

УДК 656:338

DOI: [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)

А. Г. Кравцов, доц., канд. техн. наук, **Т. Ф. Ларіна**, проф., докт. екон. наук,
О. М. Горяїнов, доц., канд. техн. наук, **А.С. Козенок**, доц., канд. техн. наук,
Т.Е. Городецька, доц., канд. екон. наук, **І.А. Бабич**, ст. викл.

Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

e-mail: kravcov_84@ukr.net

Обґрунтування критерію стійкості транспортного потоку на ділянках дорожньої мережі

У роботі 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. Показано, що розроблений критерій робастності необхідно застосовувати при аналізі дорожньої мережі на виникнення затримок під час руху та заторів, а також при проектуванні нової міської дорожньої мережі.

транспортний потік, моделювання, динамічна модель, градієнт щільності, градієнт швидкості, коефіцієнт підсилення, постійна часу, критерій стійкості, критерій робастності транспортного потоку

Постановка проблеми. В даний час транспортний потік та затори на дорожній мережі великих міст є однією з основних соціальних, економічних та екологічних проблем, пов'язаних із автомобільним транспортом у промислово розвинених країнах. Тому, управління транспортними потоками на перевантажених дорожніх мережах вимагає чіткого розуміння того, що викликає перевантаження доріг, що визначає час і місце виникнення заторів, як перевантаження поширюється по дорожній мережі тощо. З цією метою за останні п'ятдесят років було розроблено широкий спектр теорій та моделей транспортних потоків, щоб відповісти на ці дослідницькі питання. Застосування моделювання транспортних процесів є найбільш економічним методом дослідження, що одночасно дозволяє з достатньою достовірністю прогнозувати затримки під час руху та утворення заторів. Різноманітність різних варіантів організації дорожнього руху обумовлює використання цілого набору критеріїв, за допомогою яких можна моделювати та прогнозувати стійкість транспортних потоків та умови появи заторів.

Ця робота є продовженням роботи [1], де обґрунтовано структуру математичної моделі оцінки ергономічної стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі при дії зовнішніх збурень. Математична модель враховує динаміку розвитку процесу. Крім градієнтів швидкості та щільності транспортних потоків враховуються динамічні властивості транспортних засобів та багатосмугова дорожня мережа, а також час затримок на пішохідних переходах та світлофорах. Показано, що динамічні характеристики транспортного потоку описуються диференціальним рівнянням третього порядку.

Продовженням досліджень, які наведено в роботі [1], є розробка критерію оцінки стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі та прогнозування запасу стійкості при дії зовнішніх збурень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами роботи [2] наголошується, що існує кілька стратегій, що дозволяють зменшити затори, зробити міста придатними для життя, чистими та безпечними, а також обмежити збільшення часу транспортних засобів у дорозі. У роботі робиться висновок, що для вирішення таких завдань важливо знати, як насправді виглядатиме транспортний потік, де і коли будуть затори, де існують вузькі місця та де низька пропускна спроможність доріг. На думку авторів моделі транспортних потоків дозволяють виконувати таку оцінку, моделюючи та прогножуючи рух на дорогах. Використовуючи такі моделі можна прогнозувати затори на дорогах та час транспортних засобів у дорозі.

У роботі [3] наведено огляд приблизно п'ятдесятирічного досвіду моделювання транспортних потоків. Автори аналізують та порівнюють широкий спектр підходів до моделювання, розроблених до теперішнього часу та використовуваних сьогодні. Розглянуті моделі класифікуються за рівнем деталізації, з якою описується транспортний потік. Для кожної з категорій обговорюються такі питання, як точність моделювання, застосовність, а також калібрування та перевірка моделі.

Для вирішення проблеми заторів на певній ділянці доріг у роботі [4] розроблено набір систем прийняття рішень щодо оптимізації транспортного потоку. Для аналізу фактичних умов руху та розрахунку щільності та швидкості руху авторами створюється модель прогнозування транспортного потоку, яка ітеративно оновлюється, шляхом зміни вхідних параметрів. На основі цієї моделі оцінюється ступінь завантаженості на ділянці дороги, у зв'язку з чим пропонуються методи інтелектуального прийняття рішень та узгодженої оптимізації. Крім того, у цій статті реалізовано деякі прикладні експерименти на досліджуваній дорозі з трьома перехрестями та отримано гарні результати прогнозування щільності та швидкості руху. У той же час, у порівнянні з іншими існуючими методами прогнозування транспортного потоку, модель, яка представлена в цій статті, має більш високу точність, більш короткий час прогнозування та сильніший захист від перешкод.

Деякі важливі аспекти моделювання стійкості транспортних потоків представлені у роботах [5, 6]. Авторами розроблено набір критеріїв порівняльного аналізу, починаючи від експлуатаційних показників (наприклад, затримки та часу в дорозі) і закінчуючи складними явищами потоку - коливаннями, падінням пропускної спроможності та явищем гістерезису. З аналізу робіт [5, 6] можна зробити висновок про важливість обліку коливання параметрів, які характеризують транспортний потік, в математичних моделях. Такий підхід дозволить підвищити точність моделювання та прогнозування транспортного обслуговування. Реєструючи параметри транспортного потоку, такі як щільність, інтенсивність, час затримок, за допомогою спеціальних датчиків, як показано в роботі [7], можна прогнозувати ситуацію та керувати дорожнім рухом на всіх ділянках дорожньої мережі.

Подальший розвиток критеріїв оцінки стійкості транспортного потоку наведено у роботах [8, 9]. Авторами пропонується критерій, який оцінює стан руху транспортних засобів у потоці з урахуванням кількості смуг для руху та нерівномірності розподілу автомобілів у потоці за смугами руху. Автори пропонують нову характеристику для оцінки транспортного потоку – коефіцієнт "мобільності" автомобілів або нерівномірності їх руху по дорожній мережі. На думку авторів такий коефіцієнт є кількісною оцінкою якості організації дорожнього руху у місті, як добуток середньої дальності пробігу без затримок на середню швидкість потоку. Автори роблять висновок, що чим більше значення коефіцієнта мобільності, тим вище якість організації дорожнього руху. На нашу думку, запропонований коефіцієнт «мобільності» не

позбавлений недоліків. Він не враховує коливання щільності та інтенсивності транспортного потоку. Це знизить точність прогнозування затримок під час руху у потоці.

Підхід у моделюванні затримок під час руху автомобілів у потоці, розглянутий у роботі [10]. Авторами запропоновано критерій стійкості дорожнього руху з урахуванням багатосмугового руху, взаємного впливу автомобілів під час руху та затримок під час руху. Критерій враховує: дальність поїздки та швидкість руху; час затримок автомобілів під час руху; нерівномірність чи нестійкість руху, яку автори враховують градієнтом щільності транспортного потоку. Позитивним моментом даної роботи є використання такої фізичної величини, як градієнт. Градієнт вказує швидкість та напрямок зміни щільності транспортного потоку під час руху на певній ділянці дороги, що підвищить точність прогнозування.

Підхід до вивчення нерівномірності транспортних потоків представлений у роботі [11]. Авторами запроваджують поняття інтегральної (техногенної небезпеки) транспортних потоків на міській дорожній мережі. Вводиться таке поняття, як «просторово-тимчасова ємність транспортного потоку», яка розраховується як добуток інтенсивності руху на щільність транспортного потоку, розмірність $1/m \cdot c$. Дано визначення градієнта швидкості транспортного потоку, який визначається як відношення прискорення автомобілів у транспортному потоці до швидкості руху в потоці. При цьому величину прискорення автори ідентифікують як внутрішню енергію транспортного потоку. На наш погляд, облік прискорення в транспортному потоці є перспективним методичним прийомом. Сучасні електронні засоби реєстрації дозволяють визначати негативну чи позитивну величину прискорення та передавати її до інформаційних центрів в онлайн режимі.

Аналогічний підхід до моделювання транспортного потоку представлено авторами роботи [12]. У цій статті основна увага приділяється двом фундаментальним явищам: стійкості руху автомобілем за тим, хто рухається попереду і коливаннями транспортного потоку. Авторами визначають мінімальні та максимальні значення амплітуд коливань швидкості руху в потоці та напрямки їх зміни. Потім знаходять кореляцію коливань із стійкістю транспортного потоку. Проведені авторами дослідження показали, що чим менше амплітуди коливань швидкості в потоці, тим вище стійкість транспортного потоку. У роботі запропоновано рекомендації щодо зниження амплітуди коливань швидкості під час руху в потоці, наприклад, застосуванням автоматизованих систем керування рухом.

Саме такий підхід, де використовується облік коливань параметрів транспортного потоку, застосований у роботах [13-15]. Авторами досліджується коливання щільності потоку та їх кореляція зі коливаннями часу у дорозі, пов'язаними із значними заторами. Цей метод має додаткові переваги самокалібрування та адаптації до зовнішніх умов. У цих роботах представлено подальший розвиток моделей руху автотранспортних потоків методами механіки суцільного середовища. Розглянуто випадок змінної швидкості поширення збурень, побудовано графік її залежності від щільності потоку. Наведено результати розрахунків руху потоку з урахуванням в'язкопружних ефектів. Іншими словами, проводиться облік ефектів другого порядку, а саме оцінки водієм градієнтів швидкості між своїм автомобілем і транспортними засобами, що знаходяться поблизу (попереду). Це дозволяє прогнозувати дорожню ситуацію як на підставі поточного значення щільності потоку, а й можливе ущільнення чи розрідження потоку, виходячи з аналізу градієнтів швидкості. Робиться висновок, що збільшення часу між затримками автомобілів під час руху в потоці та зменшення часу затримок, позитивно впливає на стійкість транспортного потоку.

Представлений аналіз стратегій та математичних моделей оцінки стійкості транспортних потоків на дорогах та автомагістралях до заторів та затримок під час руху дозволяє зробити наступні висновки. Основними параметрами, що характеризують процес, є: мінімальні та максимальні значення амплітуд коливань швидкості в потоці та напрямки їх зміни. З аналізу представлених робіт випливає, що такі коливання корелюють зі коливаннями часу знаходження транспортного засобу в дорозі та наявністю заторів на маршруті.

На підставі даних висновків можна стверджувати, що розробка критеріїв оцінки стійкості транспортного потоку інформативними є такі параметри, як градієнт щільності та градієнт швидкості в транспортному потоці. Такі фізичні величини дозволяють враховувати наявність коливань у потоці, їх величину та напрямок (збільшення чи зменшення). При цьому величину прискорення деякі автори ідентифікують як внутрішню енергію транспортного потоку.

Для прогнозування виникнення заторів на маршрутах дорожньої мережі, а також для оцінки запасу стійкості транспортного потоку на ділянках, що аналізуються, необхідно розробити критерій оцінки стійкості транспортного потоку. Під стійкістю транспортного потоку будемо розуміти здатність транспортних засобів зберігати швидкість і напрямок руху за наміченим маршрутом вуличної дорожньої мережі або магістралі без затримок і заторів, незважаючи на збурення, що впливають на них [1].

Найбільш ефективним, на наш погляд, є добре розроблений та апробований математичний апарат теорії автоматичного управління, де досліджуються динамічні процеси за допомогою диференціальних рівнянь [16, 17]. Розробка критерію оцінки стійкості транспортного потоку на ділянках дорожньої мережі, що аналізуються, при дії збурень, дозволить аналізувати та прогнозувати виникнення заторів та затримок залежно від зміни різних факторів та розробляти заходи щодо їх усунення.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка критерію оцінки стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі та прогнозування запасу стійкості при дії зовнішніх збурень.

Виклад основного матеріалу. При розробці критерію оцінки стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі та прогнозування запасу стійкості при дії зовнішніх збурень, скористаємося диференціальним рівнянням, яке відображає динаміку зміни транспортного потоку в часі. Рівняння отримано в роботі [1]:

$$(T_1 T_2 T_3) p^3 + (T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) p^2 + (T_1 + T_2 + T_3 + K_2 K_3 T_1) p + K_2 K_3 + 1 = \\ = (K_1 K_2 T_3) p + K_1 K_2, \quad (1)$$

де K_1, K_2, K_3 – коефіцієнти підсилення, безрозмірні величини, формули для розрахунку наведено в роботі [1];

де T_1, T_2, T_3 – постійні часу, розмірність секунда, формули для розрахунку наведено в роботі [1].

Диференціальне рівняння третього порядку записано в операторній формі, де $p=d/dt$, оператор диференціювання. Аналіз диференціального рівняння (1) наведено в роботі [1].

Для аналізу стійкості технічних систем розроблено ряд спеціальних методів, які в теорії автоматичного управління отримали назву критеріїв стійкості [16, 17]. При цьому всі критерії базуються на теорії стійкості технічних систем, розробленої Ляпуновим.

Алгебраїчний критерій, критерій Гурвіца, є найпоширенішим критерієм і застосовується, коли відомо характеристичне рівняння. Як характеристичне рівняння виступає ліва частина диференціального рівняння в операторній формі (1).

Запишемо характеристичне рівняння, здійснивши заміну та прирівнявши його до нуля:

$$A_0 p^3 + A_1 p^2 + A_2 p + A_3 = 0, \quad (2)$$

де:

$$A_0 = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3, c^3, \quad (3)$$

$$A_1 = T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3, c^2, \quad (4)$$

$$A_2 = T_1 + T_2 + T_3 + K_2 K_3 T_1, c, \quad (5)$$

$$A_3 = K_2 \cdot K_3 + 1. \quad (6)$$

Відповідно до алгебраїчного критерію стійкості Гурвица технічна система є стійкою, якщо всі коефіцієнти A_i характеристичного рівняння (2) позитивні. Це необхідна умова стійкості [16, 17].

Достатня умова стійкості – всі визначники з коефіцієнтів A_i характеристичного рівняння (2) є позитивними [16, 17]. Якщо хоча б один із визначників дорівнює нулю, то система знаходиться на межі втрати стійкості. Якщо хоча б один із визначників негативний, то система нестійка.

Відповідно до правил запишемо всі визначники для характеристичного рівняння (2):

$$\Delta_1 = A_1 > 0; \quad (7)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} A_1 & A_3 \\ A_0 & A_2 \end{vmatrix} = A_1 \cdot A_2 - A_0 \cdot A_3 > 0; \quad (8)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} A_1 & A_3 & 0 \\ A_0 & A_2 & 0 \\ 0 & A_1 & A_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1 & A_3 \\ A_0 & A_2 \end{vmatrix} A_3 > 0 = (A_1 \cdot A_2 - A_0 \cdot A_3) \cdot A_3 > 0 \quad (9)$$

Вираз (9) є необхідною та достатньою умовою сталого функціонування транспортного потоку за критерієм Гурвица. Використовуючи цей вираз, можна визначити діапазон стійкого функціонування транспортного потоку - діапазон робастності. Чим більше значення Δ_3 , розмірність c^3 , тим більше запас робастності транспортного потоку.

При значенні $\Delta_3 = 0$, транспортний потік функціонує на межі втрати стійкості, при негативних значеннях Δ_3 , настає втрата стійкості - затор.

Для порівняння транспортних потоків та побудови рейтингу за запасом сталого функціонування, необхідно отримати безрозмірний параметр – критерій, який залежить від усіх перерахованих вище факторів. Найбільш прийнятним, для аналізу стійкості технічних систем з урахуванням алгебраїчного критерію Гурвица, є вираз (9).

На підставі сформульованого підходу запишемо критерій оцінки стійкості функціонування транспортного потоку - критерій робастності:

$$RR = \frac{A_1 \times A_2}{A_0 \times A_3}. \quad (10)$$

Після підстановки замість A_i значень, представлених формулами (3) – (6), отримаємо такий вираз:

$$RR = \frac{[(T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) \times (T_1 + T_2 + T_3 + K_2 K_3 T_1)]}{[(T_1 T_2 T_3 \times K_2 K_3) + T_1 T_2 T_3]}. \quad (11)$$

Аналіз виразу (11), який є критерієм стійкості (робастності) транспортного потоку, дозволяє сформулювати параметри, від яких залежить стійкість. Як впливає з виразів, за якими розраховуються коефіцієнти підсилення K_2 , K_3 , формули наведено в роботі [1], на стійкість транспортного потоку впливають щільність і інтенсивність потоку. Їх необхідно розраховувати для кожної ділянки дорожньої мережі або магістралі та підставляти у формулу (11). Постійні часу T_1 , T_2 , T_3 залежать від кваліфікації та психофізіологічних властивостей водія, ступеня його втоми, динамічних властивостей автомобіля та дорожніх умов. Їх необхідно визначати за формулами, які наведені у роботі [1], та підставляти у формулу (11).

Якщо величина критерію дорівнює одиниці – транспортний потік функціонує на межі втрати стійкості. Якщо величина критерію менше одиниці – транспортний потік втратив стійкість, настає зупинка руху – затор. Якщо величина критерію більше одиниці – транспортний потік має стійкість, тобто, функціонує без затримок та заторів. Чим більша величина критерію, тим більший запас стійкості транспортного потоку.

З отриманих результатів теоретичних досліджень можна сформулювати визначення робастності транспортного потоку.

Робастність транспортного потоку (англ. *robust range*) – це безрозмірна величина, яка характеризує діапазон стійкого руху транспортних засобів на ділянках дорожньої мережі з урахуванням її інфраструктури, щільності та інтенсивності руху без затримок та заторів.

Критерій робастності RR , формула (11), необхідно застосовувати під час аналізу дорожньої мережі на виникнення затримок під час руху та заторів, а також при проектуванні нової міської дорожньої мережі.

Отриманий результат відрізняється від відомих, які наведені у огляді літературних джерел тим, що дозволяє шляхом моделювання визначити межі втрати стійкості – утворення заторів. Визначення граничних значень щільності та інтенсивності транспортного потоку, їх градієнтів, облік багатосмугового руху, дозволить розробляти заходи щодо запобігання заторам.

Подані результати є продовженням досліджень, що викладені у роботі [1]. Відрізняються від відомих тим, що враховують динаміку розвитку процесу. Крім градієнтів швидкості та щільності транспортних потоків, що застосовуються у перерахованих роботах, враховуються динамічні властивості транспортних засобів та багатосмугова дорожня мережа, а також час затримок на пішохідних переходах та світлофорах.

Як впливає з представлених теоретичних досліджень, критерій стійкості транспортного потоку має обмеження щодо застосування. Обмеження пов'язані з визначенням вихідних даних. На контрольованій ділянці дорожньої мережі необхідно визначати щільність та інтенсивність потоку, швидкість та прискорення руху транспортних засобів у потоці. Сучасні електронні засоби контролю дозволяють виконати такі вимірювання, проте потребують певних витрат. Крім цього, статистично визначеними величинами є час реакції водіїв на зміну дорожньої ситуації та наявність пішохідних переходів та світлофорів на контрольованій ділянці дороги.

Висновки. 1. Розроблено критерій стійкості (робастності) транспортного потоку, сформульовано параметри, від яких залежить стійкість. До таких параметрів відносяться градієнт щільності та градієнт швидкості транспортного потоку. За аналогією зі стійкістю динамічних технічних систем отримано вираз оцінки критерію стійкості транспортного потоку. Показано, що при величині критерію рівної одиниці транспортний потік функціонує на межі втрати стійкості. Якщо величина критерію менше одиниці – транспортний потік втратив стійкість, настає зупинка руху – затор. Якщо величина

критерію більше одиниці – транспортний потік має стійкість, тобто, функціонує без затримок та заторів. Чим більша величина критерію, тим більший запас стійкості.

2. Дано визначення робастності транспортного потоку. Робастність транспортного потоку (англ. robust range) – це безрозмірна величина, яка характеризує діапазон стійкого руху транспортних засобів на ділянках дорожньої мережі з урахуванням її інфраструктури, щільності та інтенсивності руху без затримок та заторів. Показано, що критерій робастності RR можна застосовувати під час аналізу дорожньої мережі на виникнення затримок під час руху та заторів, а також при проектуванні нової міської дорожньої мережі.

Подальший напрямок досліджень, на наш погляд, лежить у площині створення розрахункових моделей щодо визначення щільності та інтенсивності транспортного потоку, прогнозування значень градієнтів щільності та швидкості руху транспортних засобів у потоці. Це дозволить розробити єдину методологію моделювання стійкості транспортних потоків для побудови прогнозів завантаженості дорожньої мережі та магістралей.

Наступна стаття буде продовженням цієї роботи і присвячена результатам моделювання стійкості транспортного потоку при зміні вхідних параметрів. Використовуючи розроблений критерій робастності, будуть побудовані залежності зміни даного критерію від вхідних параметрів, що дозволить побудувати їх рейтинг впливу на стійкість.

Список літератури

1. Оцінка ергономічної стійкості транспортного потоку на ділянках дорожньої мережі. Ідентифікація математичної моделі. / В.А. Войтов та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7(38). С. 236-245
2. Kessels, F. (2019). Introduction to Traffic Flow Modelling. In: Traffic Flow Modelling. EURO Advanced Tutorials on Operational Research. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78695-7_1
3. Hoogendoorn S., Bovy P. H. L. State-of-the-art of vehicular traffic flow modeling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems and Control Engineering*. 2001. 215:283-303. DOI:10.1243/0959651011541120
4. Zhu, Y., Wu, Q. & Xiao, N. Research on highway traffic flow prediction model and decision-making method. *Sci Rep* . 2022. 12, 19919. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24469-y>
5. Marcello Montanino, Julien Monteil, Vincenzo Punzo. From homogeneous to heterogeneous traffic flows: Lp String stability under uncertain model parameters. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2021. Vol. 146. P. 136-154. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.01.009>
6. Saeed Mohammadian, Zuduo Zheng, Md. Mazharul Haque, Ashish Bhaskar. Performance of continuum models for realworld traffic flows: Comprehensive benchmarking. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2021. Vol. 147. P. 132-167. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.03.007>
7. Jiping Xing, Wei Wu, Qixiu Cheng, Ronghui Liu. Traffic state estimation of urban road networks by multi-source data fusion: Review and new insights. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2022. Vol. 595. 1. 127079. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.127079>
8. Гук В.І., Шкодовський Ю.М. Транспортні потоки: теорія та їх застосування в урбаністиці: монографія. Х.: Золоті сторінки, 2009. 232 с.
9. Гук В.І., Запорожцева О.В. Взаємозв'язок інтенсивності, швидкості і щільності транспортних потоків на багатосмугових автомагістралях. *Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр.* 2010. Вып. 50. С. 69– 73.
10. Запорожцева Е.В. Распределение задержек автомобилей на автомагистралях. *Вестник ХНАДУ*. 2013. Вып.61-62. С. 102 – 105.
11. Жданов В.Л. Анализ информативного признака емкости транспортного потока как критерия оценки уровня его интегральной опасности. *Вестник КузГТУ. Автомобильный транспорт*. 2008. С. 12 – 17.
12. Jie Sun, Zuduo Zheng, JianSun. The relationship between car following string instability and traffic oscillations in finite-sized platoons and its use in easing congestion via connected and automated vehicles with IDM based controller. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2020. Vol. 142. P. 58-83 <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.10.004> .

13. Kieran Kalair, Colm Connaughton. Anomaly detection and classification in traffic flow data from fluctuations in the flow–density relationship. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2021. Vol. 127. 103178. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103178>.
14. Смирнова М.Н., А. И. Богданова А.И., Zhu Z.J., Маненкова А.С., Смирнов Н.Н. Математическая модель автотранспортных потоков с элементами вязкоупругости. *Матем. моделирование*. 2014. Т.26. № 7. С. 54–64
15. Geng Zhang, Yu Zhang, Dong-bo Pan, Chun-yan Sang. Study on the interval integration effect of vehicle's self-delayed velocity on traffic stability in micro traffic modeling. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2019. Vol. 533. 1. 121941. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121941>
16. Mykolaiets D., Klen K. Fundamentals of the automatic control theory. Calculation work. Kyiv : Igor Sikorsky, Kyiv Polytechnic Institute, 2020. 45 p. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38282>
17. Isidori A. Control Theory for Automation: Fundamentals. *Springer Handbooks book series (SHB)* , 2009. Pp. 147-172. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-78831-7_9
18. Modeling of reliability of logistic systems of urban freight transportation taking into account street congestion. / Vojtov V. et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4, no. 3 (100). Pp. 15-21. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.175064.
19. Muzylyov D., Shramenko N., Karnaukh M. (2021) Choice of Carrier Behavior Strategy According to Industry 4.0. In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_22.

References

1. Vojtov, V.A., Kravtsov, A.H., Karnaukh, M.V., Horyayinov, O.M., Kozenok, A.S. & Babych, I.A. (2023) Otsinka erhonomichnoyi stiykosti transportnoho potoku na dil'nytsyakh dorozhn'oyi merezhi. Identyfikatsiya matematychnoyi modeli [Identification of a mathematical model]. *Tsentral'noukrayins'kyi naukovyy visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences, Issue 7(38)*, 236-245 [in Ukrainian].
2. Kessels, F. (2019). Introduction to Traffic Flow Modelling. In: *Traffic Flow Modelling. EURO Advanced Tutorials on Operational Research*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78695-7_1 [in English].
3. Hoogendoorn, S. & Bovy, P. H. L. (2001) State-of-the-art of vehicular traffic flow modeling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems and Control Engineering*, 215:283-303. DOI:10.1243/0959651011541120 [in English].
4. Zhu, Y., Wu, Q. & Xiao, N. (2022) Research on highway traffic flow prediction model and decision-making method. *Sci Rep*, 12, 19919. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24469-y> [in English].
5. Marcello Montanino, Julien Monteil, Vincenzo Punzo. (2021). From homogeneous to heterogeneous traffic flows: Lp String stability under uncertain model parameters. *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 146, Pages 136-154. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.01.009> [in English].
6. Saeed Mohammadian, Zuduo Zheng, Md. Mazharul Haque & Ashish Bhaskar. (2021). Performance of continuum models for realworld traffic flows: Comprehensive benchmarking. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 147, Pp. 132-167 <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.03.007> [in English].
7. Jiping Xing, Wei Wu, Qixiu Cheng & Ronghui Liu. (2022). Traffic state estimation of urban road networks by multi-source data fusion: Review and new insights. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 595, 1, 127079. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.127079> [in English].
8. Huk, V.I. & Shkodovs'kyi, Yu.M. (2009). *Transportni potoky: teoriya ta yikh zastosuvannya v urbanistytsi* [Transport flows: theory and their application in urbanism]. Kharkiv: Zoloti storinky [in Ukrainian].
9. Huk, V.I. & Zaporozhtseva, O.V. (2010). Vzayemozv'yazok intensyvnosti, shvydkosti i shchil'nosti transportnykh potokiv na bahatosmuhovykh avtomahistryalakh [Interrelationship of intensity, speed and density of traffic flows on multi-lane highways]. *Vestnyk KHNADU: sb. nauch. tr. – Herald of the KhNARU*, Issue 50, 69– 73 [in Ukrainian].
10. Zaporozhtseva, Ye.V. (2013). Raspredeleniye zaderzhek avtomobiley na avtomogistryalakh [Distribution of vehicle delays on highways.]. *Vestnik KHNADU – Herald of the KhNARU*, Issue.61-62, 102 – 105 [in Ukrainian].
11. Zhdanov, V.L. (2008). Analiz informativnogo priznaka yemkosti transportnogo potoka kak kriteriya otsenki urovnya yego integral'noy opasnosti [Analysis of the informative sign of the capacity of the transport flow as a criterion for assessing the level of integral danger]. *Vestnik KuzGTU, Avtomobil'nyy transport – Herald of KuzGTU. Automobile transport* [in Ukrainian].
12. Jie Sun, Zuduo Zheng & Jian Sun. (2020). The relationship between car following string instability and traffic oscillations in finite-sized platoons and its use in easing congestion via connected and automated

- vehicles with IDM based controller. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 142, Pp. 58-83. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.10.004> [in English].
13. Kieran Kalair & Colm Connaughton. (2021). Anomaly detection and classification in traffic flow data from fluctuations in the flow–density relationship. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 127, 103178. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103178> [in English].
 14. Smirnova, M.N., Bogdanova, A.I., Zhu, Z.J., Manenkova, A.S. & Smirnov, N.N. (2014). Matematicheskaya model' avtotransportnykh potokov s elementami vyazkouprugosti [Mathematical model of motor vehicle flows with viscoelasticity elements]. *Matem. modelirovaniye – Math. modeling*, Vol. 26, 7, 54–64 [in Ukrainian].
 15. Geng Zhang, Yu Zhang, Dong-bo Pan & Chun-yan Sang. (2019). Study on the interval integration effect of vehicle's self-delayed velocity on traffic stability in micro traffic modeling. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 533, 1, 121941. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121941> [in English].
 16. Mykolaiets, D. & Klen, K. (2020). Fundamentals of the automatic control theory. Calculation work. Kyiv : Igor Sikorsky, Kyiv Polytechnic Institute. Retrieved from <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38282> [in English].
 17. Isidori, A. (2009). Control Theory for Automation: Fundamentals. *Springer Handbooks book series (SHB)*, pp. 147-172. Retrieved from https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-78831-7_9 [in English].
 18. Vojtov, V., Kutiy, O., Berezhnaja, N., Karnaukh, M. & Bilyaeva, O. (2019). Modeling of reliability of logistic systems of urban freight transportation taking into account street congestion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4, no. 3 (100), pp. 15-21 [in English].
 19. Muzylyov, D., Shramenko, N. & Karnaukh, M. (2021). Choice of Carrier Behavior Strategy According to Industry 4.0. In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham [in English].

Andrii Kravtsov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Tetiana Larina**, Prof., DSc., **Oleksiy Goryayinov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anna Kozenok**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Tetiana Gorodetska**, Assoc. Prof., PhD econ. sci., **Inna Babych**, Senior Lecturer

State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

Justification of the Criterion of Stability of the Traffic Flow at the Sections of the Road Network

The work considers the justification and obtaining the criteria for assessing the stability of the traffic flow on various sections of the street and road network under the influence of external disturbances. Analysis of the criterion allows to formulate the parameters on which stability depends. As follows from the expressions by which the criterion is calculated, the stability of the traffic flow is affected by the density and intensity of the traffic flow. They must be calculated for each section of the road network or highway in the form of amplification factors. The time constants depend on the qualification and psychophysiological properties of the driver, the degree of his fatigue, the dynamic properties of the car and road conditions. It is shown that when the value of the criterion is equal to one, the transport flow functions on the verge of loss of stability. If the value of the criterion is less than one, the traffic flow has lost its stability, traffic stops - traffic jam. If the value of the criterion is greater than one, the transport flow is stable, i.e. functions without delays and traffic jams. The larger the value of the criterion, the greater the margin of stability.

Based on the obtained results of theoretical studies, the robustness of the traffic flow is defined. The robustness of the traffic flow (English robust range) is a dimensionless value that characterizes the range of stable movement of vehicles on sections of the road network, taking into account its infrastructure, density and intensity of traffic without delays and traffic jams.

It is shown that the developed criterion of robustness must be applied in the analysis of the road network for the occurrence of delays during traffic and traffic jams, as well as in the design of a new urban road network. The obtained result differs from the known ones given in the review of literary sources in that it allows to determine the limits of the loss of stability - the formation of traffic jams - through modeling. Determining the limit values of traffic flow density and intensity, their gradients, accounting for multi-lane traffic will allow developing measures to prevent traffic jams.

traffic flow, modeling, dynamic model, density gradient, speed gradient, amplification factor, time constant, stability criterion, traffic flow robustness criterion

Одержано (Received) 17.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 23.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023