

ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ

УДК 656.051

DOI: 10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.30

ОЦІНКА ЗАТРИМОК РУХУ НА РЕГУЛЬОВАНИХ ПЕРЕХРЕСТЯХ МІСЬКИХ ВУЛИЦЬ ІЗ ТРИФАЗНИМ ЦИКЛОМ РЕГУЛЮВАННЯ

Горбачов П. Ф.¹, Макарічев О. В.¹, Шевченко В. В.¹,¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Проведено аналітичну та експериментальну оцінку часу затримки руху у процесі внесення локальних змін в організацію дорожнього руху на регульованому перехресті шляхом розвантаження фази лівоповоротних потоків основної магістралі у трифазному циклі світлофорного регулювання на міській магістралі з центральною роздільною смугою. Використано аналітичний підхід до побудови моделі затримки транспортних засобів на регульованому перехресті, адекватність якої оцінено за допомогою імітаційного експерименту, проведеного у програмному продукті *Vissim*.

Ключові слова: транспортний засіб, регульоване перехрестя, трифазний цикл, час затримки, аналітична модель, імітаційна модель, рівень завантаження перехрестя.

Вступ

Рівень розвитку транспортної системи держави – одна з головних ознак її економічної стабільності та процвітання. Регіональні та міські транспортні системи мають забезпечувати постійний розвиток і функціонування всіх видів транспорту, з метою максимального задоволення транспортних потреб населення та підприємств, що виникають на відповідній території. Це завдання за останнє десятиріччя значно ускладнилося через збільшення рівня автомобілізації населення та частки пасажирських перевезень, що реалізуються особистим транспортом. Це спричиняє перевантаження транспортних магістралей і вузлів, унаслідок чого транспортна мережа в багатьох випадках перестала справлятися з навантаженням. Значно впала середня швидкість пересування транспортних засобів (ТЗ) та різко погіршився рівень транспортного обслуговування учасників руху у великих містах, особливо в години «пік». Це робить актуальною розробку нових заходів щодо покращення умов руху та способів оцінки їх ефективності.

Аналіз публікацій

Головним чином ця проблема стосується регульованих перехресть міських магістралей, що зазвичай обумовлено невідповідністю між їх пропускнуою спроможністю (ПС) та високою інтенсивністю руху (ІР) на підходах. У свою чергу варто зазначити, що регульовані перехрестя є більш безпечними, ніж нерегульовані перехрестя, бо вони розділя-

ють транспортні та пішохідні потоки, що дозволяє уникнути конфліктних ситуацій. Але з точки зору часу проїзду перехрестя та їх пропускнуої спроможності регулювання руху на перехресті забезпечує далеко не найкращі результати внаслідок наявності періодів незавантаженості території перехрестя.

Також відомо, що режими роботи світлофорних об'єктів (СО) на регульованих перехрестях українських міст визначаються сертифікованими проектними організаціями в галузі організації дорожнього руху (ОДР), які керуються чинними в цій сфері нормативно-правовими актами [1–3]. Але ці документи визначають лише найбільш загальні вимоги до СО та надають досить велику свободу проектувальникам у процесі формування циклів світлофорного регулювання.

Найбільш застосованою є методика Вебстера [4], яка є основою як для звичайних розрахунків, так і для програмних продуктів, що формують режими роботи СО, наприклад [5]. Вона ґрунтується на емпіричній залежності середнього часу затримки ТЗ на регульованому перехресті, отриманої Вебстером у далекому 1958 році [6], за допомогою імітаційного моделювання.

Ця залежність неодноразово піддавалася критиці з боку більш сучасних дослідників, наприклад у роботах [7–10], але практично всі ці спроби, що дають результати, подібні до моделі Вебстера, носять емпіричний характер та мають суттєве обмеження у використанні за рівнем завантаження, який має бути значно меншим за одиницю. Отримати нале-

жну аналітичну модель часу затримки ТЗ на регульованому перехресті поки що не вдалося. Мабуть, завдяки цьому та іншим чинникам ставлення до кількісної оцінки планів роботи світлофорних об'єктів з боку замовників в Україні далеко не завжди є пильним. Це, у свою чергу, дуже часто призводить до неуважного проектувальників ставлення під час формування планів роботи СО та, у кінцевому результаті, до неповного використання пропускної спроможності регульованих перехресть.

Мета і постановка завдання

Метою дослідження є аналітична та експериментальна оцінка часу затримки руху ТЗ на регульованих перехрестях, що мають трифазний цикл світлофорного регулювання, за звичайних умов функціонування та на основі розроблених пропозицій щодо покращення умов проїзду перехрестя.

Ефективність альтернативних варіантів функціонування СО в наш час у найкращому випадку оцінюється за допомогою імітаційного моделювання, що зазвичай виявляється цілком достатнім під час розгляду одного об'єкта. Але в цьому випадку, коли існує необхідність поширення результатів дослідження на декілька СО, імітаційного моделювання може виявитися недостатньо, оскільки воно не в змозі відобразити загальні закономірності функціонування об'єкта, а може лише проілюструвати його роботу.

Тому для оцінки наслідків удосконалення циклу світлофорного моделювання необхідне створення аналітичної моделі, яка дозволить отримати об'єктивну оцінку часу затримки ТЗ на перехресті та зрозуміти її закономірності. Як значення затримки приймається її нижня оцінка, тобто час очікування проїзду через перехрестя. У процесі формування аналітичної моделі перехрестя вважається ізольованим, тобто використовується припущення про найпростіший потік ТЗ, що прибувають до перехрестя. Окрім цього, вважається, що під час зеленого сигналу всі ТЗ із черги перед СО встигають проїхати через перехрестя. Така ситуація є характерною для низького рівня завантаження відповідного напрямку руху та є найбільш прийнятною основою для визначення раціональних параметрів світлофорного регулювання [6].

Для досягнення поставленої мети в роботі формується аналітична модель часу очікування проїзду транспортними засобами на регульованому перехресті та розробляється

захід із покращення умов руху для трифазного циклу регулювання. Ефективність заходу оцінюється за допомогою аналітичної моделі та перевіряється експериментально – на імітаційній моделі перехрестя. Додатково обидві, аналітична та експериментальна, оцінки часу очікування проїзду порівнюються із загальновідомою моделлю часу затримки Вебстера [4].

Об'єктом моделювання обрано трифазний СО, розташований на перехресті міської магістралі з центральною розділовою смугою. Такий режим роботи забезпечує максимально комфортні умови виконання транспортними засобами (ТЗ) лівого повороту з магістралі на прилеглі вулиці та безпечно перетинання пішоходами широкої проїжджої частини магістралі у два етапи, з тимчасовим розташуванням на роздільній смузі. У трифазному циклі для кожної із вказаних цілей призначені окремі фази. Цей цикл може вважатися досить вдалим для перехресть міської магістралі з центральною розділовою смугою та другорядних доріг, оскільки він не містить окремих фаз для пішоходів, які завжди переходять вулицю паралельно дозволеному напрямку руху ТЗ.

Критичною для такого варіанта регулювання руху на перехресті є фаза, виділена для лівоповоротного потоку з магістралі на другорядні дороги, яка значно знижує ПС перехрестя для основних напрямків та може стати інструментом покращення умов руху на ньому.

Побудова аналітичної моделі часу очікування проїзду транспортними засобами на регульованому перехресті

На трифазному регульованому перехресті магістралі та другорядної дороги діють три напрямки – α , β , γ -потоків ТЗ, для яких є дозволені або заборонені сигнали світлофорів, два з яких взаємно перпендикулярні руху та один лівоповоротний, γ , з магістралі на другорядну дорогу (рис. 1).

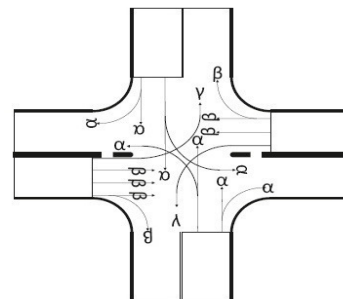


Рис. 1. Типове трифазне регульоване перехрестя міської магістралі з центральною розділовою смугою

У кожному циклі зустрічається по одному зеленому сигналу для кожного напрямку, протягом якого дозволяється рух у ньому, тривалість яких становить T_α , T_β та T_γ відповідно. Інший час у циклі рух транспорту у відповідному напрямку заборонений:

$$\begin{aligned} T^{(\alpha)} &= T - T_\alpha; \\ T^{(\beta)} &= T - T_\beta; \\ T^{(\gamma)} &= T - T_\gamma, \end{aligned} \quad (1)$$

де $T^{(\alpha)}$, $T^{(\beta)}$, $T^{(\gamma)}$ – тривалість сигналу світлофора, що забороняє рух у напрямках α , β та γ відповідно; T – тривалість циклу світлофорного регулювання з урахуванням проміжних тактів.

У цій роботі розглядається третій напрямок руху γ , який зазвичай має одну смугу, а тому всі подальші міркування викладаються саме для односмугового під'їзду до СО. Перехід до багатосмугових під'їздів можливий шляхом переведення інтенсивності відповідного ТП в односмуговий вимір.

Усі ситуації під'їзду ТЗ до перехрестя розділяються на два основних види подій: подія $A = \{\text{ТЗ під'їжджає до перехрестя, потрапляє на дозвільний сигнал і без втрат часу проїжджає через перехрестя}\}$ та подія $B = \{\text{ТЗ під'їжджає до перехрестя на заборонний сигнал і стає } k\text{-м у чергу ТЗ, що очікують дозвільного сигналу, } k \geq 1\}$.

У першому випадку у ТЗ, що рухається через перехрестя, втрат часу немає. А для другого випадку (подія B) необхідно знайти відповідне математичне сподівання часу, втраченого тим ТЗ, яке бажає проїхати через перехрестя.

Для другої події як вихідна інформація виступають тривалість T_3 заборонного сигналу, інтенсивність μ потоку ТЗ до перехрестя в певному напрямку, математичне сподівання Δ часу проїзду ТЗ динамічного габариту в період роз'їзду.

У припущенні, що роз'їзд потоку ТЗ у період дозвільного сигналу триває принаймні доти, доки всі ТЗ роз'їдуться, за умови, що ТЗ, який став k -м ($k \geq 1$) у чергу та очікує дозволеного сигналу світлофора, прибуде туди в момент t від початку забороненого сигналу, $0 < t < T_3$ умовне математичне сподівання втраченого часу таким ТЗ $Z_B(k, t)$ на регульованому перехресті дорівнює

$$\begin{aligned} Z_B(k, t) &= (T_3 - t) + (k - 1)\Delta \\ k &\geq 1, \Delta > 0, 0 < t < T_3. \end{aligned} \quad (2)$$

Для того, щоб знайти умовне математичне сподівання Z_B втраченого ТЗ часу на перехресті під час здійснення події B , необхідно умовну ймовірність $Z_B(k, t)$ помножити на щільність розподілу Ерланга з параметрами μ і k :

$$f(t) = \frac{\mu(\mu t)^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\mu t) \quad (3)$$

для моменту часу t прибуття ТЗ до перехрестя k -м у чергу під час заборонного сигналу та отриманий добуток проінтегрувати за всіма моментами часу t від нуля до T_3 , а потім отримані інтеграли підсумувати по всіх натуральних числах $k \geq 1$:

$$\begin{aligned} Z_B &= \sum_{k \geq 1} \int_0^{T_3} \frac{\mu(\mu t)^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\mu t) Z_B(k, t) dt = \\ &= \sum_{k \geq 1} \int_0^{T_3} \frac{\mu(\mu t)^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\mu t) [(T_3 - t) + (k - 1)\Delta] dt = \\ &= \sum_{k \geq 1} \int_0^{T_3} \frac{\mu(\mu t)^{k-1}}{(k-1)!} (T_3 - t) \exp(-\mu t) dt \\ &+ \sum_{k \geq 1} \int_0^{T_3} \frac{\mu(\mu t)^{k-1}}{(k-1)!} (k - 1)\Delta \exp(-\mu t) dt = \\ &= \mu \int_0^{T_3} (T_3 - t) \sum_{k \geq 1} \frac{(\mu t)^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\mu t) dt \\ &+ \mu \Delta \int_0^{T_3} \sum_{k \geq 1} (k - 1) \frac{(\mu t)^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-\mu t) dt = \\ &= \mu \int_0^{T_3} (T_3 - t) dt + \mu \Delta \int_0^{T_3} \mu t \sum_{k \geq 2} \frac{(\mu t)^{k-2}}{(k-2)!} \exp(-\mu t) dt = \\ &= \left(-\mu \frac{(T_3 - t)^2}{2} \right) \Big|_0^{T_3} + \mu^2 \Delta \frac{t^2}{2} \Big|_0^{T_3} = \\ &= \mu \frac{T_3^2}{2} + \mu^2 \Delta \frac{T_3^2}{2} = \mu T_3 (1 + \mu \Delta) \frac{T_3}{2}. \end{aligned}$$

Відношення сумарного умовного математичного сподівання Z_B втраченого часу ТЗ за цикл, за умови здійснення події B , до середнього числа μT_3 ТЗ, що прибувають за час заборонного сигналу T_3 з інтенсивністю μ на перехрестя, надає:

$$Z_B^{(1)} = \frac{Z_B}{\mu T_3} = (1 + \mu \Delta) \frac{T_3}{2}, \quad (4)$$

умовне математичне сподівання $Z_B^{(1)}$ втраченого одним ТЗ часу, за умови здійснення події B на перехресті. За формулою повної ймовірності безумовне математичне сподівання $Z^{(1)}$ втраченого одним ТЗ часу на перехресті у стаціонарному режимі дорівнює:

$$Z^{(1)} = P(B)Z_B^{(1)} + P(\bar{B})Z_{\bar{B}}^{(1)}, \quad (5)$$

де \bar{B} є подія, протилежна події B .

$$Z_{\bar{B}}^{(1)} = 0 \quad (6)$$

(втрачений час, відсутній під час проїзду без очікування на зелене світло).

З огляду на те, що стаціонарна ймовірність під'їзду до перехрестя на заборонний сигнал дорівнює:

$$P(B) = \frac{T_3}{T}, \quad (7)$$

безумовне математичне сподівання часу $Z^{(1)}$, втраченого одним ТЗ на перехресті:

$$Z^{(1)} = P(B)Z_B^{(1)} + P(\bar{B})0 = P(B)Z_B^{(1)} = \frac{T_3}{T} Z_B^{(1)} = \frac{T_3}{T} (1 + \mu \Delta) \frac{T_3}{2}$$

Кінцевий вираз для середнього часу очікування проїзду через СО виглядає як:

$$Z^{(1)} = \frac{T_3}{T} (1 + \mu \Delta) \frac{T_3}{2}. \quad (8)$$

Залежність (8) дає можливість для оцінки середнього втраченого часу всіма шістьма потоками трьох напрямків руху ТЗ на перехресті. Нехай приведені до однієї смуги інтенсивності шести потоків трьох регульованих напрямків руху α, β, γ на перехресті складають відповідно $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \gamma_1, \gamma_2$ і математичні сподівання проїзду динамічного габариту у відповідних потоках дорівнюють $\Delta(\alpha_1), \Delta(\alpha_2), \Delta(\beta_1), \Delta(\beta_2), \Delta(\gamma_1), \Delta(\gamma_2)$. Тривалість циклу T є сумою тривалості заборонних сигналів:

$$T = T^{(\alpha)} + T^{(\beta)} + T^{(\gamma)}. \quad (9)$$

Оцінка математичного сподівання втраченого часу ТЗ для кожного з шести потоків на перехресті за цикл:

$$\begin{aligned} Z^{(\alpha_1)} &= \frac{T^{(\alpha)}}{T} \alpha_1 T^{(\alpha)} (1 + \alpha_1 \Delta(\alpha_1)) \frac{T^{(\alpha)}}{2}, \\ Z^{(\beta_1)} &= \frac{T^{(\beta)}}{T} \beta_1 T^{(\beta)} (1 + \beta_1 \Delta(\beta_1)) \frac{T^{(\beta)}}{2}, \\ Z^{(\beta_2)} &= \frac{T^{(\beta)}}{T} \beta_2 T^{(\beta)} (1 + \beta_2 \Delta(\beta_2)) \frac{T^{(\beta)}}{2}, \\ Z^{(\gamma_1)} &= \frac{T^{(\gamma)}}{T} \gamma_1 T^{(\gamma)} (1 + \gamma_1 \Delta(\gamma_1)) \frac{T^{(\gamma)}}{2}, \\ Z^{(\gamma_2)} &= \frac{T^{(\gamma)}}{T} \gamma_2 T^{(\gamma)} (1 + \gamma_2 \Delta(\gamma_2)) \frac{T^{(\gamma)}}{2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Оцінка математичних сподівань втраченого одним ТЗ часу для кожного із трьох напрямків руху на перехресті за цикл дорівнює:

$$\begin{aligned} Z_1^{(\alpha)} &= \frac{Z^{(\alpha)}}{T^{(\alpha)}(\alpha_1 + \alpha_2)}, \\ Z_1^{(\beta)} &= \frac{Z^{(\beta)}}{T^{(\beta)}(\beta_1 + \beta_2)}, \\ Z_1^{(\gamma)} &= \frac{Z^{(\gamma)}}{T^{(\gamma)}(\gamma_1 + \gamma_2)}, \end{aligned} \quad (11)$$

де

$$\begin{aligned} Z^{(\alpha)} &= Z^{(\alpha_1)} + Z^{(\alpha_2)}, \\ Z^{(\beta)} &= Z^{(\beta_1)} + Z^{(\beta_2)}, \\ Z^{(\gamma)} &= Z^{(\gamma_1)} + Z^{(\gamma_2)}. \end{aligned}$$

Оцінка сумарного математичного сподівання втраченого часу всіма ТЗ із шести потоків:

$$Z = Z^{(\alpha)} + Z^{(\beta)} + Z^{(\gamma)}. \quad (12)$$

Оцінка математичного сподівання втраченого часу одним ТЗ на перехресті за цикл дорівнює:

$$Z_1 = \frac{Z}{T^{(\alpha)}(\alpha_1 + \alpha_2) + T^{(\beta)}(\beta_1 + \beta_2) + T^{(\gamma)}(\gamma_1 + \gamma_2)}.$$

Оцінка математичних сподівань втраченого часу одним ТЗ для кожного з шести потоків на перехресті за цикл відповідно дорівнює:

$$\begin{aligned} Z_1^{(\alpha_1)} &= \frac{T^{(\alpha)}}{T} (1 + \alpha_1 \Delta(\alpha_1)) \frac{T^{(\alpha)}}{2}; \\ Z_1^{(\alpha_2)} &= \frac{T^{(\alpha)}}{T} (1 + \alpha_2 \Delta(\alpha_2)) \frac{T^{(\alpha)}}{2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_1^{(\beta_1)} &= \frac{T^{(\beta)}}{T} (1 + \beta_1 \Delta(\beta_1)) \frac{T^{(\beta)}}{2}; \\ Z_1^{(\beta_2)} &= \frac{T^{(\beta)}}{T} (1 + \beta_2 \Delta(\beta_2)) \frac{T^{(\beta)}}{2}; \\ Z_1^{(\gamma_1)} &= \frac{T^{(\gamma)}}{T} (1 + \gamma_1 \Delta(\gamma_1)) \frac{T^{(\gamma)}}{2}; \\ Z_1^{(\gamma_2)} &= \frac{T^{(\gamma)}}{T} (1 + \gamma_2 \Delta(\gamma_2)) \frac{T^{(\gamma)}}{2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Оцінка сумарного математичного сподівання втраченого часу ТЗ для кожного з трьох рухів α , β , γ на перехресті за цикл відповідно дорівнює:

$$\begin{aligned} Z^{(\alpha)} &= Z^{(\alpha_1)} + Z^{(\alpha_2)}; \\ Z^{(\beta)} &= Z^{(\beta_1)} + Z^{(\beta_2)}; \\ Z^{(\gamma)} &= Z^{(\gamma_1)} + Z^{(\gamma_2)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Отримані вище оцінки для середнього часу затримки під час проїзду перехрестя по суті є асимптотичними та отримані в умовах, коли повний роз'їзд черги у процесі здійснення лівого повороту є практично достовірною подією. Тоді постає питання про те, яким умовам повинна задовольняти інтенсивність μ потоку, щоб імовірність роз'їзду черги з них протягом одного циклу була не нижчою за величину α , близькою до одиниці.

Для відповіді на це запитання знову розглядається приклад лівого повороту γ як основного елемента, за рахунок якого можливе покращення умов руху на досліджуваному трифазному регульованому перехресті.

Як і раніше, $T^{(\gamma)}$ означатиме тривалість заборонного сигналу світлофора під час здійснення лівого повороту, а μ означає інтенсивність прибуття цих ТЗ до повороту. Нехай $v^{(\gamma)}$ позначає випадкове число ТЗ, які бажають здійснити лівий поворот та з'явилися за час заборонного сигналу світлофора $T^{(\gamma)}$. Добуток $\mu T^{(\gamma)}$ показує величину середнього числа ТЗ, що з'являються для здійснення лівого повороту за час заборонного сигналу $T^{(\gamma)}$, тобто $M(v^{(\gamma)}) = \mu T^{(\gamma)}$. Згідно з прийнятою постановкою задачі випадкова величина $v^{(\gamma)}$ має розподіл Пуассона з параметром $x = \mu T^{(\gamma)}$, оскільки ця випадкова величина виходить унаслідок накладення великого числа рідкісних потоків. Згідно з центральною

граничною теоремою теорії ймовірностей, застосованою до розподілу Пуассона з параметром x є справедливою така оцінка ймовірності події $C = \{\text{Повний роз'їзд черги}\}$:

$$P(C) = P\left(v^{(\gamma)} \leq \mu T^{(\gamma)} + t_a \sqrt{\mu T^{(\gamma)}}\right) \geq a,$$

де $a = \Phi(t_a)$, а $\Phi(y) = \int_{-\infty}^y \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \frac{dt}{\sqrt{2\pi}}$ – функція Лапласа.

Якщо відомо число ТЗ, які можуть роз'їхатися під час здійснення лівого повороту за один цикл

$$n_3 = \frac{T_\gamma}{\Delta(\gamma)}, \quad (15)$$

де $\Delta(\gamma)$ – час проїзду динамічного габариту ТЗ для лівоповоротного руху через перехрестя, то умова на максимальну інтенсивність μ потоку «лівого повороту» виникає з нерівності:

$$\mu T^{(\gamma)} + t_a \sqrt{\mu T^{(\gamma)}} \leq n_3. \quad (16)$$

Підстановка $x = \mu T^{(\gamma)}$ дає нерівність:

$$x + t_a \sqrt{x} - n_3 \leq 0. \quad (17)$$

З нього в позитивній області:

$$\sqrt{x} \leq \frac{\sqrt{t_a^2 + 4n_3} - t_a}{2}, \quad (18)$$

або

$$0 \leq x \leq \left(\frac{\sqrt{t_a^2 + 4n_3} - t_a}{2} \right)^2. \quad (19)$$

Звідси, з урахуванням $x = \mu T^{(\gamma)}$, отримується обмеження на інтенсивність руху:

$$\mu_{\max} \leq \frac{1}{T^{(\gamma)}} \left(\frac{\sqrt{t_a^2 + 4n_3} - t_a}{2} \right)^2, \quad (20)$$

за умови якої справедливою буде залежність (8).

Зазвичай імовірність α практично достовірної події вибирають рівною 0,975 так, що

квантиль t_a , визначений з таблиць функції Лапласа, дорівнює 1,96.

Отримані залежності дозволяють проводити аналітичну оцінку часу очікування ТЗ проїзду перехрестя та визначити транспортні умови, для яких її доцільно розраховувати, але потребують експериментальної перевірки, оскільки побудовані на припущенні про повний роз'їзд черги за дозвільний сигнал світлофора.

Розробка заходу щодо покращення циклу світлофорного регулювання з окремою фазою для лівоповоротних потоків

Обраний як об'єкт дослідження трифазний цикл світлофорного регулювання надає можливості як для експериментальної перевірки точності розробленої аналітичної моделі, так і для покращення умов руху на ньому. Це є дуже важливим, оскільки узагальнює умови перевірки, за рахунок появи ще одного стану об'єкта.

Такий цикл світлофорного регулювання широко застосовується на просп. Науки, що розташований у Шевченківському р-ні м. Харкова. Просп. Науки є однією з основних магістральних вулиць міста, він починається від майдану Свободи, закінчується примиканням до вул. Дерев'янка та є одним із прикладів не зовсім уважного ставлення до параметрів світлофорного регулювання. Довжина проспекту становить 4060 м, на ньому налічується одинадцять СО, п'ять з яких мають трифазні та шість – двофазні цикли світлофорного регулювання. У пікові періоди на світлофорах утворюються досить великі черги як на проспекті, так і на примиканнях до нього, найбільші з яких спостерігаються у ранковий час пік на перехресті просп. Науки з вул. Новгородської.

Оскільки експериментальні дослідження завжди потребують визначення конкретних умов їх проведення, розроблений метод оцінки затримок ТЗ на перехресті доцільно застосувати для лівоповоротних потоків ТЗ із просп. Науки на вул. Новгородську, для яких у світлофорному циклі виділено окрему фазу, яка починається із вмиканням зеленої стрілки наліво.

За умови поточного циклу світлофорного регулювання зміна фази β пропуску прямих та правоповоротних потоків по просп. Науки на фазу γ пропуску лівоповоротних потоків із просп. Науки на вул. Новгородська виконується послідовно, без часткового накладання фази γ на фазу β . Це призводить до достатньо

тривалого періоду незайнятості території перехрестя рухом ТЗ. Для покращення умов руху на перехресті доцільно вмикати зелену стрілку заздалегідь, протягом фази β , для того, щоб ТЗ для повороту наліво могли виїхати на перехрестя раніше та, згідно із правилами дорожнього руху, пропустити ТЗ зустрічного прямого потоку по просп. Науки, а потім продовжити рух безпосередньо після зупинки цього потоку. Це дозволяє збільшити кількість ТЗ, що встигають роз'їхатися за дозвільний сигнал за рахунок ТЗ, які можуть розташуватися на території перехрестя під час фази β . Натурними спостереженнями встановлено, що кількість таких ТЗ становить 4 од. Це значення взято як базову кількість оцінку запропонованого заходу, для якого тепер необхідно розрахувати величини середньої затримки на перехресті.

Для поточного стану світлофорного регулювання тривалість всього циклу становить $T = 78$ с, дозвільний сигнал для обраної фази триває $T_\gamma = 18$ с, заборонний відповідно –

$T^{(\gamma)} = 60$ с. Середня кількість ТЗ, що встигають роз'їхатися за дозвільний сигнал, становить $n_1 = 8$ од. Звідси математичне сподівання часу проїзду ТЗ динамічного габариту в період роз'їзду дорівнює $\Delta(\gamma) = 2,25$ с. У даному випадку умова на максимальну інтенсивність руху в цьому напрямку, розрахована з (19), становить $\mu_{\max} = 0,0675$ с⁻¹, або $\mu_{\max} = 243$ од./год.

Якщо ж дозволити за час жовтого сигналу виїжджати лівоповоротним ТЗ на перехрестя, то в цьому випадку середня кількість ТЗ, що встигнуть роз'їхатися за дозвільний сигнал, може сягнути значення $n_1 = 12$ і, відповідно, максимальна інтенсивність руху зростає до $\mu'_{\max} = 0,1184$ с⁻¹, або $\mu'_{\max} = 426$ од./год, а математичне сподівання часу проїзду динамічного габариту ТЗ в період роз'їзду скорочується до $\Delta'(\gamma) = 1,5$ с.

Тобто, згідно з аналітичною моделлю, запропонований захід майже удвічі підвищує пропускну здатність лівоповоротної фази γ . Для отриманих умов можна за допомогою (8) розрахувати оцінки середнього часу затримки одного ТЗ у разі різних інтенсивностей γ та різних способів організації лівоповоротного руху.

Для аналітичної оцінки часу затримки обрані чотири значення інтенсивності потоку (табл. 1).

Таблиця 1 – Аналітична оцінка часу затримки ТЗ на лівоповоротному напрямку перехрестя просп. Науки та вул. Новгородської

Інтенсивність руху ТЗ, од./год	Варіант циклу, с	
	наявний	пропонований
Низька, $\gamma = 1/2\mu_{\max} = 123,5$	24,83	23,20
Поточна, $\gamma = \mu_{\max} = 243$	26,58	23,99
Проміжна, $\gamma = (\mu_{\max} + \mu'_{\max})/2 = 334,5$	27,90	24,90
Пропонована, $\gamma = \mu'_{\max} = 426$	29,22	25,82

Табл. 1 доводить очевидну, зростаючу зі збільшенням ІР ТЗ, ефективність пропонованого варіанта світлофорного регулювання та надає можливості для експериментальної перевірки аналітичної моделі (13).

Експериментальна оцінка часу затримки ТЗ на регульованому перехресті

Основним засобом проведення експериментальних досліджень у сфері організації дорожнього руху у процесі розгляду локальних об'єктів є імітаційне моделювання. У цій роботі програмним засобом проведення експериментальних досліджень обрано пакет VISSIM, один з найбільш відомих та поширених у світі.

За допомогою цього пакета розроблено імітаційну модель перехрестя просп. Науки та вул. Новгородської (рис. 2).



Рис. 2. Схема перехрестя просп. Науки та вул. Новгородської в середовищі VISSIM

З метою отримання надійних оцінок середнього часу затримки ТЗ імітаційний експеримент проводився для кожної з восьми

ситуацій по 10 разів, з результатів яких потім визначився шуканий середній час затримки (табл. 2).

Таблиця 2 – Експериментальна оцінка середнього часу затримки ТЗ на лівоповоротному напрямку перехрестя просп. Науки та вул. Новгородської

Інтенсивність руху ТЗ	Варіант циклу, с	
	наявний	пропонований
Низька	23,90	22,28
Поточна	30,85	23,34
Проміжна	45,20	24,74
Пропонована	65,32	31,45

Дані табл. 2 також вочевидь ілюструють ефективність пропонованого варіанта світлофорного регулювання, але далеко не у всіх ситуаціях підтверджують коректність аналітичних оцінок середнього часу затримки ТЗ. Відмінності насамперед стосуються перевищення експериментальних оцінок над аналітичними під час зростання інтенсивності транспортного потоку.

Аналіз результатів оцінки часу затримки ТЗ для розглянутого циклу світлофорного регулювання

Відмінності в експериментальних та аналітичних оцінках пояснюються обмеженими умовами використання залежності (13), побудованої на припущенні про повний роз'їзд ТЗ, що накопичилися перед світлофором за дозвільну фазу циклу. Тобто в ній не враховується час очікування можливості проїзду для ТЗ, що не встигли подолати перехрестя за чергову дозвільну фазу. У цьому розрахунку ця умова виконується лише в деяких випадках (табл. 3).

Таблиця 3 – Рівень завантаження лівоповоротного напрямку на перехресті просп. Науки та вул. Новгородської

Інтенсивність руху ТЗ	Варіант циклу, с	
	наявний	пропонований
Низька	0,329	0,219
Поточна	0,658	0,439
Проміжна	0,906	0,604
Пропонована	1,154	0,769

Рівень завантаження розрахований виходячи з фактичної ПС смуги руху, рівної 1600 од./год для поточного стану СО та 2400 од./год для пропонованого варіанта роботи світлофора.

Табл. 3 достатньо повно пояснює різницю між аналітичною та експериментальною оцінками середнього часу затримки ТЗ на регульованому перехресті, оскільки саме зростання рівня завантаження смуги руху призводить до зростання часу очікування можливості проїзду для ТЗ, що не встигли подолати перехрестя за чергову дозвільну фазу. Ці витрати часу має враховувати формула Вебстера [6], тому доцільно розрахувати оцінки витрат часу на затримку ТЗ для визначених умов руху на перехресті просп. Науки та вул. Новгородської також за нею (табл. 4).

Таблиця 4 – Розрахункова оцінка середнього часу затримки ТЗ на лівоповоротному напрямку перехрестя просп. Науки та вул. Новгородської за формулою Вебстера

Інтенсивність руху ТЗ	Варіант циклу, с	
	наявний	пропонований
Низька	26,56	25,38
Поточна	32,11	27,86
Проміжна	66,25	30,63
Пропонована	–	37,69

Формула Вебстера має обмеження щодо використання за рівнем завантаження, який не повинен перевищувати значення 0,9 [6], що й підтверджується даними табл. 4, але це не єдиний її недолік. Виходячи з таблиці 4, формула Вебстера надає дещо завищені значення затримки для всіх рівнів завантаження смуги руху, менших за 1,0, порівняно з експериментальними значеннями.

Виходячи з цих результатів, для повної оцінки ефективності альтернативних варіантів роботи світлофорного об'єкта на даному перехресті, формули Вебстера, так само, як і інших розроблених на цей час залежностей, виявилось недостатньо. Необхідна розробка нових, адекватних аналітичних моделей часу затримки ТЗ на регульованих перехрестях, які можуть враховувати будь-який рівень завантаження смуги руху.

Висновки

Отримані за умови повного роз'їзду черги ТЗ за зелений сигнал світлофора аналітичні оцінки часу затримки транспортних засобів на перехресті підтверджують свою адекватність у занадто обмеженій області значень навантаження смуги руху та не можуть вважатися достатніми для оцінки ефективності

заходів щодо зміни умов руху на регульованих перехрестях.

Для повного охоплення умов роботи СО необхідна розробка адекватних аналітичних моделей часу затримки ТЗ на регульованих перехрестях, які можуть враховувати не лише наближення рівня завантаження до одиниці, а навіть його можливе перевищення.

Імітаційне моделювання процесу функціонування типового трифазного СО міської магістралі з центральною роздільною смугою та другорядної вулиці показало, що запропоноване розширення фази лівоповоротного потоку дозволяє суттєво підвищити пропускну спроможність цього напрямку руху. Це приводить до більш ніж двократного скорочення втрат часу ТЗ на очікування проїзду через перехрестя, за умови високих рівнів навантаження смуги руху, та свідчить про необхідність розробки відповідного інструмента аналітичного моделювання часу затримки ТЗ на регульованих перехрестях для таких умов.

Оскільки покращення умов руху лівоповоротного потоку навряд приведе до значного зростання його інтенсивності, запропонований захід дозволяє підвищити ефективність функціонування всього СО за рахунок вибору раціональної тривалості кожної з трьох фаз окремо та циклу в цілому. Такий же захід можна застосувати на інших перехрестях з аналогічним циклом світлофорного регулювання.

Література

1. ДБН В.2.3-5:2018 Споруди транспорту. Вулиці та дороги населених пунктів. Чинний від 01.09.2018. Київ: Держбуд України, 2018.
2. ДСТУ 4092–2002 Безпека дорожнього руху. Світлофори дорожні. Загальні технічні вимоги, правила застосування та вимоги безпеки. Чинний від 03.06.2002. Київ: Держстандарт України, 2002.
3. Правила Дорожнього руху України (із змінами, внесеними постановою Кабінету Міністрів України від 14.09.2016 № 641. Редакція діє з 29 вересня 2016 р.).
4. Webster F. V., Cobbe B. M. Traffic Signals. Road Research Technical Paper No. 56, HMSQ, London, 1966. 111 p.
5. Traffic-planning software LISA+. URL: <https://www.schlothauer.de/en/software-systems/> (дата звернення: 15.11.2018).
6. Webster F. V. Traffic Signal Settings. Road Research Technique Paper No. 39, Road Research Laboratory, London, 1958. 45 p.
7. Ohno K. Computational algorithm for a fixed-cycle traffic light problem for compound Poisson

- arrivals // Transportation Science, 1978. № 12. P. 29–47.
8. Leeuwaarden, van, J. S. H. Delay analysis for the fixed-cycle traffic-light queue. Report Eurandom. Eindhoven: Eurandom. 2006. Vol. 2006014. P. 672–683.
 9. Akgungor A., Bullen A. Analytical Delay Models for Signalized Intersections. Transportation Frontiers for the Next Millennium: 69th Annual Meeting of the Institute of Transportation Engineers Conference Papers, Las Vegas, Nevada, USA, 1999. 35 p.
 10. Cheng D. X., Messer C.J., Zong Z.T., Liu J. Modification of Webster's Minimum Delay Cycle Length Equation Based on HCM 2000. Paper Submitted to the Transportation Research Board for Presentation and Publication at the 2003 Annual Meeting in Washington, D.C. 2003. 27 p.

References

1. DBN V.2.3-5:2018. (2018) Sporudy transportu. Vulicy ta dorogy naselenych punktiv. [Transport facilities. Streets and roads of settlements]. Effective from 01.09.2018. Kyiv: State Building of Ukraine [in Ukrainian].
 2. DSTU 4092-2002. (2002) Bezpeka dorozhnogo ruhu. Svitofory dorozhni. Zagal'ni technichny vymogy, pravyla zastosuvannya ta vymogy bezpeky. [Road safety. Traffic lights. General technical requirements, application rules and safety requirements]. Effective from 03.06.2002. Kyiv: Gosstandart of Ukraine [in Ukrainian].
 3. Pravila Dorozhnogo Dvizheniya [The Rules of the Road Traffic of Ukraine] (as amended by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 14.09.2016. 641 [in Ukrainian].
 4. Webster F. V., Cobbe B. M. (1966) Traffic Signals. Road Research Technical Paper, HMSQ, London, 56. 111.
 5. Traffic-planning software LISA+. URL: <https://www.schlothauer.de/en/software-systems/> (accessed: 15.11.2018).
 6. Webster F. V. Traffic Signal Settings. Road Research Technique. Road Research Laboratory, London, 1958. P. 39–45.
 7. Ohno K. (1978). Computational algorithm for a fixed-cycle traffic light problem for compound Poisson arrivals, Transportation Science. 12. P. 29–47.
 8. Leeuwaarden, van, J. S. H. (2006) Delay analysis for the fixed-cycle traffic-light queue. Eindhoven: Eurandom. 2006014, P. 672–683.
 9. Akgungor A., Bullen A. (1999) Analytical Delay Models for Signalized Intersections. Transportation Frontiers for the Next Millennium: 69th Annual Meeting of the Institute of Transportation Engineers Conference Papers, Las Vegas, Nevada, USA. 35.
 10. Cheng D. X., Messer C. J., Zong Z. T., Liu J. (2005) Modification of Webster's Minimum Delay Cycle Length Equation Based on HCM 2000. Paper Submitted to the Transportation Research Board for Presentation and Publication at the 2003 Annual Meeting in Washington, D.C. 27.
- Board for Presentation and Publication at the 2003 Annual Meeting in Washington, D.C. 27.
- Горбачов Петро Федорович**¹, д.т.н., професор, зав. каф. транспортних систем і логістики, gorbachov.pf@gmail.com, тел. +38 050-303-26-22,
- Макаричев Олександр Вікторович**¹, д. ф.-м. н., доцент каф. транспортних систем і логістики, amsol2904@gmail.com, тел. +38 098-468-31-97,
- Шевченко Володимир Вадимович**¹, аспірант, каф. транспортних систем і логістики, vvshevchenko.25@gmail.com, тел. +38 093-886-96-59.
- ¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.
- Оценка времени задержки на регулируемых перекрестках городских улиц с трехфазным циклом регулирования**
- Аннотация.* Проведена аналитическая и экспериментальная оценка времени задержки движения при внесении локальных изменений в организацию дорожного движения на регулируемом перекрестке путем разгрузки фазы левоповоротных потоков основной магистрали в трехфазном цикле светофорного регулирования на городской магистрали с центральной разделительной полосой. Использован аналитический подход к построению модели задержки транспортных средств на регулируемом перекрестке, адекватность которой оценена с помощью имитационного эксперимента, проведенного в программном продукте Vissim.
- Ключевые слова:** транспортное средство, регулируемый перекресток, трехфазный цикл, время задержки, аналитическая модель, имитационная модель, уровень загрузки перекрестка.
- Горбачёв Петр Федорович**¹, д.т.н., профессор, зав. каф. транспортных систем и логистики, gorbachov.pf@gmail.com, тел. +38 050-303-26-22,
- Макаричев Александр Викторович**¹, д.ф.-м.н., доцент, каф. транспортных систем и логистики, amsol2904@gmail.com, тел. +38 098-468-31-97,
- Шевченко Владимир Вадимович**¹, аспирант, кафедра транспортных систем и логистики, vvshevchenko.25@gmail.com, тел. +38 093-886-96-59.
- ¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Украина, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.
- Estimation of delay on signalized intersections of urban streets with a three-phase signal**
- Abstract. Problem.* The increase in the level of motorization and in the concentration of vehicles in major cities over the past decade has led to an intensive increase in traffic on the main streets of Ukrainian cities and, as a result, the number of involuntary stops has increased, the speed of traffic flows has decreased, resulting in a cut of the traffic

speed and a significant increase in the level of pollution of the environment. Improving the conditions of road traffic in modern cities requires the application of a whole complex of architectural, planning and technical measures. While the implementation of road, architectural and planning measures requires both a sufficiently long period of time and significant capital investments, traffic management measures can provide an immediate effect, and in some cases these measures are the only means of solving transport problems in conditions of limited territorial resources of cities. **Purpose.** The goal is an analytical and experimental assessment of the delay time at a controlled intersection before and after expanding the phase of the left-turn traffic of the main highway in a three-phase traffic light regulation cycle on a city highway with a central median. **Methodology.** An analytical approach has been used for developing a model of the delay of vehicles at a controlled intersection, the adequacy of which has been assessed with a simulation experiment conducted in the Vissim software environment using as an example the city highway with a central median. **Results.** It has been established that the created analytical dependence of the delay of vehicles at a controlled intersection has a narrow field of use that is only at low levels of loading the lane of traffic. This makes it clear that there is a need to develop the delay models that give an adequate valuation of the delay for all levels of loading. The proposed extension of the phase of the left-turning traffic flow is a common solution for similar traffic lights objects and can significantly

reduce the waiting time. **Novelty.** The developed analytical model is based on generally accepted driving conditions at isolated controlled intersections, but it is completely original. The quantitative estimation of the effectiveness of the given improvement of the traffic light cycle has been obtained for the first time. **Practical value.** The proposed and justified improvement of the traffic light cycle can significantly reduce the delays of vehicles at controlled intersections with a three-phase traffic light control cycle, similar to the one considered in the paper.

Key word: vehicle, signalized intersection, three-phase signal, time delay, analytical model, simulation model, degree of saturation.

Peter Horbachov¹, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Department The Department of Transportation Systems and Logistics Kharkov National Automobile and Highway University, e-mail: gorbachov.pf@gmail.com, tel.: +38 050 303-26-22,

Alexander Makarichev¹, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor The Department of Transportation Systems and Logistics, e-mail: amsol2904@gmail.com, tel.: +38 098 468-31-97,

Vladimir Shevchenko¹, Postgraduate Student, The Department of Transportation Systems and Logistics, e-mail: vvshevchenko.25@gmail.com, tel.: +38 093 886-96-59.

¹Kharkov National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002.