

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656:338

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.165-177](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.165-177)

В. А. Войтов, проф., д-р техн. наук, **Н.Г. Бережна**, доц., канд. техн. наук, **І.І. Сисенко**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Войтов**, доц., канд. техн. наук, **Л.Ф. Кривенко**, директор АТП 16363, **А.С. Козенок**, доц., канд. техн. наук

Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

e-mail: vavoitovva@gmail.com

Прогнозування завантаженості вулиць великих міст з урахуванням коливань щільності та швидкості руху транспортних потоків

У роботі розроблено методичний підхід прогнозування завантаженості вулиць великих міст з урахуванням коливань щільності транспортних потоків та швидкості руху автомобілів, які пов'язані з «годинами пік». Методичний підхід, на відміну від раніше відомих, доповнює відомий критерій робастності, розроблений авторами у попередніх публікаціях, що дозволяє підвищити точність прогнозування виникнення заторів. Запропоновано функції зміни щільності транспортного потоку та швидкості руху транспортних засобів у транспортному потоці, що змінюються у часі. Крім реального часу функції містять змінні параметри у вигляді амплітуди коливань та періоду коливань. Це дозволяє зробити адаптацію моделі прогнозування до реальної дорожньої мережі з урахуванням періоду завантаженості мережі та інфраструктури доріг.

транспортний потік, прогнозування, динамічна модель, щільність транспортного потоку, швидкість руху, критерій робастності транспортного потоку, амплітуда коливань, період коливань, стійкість транспортного потоку, затор

Постановка проблеми. Вивченню явища навантаження транспортного потоку, особливо на вулицях великих міст, останнім часом приділяється багато уваги. В наукових працях, які присвячені навантаженню транспортних потоків, таке явище підлягає детальному вивченню. Мета таких досліджень – показати, що використання даних про навантаження дорожньої мережі в стаціонарних умовах і при коливанні навантаження, може значно покращити результати прогнозів. Додавання до стаціонарних моделей коливальної складової, може підвищити точності моделювання і прогнозування виникнення заторів.

Робота є продовженням робіт [1-3], де в роботі [1] обґрунтовано структуру математичної моделі оцінки ергономічної стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі при дії зовнішніх збурень. Математична модель враховує динаміку розвитку процесу. Продовженням досліджень, які наведено в роботі [2], є розробка критерію оцінки стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі, який отримав назву критерій робастності. Це безрозмірна величина, яка характеризує діапазон сталого руху транспортних засобів на ділянках дорожньої мережі з урахуванням її інфраструктури, щільності та інтенсивності руху без затримок та заторів. В роботі [3] показано, що розроблений критерій робастності необхідно застосовувати при аналізі дорожньої мережі на виникнення затримок під час руху, а також при проектуванні нової міської дорожньої мережі. Однак розроблений критерій має обмеження – не враховує коливання параметрів транспортного потоку (щільності,

швидкості руху транспортних засобів в потоці), що має місце в «години пік» великих міст. Тому дослідження та прогнозування завантаженості вулиць великих міст з урахуванням коливань щільності транспортних потоків та швидкості руху автомобілів в часі та визначення впливу коливань на утворення заторів є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні десятиліття розвиток транспортної інфраструктури великих міст набув стрімких змін. Це призвело до загострення проблем транспортного забезпечення населення, яке проживає у таких мегаполісах. Загострилися проблеми пов'язані з виникненням заторів, що чинить прямий вплив на населення, наприклад, збільшення часу транспортних кореспонденцій, забруднення повітря вихлопними газами, збільшення витрат палива автомобілями, порушення правил дорожнього руху, шумовий вплив, дорожні аварії. Авторами роботи [4] згруповано інтелектуальні методи, що використовуються для аналізу даних про мобільність при прогнозуванні транспортних потоків у міських районах. Показано набори даних, які використані в літературі та застосовуються для прогнозування транспортних потоків. Наведено кількісні результати точності різних методів прогнозування, виділено переваги та обмеження аналізованих методів.

У роботах [5,6] представлено огляд літератури та оцінка методів прогнозування дорожнього руху. Зокрема, огляд літератури в роботі [5] стосується вивчення наукових статей з метою зробити висновки про найбільш застосовувані методи та майбутні напрями їх впровадження у міській логістиці. Алгоритми (методи), за допомогою яких здійснюється прогноз перевезень, класифіковані та проаналізовані з акцентом на їхнє потенційне застосування в системах вантажного автомобільного транспорту. Автори стверджують, що правильне використання інформації про затори на дорогах може значно підвищити ефективність транспортного обслуговування. На думку авторів розроблені алгоритми та методи будуть використовуватися для маршрутизації та планування транспортного забезпечення. У роботі [6], з метою підвищення точності прогнозування, враховується тип транспортного потоку, «гетерогенний невпорядкований» або «змішаний». Автори показали, що у більшості досліджень використовуються методи та концепції, розроблені для однорідного транспортного потоку. У цій роботі представлений огляд і методологія процесу моделювання для змішаного потоку, що відображає «заповнення прогалін», а не звичайна поведінка «слідування за автомобілем». Подано порівняння підходів до моделювання та обговорюється точність їх реалізації. На наш погляд, такий підхід є перспективним для моделювання транспортних потоків та прогнозування заторів у великих містах.

Моделюванню та прогнозуванню транспортних потоків великих міст присвячені роботи [7,8]. Наприклад, у роботі [7] представлені експериментальні результати, засновані на реалістичних трасах автомобільного руху у місті Валенсія (Іспанія). Автори показують, що деякі сегменти вулиць відповідають загальній теорії автомобільного потоку, тоді як велика кількість сегментів вулиць підпадають під інші категорії і апроксимуються іншими рівняннями. Автори пропонують застосувати кластерний аналіз та кожен окремий сегмент вулиць моделювати за різними рівняннями. У роботі [8], на основі експериментальних даних, були побудовані діаграми, що відображають залежність швидкості та щільності транспортного потоку для різних ділянок доріг. Це дозволило авторам роботи розробити нові рівняння, що дозволяють теоретично визначати щільність та швидкість транспортного потоку та прогнозувати пропускну спроможність доріг.

Прогнозування транспортних потоків з використанням інтелектуальних транспортних систем розглянуто у роботах [9,10]. Багато існуючих моделей, таких як ARIMA, SVR, ANN і т.д., використовуються для отримання важливих характеристик

транспортної мережі та прогнозування мобільності. У роботі [10] представлено імітаційну модель на основі клітинних автоматів, модель TSF. Модель отримана на основі існуючої моделі Нагеля Шрекенберга для моделювання автомобільного руху на автомагістралях. Автори роботи роблять висновок, що модель TSF може бути реалізована як основний інструмент для моделювання та прогнозування транспортних потоків великих міст.

Прогнозу виникнення заторів на вулицях великих міст присвячені роботи [11-14]. У роботі [11] представлена модель міського руху (AUTM) для прогнозування та запобігання заторам на дорогах. Модель включає три ключові компоненти: метод перетворення мапи маршруту для отримання вихідних даних для побудови прогнозу; вирішення оптимізаційних задач за обраними маршрутами; побудова раціонального маршруту, що виключає затори. Робота [12] має на меті розробити мережеві методи для ефективного пошуку маршрутів, які будуть використовуватися для з'єднання точок кореспонденцій. Роботи [13,14] спрямовані на вивчення просторово-часового поширення заторів на основі зібраних емпіричних даних про дорожній рух у великих містах. Автори розробили метод виявлення впливових центрів зупинки руху та зробили висновок, що затори поширюються радіально від центру утворення затору на інші вулиці з різними швидкостями та навіть на район [14]. На думку авторів, отримані моделі можуть дати прогноз і контролювати поширення заторів, що може бути корисним для розробки майбутніх технологій автономного водіння та інтелектуальних транспортних систем.

Вивченню явища навантаження транспортного потоку присвячені роботи [15-17]. На думку авторів, навантаження транспортних потоків підлягає детальному вивченню. Мета таких досліджень – показати, що використання даних про навантаження дорожньої мережі може значно покращити результати прогнозів виникнення заторів. Розроблені моделі, на думку авторів, можуть використовуватись спільно з будь-якою попередньою моделлю, тому немає необхідності замінювати налагоджені моделі, а використовувати їх як доповнення.

Автори робіт [18-21] стверджують, що для підвищення точності моделювання і прогнозування необхідно враховувати нестационарність (коливання) параметрів транспортного потоку. Автори доводять, що вихідний ряд коливань параметрів потоку, як функція часу, може демонструвати статистичну автокореляцію, проте сигнали коливань розділені знаками, як у позитивній області досліджень, так і в негативній. Наявність коливань підвищує похибку прогнозування. Автори пропонують заходи, наприклад, використання фільтра Калмана [20] для коригування прогнозованого стану дорожнього руху на перехрестях. У роботі [21] розглядається методичний підхід використання нестационарних даних про транспортний потік високої інформативності, отриманих за допомогою сучасних сенсорних мереж. На думку авторів, такі дані демонструють значні статистичні коливання. На основі проведених досліджень в роботі робиться висновок, що такі флуктуації найкраще описуються за допомогою двомірного розподілу ймовірностей у площині «щільність–потік».

З аналізу виконаних робіт можна зробити висновок, що при виконанні моделювання транспортних потоків великих міст і при побудові прогнозів можливості виникнення заторів, необхідно враховувати нестационарність (коливання) параметрів, наприклад, таких як щільність транспортного потоку і швидкість руху транспортних засобів в потоці в різні відрізки часу доби.

Автори роботи [22] стверджують, що інформаційні потоки та потоки даних досягли такого рівня, що можуть відігравати основну роль у моделюванні реальних транспортних систем. У цій роботі викладено концептуальну основу для моделювання

динаміки міського руху, яка пропонує використання ланцюгів Маркова у співіснуванні з безперервними потоками даних. Автори, як додаток до розробленої моделі, використовують експериментальні дані, що складаються з GPS-слідів автомобілів-таксі у місті Пекіні та зіставляють результати моделювання з експериментальними даними, що підтверджує їхню ідентичність та інформативність.

Вивченню динаміки транспортного потоку присвячено роботи [23-24]. Наприклад, у [23] розроблена інтегрована структура моделювання динаміки транспортного потоку для аналізу та прогнозу пов'язаних систем у реальному часі. Модель дозволяє прогнозувати динаміку транспортного потоку у реальному часі попиту на транспортне обслуговування. Наведено порівняння рішень мережевих потоків на основі динамічних, напівдинамічних та статичних моделей транспортної мережі. У роботі [24] виконано класифікацію структур транспортних потоків по фундаментальній діаграмі шляхом розгляду щільності потоку, як індикатора структури. Фундаментальна діаграма швидкості-щільності оновлюється, щоб відповідати схемі потоку в реальному часі. На наш погляд, облік щільності потоку, що варіюється, є більш перспективним методичним прийомом. Такий підхід дозволяє підвищити точність моделювання та знизити похибку прогнозу.

Підсумовуючи аналіз публікацій, присвячених динаміці моделювання транспортних потоків, що змінюється в часі, необхідно зазначити, що основними факторами в таких моделях виступають щільність потоку та швидкість руху транспортних засобів у потоці, коливання щільності та швидкості руху. Нестационарність (коливання) параметрів транспортного потоку в реальному часі, на нашу думку, на основі виконаного вище аналізу літературних джерел, є значущими факторами для моделювання стійкості транспортного потоку до утворення заторів. Під час використання таких моделей необхідно використовувати функції зміни щільності та швидкості руху автомобілів в потоці в реальному часі. Отримані значення межі втрати стійкості транспортного потоку дозволять враховувати стохастичність процесу та підвищити рівень прогнозування стійкості транспортного потоку до заторів.

Саме такий підхід розроблено авторами робіт [1-3]. Авторами обґрунтовано структуру математичної моделі оцінки ергономічної стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі при дії зовнішніх збурень. Показано, що динамічні характеристики транспортного потоку описуються диференціальним рівнянням третього порядку. Отримано критерій оцінки стійкості транспортного потоку на різних ділянках вулично-дорожньої мережі. Аналіз критерію дозволяє сформулювати параметри, від яких залежить стійкість. Показано, що на стійкість транспортного потоку впливають щільність та інтенсивність транспортного потоку. Їх необхідно розраховувати для кожної ділянки дорожньої мережі чи магістралі як коефіцієнти підсилення. Дано визначення робастності транспортного потоку (англ. *robust range*) – це безрозмірна величина, яка характеризує діапазон сталого руху транспортних засобів на ділянках дорожньої мережі з урахуванням її інфраструктури, щільності та інтенсивності руху без затримок та заторів. Доведено, що розроблений критерій робастності [3] необхідно застосовувати при аналізі дорожньої мережі на виникнення затримок під час руху та заторів, а також при проектуванні нової міської дорожньої мережі.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження та прогнозування завантаженості вулиць великих міст з урахуванням коливань щільності транспортних потоків та швидкості руху автомобілів в часі та визначення впливу коливань на утворення заторів.

Виклад основного матеріалу. У роботі [2] представлено критерій стійкості транспортного потоку *RR*, який отримав назву критерія робастності. Як було доведено

в зазначеній роботі позитивне значення критерію робастності – це діапазон стійкого руху транспортних засобів на ділянках дорожньої мережі з урахуванням її інфраструктури, щільності та інтенсивності (швидкості) руху без затримок та заторів. Чим більше значення критерію робастності, тим більший запас стійкості має транспортний потік до утворення затору. Критерій робастності має вигляд [2]:

$$RR = \frac{[(T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) \times (T_1 + T_2 + T_3 + K_2 K_3 T_1)]}{[(T_1 T_2 T_3 \times K_2 K_3) + T_1 T_2 T_3] \times 500} \quad (1)$$

У роботі [3] було надано значення постійних часу T_i коефіцієнтів підсилення K , які входять у критерій (1).

Значення постійної часу T_1 , яка характеризує інерційність водія, залежно від величини щільності транспортного потоку, представлено виразом:

$$T_1 = \frac{t_1^2 \cdot N \cdot l_a \cdot \sigma_a}{70 \cdot L \cdot v}, \text{ с}, \quad (2)$$

де t_1 - час реакції водія на зміну дорожньої ситуації, може змінюватися в межах від 0,6 до 1,4 сек;

N – кількість автомобілів на контрольованій ділянці дороги;

l_a – довжина автомобіля, м;

σ_a – середньоквадратичне відхилення прискорення автомобілів в транспортному потоці, м/с², формулу для розрахунку наведено в роботі [1];

L – довжина контрольованої ділянки дороги, зазвичай приймається рівною 1000 м;

v – швидкість автомобілів у транспортному потоці, м/с.

Значення постійної часу T_2 , яка характеризує інерційність автомобіля і виявляється у здатності до маневру, представлено формулою:

$$T_2 = \frac{M \cdot l_a^2}{1000 \cdot N_e \cdot t_2^2}, \text{ с}, \quad (3)$$

де M – маса автомобіля, розмірність кг;

N_e – номінальна потужність двигуна автомобіля, розмірність Вт;

t_2 – час на маневр, який може використовувати автомобіль при зміні дорожньої ситуації на контрольованій ділянці, розмірність с.

Значення постійної часу T_3 , що характеризує інерційність зміни дорожньої ситуації, наведено формулою:

$$T_3 = \frac{n \cdot t_2^2}{5 \cdot t_3}, \text{ с}, \quad (4)$$

де n – кількість смуг руху на проїжджій частині;

t_3 – сумарний час затримок під час руху за маршрутом довжиною 1000 м, с.

Коефіцієнт підсилення K_1 , який характеризує ступінь впливу щільності транспортного потоку на час реакції водія, представлений формулою:

$$K_1 = \frac{N \cdot l_a}{L}, \quad (5)$$

Коефіцієнт підсилення K_2 , який характеризує вплив динамічності транспортного потоку на час затримок під час руху та втрату стійкості, представлений формулою:

$$K_2 = \frac{\sigma_a \cdot N^2 \cdot l_a^3}{v^2 \cdot L^2}. \quad (6)$$

Коефіцієнт підсилення K_3 , який характеризує вплив зміни дорожньої ситуації, на час затримки під час руху в потоці та втрату стійкості, представлений формулою:

$$K_3 = \frac{N \cdot l_a \cdot k^2 \cdot s^2}{10 \cdot L}, \quad (7)$$

де k – кількість пішохідних переходів на контрольованій ділянці;

s – кількість світлофорів на контрольованій ділянці.

Наведені вирази (2) – (7) підставляються у формулу (1) для розрахунку значення критерію робастності RR на ділянці дороги, що досліджується. Як доведено в роботах [1-3] значенню критерія робастності більше одиниці відповідає наявність руху автомобілів у потоці, це з висновків роботи [2]. Чим більша величина критерію RR , тим вище запас по робастності транспортного потоку. За значенням критерію робастності $RR=1$, транспортний потік втрачає стійкість, тобто відбувається зупинка руху, це межа переходу від руху до затору. При RR менше одиниці – затор, транспортний потік не рухається.

Виконаємо теоретичні дослідження впливу коливань щільності транспортного потоку та швидкості руху автомобілів в потоці на величину критерію робастності, що визначає межу утворення заторів. Такі коливання характерні для великих міст і отримали назву «години пік», коли щільність транспортного потоку збільшується до величин, які викликають утворення заторів. Відповідно швидкість руху автомобілів в транспортному потоці зменшується до нуля.

Вираз для розрахунку середнього значення щільності транспортного потоку на ділянці дорожньої мережі довжиною $L=1000$ м, яке відповідає сталому режиму руху, представимо у вигляді:

$$p_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m N_i}{L}, 1/\text{м}, \quad (8)$$

де m – кількість автомобілів в транспортному потоці на контрольованій ділянці;

Вираз для моделювання коливання щільності транспортного потоку в часі що досліджується, представимо у вигляді:

$$p(t) = p_{cp} + p_{cp} \left(A_p \cdot \sin \frac{k \cdot t}{T_{nep}} \right), 1/\text{м}, \quad (9)$$

де A_p – амплітуда коливань щільності транспортного потоку в часі що досліджується, безрозмірна величина, розраховується за формулою:

$$A_p = \frac{\sigma_p}{p_{cp}}, \quad (10)$$

де σ_p – середньоквадратичне відхилення щільності транспортного потоку

виразимо формулою:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (p_i - p_{cp})^2}, \quad (11)$$

де m – кількість вимірювань величини щільності транспортного потоку на контрольованій ділянці;

p_i – величина щільності транспортного потоку i -го виміру;

k – коефіцієнт, який враховує розмірність величин, безрозмірна величина;

t – реальний час, в межах якого проводиться дослідження, розмірність година;

T_{nep} – період коливань зміни щільності транспортного потоку, розмірність година.

Вираз для розрахунку середнього значення швидкості руху автомобілів в транспортному потоці на ділянці дорожньої мережі довжиною 1000 м, яке відповідає сталому режиму руху, представимо у вигляді:

$$v_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m v_i}{m}, \quad 1/м, \quad (12)$$

де m – кількість вимірювань величини швидкості автомобілів в транспортному потоці на контрольованій ділянці;

Вираз для моделювання коливання швидкості руху автомобілів в транспортному потоці в часі що досліджується, представимо у вигляді:

$$v(t) = v_{cp} + v_{cp} \left(A_v \cdot \sin \frac{k \cdot t}{T_{nep}} \right), \quad 1/м, \quad (13)$$

де A_v – амплітуда коливань швидкості автомобілів в транспортному потоці в часі що досліджується, безрозмірна величина, розраховується за формулою:

$$A_v = \frac{\sigma_v}{v_{cp}}, \quad (14)$$

де σ_v – середньоквадратичне відхилення швидкості руху автомобілів в транспортному потоці виразимо формулою:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (v_i - v_{cp})^2}, \quad (15)$$

де m – кількість вимірювань величини швидкості руху автомобілів в транспортному потоці на контрольованій ділянці.

Отримані значення щільності транспортного потоку в реальному часі, вираз (9) та значення швидкості руху автомобілів в транспортному потоці в реальному часі, вираз (13), підставляються у формули (2) – (7) для розрахунку постійних часу T та коефіцієнтів підсилення K , а потім критерію робастності, формула (1), як функції часу. Розроблений методичний підхід дозволяє досліджувати вплив коливань (за амплітудою

та періодом) щільності та швидкості руху автомобілів в транспортному потоці на вулицях великих міст в реальному часі та визначати межу появи заторів, особливо в «години пік».

Виконаємо прогнозування стійкості (робастності) RR транспортного потоку, формула (1), під час руху міськими вулицями великого міста. Прогнозування будемо виконувати залежно від зміни щільності транспортного потоку, формула (9) та швидкості руху автомобілів, формула (13). У формули входять величини середнього значення щільності транспортного потоку на ділянці дорожньої мережі довжиною $L=1000$ м, а також середнього значення швидкості руху автомобілів в транспортному потоці. Додавання коливальної складової дозволяє врахувати коливання величин щільності та швидкості транспортного потоку, що пов'язане з «годинами пік», які притаманні для великих міст.

Аналіз представлених залежностей дозволяє зробити такі висновки. Збільшення щільності потоку (у години пік) значно зменшує діапазон робастності. Крива 1 на рис.1 відповідає щільності потоку 30 автомобілів на 1000 метрів дороги. Наявність коливань з амплітудою, що дорівнює 0,5, формула (10) зменшує величину критерію робастності, проте не призводить до утворення заторів. При щільності транспортного потоку 60 автомобілів на 1000 метрів дороги, крива 2, рис.1, виникають затори. Поданий прогноз побудовано для періоду коливань $T_{пер} = 4$ години. Тобто, через кожні 4 години проявляється збільшення щільності від 30 автомобілів до 60 автомобілів на 1000 метрів дороги. Прогнозування виконувалося для міської вулиці, що має дві смуги для руху, 5 світлофорів та 5 пішохідних переходів на 1000 метрів дороги.

Залежності зміни швидкості руху автомобілів у транспортному потоці та їх вплив на діапазон робастності за наявності коливань швидкості, формула (13), представлені на рис.2. Залежності побудовано для постійної щільності потоку, що дорівнює 50 автомобілів на 1000 метрів дороги, амплітуда коливань 0,5, формула (14), період коливань $T_{пер} = 4$ години. З аналізу залежностей можна зробити такі висновки. Зменшення швидкості руху автомобілів у транспортному потоці призводить до втрати стійкості потоку – виникнення заторів, що представлено кривою 3. Цей факт підтверджує функціональний зв'язок між щільністю транспортного потоку та швидкістю руху автомобілів у потоці.

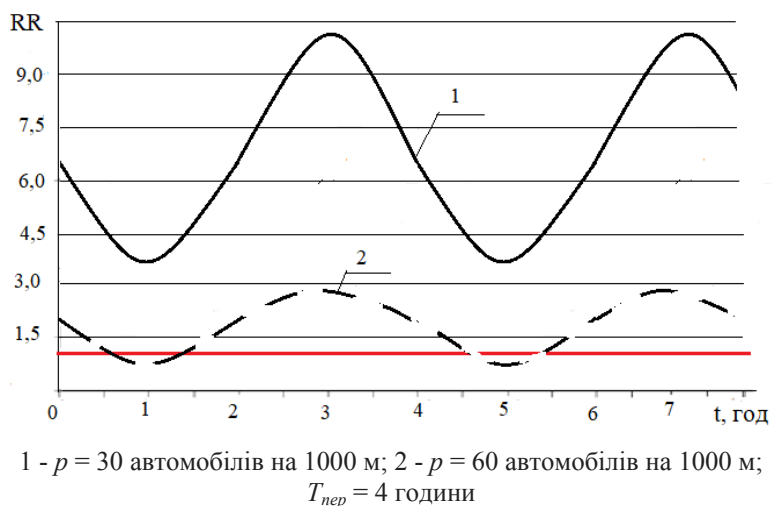
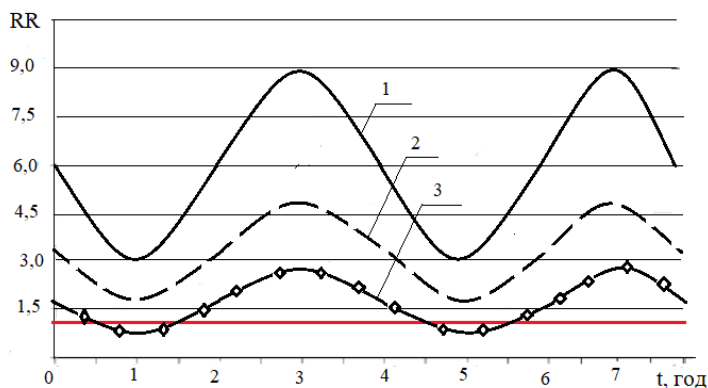


Рисунок 1 - Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні часу

Джерело: розроблено авторами



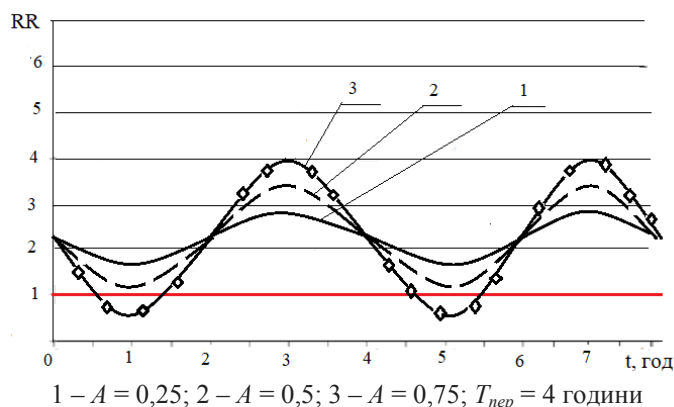
1 - $v = 40$ км/год; 2 - $v = 30$ км/год; 3 - $v = 20$ км/год; $T_{пер} = 4$ години

Рисунок 2 - Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень швидкості руху автомобілів при зміні часу

Джерело: розроблено авторами

Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку при зміні амплітуди коливань щільності, формула (10) і швидкості руху, формула (14), представлені на рис.3. Залежності побудовано для постійної щільності потоку, що дорівнює 60 автомобілів на 1000 метрів дороги, швидкості руху автомобілів 30 км/годину, період коливань $T_{пер} = 4$ години. З аналізу залежностей можна зробити такі висновки. Збільшення амплітуди коливань призводить до втрати стійкості потоку. При значенні амплітуди $A = 0,75$ транспортний потік втрачає стійкість, виникає затор, що представлено кривою 3.

Представлені залежності на рис.3 характерні як для коливань щільності транспортного потоку, так і для коливань швидкості автомобілів у транспортному потоці.



1 - $A = 0,25$; 2 - $A = 0,5$; 3 - $A = 0,75$; $T_{пер} = 4$ години

Рисунок 3 - Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень амплітуди коливань

Джерело: розроблено авторами

Вплив на стійкість транспортного потоку величини періоду коливань $T_{пер}$ представлено на рис.4. Період коливань – це відрізок часу, коли збільшення щільності транспортного потоку (зменшення швидкості руху автомобілів у транспортному потоці) повторюється. Залежності побудовано для трьох періодів коливань: $T_{пер} = 2$ години; 4 години; 6 годин, при постійній щільності потоку, що дорівнює 60 автомобілів на 1000 метрів дороги, швидкості руху автомобілів 30 км/годину, при різній амплітуді коливань, що дорівнює $A = 0,25; 0,5; 0,75$.

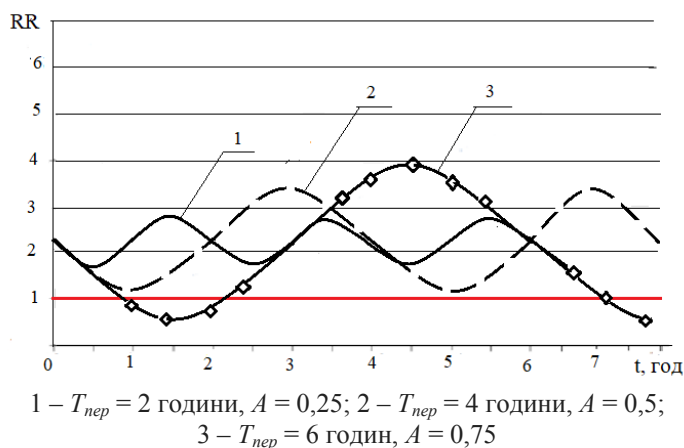


Рисунок 4 - Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень періоду коливань

Джерело: розроблено авторами

Як впливає з поданих залежностей, період появи «години пік» не впливає на втрату стійкості транспортного потоку. Найважливішим чинником виступає амплітуда коливань. При високих значеннях амплітуди, наприклад $A = 0,75$, крива 3, порушується межа втрати стійкості - виникає затор. Однак облік такого чинника, як період коливань, дозволить адаптувати математичну модель до реальних умов поведінки транспортного потоку і тим самим підвищити точність прогнозування. Для цього можна розбивати окремі вулиці на кластери і виконувати моделювання кожного кластера окремо, використовуючи відповідні значення вхідних параметрів.

Висновки. Розроблено методичний підхід прогнозування завантаженості вулиць великих міст з урахуванням коливань щільності транспортних потоків та швидкості руху автомобілів, які пов'язані з «годинами пік». Методичний підхід, на відміну від раніше відомих, наведених у цій роботі в огляді літературних джерел, доповнює відомий критерій робастності, розроблений у роботах [2,3], що дозволяє підвищити точність прогнозування виникнення заторів.

Запропоновано функції зміни щільності транспортного потоку та швидкості руху транспортних засобів у потоці, що змінюються у часі. Крім реального часу функції містять змінні параметри у вигляді амплітуди коливань та періоду коливань. Це дозволяє зробити адаптацію моделі прогнозування до реальної дорожньої мережі з урахуванням періоду завантаженості мережі та інфраструктури доріг.

Показано, що облік коливальної складової транспортного потоку розширює можливості застосування критерію робастності, представленого формулою (1) і дозволяє дати більш точний прогноз для різних ділянок дорожньої мережі великих міст.

Як впливає з представлених теоретичних досліджень, математична модель прогнозування стійкості транспортного потоку в часі з урахуванням коливань має обмеження щодо застосування. Обмеження пов'язані з визначенням вихідних даних для прогнозування. На контрольованих ділянках дорожньої мережі необхідно визначити середнє значення щільності потоку, середнє значення швидкостей руху транспортних засобів, амплітуду коливань в «години пік» та період появи «годин пік». Подальший напрямок досліджень, на наш погляд, лежить у площині створення розрахункових моделей щодо визначення середнього значення щільності потоку, середнього значення швидкостей руху транспортних засобів, амплітуди коливань в «години пік» та періодів появи «годин пік». Це дозволить розробити єдину методологію моделювання стійкості транспортних потоків для побудови прогнозів завантаженості дорожньої мережі.

Список літератури

1. Оцінка ергономічної стійкості транспортного потоку на дільницях дорожньої мережі. Ідентифікація математичної моделі / Войтов В.А. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7(38), ч.І. С. 236-245 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.236-245](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.236-245)
2. Обґрунтування критерію стійкості транспортного потоку на дільницях дорожньої мережі / Кравцов А.Г. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7(38), ч.ІІ. С. 222-230 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.222-230](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.222-230)
3. Дослідження математичної моделі стійкості транспортного потоку на дільницях дорожньої мережі міста / Горяїнов О.М. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39), ч.І. С. 183-195 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.183-195](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.183-195)
4. Medina-Salgado B., Sanchez-DelaCruz E., Pozos-Parra P., Sierra J. E. Urban traffic flow prediction techniques: A review. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. 2022. №35. P. 100739. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2022.100739>
5. Kechagias E. P., Gayialis S. P., Konstantakopoulos G. D., Papadopoulos G. A. Traffic flow forecasting for city logistics: A literature review and evaluation. *International Journal of Decision Support Systems*. 2019. №4(2). P. 159-176. <https://doi.org/10.1504/IJDSS.2019.104556>
6. Verma A. Review of studies on mixed traffic flow: perspective of developing economies. *Transportation in Developing Economies*. 2016. № 2. P. 1-16. <https://doi.org/10.1007/s40890-016-0010-0>
7. Zambrano-Martinez J. L., T. Calafate C., Soler D., Cano J. C., Manzoni P. Modeling and characterization of traffic flows in urban environments. *Sensors*. 2018. 18(7). P. 2020. <https://doi.org/10.3390/s18072020>
8. Horvat R., Kos G., Ševrović M. Traffic flow modelling on the road network in the cities. *Tehnički vjesnik*. 2015. №22(2). P. 475-486. <https://doi.org/10.17559/TV-20150127093334>
9. Bhanu M., Priya S., Dandapat S. K., Chandra J., Mendes-Moreira J. Forecasting traffic flow in big cities using modified tucker decomposition. In *Advanced Data Mining and Applications: 14th International Conference, ADMA 2018, Nanjing, China, November 16–18, 2018, Proceedings*. 2018. 14. (pp. 119-128). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05090-0_10
10. Gora P. Traffic simulation framework. In *2012 UKSim 14th International Conference on Computer Modelling and Simulation*. 2012, March. pp. 345-349. IEEE. <https://doi.org/10.1109/UKSim.2012.57>
11. Hu W., Wang H., Qiu Z., Yan L., Nie C., Du B. An urban traffic simulation model for traffic congestion predicting and avoiding. *Neural Computing and Applications*. 2018. №30. P.1769-1781. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2785-7>
12. Hofer C., Jäger G., Füllsack M. Including traffic jam avoidance in an agent-based network model. *Computational social networks*. 2018. №5. P.1-12. <https://doi.org/10.1186/s40649-018-0053-y>
13. Jiang Y., Kang R., Li D., Guo S., Havlin S. Spatio-temporal propagation of traffic jams in urban traffic networks. *arXiv preprint arXiv:1705.08269*. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.08269>
14. Nagy A. M., Simon V. Traffic congestion propagation identification method in smart cities. *Infocommunications Journal*. 2021. №13(1). P. 45-57. <https://doi.org/10.36244/ICJ.2021.1.6>
15. Nagy A. M., Simon V. Improving traffic prediction using congestion propagation patterns in smart cities. *Advanced Engineering Informatics*. 2021. № 50. P. 101343. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101343>
16. Nagy A. M., Simon V. A novel congestion propagation modeling algorithm for smart cities. *Pervasive and Mobile Computing*. 2021. №73. P. 101387. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2021.101387>
17. Liu X. C., Zhang G., Lao Y., Wang, Y. Modeling traffic flow dynamics on managed lane facility: approach based on cell transmission model. *Transportation research record*. 2012. № 2278(1). P. 163-170. <https://doi.org/10.3141/2278-18>
18. Xu N., Shang P., Kamae S. Modeling traffic flow correlation using DFA and DCCA. *Nonlinear Dynamics*. 2010. №61. P. 207-216. <https://doi.org/10.1007/s11071-009-9642-5>
19. Fulari S., Thankappan A., Vanajakshi L., Subramanian S. Traffic flow estimation at error prone locations using dynamic traffic flow modeling. *Transportation letters*. 2019. №11(1). P. 43-53. <https://doi.org/10.1080/19427867.2016.1271761>
20. Yang H., Yu W., Zhang G., Du L. Network-Wide Traffic Flow Dynamics Prediction Leveraging Macroscopic Traffic Flow Model and Deep Neural Networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2024. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3329489>
21. Kalair K., Connaughton C. Anomaly detection and classification in traffic flow data from fluctuations in the flow–density relationship. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2021. №127. P. 103178. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103178>

22. Moosavi V., Hovestadt L. Modeling urban traffic dynamics in coexistence with urban data streams. In *Proceedings of the 2nd ACM SIGKDD International Workshop on Urban Computing*. 2013, August. pp. 1-7. <https://doi.org/10.1145/2505821.2505822>
23. Zhou Z., Zhang X., Guo Q., Sun H. Analyzing power and dynamic traffic flows in coupled power and transportation networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. №135. P. 110083. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110083>
24. Celikoglu H. B. Dynamic classification of traffic flow patterns simulated by a switching multimode discrete cell transmission model. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2014. №15(6). P. 2539-2550. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2317850>

References

1. Vojtov, V.A. et al. (2023). Otsinka erhonomichnoi stijkosti transportnoho potoku na dil'nytsiakh dorozhn'oi merezhi. Identyfikatsiia matematychnoi modeli [Assessment of ergonomic sustainability of traffic flow at road network sections. Identification of a mathematical model]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical Sciences*, 7(38), 236-245 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.236-245](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.236-245) [in Ukrainian].
2. Kravtsov, A.H. et al. (2023). Obhruntuvannia kryteriiu stijkosti transportnoho potoku na dil'nytsiakh dorozhn'oi merezhi [Justification of the traffic flow stability criterion at the sections of the road network]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical Sciences*, 7(38), 222-230 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.222-230](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.222-230) [in Ukrainian].
3. Horiainov, O.M. et al. (2023). Doslidzhennia matematychnoi modeli stijkosti transportnoho potoku na dil'nytsiakh dorozhn'oi merezhi mista [Study of the mathematical model of the stability of the traffic flow in the sections of the city's road network]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical Sciences*, 8(39), 1, 183-195 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.183-195](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.183-195) [in Ukrainian].
4. Medina-Salgado, B., Sanchez-DelaCruz, E., Pozos-Parra, P. & Sierra, J. E. (2022). Urban traffic flow prediction techniques: A review. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 35, 100739. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2022.100739>
5. Kechagias, E. P., Gayialis, S. P., Konstantakopoulos, G. D. & Papadopoulos, G. A. (2019). Traffic flow forecasting for city logistics: A literature review and evaluation. *International Journal of Decision Support Systems*, 4(2), 159-176. <https://doi.org/10.1504/IJDSS.2019.104556>
6. Verma, A. (2016). Review of studies on mixed traffic flow: perspective of developing economies. *Transportation in Developing Economies*, 2, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s40890-016-0010-0>
7. Zambrano-Martinez, J. L., T. Calafate, C., Soler, D., Cano, J. C. & Manzoni, P. (2018). Modeling and characterization of traffic flows in urban environments. *Sensors*, 18(7), 2020. <https://doi.org/10.3390/s18072020>
8. Horvat, R., Kos, G. & Ševrović, M. (2015). Traffic flow modelling on the road network in the cities. *Tehnički vjesnik*, 22(2), 475-486. <https://doi.org/10.17559/TV-20150127093334>
9. Bhanu, M., Priya, S., Dandapat, S. K., Chandra, J. & Mendes-Moreira, J. (2018). Forecasting traffic flow in big cities using modified tucker decomposition. In *Advanced Data Mining and Applications: 14th International Conference, ADMA 2018, Nanjing, China, November 16–18, 2018, Proceedings 14* (pp. 119-128). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05090-0_10
10. Gora, P. (2012, March). Traffic simulation framework. In *2012 UKSim 14th International Conference on Computer Modelling and Simulation* (pp. 345-349). IEEE. <https://doi.org/10.1109/UKSim.2012.57>
11. Hu, W., Wang, H., Qiu, Z., Yan, L., Nie, C. & Du, B. (2018). An urban traffic simulation model for traffic congestion predicting and avoiding. *Neural Computing and Applications*, 30, 1769-1781. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2785-7>
12. Hofer, C., Jäger, G. & Füllsack, M. (2018). Including traffic jam avoidance in an agent-based network model. *Computational social networks*, 5, 1-12. <https://doi.org/10.1186/s40649-018-0053-y>
13. Jiang, Y., Kang, R., Li, D., Guo, S. & Havlin, S. (2017). Spatio-temporal propagation of traffic jams in urban traffic networks. *arXiv preprint arXiv:1705.08269*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.08269>
14. Nagy, A. M. & Simon, V. (2021). Traffic congestion propagation identification method in smart cities. *Infocommunications Journal*, 13(1), 45-57. <https://doi.org/10.36244/ICJ.2021.1.6>
15. Nagy, A. M. & Simon, V. (2021). Improving traffic prediction using congestion propagation patterns in smart cities. *Advanced Engineering Informatics*, 50, 101343. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101343>
16. Nagy, A. M. & Simon, V. (2021). A novel congestion propagation modeling algorithm for smart cities. *Pervasive and Mobile Computing*, 73, 101387. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2021.101387>

17. Liu, X. C., Zhang, G., Lao, Y. & Wang, Y. (2012). Modeling traffic flow dynamics on managed lane facility: approach based on cell transmission model. *Transportation research record*, 2278(1), 163-170. <https://doi.org/10.3141/2278-18>
18. Xu, N., Shang, P. & Kamae, S. (2010). Modeling traffic flow correlation using DFA and DCCA. *Nonlinear Dynamics*, 61, 207-216. <https://doi.org/10.1007/s11071-009-9642-5>
19. Fulari, S., Thankappan, A., Vanajakshi, L. & Subramanian, S. (2019). Traffic flow estimation at error prone locations using dynamic traffic flow modeling. *Transportation letters*, 11(1), 43-53. <https://doi.org/10.1080/19427867.2016.1271761>
20. Yang, H., Yu, W., Zhang, G. & Du, L. (2024). Network-Wide Traffic Flow Dynamics Prediction Leveraging Macroscopic Traffic Flow Model and Deep Neural Networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3329489>
21. Kalair, K. & Connaughton, C. (2021). Anomaly detection and classification in traffic flow data from fluctuations in the flow–density relationship. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 127, 103178. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103178>
22. Moosavi, V. & Hovestadt, L. (2013, August). Modeling urban traffic dynamics in coexistence with urban data streams. In *Proceedings of the 2nd ACM SIGKDD International Workshop on Urban Computing* (pp. 1-7). <https://doi.org/10.1145/2505821.2505822>
23. Zhou, Z., Zhang, X., Guo, Q. & Sun, H. (2021). Analyzing power and dynamic traffic flows in coupled power and transportation networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110083. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110083>
24. Celikoglu, H. B. (2014). Dynamic classification of traffic flow patterns simulated by a switching multimode discrete cell transmission model. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(6), 2539-2550. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2317850>

Viktor Vojtov, Prof., DSc., **Natalija Berezhna**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Igor Sysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anton Voitov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Leonid Kryvenko**, Director of the enterprise 16363, **Anna Kozenok**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

Forecasting the congestion of the streets of large cities, taking into account fluctuations in the density and speed of traffic flows

The work has developed a methodical approach for forecasting the congestion of the streets of large cities, taking into account the fluctuations in the density of traffic flows and the speed of movement of cars in the traffic flow, which are associated with "peak hours". The methodological approach, unlike the previously known ones, complements the well-known robustness criterion developed by the authors in previous publications, which allows to increase the accuracy of forecasting the occurrence of traffic jams.

Time-varying functions of traffic flow density and vehicle speed in the traffic flow are proposed. In addition to real time, functions contain variable parameters in the form of amplitude of oscillations and period of oscillations. This makes it possible to adapt the forecasting model to the real road network, taking into account the period of network congestion and road infrastructure. The dependences of the change in the range of robustness of the traffic flow when the density and speed of movement of vehicles in the flow change. It has been proven that in the presence of fluctuations of the listed parameters, the appearance of traffic jams occurs at average values of density and speed. A significant influence of the amplitude of fluctuations in the density and speed of movement of vehicles in the stream on the appearance of traffic jams has been proven. It is shown that the magnitude of the amplitude of oscillations during "peak times" significantly reduces the stability range of the traffic flow. The influence of the "peak hour" period on the loss of stability of the traffic flow is given. It has been proven that the period of oscillations is an insignificant factor in forecasting traffic jams. However, accounting for such a factor will allow to adapt the mathematical model to the real conditions of traffic flow behavior and thereby increase the accuracy of forecasting.

It is shown that accounting for the fluctuating component of the traffic flow expands the possibilities of applying the robustness criterion presented by the authors in previous publications and makes it possible to provide a more accurate forecast for various sections of the road network of large cities.

traffic flow, forecasting, dynamic model, traffic flow density, traffic speed, traffic flow robustness criterion, oscillation amplitude, oscillation period, traffic flow stability, traffic jam

Одержано (Received) 15.01.2024

Прорецензовано (Reviewed) 21.02.2024

Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024