i -й фазі регулювання визначається таким чином:

$$t_{oi} = \frac{(T_u - T_n) \cdot Y_i}{Y} \quad (4)$$

Аналізуючи вирази (1-4) можна зробити наступні пропозиції по оптимізації режимів СФР на ізольованому перехресті:

1) необхідно оптимізувати значення M_{nij} і Y_i , що дозволить частково оптимізувати T_u , t_{oi} , X_{ij} і зменшити \bar{t}_3 ;

2) необхідно мінімізувати значення t_{ni} , що дає можливість зменшити T_u і \bar{t}_3 .

За пропонованою методикою необхідно мінімізувати сумарний час основних тактів, для чого мінімізують $Y = \min$ або забезпечують загальний мінімум затримок при старті потоків. Ступінь складності розрахунків по другому варіанту є досить високою [4].

Для мінімізації Y необхідно мінімізувати по можливості кожен з розрахункових фазових коефіцієнтів Y_i , що можливо за рахунок раціонального розподілу ТП на підходах до перехрестя.

Мінімізація значень t_{ni} , як відзначається в [4] можлива за рахунок визначення оптимальної послідовності чергування фаз і регулювання відстані до далекої конфліктної точки, що призводить до зменшення \bar{t}_3 і ефективнішого режиму регулювання на перехресті в цілому.

Розподіли транспортних потоків на підході до перехрестя

При розгляді можливих варіантів удосконалення моделі розрахунків елементів і ЦСС було відмічено, що необхідно мінімізувати $Y = \min$, що можливо за рахунок раціонального розподілу ТП на підходах до перехрестя. Для цього пропонується розглянути ряд типових умов розподілу ТП на підходах до перехрестя (рис. 1): а) ТП $N_3 = N_4 + N_5$ прямого напрям розподіляється рівно між смугами руху, $N_4 = N_5$; б) ТП N_4 і N_5 розподіляється між смугами так, що $Y_1 = Y_2$; в) ТП N_3 при розподілі між смугами, вирівнює ТП цих смуг, $N_1 + N_4 = N_2 + N_5$.

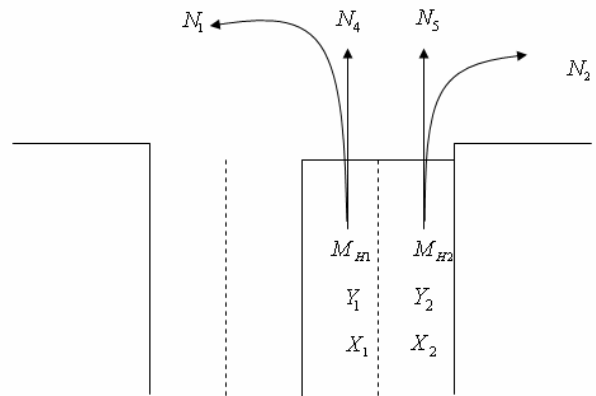


Рис. 1. Схема розподілу ТП на двосмуговому підході

Найцікавішою з перерахованих варіантів є умова б). Для перевірки цієї гіпотези було запропоновано методом математичного моделювання різних варіантів розподілу ТП здійснити оцінку показників якості ОДД на перехресті такими параметрами як \bar{t}_3 і X_{ij} .

Значення Y_i відповідних смуг руху при вказаному розподілі напрямів руху (рис. 1) мають вигляд:

$$Y_1 = \frac{N_1 + N_4}{M_{H1}}, \quad Y_2 = \frac{N_2 + N_5}{M_{H2}};$$

Для умови б) $Y_1 = Y_2$, значення t_{oi} для обох смуг будуть єдиними, тому $X_1 = X_2$ і завантаження смуг буде найбільш рівномірним. Для перевірки цих припущень були проведені розрахунки елементів і ЦСС, \bar{t}_3 і X_{ij} за ідентичними початковими даними відносно усіх трьох умов розподілу ТП.

Для наочності аналізу отриманих результатів на рис. 2 наведена залежність зміни для трьох вибраних умов розподілу ТП. Проаналізувавши результати розрахунків можна відмітити наступне: при другому варіанті розподілу ТП значення \bar{t}_3 є мінімальним; - при цьому вирівнюються значення X_i і найефективніше використовується пропускна здатність підходів до перехрестя. Розрахунки, приведені на графіку, перевірялися для широкого діапазону початкових даних (інтенсивності руху бралися такими, щоб $X_{ij} > 0,5$), і тому представляють загальну картину залежності від розглянутих умов.

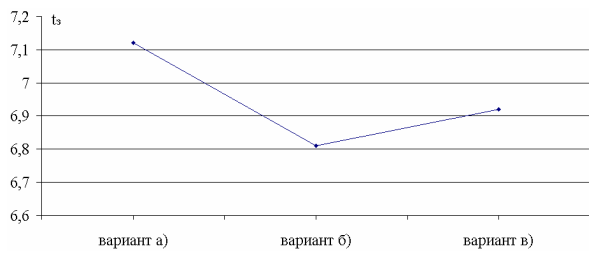


Рис. 2. Залежність зміни \bar{t}_s від умов розподілу ТП по смугах руху

Таким чином, при виборі схеми ОР, доцільно рекомендувати таке розподілення ТП прямого напрямку, при якому забезпечується умова: $Y_1 = Y_2 = \dots$. У зв'язку з цим, виникла необхідність рішення задачі, визначення аналітичних умов розподілу ТП для різних схем підходів до перехрестя. Це дозволить зменшити трудомісткість розрахунків по оптимізації схем СФР і удосконалити проектування ОДР на перехресті. Спочатку були визначені умови розподілу інтенсивностей N_4 і N_5 прямого напрямку N_3 (рис. 1) для двосмугового підходу до перехрестя. Для цього проаналізуємо вираз (4), а також рівняння для визначення M_{H1} :

- потік насичення лівої смуги

$$M_{H1} = 525 \cdot B_{nч1} \cdot \frac{100}{a_1 + 1.75 \cdot b}, \quad (5)$$

де $B_{nч1}$ - ширина лівої смуги руху; a_1 та b - відповідно частини інтенсивностей прямого і лівоповоротного напрямів руху, %:

$$a_1 = \frac{N_4 \cdot 100}{N_1 + N_4}, \quad b = \frac{N_1 \cdot 100}{N_1 + N_4}, \quad (6)$$

- потік насичення правої смуги

$$M_{H2} = 525 \cdot B_{nч2} \cdot \frac{100}{a_2 + 1.25 \cdot c}, \quad (7)$$

де a_2 і b - відповідно частини інтенсивностей прямого і правоповоротного напрямів руху %:

$$a_2 = \frac{N_5 \cdot 100}{N_2 + N_5}, \quad c = \frac{N_2 \cdot 100}{N_2 + N_5}, \quad (8)$$

$B_{nч2}$ - ширина правої смуги руху, м. Відповідно до умови і виразів (5-8) шляхом послідовних перетворень отримуємо значення N_4 і N_5 :

$$N_4 = \frac{B_{nч1} \cdot (N_3 + 1.25 \cdot N_2) - B_{nч2} \cdot 1.75 \cdot N_1}{B_{nч1} + B_{nч2}}, \quad (9)$$

$$N_5 = \frac{B_{nч2} \cdot (N_3 + 1.75 \cdot N_1) - B_{nч1} \cdot 1.25 \cdot N_2}{B_{nч1} + B_{nч2}}. \quad (10)$$

У окремому випадку, коли на підході $B_{nч1} = B_{nч2}$, вирази (9 і 10) спрощуються:

$$N_4 = \frac{N_3 + 1.25 \cdot N_2 - 1.75 \cdot N_1}{2};$$

$$N_5 = \frac{N_3 + 1.75 \cdot N_1 - 1.25 \cdot N_2}{2}.$$

Аналогічним чином визначалися аналітичні умови розподілу ТП для трьохсмугових підходів до перехрестя. Одним з варіантів такого завдання є випадок, при якому інтенсивність прямого напрямку розподіляється по усіх трьох смугах (рис. 3).

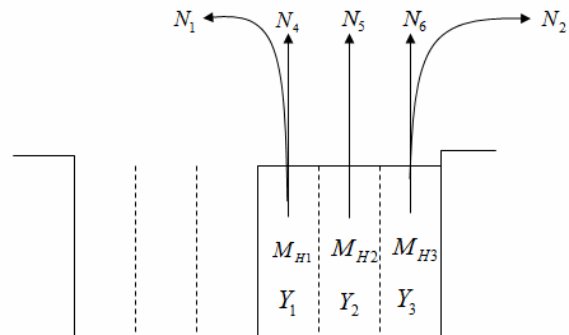


Рис. 3. Схема першого варіанту трьохсмугового підходу

Завдання зводиться до визначення співвідношень між N_4 , N_5 і N_6 , при яких $Y_1 = Y_2 = Y_3$. Оскільки інтенсивність прямого напрямку N_3 визначається

$$N_3 = N_4 + N_5 + N_6, \quad (11)$$

значення для визначення фазових коефіцієнтів лівої смуги залишаються, а для середньої смуги

$$Y_2 = N_5 / M_{H2}, \quad (12)$$

де M_{H2} - ПН середньої смуги, авт./год.

А фазовий коефіцієнт правої смуги

$$Y_3 = (N_2 + N_6) / M_{H3}, \quad (13)$$

де M_{H3} - ПН правої смуги, авт./год.

Потоки насичення і їх складові визначаються:

- ПН середньої смуги $M_{H2} = 525 \cdot B_{nч2}$;

- ПН правої смуги

$$M_{H3} = 525 \cdot B_{nч3} \cdot 100 / (a_2 + 1.25 \cdot c), \quad (14)$$

де $a_2 = N_6 \cdot 100 / (N_2 + N_6)$, $c = N_2 \cdot 100 / (N_2 + N_6)$; $B_{nч3}$ - ширина правої смуги руху, м.

Згідно з умовою $Y_1 = Y_2 = Y_3$, його можна представити в такому вигляді

$$(N_1 + N_4) / M_{H1} = N_5 / M_{H2} = (N_2 + N_6) / M_{H3}. \quad (15)$$

Далі, підставивши в цей вираз значення ПН

$$N_5 / 525 \cdot B_{nч2} = (N_6 + 1.25 \cdot N_2) / 525 \cdot B_{nч3}, \quad (16)$$

і спростивши його, отримаємо

$$\frac{N_4 + 1.75 \cdot N_1}{B_{nч1}} = \frac{N_5}{B_{nч2}} = \frac{N_6 + 1.25 \cdot N_2}{B_{nч3}} \quad (17)$$

Це рівняння з 3 невідомими N_4 , N_5 і N_6 . Для визначення невідомих складемо матрицю-визначник

$$\begin{cases} B_{nч3} \cdot N_4 + B_{nч3} \cdot 1.75 \cdot N_1 = B_{nч1} \cdot N_6 + B_{nч1} \cdot 1.25 \cdot N_2; \\ B_{nч2} \cdot N_4 + B_{nч2} \cdot 1.75 \cdot N_1 = B_{nч1} \cdot N_5. \end{cases}$$

У окремому випадку, коли ширина даних трьох смуг однакова $B_{nч1} = B_{nч2} = B_{nч3}$, рівняння (17) спрощується до такого вигляду:

$$N_4 + 1,75 \cdot N_1 = N_5 = N_6 + 1,25 \cdot N_2. \quad (18)$$

За умови (11) та $N_4 = K$, послідовно визначаємо $N_5 = K + 1,75 \cdot N_1$; $N_6 = K + 1,75 \cdot N_1 - 1,25 \cdot N_2$. (19)

Звідки

$$K = N_4 = (N_3 + 2,25N_1 + 1,25N_2)/3. \quad (20)$$

Таким чином, значення інтенсивності для середньої і правої смуги N_5 і N_6 можливо отримати підстановкою (20) в рівняння (19). Так само були визначені умови вирівнювання фазових коефіцієнтів для ряду інших типових схем пофазного роз'їзду, коли на підході до перехрестя окремі смуги виділяються або для повороту наліво, або направо.

Для реалізації цих умов при жорсткому режимі ЦСС і випадковому прибутті ТЗ на підходах до перехрестя на кожній смузі на відповідній відстані від стоп-лінії нанести лінію, що відповідає довжині черги з однаковим M_n . Для різного рівня інтенсивностей таких ліній різного значення M_n може бути декілька, причому кожний рівень буде визначатися за кольором ліній. ТЗ прямого напрямку для більш швидкого пересування перехрестя будуть займати місце, де відстань між останнім ТЗ в черзі і відповідною лінією M_n буде найбільшою.

Ще одне рішення може бути реалізовано з використанням електронних показників напрямків руху на

підходах до перехрестя. В цьому випадку при установі на дальніх підходах до перехрестя детекторів фіксації ТЗ і їх довжини кількість автомобілів прямого напрямку по смугах можливо регулювати активністю включення електронних показників.

Цей спосіб може бути використано так для адаптивного, так і жорсткого регулювання ізольованого перехрестя.

Висновки

Запропоновані умови для розподілу ТП на перехресті дають можливість вибору раціональної структури пофазного роз'їзду, істотно зменшити об'єм розрахунків при виборі комплексної схеми оптимізації режимів СФР.

Розрахунки розподілу ТП на перехресті потрібні для визначення більш якісної оцінки умів руху, рівня функціонування та вибору найбільш раціональної організації руху і комплексу керуючих дій.

Запропонований підхід є комплексним до оцінки технології управління СС і може бути основою для математичного забезпечення систем автоматизованого проектування світлофорних об'єктів.

Проведені дослідження дозволили розробити алгоритми і програмне забезпечення, які можуть застосовуватися для проектування схем ОДР на перехрестях ВДМ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кременец, Ю.А. Технические средства организации дорожного движения: учебник [для вузов] / Ю.А. Кременец, М.П. Печерский, М.Б. Афанасьев. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 279 с.
2. Капитанов В.Т. Управление транспортными потоками в городах / В.Т. Капитанов, Е.Б. Хилажев. – М.: Транспорт, 1985.-144 с.
3. Левашев А.Г. Проектирование регулируемых пересечений: Учеб. пособие / А.Г. Левашев, А.Ю. Михайлов, И.М. Головных. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 208 с.
4. Важник Ю.П. Разработка и применение нелинейной модели убывания автомобилей из очереди при светофорном регулировании: Автореф. дис. канд. технич. наук. – Минск, 1998. -20 с.

Received (Надійшла) 16.12.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.02.2021

Determination of efficiency of distribution of transport streams on going near the manager crossing

O. Denysenko, A. Kovalenko, S. Pashkevich

Abstract. The article is determination of terms of distribution of transport streams (TS) on approaches of the managed crossing at that complex optimization of loop of the traffic-light signaling (TLS) constructs comes true. **An aim is** determination of terms of distribution of TS according to a select criterion, at that minimization of delays of transport vehicles comes true on crossing and the values of traffic-light loop constructs are optimized. **Research tasks:** determination of criterion and mathematical models of analytical terms of optimal distribution of TS for different charts on going near crossing, at that optimization of delays of transport vehicles and traffic-light loop constructs is provided. **Next results are got.** Some features of decision of task of forming of directions of motion of TS and search of optimal charts of their distribution are exposed on the phases of cycle. A criterion and terms of smoothing of phase coefficients are certain for the row of model charts on phase departure, and also mathematical models of analytical terms of distribution of TS, providing optimization delays of transport vehicles. During the analysis of researches and job performances the algorithm select charts of traffic organization on crossing and sequence of determination of adjusting loop constructs offer in future. **Conclusions.** The got terms for distribution TS on crossing give an opportunity of choice of rational structure on phase departure, substantially to decrease the volume of calculations at the choice of complex chart of optimization of the modes of the traffic-light adjusting. Offered approach estimation of technology of management of the traffic-light signaling is complex and can be the basis for the mathematical providing of computer-aided of traffic-light objects designs. The models of distribution of TS on crossing are needed for determination of more quality estimation of terms of motion, level of functioning and choice of the most rational organization of motion and complex of managing actions. Undertaken studies allowed to work out algorithms and software, that can be used for planning of charts of organization of motion on crossing of street-travelling network.

Keywords: cycle, intersection, delay, distribution, lane.