

Доц. д-р инж. Маджарски Е. М., Ас. инж. Салиев Д. Н., инж. Павлов А. И.
Технически университет – София, България

E-mail: majarski@tu-sofia.bg; E-mail: durhan_saliev@tu-sofia.bg; E-mail: unicorn_hk20000@yahoo.com

Abstract: *The issues considered in this topic are: observe and analyse of complex road junction real state; mathematical model for traffic signal light optimization and improvement of junction state independently of peak hours duration.*

KEYWORDS: TRAFFIC SIGNAL LIGHT OPTIMIZATION METHOD, COMPLEX ROAD JUNCTION, QUEUE LENGT, WAITING TIME ON JUCTION.

1. Увод

Светофарите служат за регулиране на движението на отделни възли по цялата дължина на отсечките или при избрана част от мрежата [1]. За транспортните потоци, които в конфликтните зони пространствено не могат да се разделят, светлинният сигнал въвежда разделяне на отделните потоци.

Въвеждането на светофари може да се базира на няколко критерия: планиране, безопасност, пропускателна способност, пешеходци и особени случаи. Планирането произхожда от това, че всеки важен възел на едно ниво трябва да е предвиден със светлинни сигнали, особено в градски условия. Въпросът за въвеждане на светофари в експлоатация се решава на основата на транспортното натоварване.

Светофарната уредба на кръстовище се оразмерява така, че да пропуска движението през върховия час и да има известен процент резервна пропускателна способност. За целта се изисква да е съставена картограма на транспортното натоварване за върховия час и да е известен процента на годишното натоварване на движението. На тази основа се проектира ситуацията на кръстовището, определят се броя на фазите и тяхната продължителност и продължителността на цикъла, така, че кръстовището да има най-голяма пропускателна способност и движението да се пропуска безопасно и с най-малко задръжки. За постигане на тези цели не конфликтните транспортни потоци с голяма интензивност се пропускат едновременно, т. е. в една и съща фаза. В ситуация кръстовището се проектира колкото е възможно по-компактно (по-малко разстояние между срещуположните стоп-линии), за да се намали времето между фазите (междинното време).

2. Предпоставки и начини за разрешаване на проблема

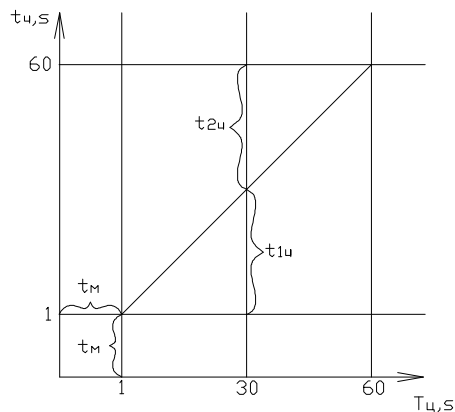
Описаните методи в литературата [1, 2] за оразмеряване на светофарна уредба се основават на интензивността на транспортните потоци измерена в автомобили за час. В практиката се установява, че ползването на такава входна информация често води до грешки и невъзможност за постигане на целите поставени при въвеждането на светлинно сигнално регулиране (пропускане на движението през възела през върховия период и то да се осъществява с осигуряване на известен процент резервна пропускателна способност). Представените основни положения за образуване на фазите, тяхната последователност, определянето на отделните времена и броя на фазите в повечето случаи се оказват неприложими, особено за големи потоци. Реалните условия на движението в градовете изисква метод за определянето на тези елементи, който да дава

възможност за отчитане влиянието на показателите на транспортните потоци за много по-малък интервал от време. Причината за това, е че пиковите периоди в различни райони на града и дори и на съседни кръстовища са с различна продължителност, която в някои случаи е по-малка, а в други по-голяма от един час. Неправилното оразмеряване на светофарната уредба води до струпване на автомобили, образуване на задръствания, трудното отливане на потока и използване на възможностите на пътната мрежа.

Един от начините за решаване тези проблеми е чрез оптимизиране на светофарните цикли с помощта на представения критерий основан на минимално общо време за чакане на кръстовището. Целта е да се оптимизира продължителността на червения сигнал към всеки от потоците, така че да се намалат образуваните опашки от автомобили при по-силно натоварените потоци и това да бъде компенсирано от увеличаването на опашките от автомобили при по-слабо натоварените потоци.

Теоретична постановка на за оптимизиране се представя за едно четирикълноно кръстовище с два потока - поток 1 и поток 2. За всеки от потоците имаме стойност на продължителността на червения сигнал в случая $t_{1ч}$ и $t_{2ч}$, и средна дължина на опашката, която се образува по време на червения сигнал - $L_{1оп}$ и $L_{2оп}$. След като имаме тези два параметъра изчисляваме броя на автомобилите в опашка отнесени за една секунда - I_1 и I_2 , които се получават като отношение на дължината на опашката и времето за червен сигнал при съществуващото положение на разглежданото кръстовище.

Изчисляваме времето за чакане на кръстовището за всеки един възможен случай на разпределение на червените сигнали, като променяме времетраенето им през една секунда в рамките на цикъла на светофарната уредба (фиг. 1).



Фиг. 1 Изменение на времената за червен сигнал на поток 1 и поток 2

Изчисляването на времето за чакане на кръстовището при червен сигнал за поток 1 равен на 1 секунда се извършва по следните формули:

$$(1) t_{2ч} = (t_{1ч} + t_{2ч}) - 1, s$$

$$(2) T_{чак.пот.1} = 1 * I_1, s$$

където $T_{чак.пот.1}$ е времето за чакане на поток 1.

$$(3) T_{чак.пот.2} = 1 * I_2 + 2 * I_2 + 3 * I_2 + .. \\ .. + (((t_{1ч} + t_{2ч}) - 2) * I_2) + (((t_{1ч} + t_{2ч}) - 1) * I_2), s$$

където $T_{чак.пот.2}$ е времето за чакане на поток 2.

$$(4) T_{чак.общо} = T_{чак.пот.1} + T_{чак.пот.2}$$

където $T_{чак.общо}$ е общото време за чакане на кръстовището за съотношение на червените сигнали 1:59.

Формулите са аналогични за всяко следващо изчисление при $t_{1ч} = 2, 3$ и т. н. до $(T_{ц} - t_{ч})$ секунди.

Оптималното решение е това, при което общото време за чакане на кръстовището е минимално.

3. Резултати и дискусия

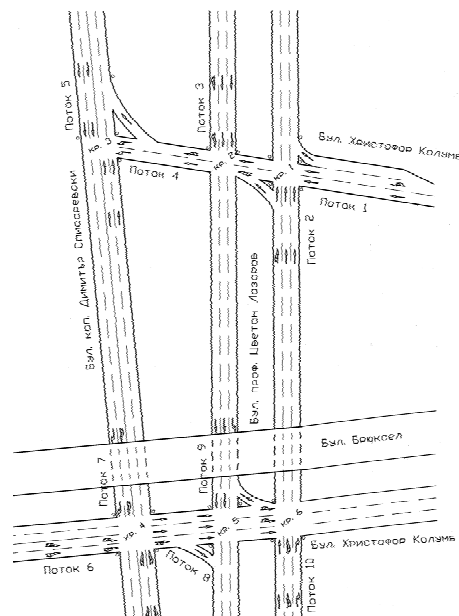
Разгледаният критерий е приложен за сложно кръстовище в гр. София. Това е едно от най-натоварените кръстовища, намиращо се между “бул. Цариградско шосе” и “ж.к. Дружба 1”, поема основния трафик от автомобили от и за “ж.к. Дружба”. Най-натоварената улица е “бул. Хр. Колумб”, която представлява и второстепенна връзка и към Аерогара София.

След проведени наблюдения се установи, че по време на сутрешния и вечерния пикови периоди на денонощието натоварването с автомобили на разглежданото кръстовище е много голямо и при навлизане в кръстовището от към “бул. Цариградско шосе” в посока към “ж.к. Дружба 1” се образува натрупване на автомобили, което блокира нормалната работа на кръстовището.

Разглежданото кръстовище представлява комплекс от шест по малки кръстовища, които са в голяма близост едно до друго. Това обуславя неизменната им взаимозависимост по време на работа. Това налага изследването на всички шест кръстовища, както поотделно, така и общата им работа. Схема на разглежданото кръстовище е показана на фиг. 2. Работата на светофарната уредба е организирана с твърд режим, който не се изменя в продължителност на целия ден.

Изследвани са средни дължини на опашките за всички потоци, светофарните цикли на всички шест кръстовища и интензивността на пропускане на автомобили през кръстовището по потоци.

Средни дължини на опашките включва преброяване на спрелите автомобили при светване на червен сигнал от светофара. Измерва се броят на автомобилите спрели в кръстовището при преминаване от червен към зелен сигнал. Измерването е извършено в периода от 17.03.2008 г. до 28.03.2008 г., в рамките на две работни седмици. То е проведено през работни дни съответно – вторник, сряда и четвъртък и по време на пиковите периоди съответно за сутрешен пик от 8.30 до 9.30 часа, а за вечерен пик от 18.00 до 19.00 часа. Направено е измерване и за не пиков час в периода от 12.05.2008 г. до 17.05.2008 г., между 13.00 и 14.00 часа.



Фиг. 2 Схема на разглежданото кръстовище в кв. “Дружба 1”, гр. София

Средните дължини на опашките за всички 10 потока в кръстовището са показани в таблица 1, таблица 2 и таблица 3:

Сутрешен пик – 8.30 до 9.30 Таблица 1

Поток	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
А-ли	63	4	14	21	9	12	12	18	17	14

Вечерен пик – 18.00 до 19.00 Таблица 2

Поток	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
А-ли	97	4	9	22	6	11	11	18	13	17

Не пиков час – 13.10 до 13.30 Таблица 3

Поток	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
А-ли	19	3	5	14	4	10	3	11	11	10

Сутрешният пик за потоците с направление от “бул. Цариградско шосе” към “ж.к. Дружба” достига до средна дължина на опашката около 100 броя автомобили и е сравнително кратък като период – около 30 минути, докато вечерният пик за същото направление достига до същите стойности като брой автомобили, но е много по-голям от изследвания период и започва значително по-рано от 18.00 часа. Потоците по това направление надвишават многократно, като стойност останалите. От изследването на останалите потоци се установи, че направления съответно от “ж.к. Дружба 1” и “ж.к. Дружба 2” към “бул. Цариградско шосе” са относително малки и постоянни. От измерването през не пиков час се установи, че потоците по всички направления са не натоварени и сравнително равномерни като стойности.

Продължителността на светофарните цикли за първите четири кръстовища е 60 секунди, а за пето и шесто е 66 секунди. Необходимите данни за изследването са продължителността на червените сигнали към всеки от потоците, тъй като от него зависи големината на опашките, които ще се образуват по кръстовищата. Продължителността на червения сигнал към потоците от най-натовареното направление от “бул. Цариградско шосе” към “ж.к. Дружба 1” е съответно 33 секунди за кръстовища 1, 2 и 3, а срещулежащите им потоци с направления от “ж.к. Дружба 1” към “ж.к. Дружба 2” за кръстовища 1, 2 и 3 имат продължителност на червения сигнал – 28 секунди. Основните опашки по време на пиковите часове се образуват именно при кръстовища 1, 2 и 3. При кръстовища 4, 5 и 6 не

се наблюдават натрупване на големи опашки от автомобили, което респективно означава, че съществуващите светофарни цикли работят сравнително добре.

Интензивността на пропускане на автомобили през кръстовището по потоци е измерена като експериментът включва засичане на броя автомобили, които преминават за продължителността на зеления сигнал по потоци. При тези потоци, където нямаме натрупване на големи опашки от автомобили, т.е. нямаме постоянно преминаващи автомобили в продължителността на зеления сигнал, интензивността е измерена като е измерено за колко време образувалата се опашка по време на червения сигнал ще премине през кръстовището при светване на зеления сигнал. Получените стойности за интензивността се измерват в автомобили за секунда и са основа за оптимизацията на разглежданото кръстовище.

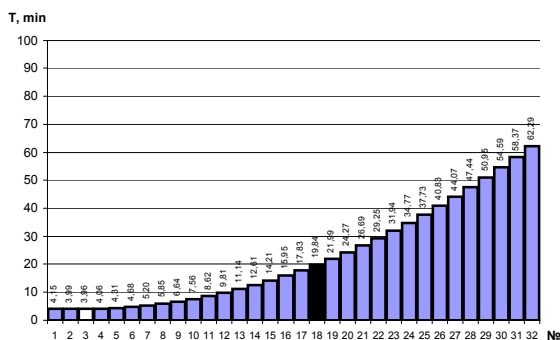
След проведените наблюдения и измервания става ясно, че на разглежданото кръстовище съществуват проблеми с прекомерното натрупване на автомобили при потоците от най-натовареното направление от “бул. Цариградско шосе” към “ж.к. Дружба 1”.

Според разглежданата методология и събраната информация от проведените изследвания за дължините на опашките на потоците и светофарните цикли, можем да оптимизираме всяко от разглежданите шест кръстовища.

Разгледаме сутрешния пик при кръстовище 1. Имаме поток 1 и поток 2, за всеки от потоците знаем продължителността на червения сигнал към него и измерените средни дължини на опашките. С данни се изчислява броя на автомобилите в опашка отнесени за една секунда за всеки от потоците (таблица 4). Чрез прилагане на методологията изчисляваме $T_{\text{чак. общо}}$ за всички възможни съотношения. С получените данни за $T_{\text{чак. общо}}$ се построява графика (фиг. 3). На фигурата с черен цвят е означено съществуващото в момента положение, а с бял цвят оптималното решение. Вижда се, че съществуващото положение в момента е № 18 за което $T_{\text{чак. общо}} = 19.84$ минути, а оптималното решение е № 3, за което $T_{\text{чак. общо}} = 3.96$ минути.

Кръстовище 1, сутрешен пик Таблица 4

	$t_{\text{ч}}, \text{ s}$	$L_{\text{оп}}, \text{ бр.}$	$A\text{-ли}, \text{ бр/с}$
поток 1	33	63,15	1,913636364
поток 2	29	3,7	0,127586207



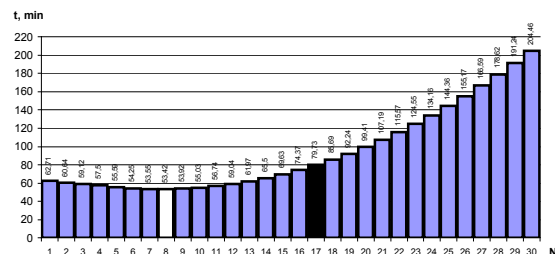
Фиг. 3 Изменение на $T_{\text{чак.общо}}$ за кръстовище 1, сутрешен пик

Аналогично се построяват съгласно методологията и графиките за кръстовище 1 вечерен пик и за останалите кръстовища, съответно за сутрешен и вечерен пик.

Определя се общо решение за шестте кръстовища с цел уеднаквяване на светофарните цикли за всички кръстовища. Така ще се подобри управлението на светофарните уредби и ще позволи по-добра синхронизация на работата им. За да

уеднаквим решението, приемаме че всички кръстовища ще имат продължителност на цикъла 60 секунди.

За да намерим общо решение за всички кръстовища сумираме времето за $T_{\text{чак.}}$ за всички възможни съотношения, за всички разглеждани кръстовища. С получените нови стойности на общо $T_{\text{чак.}}$ за всички шест кръстовища построяваме графика, на която се вижда минималното $T_{\text{чак.}}$ и определя оптималното решение (фиг. 4). Общото $T_{\text{чак.}}$ за един цикъл за съществуващото положение е показана върху фигурата с черен цвят.



Фиг. 4 Изменение на общото време за чакане на шестте кръстовища за сутрешен пик

За да сме сигурни, че полученото решение ще работи в реалните условия на кръстовището, се прави независима от до тук разглежданата методика проверка. От полученото решение - съотношение № 8 - имаме като резултат времената за продължителността на червения сигнал за всеки поток и новите им дължини на опашките, които ще се образуват. Според продължителността на червените сигнали, определяме и продължителността на зелените сигнали. С използването на експериментално установените интензивности на пропускане на автомобили през кръстовищата по потоци проверяваме дали събиращите се опашки при оптимизационното решение физически ще могат да преминават през кръстовището, без да се натрупват. Преминаваме една позиция по графиката на фиг. 4 към моментното съотношение и съответно правим проверка за него. Новото решение респективно има и нови продължителности на червените сигнали към потоците и нови дължини на опашките за потоците. Последователно разглеждаме съотношенията докато стигнем до решение, в което извършваната проверка показва, че няма да има натрупване на опашки или ако има, то ще е приемливо. При проверката на решение № 8 се оказва следното за кръстовище 1 - при основния и второстепенния поток няма да има натрупване на автомобили. За кръстовище две обаче се оказва, че при основния поток ще има възможност да преминат още 30 броя автомобили освен тези в натрупалата се опашка, а при второстепенния поток ще има натрупване на автомобили в течение на времето, като в случая то ще е с 15 броя автомобили на цикъл, което е неприемливо. Същото важи и за останалите кръстовища. Това съотношение дава много добро решение при натоварените направления на влошава работата в не натоварените направления. След преминаваме към разглеждане на следващите съотношения № 9, № 10, № 11, № 12, № 13 и № 14 се оказва, че най-приемливото решение е в съотношение № 12 - при него освен, че имаме много добър ефект в натоварените направления, няма да влошим работата и на никое от другите, по слабо натоварени направления.

Аналогично се процедира и при търсенето на решение за вечерния пик. При избраното решение за вечерния пик имаме добър ефект в натоварените направления и няма да нарушим работата на кръстовищата в останалите направления.

Необходимо е да се избере едно от двете съотношения за сутрешен и вечерен пик, което да е решение за целия ден. Съответно избраното решение е №12, тъй като при него има достатъчно добър ефект по натоварените направления и за двата пика, и съответно няма да се задръсти движението в останалите направления.

След като решението е определено, то ни дава като резултат продължителността на червените сигнали за потоците и техните нови дължини на опашки. Решението показва, че продължителността на червените сигнали към основните потоци е $t_1 = 22 \text{ s}$, а към второстепенните потоци е $t_{2ч} = 40 \text{ s}$.

Необходимо е да се провери как ще работи намереното решение през не пиковите часове на деня. След направената аналогична проверка се установи, че новите времена за червен сигнал няма да нарушат работата на никое от кръстовищата по време на не пиковите часове на деня. Получените резултати показват, че с новите времена за продължителността на червения сигнал работата на кръстовището ще се подобри.

4. Заключение

Разгледания критерий за оптимизиране на времената на фазите на светлинно регулирано кръстовище се основава на показатели на транспортните потоци отнесени за един цикъл на светофарната уредба.

При използване на методиката се позволява оптимизиране на времената на светофарни уредби за период от време независимо от неговата продължителност.

С прилагането на решение се очаква намаляване на общото време за чакане с 56 часа на ден, с което се спестява около 170 литра гориво на ден, намаляват се вредните емисии с около 16% и се намалява загубата на време на пътуващите с около 20000 човекочаса за година.

Предложено е на Столична община и се очаква разрешение за експериментално пренастройване на времената на фазите на изследваното кръстовище с получените, чрез създадения математически модел времена.

5. Литература

1. Сотиров Д. Г Проектиране на пътища. София, Техника, 1983.
2. Тодоров Т. Й. Градоустройство, градско движение и улици. София, Техника, 1982.