

УДК 656.13

Л.С.Дідківська

Національний транспортний університет
ОБҐРУНТУВАННЯ ОБЛАСТІ ЕФЕКТИВНОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ АДАПТИВНИХ
МЕТОДІВ СВІТЛОФОРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЧЕРЕЗ ОЦІНКУ ПАРАМЕТРІВ
ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ

На базі розробленої оцінки ступеня стаціонарності транспортних потоків методами спектрально-кореляційного аналізу запропоновано спосіб визначення коректного діапазону ефективного функціонування адаптивних методів регулювання дорожнього руху в умовах нестаціонарності процесу надходження транспортних засобів $N(t)$.

Ключові слова: інтелектуальна транспортна система, адаптивні методи регулювання дорожнього руху, рівень стаціонарності, процес надходження транспортних засобів, спектрально-кореляційний аналіз, автокореляційна функція.

Рис 5. Форм 5. Літ 18.

ОБОСНОВАНИЕ ОБЛАСТИ ЭФФЕКТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АДАПТИВНЫХ
МЕТОДОВ СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОСРЕДСТВОМ ОЦЕНКИ
ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

На базе разработанной оценки степени стационарности транспортных потоков методами спектрально-корреляционного анализа предложен способ определения корректного диапазона эффективного функционирования адаптивных методов регулирования дорожного движения в условиях нестационарности процесса поступления транспортных средств $N(t)$.

Ключевые слова: интеллектуальная транспортная система, адаптивные методы регулирования дорожного движения, уровень стационарности, процесс поступления транспортных средств, спектрально-корреляционный анализ, автокорреляционная функция.

JUSTIFICATION FOR THE FIELD OF EFFICIENT FUNCTIONING OF THE ADAPTIVE
METHODS FOR THE TRAFFIC LIGHT REGULATION THROUGH ASSESSMENT OF
TRAFFIC FLOW PARAMETERS

IT development with big cities glutted by vehicles on the background creates preconditions for implementation of the intellectual transport systems for traffic regulation. At the controlled crossings level the assignment of such systems is provided by means of flexible (adaptive) regulation.

The newest technologies for traffic light signaling are developed in Ukraine. These are implemented on the modern hardware and contain closed contours of automatic control through vehicle detectors, video monitoring, etc. However, such equipment costs are quite high, so these facilities introduction requires justification and explicit application criteria.

Currently, the traffic management at road network crossings is done mainly by strict regulation. At the same time, the present technical possibilities of serial industrial facilities far exceed functioning traffic control technologies in terms of its nonstationarity. Wider introduction of the newest flexible technologies is slowed by the lack of modernized standards and criteria for the range of their effective functioning. Based on the developed assessment of the vehicle flows stationarity degree using spectral correlation analysis an approach is offered to determine the correct range of the effective functioning of the adaptive traffic control methods in terms of vehicles proceeds nonstationarity.

Keywords: intellectual transport system, adaptive traffic control methods, stationarity level, vehicles proceeds process, spectral correlation analysis, auto-correlation function.

Розвиток інформаційних технологій на тлі перенасичення великих міст транспортними засобами створює передумови для впровадження інтелектуальних транспортних систем регулювання транспортних потоків. На рівні регульованих перехресть виконання завдання таких систем забезпечується гнучкими (адаптивного) методами регулювання (ГМР).

В Україні розробляються новітні технології світлофорної сигналізації, що реалізуються на сучасній комп'ютерній базі й містять замкнені контури автоматичного управління завдяки детекторам транспорту, відеомоніторингу та ін. Проте, вартість такого обладнання досить висока, тому впровадження цих засобів потребує обґрунтування і чітко сформульованих критеріїв застосування.

Актуальність теми. Під час проектування доріг, збудованих десятиліття тому, не було враховано показників сучасного приросту кількості транспортних засобів, що призвело до ускладнення транспортної ситуації в великих містах з кількістю населення понад сто тисяч. Назрівання аналогічної ситуації відбувається і в містах, кількість населення яких становить десятки

тисяч. Перед жителями найбільших міст така проблема постала десятиліття тому, і на мінімізацію її негативних наслідків спрямовані передові технології та новітні розробки у галузі науки і техніки.

Як в Україні, так і в усьому світі розвиток і розширення наявних транспортних шляхів в умовах агломерації, а також з екологічної і фінансової причин, можливе лише з певними обмеженнями. Альтернативою розширення вулично-дорожньої мережі є зменшення кількості транспортних засобів на дорогах шляхом підвищення вартості транспортних зборів і податків. Такі заходи можуть позначитися на якості життя населення і мати непередбачувані наслідки для економіки в цілому.

Водночас підвищити ефективність перевезень можна за допомогою технологічних заходів. Відправними точками для цього є оснащення транспортних засобів сучасною інформаційною технікою і впровадження новітніх технологій у процес організації дорожнього руху. Гнучкі методи світлофорного регулювання в умовах роботи регульованого перехрестя слід віднести саме до таких заходів. Встановлено за доцільне дослідити нормативне і практично-технічне поле функціонування «інтелектуальних» транспортних систем [6], що базуються на засадах адаптивного регулювання транспортними потоками.

Цій проблемі присвячено праці багатьох вітчизняних та іноземних науковців: Е.В. Гаврилова [16], Д. Дрю [3], В.І. Єресова [4, 5], Ю.А. Кременця, М.П. [7], Печерського [7,10], В.П. Поліщука [16], Д.С. Самойлова [14], В.В. Сільянова [15], С. Халберта, Б.М.[13], Четверухіна [9,17,18] та ін.

Наявні методи регулювання дорожнього руху (здебільшого — програмні) не враховують рівень стаціонарності його параметрів, що природно впливає на якість світлофорного регулювання. До того ж широко використовувані критерії якості управління, такі як непродуктивні транспортні затримки, довжина черги перед стоп-лінією, кількість транспортних засобів у черзі, також не враховують рівень стаціонарності параметрів транспортних потоків. На практиці застосовуються принципи представлення світлофорних об'єктів як систем масового обслуговування, що працюють в сталому режимі за усереднених характеристик потоків. Експериментальні дослідження, навпаки, доводять, що процес надходження транспортних засобів є нестаціонарним.

Метою дослідження є підвищення ефективності регулювання дорожнього руху шляхом дослідження його закономірностей і обґрунтування умов доцільності впровадження "інтелектуальних" транспортних систем на регульованих перехрестях вулично-дорожньої мережі.

Сьогодні управління транспортними і пішохідними потоками на перехрестях здійснюється переважно методами жорсткого (програмного) регулювання. Параметри управління (уставки) світлофорного регулювання при цьому принципово не можуть змінюватись у процесі регулювання. Водночас відомо, що параметрам як транспортних, так і пішохідних потоків притаманна властивість нестаціонарності.

Режими жорсткого програмного світлофорного регулювання розраховуються, з огляду на умови максимального (пікового) завантаження перехрестя, при цьому

$$x_1 = x_2 = \dots = x_n = x_0 = \text{const}, \quad (1)$$

де x_0 – оптимальний ступінь насичення фаз перехрестя.

Оптимальності режиму світлофорного регулювання буде досягнуто за умови, коли за кожний цикл надходитиме однакова кількість автомобілів:

$$N_1(t) = N_2(t) = N_3(t) = \dots = N_m(t). \quad (2)$$

Твердження про нестаціонарність потоків ставить під сумнів виконання умови (2), а отже і (1), та, як наслідок, ефективність жорстких методів регулювання.

Виконання умови (2) стає можливим лише в разі застосування принципу гнучкого (адаптивного) регулювання, в основу якого покладено зворотний зв'язок з транспортним потоком. Він реалізується за допомогою детекторів транспорту, що забезпечують автоматичний моніторинг характеристик транспортного потоку (інтенсивності, щільності, інтервалів руху тощо).

Робоча гіпотеза полягає у тому, що в діапазоні реальних завантажень зі зростанням завантаження напрямку (смуги руху) випадковий процес надходження транспортних засобів $N(t)$ стає стабільнішим (підвищується рівень стаціонарності). Інакше кажучи, стабільність надходження

автомобілів на напрямки перехрестя залежить від рівня його завантаження, до того ж, при низьких завантаженнях стабільність низька, а при високих, навпаки, – висока.

У результаті аналізу наявних рекомендацій із упровадження гнучких методів регулювання виявлено відсутність врахування рівня стаціонарності параметрів транспортних потоків. Отже, постає концептуальна задача – окреслити зону ефективного застосування технологій світлофорного регулювання залежно від умов і параметрів руху. На формування позиції автора в питанні функціонування гнучких методів регулювання вплинули роботи В.В. Сільянова, М.П. Печерського, Ю.А. Кременця, П.В. Рушевського, В.П. Поліщука, В.І. Єрсова, Б.М. Четверухіна, Є.Г. Ногової та ін.

Здійснено оцінювання стану транспортного потоку на основі низки показників, що характеризують його стан якісно та кількісно. Базою для проведення аналізу слугував набір статистичних даних, одержаних шляхом спостереження за транспортними потоками.

Було здійснено перевірку нормальності статистичних сукупностей з позитивним результатом за наближеним критерієм Шапіро – Вілка (W – критерій). Застосування регресійного аналізу дало змогу встановити зв'язок обраних параметрів із коефіцієнтом завантаження дороги рухом Z . [2] Зведений графік на рисунку 1 дозволяє комплексно проаналізувати обрані параметри, що характеризують стан транспортного потоку.

У ході дослідження процесу $N(t)$ на основі рівня завантаження рухом Z стало відомо, що в діапазоні завантажень $0 < Z < 1$ для незбурених транспортних потоків (тобто таких, що є вільними від впливу об'єктів вулично-дорожньої мережі) коефіцієнт стаціонарності інтенсивності транспортного потоку не досягає критичного значення $\alpha_{дон}$, а статистичні характеристики (математичне очікування і дисперсія) показали свою залежність від часу. Водночас результати прогнозування за допомогою лінії тренду вказують на досягнення коефіцієнтом стаціонарності значення критерію стаціонарності: $\alpha = \alpha_{дон} = 0,05$ за умови, що $Z = 1$. Тобто, можна очікувати, що процес $N(t)$ за цих умов буде стаціонарним, отже умови (1) і (2) виконуватимуться. Відповідно жорсткі методи регулювання будуть не менш ефективними, ніж гнучкі методи, за вказаного рівня завантаження.

Коефіцієнт варіації інтенсивності V_N та рівномірності надходження транспортних засобів f принципово можна використовувати для характеристики рівня стаціонарності незбурених транспортних потоків. Одержана залежність $\alpha(v_N)$ з більшою чутливістю характеризує рівень стаціонарності.

На наступному етапі вирішення задач дослідження було приділено увагу встановленню зв'язків між параметрами, що характеризують стан транспортного потоку (коефіцієнт варіації інтенсивності v_N , рівномірності f , стаціонарності α) та його спектрально-кореляційними характеристиками задля визначення швидкості зміни процесу $N(t)$.

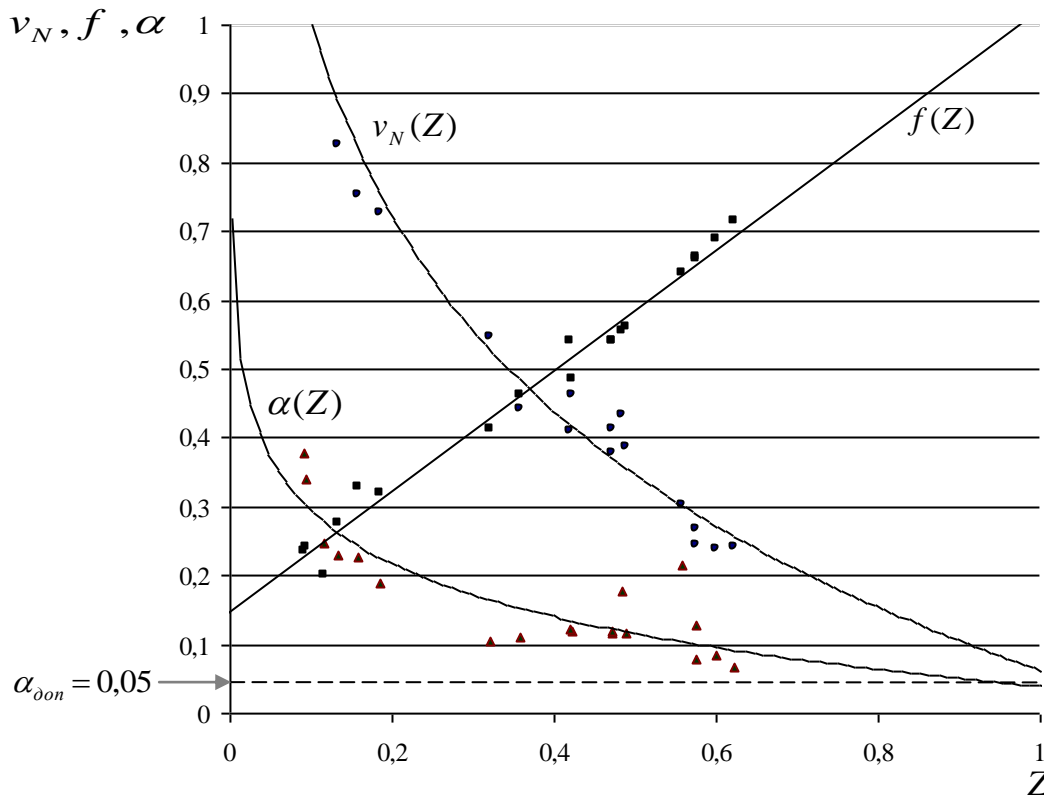


Рис. 1 Графіки залежності коефіцієнта варіації v_N , коефіцієнта рівномірності f та коефіцієнта стаціонарності α від рівня завантаження рухом Z

Для удосконалення ж оцінювання стаціонарності процесу надходження транспортних засобів $N(t)$ було застосовано елементи спектрально-кореляційного аналізу [8. Оскільки, за класичним визначенням, випадковий процес $X(t)$ називається стаціонарним у випадку, коли його кореляційна функція не залежить від поточного часу, розраховано і проаналізовано поведінку автокореляційної функції [1, 12]:

$$R_x(t_1; t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x_1 x_2 f(x_1; x_2; t_1; t_2) dx_1 dx_2, \quad (3)$$

де t_1 і t_2 – моменти часу, між якими визначається статистичний зв'язок випадкових величин x_1 та x_2 .

Для розрахунку дискретних процесів використовується формула

$$R_x(t_1; t_2) = M \{x(t_1)x(t_2)\} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t_1)x(t_2), \quad (4)$$

де N – кількість реалізацій випадкового процесу;

$x(t_1)$; $x(t_2)$ – значення $x(t)$ в моменти часу t_1 і t_2 , що відраховуються від початку кожної реалізації.

Позначивши t_2 як суму $t_1 + \tau$, формулу (4) можна записати у вигляді

$$R_x(t; \tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t)x(t + \tau). \quad (5)$$

Вираз (5) характеризує статистичний зв'язок значень випадкового процесу $N(t)$ в будь-який поточний момент часу t , що відраховується від початку кожної реалізації зі значеннями цього

процесу в перерізі, віддаленого на час τ (у межах цього дослідження було обґрунтовано і прийнято тривалість $\tau = 10 \text{ с}$).

Як параметр автокореляційної функції, що характеризує тривалість зв'язку між значеннями випадкової величини в найближчі моменти часу, використано період її спаду τ_{cn} (вимірюється у кількості періодів τ).

На рисунку 2 зображено функції $R_x(t; \tau; Z)$, розраховані за формулою (5) і пронормовані з метою порівняння швидкості спаду кореляційних функцій, що оцінюється величиною τ_{cn} .

З рисунку 2 видно, що зі збільшенням завантаження вулично-дорожньої мережі міст рухом сімейство кривих функції кореляції і дотичних до них вказують на подовження тривалості зв'язку між значеннями випадкової величини в найближчі моменти часу, а отже, і підвищення рівня стаціонарності процесу $N(t)$. З погляду обґрунтування доцільності впровадження гнучких методів світлофорного регулювання це підтверджує некоректність наявних рекомендацій і свідчить на користь робочої гіпотези.

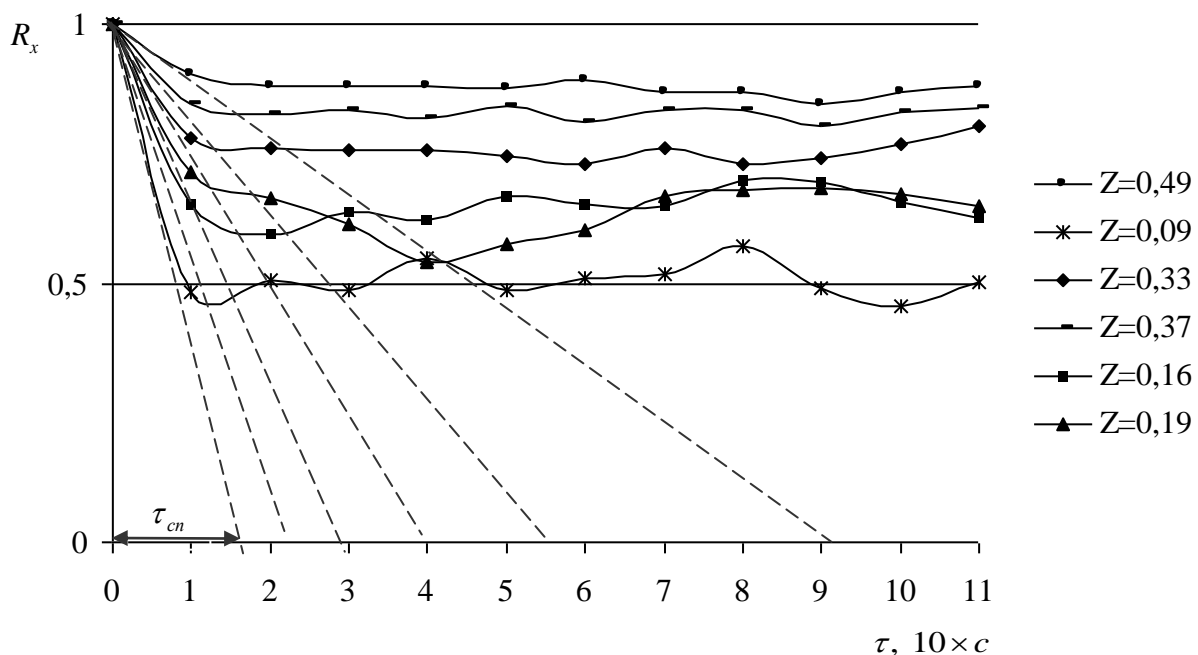


Рис. 2. Графіки автокореляційної функції випадкового процесу $N(t)$
 Подальші дослідження дали змогу встановити залежності, наведені нижче на рисунку 3.
 $\tau_{cn}, 10 \times c$

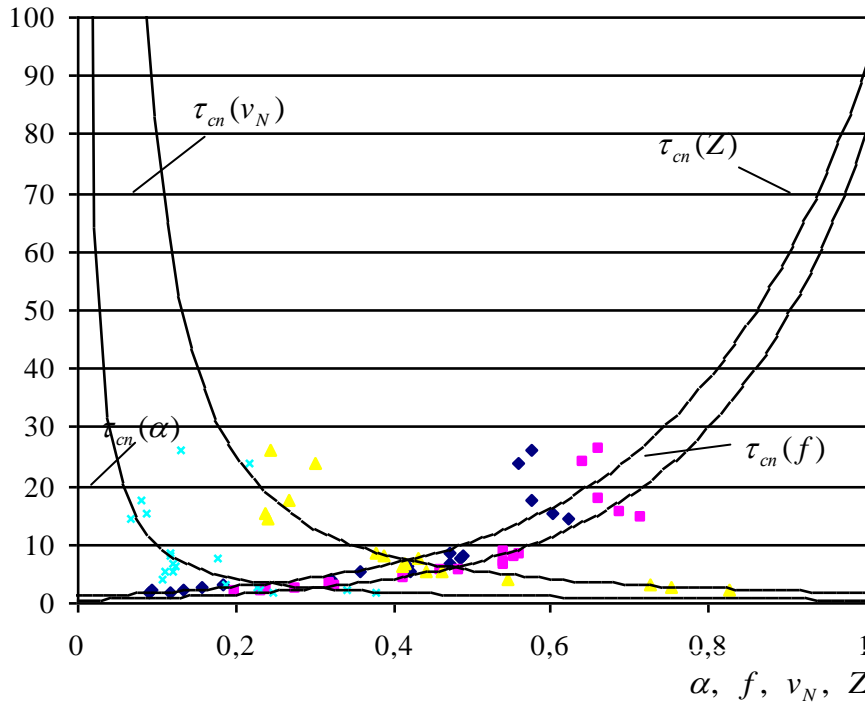


Рис. 3. Залежність періоду спаду автокореляційної функції τ_{cn} від коефіцієнта завантаження рухом Z , коефіцієнта стаціонарності α , коефіцієнта рівномірності f , коефіцієнта варіації v_N

Отримані дані дозволяють оцінювати динаміку транспортного потоку на основі інформації від детекторів транспорту і оперативних розрахунків параметрів, що характеризують випадковий процес $N(t)$. За усередненими показниками за час моніторингу характеристик транспортного потоку t_m , що пропонується розраховувати, беручи до уваги прогнозований період спаду τ_{cn} , визначатимуться оптимальні тривалості фаз на кожному з напрямків.

Це означає, що при функціонуванні адаптивних (гнучких) методів регулювання руху тривалість фаз для кожного напрямку руху за невисоких значень коефіцієнта завантаження рухом буде змінюватися щоразу, а в разі стабілізації характеру надходження транспортних засобів імовірність повтору тривалостей фаз для напрямку зростатиме. Значення тривалостей фаз у цьому випадку буде близьким за значенням до розрахованого для жорстких методів регулювання. Натомість, якщо використовувати жорсткі методи регулювання за відносно малих значень Z , фази будуть мало насиченими, імовірність роботи перехрестя в умовах «ніхто нікуди не їде» зростає зі зменшенням інтенсивності руху.

Спектрально-кореляційний аналіз дав змогу встановити кількісні залежності між рівнем завантаження рухом Z , коефіцієнтом варіації інтенсивності v_N , рівномірності f , стаціонарності α і періодом спаду автокореляційної функції τ_{cn} . Висновки про підвищення рівня стаціонарності зі зростанням завантаження проїзної частини рухом, підтверджено на базі аналізу статистичних даних, оскільки в разі зростання інтенсивності руху кореляційний зв'язок між кількісними характеристиками процесу $N(t)$ в фіксовані моменти часу t_1 і t_2 , де $t_2 = t_1 + \tau$, підсилюється. Серед досліджених параметрів, що характеризують стан процесу $N(t)$, коефіцієнт варіації v_N найсильніше корелює з величиною спаду автокореляційної функції τ_{cn} і може бути використаний для її характеристики і прогнозування.

Здійснено аналіз наявних методик щодо застосування їх до техніко-економічних розрахунків доцільності впровадження гнучких технологій світлофорного регулювання на ізольованих перехрестях в умовах нестаціонарності параметрів, що характеризують стан транспортного потоку.

Оцінювання техніко-економічної ефективності здійснене на прикладі моделювання роботи чотиристороннього перехрестя в умовах однорядного руху в кожному напрямку з сумарною інтенсивністю перехрестя від 338 авт./год до 2317 авт./год при ідеальному потоці насичення під час проходження стоп-лінії. Ідеальний потік насичення відповідає значенню годинної інтенсивності на рівні $N_{ідеал} = M_{n ідеал} = 1860$ авт./год.

Рекомендації з упровадження того чи іншого виду світлофорного регулювання зазвичай подаються з огляду на співвідношення величин інтенсивностей на головній та другорядній дорозі. Пропонується розглядати транспортні засоби як рівноправні й визначати якість управління транспортними потоками на основі величини сумарної або середньої затримки транспортних засобів на перехресті та їх вартості.

Для реалізації гнучких методів регулювання транспортних потоків пропонується алгоритм порівняння концентрації транспорту на напрямку з зеленим сигналом з затримкою на напрямку з червоним сигналом, побудований за принципом мінімізації затримок.

Техніко-економічний аналіз дав змогу розробити методику прийняття рішення під час упровадження гнучких методів регулювання залежно від значення середньодобової інтенсивності руху на перехресті й вартості проекту, з врахуванням вартості річного обслуговування системи (рисунок 4).

Умовні позначення до рисунку 4:

- $N_{П}$ – середньодобова інтенсивність (як сумарна для всіх напрямків руху);
- $\sum M_n$ – максимальна сумарна кількість транспортних засобів, що їх може пропустити перехрестя за годину роботи;
- $B_{ГМР}$ – допустимий рівень вартості проекту, грн.;
- $K_{б доп}$ – балансова вартість технічних засобів, що реалізують принципи гнучких методів регулювання руху, грн.

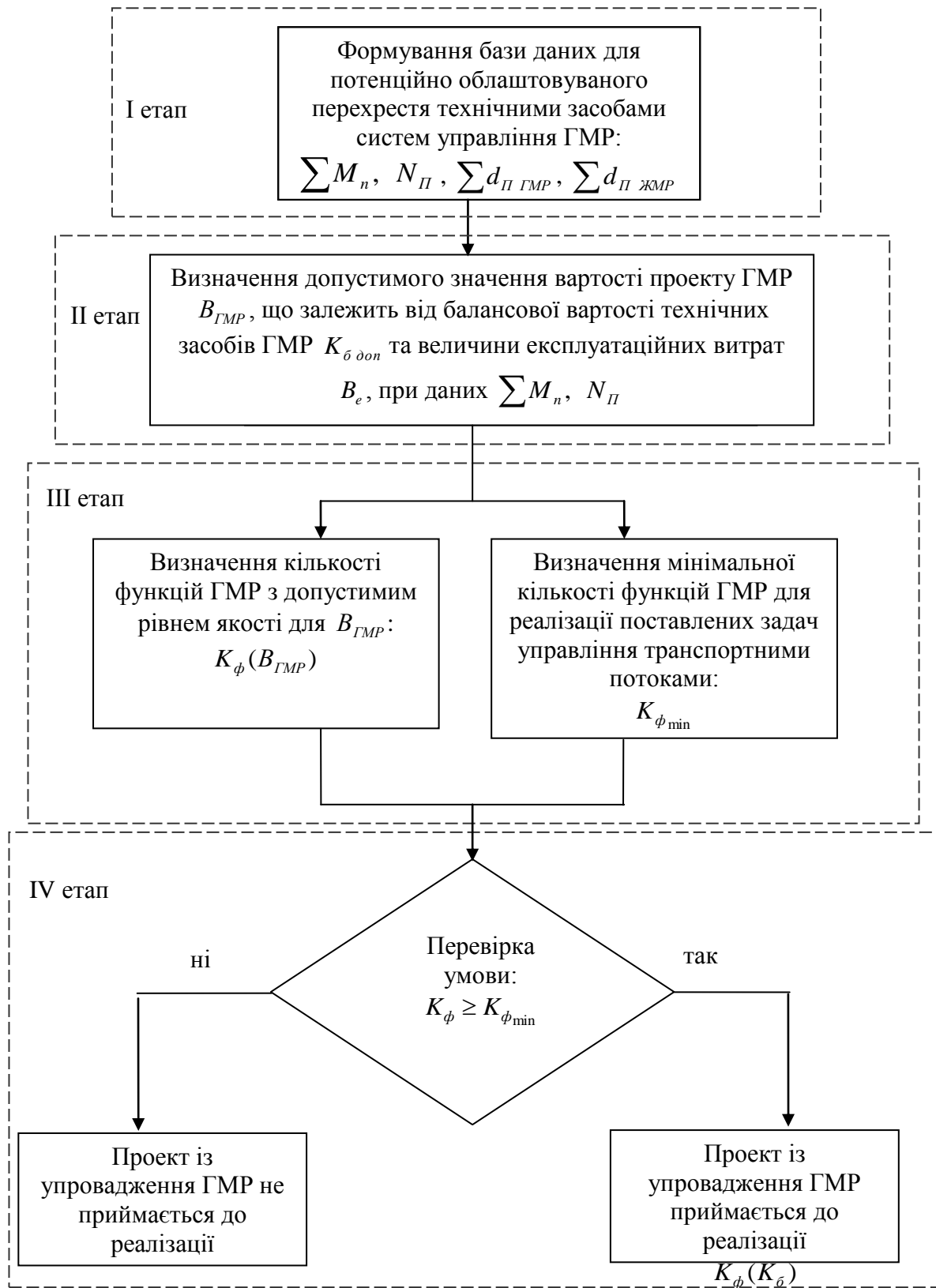
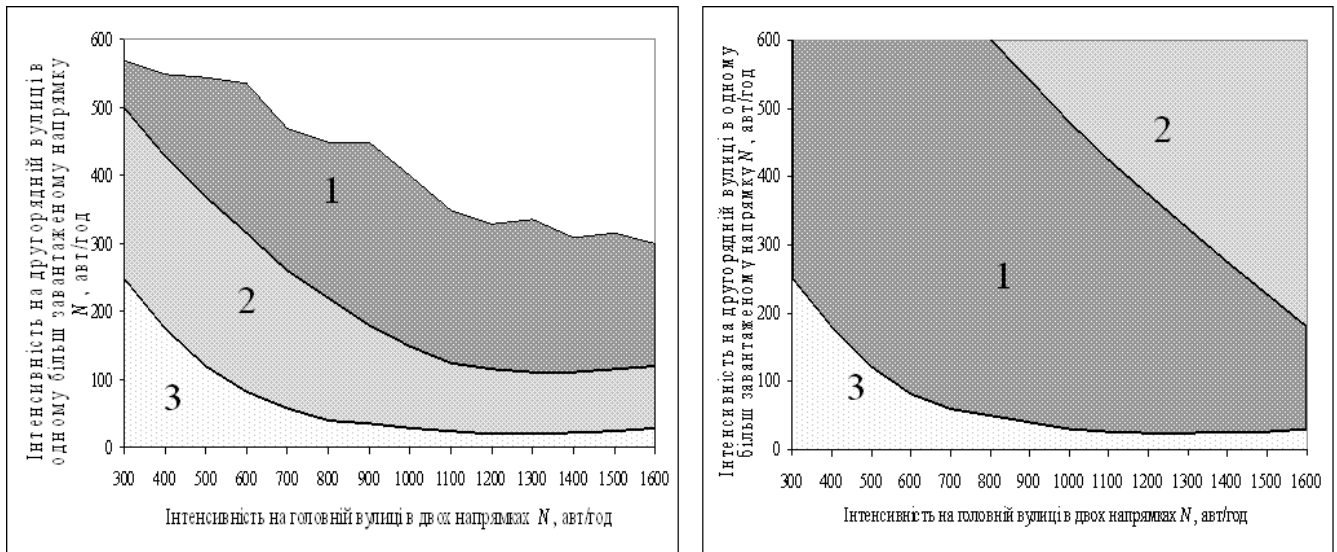


Рис. 4. Методика прийняття рішення про впровадження проекту з використанням гнучких методів регулювання дорожнього руху на регульованому перехресті

В результаті моделювання роботи світлофорного об'єкту з використанням адаптивних (гнучких) методів регулювання дорожнього руху та порівняння його техніко-економічних показників з

показниками функціонування того ж об'єкта за умов жорсткого світлофорного регулювання області доцільного впровадження технологій матимуть іншу послідовність. Рисунок 5 ілюструє зміну рекомендацій по впровадженню локальних методів регулювання [11, 12] з врахуванням нестаціонарної поведінки транспортних потоків.



а – чинні рекомендації ; б – рекомендації, що пропонуються на базі даної роботи

Рис. 5 – Области ефективного використання локальних методів регулювання по мінімальному завантаженню перехрестя протягом 8 годин з найбільш інтенсивним рухом транспорту

- 1 – рекомендована область для гнучких методів регулювання;
 - 2 – рекомендована область для жорстких методів регулювання;
 - 3 – нерегульована область.
- Кількість смуг на обох вулицях (1×1)

ВИСНОВКИ

У ході дослідження вирішені та обґрунтовані коректні діапазони ефективного застосування гнучких методів в умовах нестаціонарності параметрів транспортного потоку. Перспективним здається дослідження впливу інших умов, в яких функціонують новітні технології організації дорожнього руху, на техніко-економічні показники.

1. Наразі регулювання транспортних потоків на перехрестях вулично-дорожньої мережі здійснюється переважно жорсткими методами. Водночас на базі новітніх технологій є можливість здійснювати світлофорне регулювання з урахуванням рівня стаціонарності параметрів транспортного потоку. Питання поширення таких технологій гальмуються відсутністю модернізованих нормативів і критеріїв щодо їх ефективного функціонування.

2. Доведено, що коефіцієнт варіації інтенсивності v_N та коефіцієнт рівномірності надходження транспортних засобів f можуть використовуватися для оцінювання стаціонарності транспортних потоків. Встановлено характер залежностей $\alpha(v_N)$, $\alpha(f)$. При цьому рівень стаціонарності процесу $N(t)$ підвищується зі зростанням завантаження рухом Z . Результати регресійного аналізу вказують на досягнення коефіцієнтом стаціонарності значення критерію стаціонарності, тобто $\alpha = \alpha_{дон} = 0,05$, за умови, що $Z \rightarrow 1$.

3. Шляхом застосування спектрально-кореляційного аналізу для оцінювання дорожнього руху встановлено зв'язок між властивостями автокореляційної функції та параметрами ТП: коефіцієнтом

варіації інтенсивності v_N ; коефіцієнтом рівномірності f ; коефіцієнтом стаціонарності α ; коефіцієнтом завантаження рухом Z .

4. Результати оцінювання процесу надходження транспортних засобів методами спектрально-кореляційного аналізу довели доцільність використання автокореляційної функції в якості характеристики швидкості зміни інтенсивності руху, а також при прогнозуванні її значення.

5. На базі запропонованого оцінювання рівня стаціонарності транспортних потоків методами спектрально-кореляційного аналізу розроблено методику визначення коректних діапазонів ефективного застосування гнучких методів регулювання на ізольованих перехрестях вулично-дорожньої мережі міст, що впроваджена в Центрі безпеки дорожнього руху та автоматизованих систем при МВС України.

6. Проведений техніко-економічний аналіз доводить переваги і доцільність впровадження гнучких методів регулювання в окресленій області ефективного застосування світлофорної сигналізації. Її конфігурація та розширення на протигагу показникам, наведеним у чинних нормативних документах, зумовлені зниженням вартості сучасної апаратури та новими принципами визначення доцільності впровадження гнучких методів світлофорного регулювання.

1. Брайловский Н.О. Управление движением транспортных средств / Н.О. Брайловский, Б.И. Грановский. – М. : Транспорт, 1975. – 112 с.
2. Гавриленко В.В. Решение задач аппроксимации средствами Excel / В.В. Гавриленко, Л.М. Парохненко // Компьютеры + программы – 2002. – № 12. – С. 42–47.
3. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими / Дрю Д. – М. : Транспорт, 1972. – 323 с.
4. Єресов В.І. Ефективність застосування гнучких технологій світлофорного регулювання на перехрестях / В.І. Єресов, Л.С. Дідківська // Вісн. Донец. ін. автомоб. транспорту: наук. журн. – Д. : ПП «РВФ Молнія», 2009. 1. – С. 92–97.
5. Єресов В.І. Метод. вказ. до викон. курс. роб. з дисципл. «Автоматизовані системи управління дорожнім рухом» для студ. ден. форми навч. спец. «Організація і управління дорожнім рухом» / В.І. Єресов, О.Т. Лановий, О.О. Коляда. – К. : НТУ, 2008. – 40 с.
6. Кочерга В.Г. Оценка и прогнозирование параметров дорожного движения в интеллектуальных транспортных системах / В.Г. Кочерга, В.В. Зырянов. – Ростов-на-Дону: Узд-во. РГСУ, 2001. – 130 с.
7. Кременец Ю.А. Технические средства регулирования дорожного движения: учебное пособие для вузов / Ю.А. Кременец, М.П. Печерский. – М. : Транспорт, 1981. – 252 с.
8. Кузьменко И.Н. Применение теории случайных функций в геодезии / И.Н. Кузьменко, Ю.В. Полищук, Л.А. Шаповалові. – К. : Вища шк., 1980. – 144 с.
9. Михайленко В.И. Управление движением на автомобильных дорогах / В.И. Михайленко, Б.М. Четверухин. – К. : Урожай, 1991. – 200 с.
10. Печерский М.П. Автоматизированные системы управления дорожным движением в городах / М.П. Печерский, Б.Г. Хорович. – М. : Транспорт, 1979. – 176 с.
11. Рекомендації з впровадження та оцінки ефективності роботи світлофорного регулювання дорожнього руху / ГУ РУ МВС України, 2005. – 56 с.
12. Руководство по проектированию и внедрению автоматизированных систем управления дорожным движением на базе АССУД / под общ. ред. Г.Я. Волошина. – М. : ВНИИБД МВД СССР, 1981. – 232 с.
13. Рэнкин В.У. Автомобильные перевозки и организация дорожного движения : пер. с англ. / В.У. Рэнкин, П. Клафи, С. Халберт. – М. : Транспорт, 1981. – 592 с.
14. Самойлов Д.С. Организация и безопасность городского движения : учебник для вузов. – [2-е изд., перераб. и доп. ил.] / Д.С. Самойлов, В.А. Юдин, П.В. Рушевский. – М. : Высш. шк. 1981. – 256 с.
15. Сильянов В.В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог / В.В. Сильянов. – М. : Транспорт, 1984. – 287 с.
16. Системологія на транспорті. У 5 кн. / за заг. ред. М.Ф. Дмитриченка. – Кн. IV : Організація дорожнього руху / [Е.В. Гаврилов, М.Ф. Дмитриченко, О.Т. Лановий, В.П. Поліщук]. – К. : Знання України, 2006. – 451 с.
17. Четверухин Б.М. Прогнозирование состояния транспортных потоков / Б.М. Четверухин, В.И. Єресов // Автомобільні дороги та дорожнє будівництво. – 1984. – № 34. – С. 31–35.
18. Четверухин Б.М. Теоретические основы учета и управления движением на автомобильных дорогах / Б.М. Четверухин, В.И. Михайленко. – К., 1988. – 220 с. Деп. в УкрНИИТИ 5.09.88, №3782.

Стаття надійшла до редакції 06.04.2014.