

УДК 656:338

DOI: [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)

**В.А. Войтов**, проф., д-р техн. наук, **А. Г. Кравцов**, доц., канд. техн. наук, **М. В. Карнаух**, доц., канд. техн. наук, **О. М. Горяїнов**, доц., канд. техн. наук, **А.С. Козенок**, доц., канд. техн. наук, **І.А. Бабич**, ст. викл.

*Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна*

*e-mail: vavoitovva@gmail.com*

## Оцінка ергономічної стійкості транспортного потоку на ділянках дорожньої мережі. Ідентифікація математичної моделі

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.

Отримано вирази для визначення коефіцієнтів підсилення та постійних часу, що входять у диференціальне рівняння. Обґрунтовані параметри, які є вхідним впливом та визначають стійкість транспортного потоку, – це градієнти щільності та швидкості потоку. Обґрунтовані параметри, що характеризують реакцію транспортного потоку на обурення, – це постійні часу, фізичний сенс яких полягає в інерційності всіх ланок, що входять у модель.

**транспортний потік, моделювання, динамічна модель, структурна ідентифікація, параметрична ідентифікація, градієнт щільності, градієнт швидкості, коефіцієнт підсилення, постійна часу**

**Постановка проблеми.** Високий рівень завантаженості дорожньо-вуличної мережі у містах супроводжується різким зниженням швидкостей сполучення та транспортними заторами. Це призводить до зростання аварійності, підвищення часу доставки кореспонденцій та зниження ефективності використання автомобільного транспорту. Враховуючи це, дослідження питань використання пропускнуої спроможності існуючої дорожньої структури шляхом прогнозування виникнення заторів та коригування маршрутів руху є актуальним і дозволить удосконалити організацію перевізного процесу.

Аналіз низки досліджень показав, що процес дорожнього руху характеризується комплексом показників, які визначають рівень організації самого процесу з одного боку, з другого – характеризують умови, у яких відбувається транспортне обслуговування. Різноманітність різних варіантів організації дорожнього руху обумовлює використання цілого набору критеріїв, які можна поділити на частинні та інтегральні. У процесі досліджень у галузі кінетичної теорії транспортних потоків автори Роберт Герман та Ілля Пригожин створили «дворідинну» модель транспортного потоку (Two-Fluid Model) [1]. При цьому метою створення моделі стала оцінка режиму руху транспортного потоку міською дорожньо-вуличною мережею. Застосування моделювання транспортних процесів є найбільш економічним методом дослідження, що одночасно дозволяє з достатньою достовірністю прогнозувати затримки під час руху та утворення заторів.

Одним із шляхів вирішення такого завдання є розробка математичної моделі ергономічної оцінки стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі під час дії зовнішніх збурень. Це дозволить прогнозувати виникнення затримок під час руху та заторів.

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 обурення, що впливають на них.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [2-4] представлено огляд літератури, де викладено концепцію «стійкої безпеки дорожнього руху». Мета концепції – надати безпеці дорожнього руху нового імпульсу. Концепція обґрунтовує шляхи зниження ймовірності виникнення заторів та випадків дорожньо-транспортних пригод на магістральних дорогах та міській вуличній мережі. Автори зазначають, що результати такого аналізу мають враховуватись при проектуванні нової дорожньої інфраструктури. У статтях обговорюються принципи та заходи сталого безпеки дорожнього руху, а також організаційні та фінансові заходи щодо їх забезпечення. У цих роботах автори наводять методи оцінки стійкості транспортних мереж, параметри та критерії оцінки стійкості. Показано взаємозв'язок між стійкістю транспортного потоку з одного боку та щільністю, інтенсивністю та часом руху транспортних засобів у потоці з іншого боку.

Наведені публікації розширюють аналітичний підхід до дослідження стійкості транспортних потоків, показують взаємозв'язок між параметрами, що характеризують такий потік. Математичних моделей, методів та методик вирішення прикладних завдань, автори не наводять.

Математичним моделям стійкості транспортних потоків присвячені роботи [5, 6]. У цих роботах показано, що неоднорідність таких характеристик, як реакція водіїв на зовнішнє обурення та динамічні властивості транспортних засобів впливають на стійкість руху транспортного потоку. Для підвищення точності моделювання автори пропонують розділяти стійкість однорідних транспортних потоків та гетерогенних потоків. Ступінь стійкості руху в однорідному потоці значно вищий, ніж у гетерогенному. Моделі побудовані з урахуванням імовірнісних розподілів основних параметрів, що характеризують транспортний потік. Робиться висновок, що для підвищення точності моделювання необхідно враховувати коливання параметрів транспортного потоку, особливо гетерогенного.

Роботи [7-9] спрямовані на дослідження впливу затримок та виникнення заторів у транспортних потоках. У цих дослідженнях пропонується інноваційна система раннього попередження про затори на дорогах, що включає точкове прогнозування, оцінку характеристик, інтервальне прогнозування. Прогноз виконується з урахуванням статистичних розподілів параметрів потоку. Результати моделювання використовуються на етапі комплексної оцінки рівня завантаженості доріг, включаючи моделювання щільності руху та середньої швидкості руху. Таким чином, цей підхід може бути широко використаний для індивідуального планування маршрутів руху та уніфікованого управління рухом. Результати моделювання використовуються для управління рухом на магістралях та підвищують рівень обслуговування під час перевантажень на дорогах. На думку авторів, час затримок під час руху в потоці є більш чутливим параметром до стабільності транспортного потоку.

У роботі [10] пропонується нова модель управління транспортним потоком із зворотним зв'язком для дослідження механізму поширення коливань транспортного потоку. Умову лінійної стійкості одержано з використанням методу аналізу частотної області. Як аналітичний аналіз моделі, і чисельні експерименти, показують, що облік зворотного зв'язку у моделях підвищує точність прогнозування затримок та заторів і може ефективно запобігати заторам на дорогах.

Системне уявлення понять «керуваність автомобілів» та «керування автомобілем» з погляду кібернетики, теорії інформації та автоматичного управління, представлено в роботі [11]. Автори вважають, що оцінку керуваності необхідно виконувати з урахуванням інформації про дорожню ситуацію та реакцію автомобіля на поворот керма. Пропонується систему «водій – автомобіль» розглядати як систему автоматичного управління, де процес управління залежить від передавальних функцій водія та автомобіля. Передавальні функції виражені автором у вигляді інерційних ланок. На нашу думку такий підхід є перспективним, тому що математичний апарат теорії автоматичного управління добре розроблений.

Теоретичні та експериментальні дослідження часу затримки автомобілів у потоці, обумовлені часом реакції водія на умови руху, що змінюються, представлені в роботах [12, 13]. Автори визначають поняття часу реакції водія на зміну дорожньої ситуації. Реакцією називається дія організму у відповідь на зовнішній подразнюючий фактор. До простих реакцій належать дії у відповідь на одиничний подразник (наприклад, гальмування автомобіля, що рухається попереду). До складних – дія одразу кількох факторів (наприклад, на регульованому перехресті доводиться стежити за зміною сигналів світлофора та за рухом пішоходів, що переходять проїжджу частину, а також стежити за іншим транспортом). Автори стверджують, що залежно від особливостей характеристик конкретної дорожньо-транспортної ситуації, час реакції водія може змінюватися в межах від 0,6 до 1,4 сек.

Представлений аналіз концепцій та математичних моделей оцінки стійкості транспортних потоків на міських вулицях та автомагістралях до заторів та затримок під час руху дозволяє зробити наступні висновки. Основними параметрами, що характеризують процес, є: щільність та інтенсивність транспортного потоку, а також час затримок у процесі руху. 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).

Для підвищення адекватності моделей, що розробляються, у схемі моделювання необхідно мати зворотний зв'язок. Це дозволить враховувати зміну дорожньої ситуації у часі. Функціонування транспортного потоку слід розглядати як динамічний процес, використовуючи поняття стійкості технічних систем за Ляпуновим.

Найбільш ефективним, на наш погляд, є добре розроблений та апробований математичний апарат теорії автоматичного управління, де досліджуються динамічні процеси із зворотним зв'язком за допомогою диференціальних рівнянь.

Розробка математичної моделі ергономічної оцінки стійкості транспортного потоку на ділянках дорожньої мережі 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 математичної моделі оцінки ергономічної стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі при дії зовнішніх збурень.

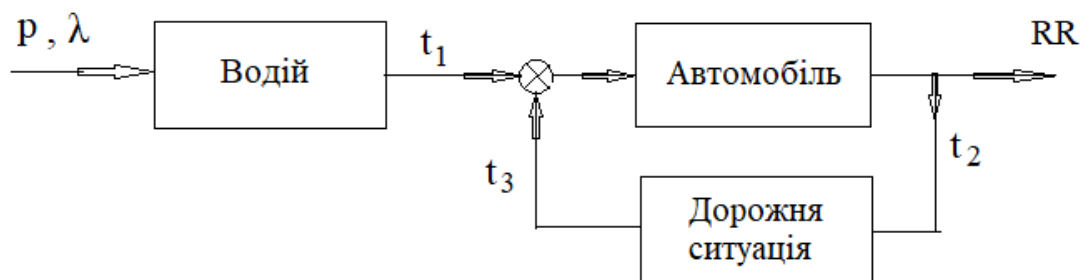
**Виклад основного матеріалу.** При розробці математичної моделі ергономічної оцінки стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі з урахуванням дії зовнішніх збурень прийняті відповідні припущення.

Одиничний транспортний засіб будемо розглядати в потоці, що рухається за автомобілем, що йде попереду, з урахуванням багатосмуговості руху і часу реакції водія на збурення, з урахуванням динамічних властивостей автомобіля і швидкості зміни дорожньої ситуації.

Для опису динамічних властивостей системи водій-автомобіль-дорожня ситуація будемо використовувати математичний апарат теорії автоматичного управління за наявності зворотного зв'язку [14]. Структурно-динамічна схема моделювання стійкості руху транспортного засобу представлена на рис. 1.

Динамічні властивості водія, автомобіля та дорожньої ситуації приймемо у вигляді інерційних ланок, тому що реакція на збурення відбувається не миттєво, а з затримками у часі.

Відповідно до основних принципів теорії автоматичного управління, інерційні ланки структурно-динамічної схеми, рис. 1, виразимо в наступному вигляді.



$p$  – щільність транспортного потоку, 1/м;  $\lambda$  – інтенсивність транспортного потоку, 1/с;  
 $t_1$  – час реакції водія, с;  $t_2$  – час маневру автомобіля, с;  $t_3$  – час затримки під час руху у транспортному потоці, с; RR – діапазон (величина) стійкості транспортного потоку, безрозмірна величина

Рисунок 1 – Структурно-динамічна схема моделювання стійкості руху транспортного засобу:  
 Джерело: розроблено авторами

Для моделювання ланки «водій» передавальна функція має вигляд:

$$W_1 = \frac{K_1}{T_1 p + 1}, \quad (1)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт підсилення, що характеризує ступінь впливу вхідного сигналу (щільність та інтенсивність транспортного потоку), на вихідний сигнал (час реакції водія на зміну параметрів транспортного потоку), безрозмірна величина;

$T_1$  – постійна часу, що характеризує інерційність водія, розмірність секунда;

$p = d/dt$  – оператор диференціювання.

Для моделювання ланки «автомобіль» передавальна функція має вигляд:

$$W_2 = \frac{K_2}{T_2 p + 1}, \quad (2)$$

де  $K_2$  – коефіцієнт підсилення, характеризує ступінь впливу вхідного сигналу (час реакції водія на зміну параметрів транспортного потоку), на вихідний сигнал (час затримки під час руху у потоці, втрата стійкості транспортного потоку – затор), безрозмірна величина;

$T_2$  – постійна часу, що характеризує інерційність автомобіля, що виявляється у здатності автомобіля до маневру у вигляді часу на маневр, розмірність секунда.

Для моделювання ланки «дорожня ситуація» передавальна функція має вигляд:

$$W_3 = \frac{K_3}{T_3 p + 1}, \quad (3)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт підсилення, характеризує ступінь впливу вхідного сигналу (час на маневр автомобіля при зміні дорожньої ситуації), на вихідний сигнал (час затримки при русі в потоці, втрата стійкості транспортного потоку – затор), безрозмірна величина;

$T_3$  – стала часу, що характеризує інерційність зміни дорожньої ситуації, розмірність секунда.

Використовуючи основні положення теорії автоматичного управління, які викладені у роботах [14, 15], запишемо вирази для еквівалентної передавальної функції структурно-динамічної схеми, яка представлена на рис.1:

$$W = W_1 \cdot \frac{W_2}{1 + W_2 \cdot W_3} = \frac{K_1}{T_1 p + 1} \cdot \frac{\frac{K_2}{T_2 p + 1}}{1 + \frac{K_2 \cdot K_3}{(T_2 p + 1) \cdot (T_3 p + 1)}}. \quad (4)$$

Після алгебраїчних перетворень еквівалентну передавальну функцію запишемо у вигляді:

$$W = \frac{(K_1 K_2 T_3) p + K_1 K_2}{(T_1 T_2 T_3) p^3 + (T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) p^2 + (T_1 + T_2 + T_3 + K_2 K_3 T_1) p + K_2 K_3 + 1}. \quad (5)$$

Чисельник виразу (5) представляє вхідний сигнал у динамічну систему, яку наведено на рис.1. Знаменник – вихідний сигнал.

Використовуючи вираз для еквівалентної передавальної функції (5), запишемо диференціальне рівняння, яке відображає динаміку зміни транспортного потоку в часі:

$$\begin{aligned} (T_1 T_2 T_3) p^3 + (T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) p^2 + (T_1 + T_2 + T_3 + K_2 K_3 T_1) p + K_2 K_3 + 1 = \\ = (K_1 K_2 T_3) p + K_1 K_2 \end{aligned} \quad (6)$$

Диференціальне рівняння третього порядку записано в операторній формі, де  $p = d/dt$ , оператор диференціювання.

Аналіз диференціального рівняння (6) дозволяє зробити наступні висновки.

Права частина рівняння характеризує вхідний сигнал, який впливає на транспортний потік, як динамічну систему. Це величини коефіцієнтів  $K_1$  і  $K_2$ , а також постійна часу  $T_3$ . Отже, щільність і інтенсивність транспортного потоку –  $K_1$ ,  $K_2$ , а також час реакції водія на зміну параметрів транспортного потоку та інерційність зміни дорожньої ситуації –  $T_3$  є основними значущими параметрами, які впливають на стійкість. Крім цього, у правій частині знаходиться перша похідна від добутку перерахованих параметрів. Це означає, що на стійкість транспортного потоку впливають не тільки величини  $K_1 \cdot K_2 \cdot T_3$ , а й швидкість їх зміни у часі. Тому застосування у моделях таких параметрів, як градієнт щільності та градієнт швидкості обґрунтовано.

Ліва частина диференціального рівняння (6) характеризує вихідний сигнал, тобто реакцію транспортного потоку, як динамічної системи, на вхідний вплив – праву частину рівняння. Це величини коефіцієнтів  $K_2$ ,  $K_3$  та величини постійних часу  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ . Значення цих величин впливатиме на стійкість транспортного потоку.

Щоб застосувати диференціальне рівняння (6) і визначити межу стійкості функціонування транспортного потоку, необхідно виконати параметричну ідентифікацію динамічної моделі.

Сутність параметричної ідентифікації математичної моделі полягає у знаходженні виразів визначення величин коефіцієнтів підсилення і постійних часу, які входять у диференціальне рівняння (6).

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

$$K_1 = \frac{N \cdot l_a}{L}, \quad (7)$$

де  $N$  – кількість автомобілів на контрольованій ділянці дороги;

$l_a$  – довжина автомобіля, м;

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

У зв'язку з тим, що транспортний потік є динамічним потоком і змінюється при русі за маршрутом [16, 17], запишемо вираз для розрахунку градієнта щільності потоку як першої похідної від контрольованої ділянки дороги:

$$\text{grad}p = \frac{\sigma_N}{L^2}, 1/\text{м}^2, \quad (8)$$

де  $\sigma_N$  – середньоквадратичне відхилення кількості автомобілів у транспортному потоці на контрольованій ділянці дороги.

Середньоквадратичне відхилення кількості автомобілів у транспортному потоці виразимо формулою:

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (N_i - N_{cp})^2}, \quad (9)$$

де  $m$  – кількість вимірювань величини кількості автомобілів на контрольованій ділянці;

$N_i$  – величина кількості автомобілів  $i$ -го виміру;

$N_{cp}$  – величина середньої кількості автомобілів  $m$  вимірів.

Порівнюючи формули (7) і (8), можна зробити висновок, що градієнт щільності транспортного потоку пропорційний коефіцієнту підсилення  $K_1$ .

Значення постійної часу  $T_1$ , яка характеризує інерційність водія, залежно від величин щільності та інтенсивності транспортного потоку, представимо виразом:

$$T_1 = \frac{t_1^2 \cdot N \cdot l_a \cdot \sigma_a}{L \cdot v}, \text{ с}, \quad (10)$$

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

$\sigma_a$  – середньоквадратичне відхилення прискорення автомобілів у транспортному потоці, м/с<sup>2</sup>;

$v$  – швидкість автомобілів в транспортному потоці, м/с.

Прискорення автомобіля, виходячи з другого закону Ньютона, висловимо формулою:

$$a = \frac{N_e}{v \cdot M}, \quad (11)$$

де  $N_e$  – номінальна потужність двигуна автомобіля, розмірність Вт;

$M$  – маса автомобіля, розмірність кг.

Середньоквадратичне відхилення прискорення автомобілів у транспортному потоці висловимо формулою:

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (a_i - a_{cp})^2}, \quad (12)$$

де  $m$  – кількість вимірювань величини прискорення автомобілів на контрольованій ділянці;

$a_i$  – величини прискорення  $i$ -го вимірювання, розмірність м/с<sup>2</sup>;

$a_{cp}$  – величини середнього прискорення  $m$  вимірювань, розмірність м/с<sup>2</sup>.

Коефіцієнт підсилення  $K_2$ , який характеризує вплив ступеня динамічності транспортного потоку на час затримок при русі та втрату стійкості, виразимо такою формулою:

$$K_2 = \frac{\sigma_a \cdot N^2 \cdot l_a^3}{v^2 \cdot L^2}. \quad (13)$$

Градiєнт швидкості транспортного потоку, який можна порівнювати із внутрішньою енергією потоку, виразимо формулою:

$$gradv = \frac{\sigma_a}{v \cdot L}, \text{ 1/м} \cdot \text{с}. \quad (14)$$

Порівнюючи формули (13) і (14), можна дійти висновку, що градієнт швидкості транспортного потоку пропорційний коефіцієнту підсилення  $K_2$ .

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

$$T_2 = \frac{M \cdot l_a^2}{N_e \cdot t_2^2}, \text{ с}, \quad (15)$$

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

Коефіцієнт підсилення  $K_3$ , який характеризує ступінь впливу зміни дорожньої ситуації, на час затримки під час руху в потоці [16, 17] та втрату стійкості, виразимо наступною формулою:

$$K_3 = \frac{N \cdot l_a \cdot k^2 \cdot s^2}{L}, \quad (16)$$

де  $k$  – кількість пішохідних переходів на контрольованій ділянці, розмірність од;

$s$  – кількість світлофорів на контрольованій ділянці, розмірність од.

Значення постійної часу  $T_3$ , що характеризує інерційність зміни дорожньої ситуації, виразимо такою формулою:

$$T_3 = \frac{n \cdot t_2^2}{t_3}, \text{ с}, \quad (17)$$

де  $n$  – кількість смуг руху на проїжджій частині;

$t_3$  – сумарний час затримок під час руху за маршрутом, с.

Як впливає з представлених теоретичних досліджень, математична модель стійкості транспортного потоку має обмеження щодо застосування. Обмеження пов'язані з визначенням вихідних даних для моделювання. 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.



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 наша стаття буде продовженням цієї роботи та присвячена обґрунтуванню та отриманню числового критерію, який дозволить визначити межу стійкості транспортного потоку (виникнення заторів) при зміні вхідних параметрів. Моделювання зміни межі стійкості при зміні вхідних параметрів дозволить побудувати їхній рейтинг впливу на стійкість.

#### **Висновки:**

1. Обґрунтовано структуру математичної моделі оцінки ергономічної стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі при дії зовнішніх збурень, що є результатом структурної ідентифікації. Математична модель відрізняється від відомих тим, що враховує динаміку розвитку процесу. Крім градієнтів швидкості та щільності транспортних потоків, враховуються динамічні властивості транспортних засобів та кількість смуг дорожньої мережі, а також час затримок на пішохідних переходах та світлофорах. Показано, що динамічні характеристики транспортного потоку описуються диференціальними рівняннями третього порядку.

2. Виконана параметрична ідентифікація математичної моделі, отримані вирази для визначення коефіцієнтів підсилення та постійних часу, що входять у диференціальне рівняння. Обґрунтовані параметри, які є вхідним впливом та впливають на стійкість транспортного потоку, – це градієнт щільності та градієнт швидкості потоку. Обґрунтовано параметри, що характеризують реакцію транспортного потоку на збурення, – це постійні часу, фізичний зміст яких в інерційності всіх ланок, що входять у модель.

#### **Список літератури**

1. Ishii, M., Hibiki, T. (2006). Two-Fluid Model. In: *Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow*. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-29187-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-0-387-29187-1_9)
2. Martin Luther Mfenjou, Ado Adamou Abba Ari, Wahabou Abdou, François Spies Kolyang. (2018). Methodology and trends for an intelligent transport system in developing countries. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. Vol. 19. P. 96-111 <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2018.08.002>.
3. Ingridvan SCHAGEN, Theo JANSSEN. (2000). MANAGING ROAD TRANSPORT RISKS: Sustainable Safety in the Netherlands. *IATSS Research*, Volume 24, Issue 2, Pages 18-27 [https://doi.org/10.1016/S0386-1112\(14\)60025-X](https://doi.org/10.1016/S0386-1112(14)60025-X)
4. Mohammad Zaher Serdar, Muammer Koç, Sami G.Al-Ghamdi. (2022). Urban Transportation Networks Resilience: Indicators, Disturbances, and Assessment Methods. *Sustainable Cities and Society*, Volume 76, 103452 <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103452>
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>
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*, Volume 147, Pages 132-167 <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.03.007>
7. Ping Jiang, Zhenkun Liu, Lifang Zhang, Jianzhou Wang. (2022). Advanced traffic congestion early warning system based on traffic flow forecasting and extenics evaluation. *Applied Soft Computing*, Volume 118, 108544 <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108544>
8. Trinh Dinh Toan, Wong Y.D. (2021). Fuzzy logic-based methodology for quantification of traffic congestion. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Volume 570, 15, 125784 <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125784>
9. Dihua Sun, Dong Chen, Min Zhao, Weining Liu, Linjiang Zheng. (2018). Linear stability and nonlinear



- analyses of traffic waves for the general nonlinear car-following model with multi-time delays. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Volume 501, 1, Pages 293-307 <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.02.179>
10. Tao Wang, Yuanshu Zhang, Jing Zhang, Zhen Li, Shubin Li. (2020). New feedback control strategy for optimal velocity traffic model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Volume 559, 1, 125053 <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.125053>
  11. Осташевский С.А. (2013). Определение понятий «управляемость автомобилей» и «вождение машины» в системе «водитель-автомобиль-дорога». *Вестник ХНАДУ*. Вып.61-62. С. 300-305.
  12. Markovkina A.I., Papunin A.V. (2019). The study of the influence of intelligent driver assistance systems on the capacity of urban roads. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1177. doi:10.1088/1742-6596/1177/1/012052
  13. Podoprigora N., Stepina P., Dobromirov V., Kotikov J. (2020). Determination of driver's reaction time in expert studies of road traffic accidents using software and hardware complex. *Transportation Research Procedia*, vol. 50, pp. 538-544. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.064>
  14. Mykolajets D., Klen K. (2020). Fundamentals of the automatic control theory. Calculation work. *Kyiv : Igor Sikorsky, Kyiv Polytechnic Institute*, 45 p. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38282>
  15. Isidori A. (2009). Control Theory for Automation: Fundamentals. *Springer Handbooks book series (SHB)*, pp. 147-172. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-78831-7\\_9](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-78831-7_9)
  16. Vojtov V., Kutiya 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. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.175064.
  17. 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](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_22)

## References

1. Ishii, M. & Hibiki, T. (2006). Two-Fluid Model. In: *Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow*. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-29187-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-0-387-29187-1_9) [in English].
2. Martin Luther Mfenjou, Ado Adamou Abba Ari, Wahabou Abdou, François Spies Kolyang. (2018). Methodology and trends for an intelligent transport system in developing countries. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 19, 96-111. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2018.08.002> [in English].
3. Ingridvan SCHAGEN, Theo JANSSEN. (2000). MANAGING ROAD TRANSPORT RISKS: Sustainable Safety in the Netherlands. *IATSS Research*, 24(2), 18-27. [https://doi.org/10.1016/S0386-1112\(14\)60025-X](https://doi.org/10.1016/S0386-1112(14)60025-X) [in English].
4. Mohammad Zaher Serdar, Muammer Koç, Sami G.Al-Ghamdi. (2022). Urban Transportation Networks Resilience: Indicators, Disturbances, and Assessment Methods. *Sustainable Cities and Society*, 76, 103452. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103452> [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*, 146, 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*, 147, 132-167. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.03.007> [in English].
7. Ping Jiang, Zhenkun Liu, Lifang Zhang, Jianzhou Wang. (2022). Advanced traffic congestion early warning system based on traffic flow forecasting and extenics evaluation. *Applied Soft Computing*, 118, 108544. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108544> [in English].
8. Trinh Dinh Toan, Wong Y.D. (2021). Fuzzy logic-based methodology for quantification of traffic congestion. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 570 (15), 125784. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125784> [in English].
9. Dihua Sun, Dong Chen, Min Zhao, Weining Liu, Linjiang Zheng. (2018). Linear stability and nonlinear analyses of traffic waves for the general nonlinear car-following model with multi-time delays. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 501 (1), 293-307. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.02.179> [in English].
10. Tao Wang, Yuanshu Zhang, Jing Zhang, Zhen Li, Shubin Li. (2020). New feedback control strategy for optimal velocity traffic model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 559 (1), 125053.

- <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.125053> [in English].
11. Ostashevskiy, S.A. (2013). Opredeleniye ponyatiy “upravlyayemost' avtomobiley” i “vozhdeniye mashiny” v sisteme “voditel'-avtomobil'-doroga”. *Vestnik KHNADU, Issue 61-62*, 300-305 [in English].
  12. Markovkina, A.I. & Papunin, A.V. (2019). The study of the influence of intelligent driver assistance systems on the capacity of urban roads. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1177. doi:10.1088/1742-6596/1177/1/012052 [in English].
  13. Podoprigora, N., Stepina, P., Dobromirov, V. & Kotikov, J. (2020). Determination of driver's reaction time in expert studies of road traffic accidents using software and hardware complex. *Transportation Research Procedia, Vol. 50*, pp. 538-544. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.064> [in English].
  14. Mykolaiets, D. & Klen, K. (2020). *Fundamentals of the automatic control theory. Calculation work*. Kyiv : Igor Sikorsky, Kyiv Polytechnic Institute, 45 p. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38282> [in English].
  15. Isidori, A. (2009). Control Theory for Automation: Fundamentals. *Springer Handbooks book series (SHB)*, pp. 147-172. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-78831-7\\_9](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-78831-7_9) [in English].
  16. Vojtov, V., Kutiya, 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, №3 (100)*, 15-21. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.175064 [in English].
  17. 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](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_22) [in English].

**Viktor Vojtov**, Prof., DSc., **Andrey Kravtsov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mykola Karnaukh**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksiy Goryayinov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anna Kozenok**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Inna Babych**, Senior Lecturer

*State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine*

### **Assessment of the Ergonomic Stability of the Traffic Flow on Sections of the Road Network. Identification of the Mathematical Model**

The paper discusses the structure of the mathematical model featuring assessment of the ergonomic stability of the traffic flow in various sections of the road network under the influence of external disturbances, which is the result of structural identification. The mathematical model differs from the known ones in that it takes into account the dynamics of the process development. In addition to the gradients of speed and density of traffic flows, the research takes into account the dynamic properties of vehicles and the multi-lane road network, as well as the time of delays at pedestrian crossings and traffic lights. The dynamic properties of the traffic flow are described with a third-order differential equation.

The mathematical model is parametrically identified; expressions for determining the gains and time constants included in the differential equation are obtained. The input parameters impacting and affecting the stability of the traffic flow are substantiated – these are the gradients of the density and speed of the flow. The parameters characterizing the response of the traffic flow to disturbances are substantiated – these are time constants, the physical meaning of which is the inertia of all links included in the model.

The study presents expressions for determining the gains and time constants included in the differential equation. The gain coefficient  $K_1$  characterizes the degree of influence of the density of the traffic flow on the reaction time of the driver. The gain coefficient  $K_2$  characterizes the influence of the degree of dynamism of the traffic flow on the time of delays during movement and loss of stability. The gain coefficient  $K_3$  characterizes the degree of influence of a change in the traffic situation on the delay time when moving in the stream and loss of stability. The value of the time constant  $T_1$  characterizes the inertia of the driver depending on the density and intensity of the traffic flow. The value of the time constant  $T_2$  characterizes the inertia of the car and is expressed in the ability to maneuver. The value of the time constant  $T_3$  characterizes the inertia of changing the traffic situation.

**transport flow, modeling, dynamic model, structural identification, parametric identification, density gradient, speed gradient, gain coefficient, time constant**

*Одержано (Received) 16.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 22.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*