

О. М. Горяїнов, доц., канд. техн. наук, **А.С. Козенок**, доц., канд. техн. наук,
Н.Г. Бережна, доц., канд. техн. наук, **І.І. Сисенко**, доц., канд. техн. наук, **І.А. Бабич**, ст.
викл., **О.В. Войтов**, асп.

Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

e-mail: kravcov_84@ukr.net

Дослідження математичної моделі стійкості транспортного потоку на ділянках дорожньої мережі міста

У роботі наведено результати дослідження математичної моделі стійкості транспортного потоку на ділянках вулично-дорожньої мережі міста при зміні зовнішніх факторів. На підставі результатів моделювання запропоновано всі фактори, що впливають на стійкість транспортного потоку, розділити на три групи. Перша група факторів характеризує конструкцію транспортного засобу. Другу групу факторів названо факторами часу, які враховують: час реакції водія на зміну дорожньої ситуації; час на маневр, який може використовувати автомобіль у разі зміни дорожньої ситуації; сумарний час затримок під час руху за маршрутом. Третя група факторів враховує особливості побудови інфраструктури дорожнього середовища. На підставі результатів моделювання представлено рейтинг факторів, що впливають на величину запасу стійкості транспортного потоку.

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

Постановка проблеми. Високий рівень завантаження вулично-дорожньої мережі у містах супроводжується різким зниженням швидкостей сполучення та транспортними заторами. Це призводить до зростання аварійності, підвищення часу доставки вантажів та підвищення собівартості перевезень. Враховуючи це, дослідження питань пропускної спроможності існуючої дорожньої мережі шляхом моделювання та прогнозування виникнення заторів, коригування маршрутів руху є актуальним та дозволить удосконалювати організацію перевізного процесу.

У цій статті розглянуто фактори, що визначають умови стійкості транспортного потоку (виникнення заторів) під час руху транспортних засобів по вуличній мережі, кількісні та якісні показники, що впливають на стійкість, ранжування факторів за ступенем впливу на стійкість.

Робота є продовженням робіт [1,2], 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. 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 [2], є розробка критерію оцінки стійкості транспортного потоку на різних ділянках 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. 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.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На думку авторів роботи [3] моделювання руху є широко використовуваним методом вивчення транспортних потоків, планування та розробки транспортних мереж та систем. Імітаційні моделі дорожнього руху автори поділяють на три категорії: макроскопічні, мікроскопічні та мезоскопічні. У більшості випадків моделі дозволяють визначити такі параметри, як інтенсивність руху, середня швидкість, затримки та втрати часу у дорозі. Дана робота є аналізом існуючих моделей транспортних потоків з точки зору їх функцій, обмежень та застосуванням за різними критеріями.

Основним чинником під час моделювання руху використовується щільність транспортного потоку [4-6]. Наприклад, у роботі [4] щільність транспортних потоків враховується як рівноважне, стабільне значення. При цьому рівноважні щільності потоків отримані авторами роботи аналітично. У роботі [5] наведено експериментальний метод реєстрації щільності транспортного потоку на підставі руху транспортних засобів поблизу перехрестя. У роботі [6] показано застосування щільності потоку, що варіюється, в моделях. Авторами отримано рішення для різних значень щільності. На наш погляд облік щільності потоку, що варіюється, є більш перспективним методичним прийомом. Такий підхід дозволяє підвищити точність моделювання.

Моделювання неоднорідних (гетерогенних) транспортних потоків представлено в роботах [7, 8] Авторами роботи [7] розроблена макроскопічна модель гетерогенного транспортного потоку з частковим підключенням до автоматизованої системи, що заснована на теорії потенційного поля безпеки. У роботі [8] макроскопічна модель гетерогенного транспортного потоку враховує градієнт швидкості та час затримки водія у прийнятті рішень.

У роботах [9-12] досліджувалося вплив середньої неоднорідності руху автомобілів за наявності кількох смуг для руху, виникнення конфліктних ситуацій між автомобілями при зміні смуг. Наприклад, у роботі [10] у модель включений такий фактор, як погодні умови. У роботі [11], до перерахованих факторів, додані такі параметри, як прискорення та гальмування транспортних засобів при русі за автомобілем, що йде попереду. У роботі [12] враховані різні стилі водіння та відмінності у параметрах транспортних засобів (швидкість, прискорення, уповільнення тощо). Такі фактори були включені в модель з використанням аналізу основних компонентів та методу кластеризації. На думку авторів перерахованих робіт, облік таких факторів дозволяє підвищити адекватність мікроскопічних математичних моделей до реальної дорожньої ситуації та прогнозувати виникнення аварійних ситуацій та заторів.

У роботах [13,14] проводяться порівнянні дослідження для відтворення зниження пропускнув спроможності на з'їздах з автомагістралей та в'їздах на магістралі. Авторами виявлено одну з основних слабких сторін мікроскопічного моделювання дорожнього руху при з'їзді та в'їзді на магістралі – це зниження пропускнув

спроможності. Запропоновано модель примусової зміни смуги руху для транспортних засобів, що в'їжджають на магістраль.

Для дослідження феномена зупинки та зміни швидкості руху, викликаного слідуванням за автомобілем, що йде попереду, пропонується гібридна модель, яка поєднує можливості на макро і мікрорівнях [15]. По-перше, при стохастичному характері поведінки водіння до різниці швидкостей додається броунівський шум, щоб модифікувати модель слідування за автомобілем. Потім додаються макроскопічні характеристики транспортного потоку та дві моделі поєднуються в контексті великого транспортного потоку. В основі створення таких моделей лежить оцінка щільності транспортного потоку [16]. На думку авторів, розпізнавання та підрахунок транспортних засобів — два основні кроки для оцінки щільності руху. Системи ідентифікації транспортних засобів можуть будуватися з урахуванням нейронних мереж.

У роботах [17,18] гібридні моделі представлені як інтелектуальні системи керування дорожнім рухом. Такі системи є ефективним способом вирішення проблеми заторів у місті, підвищення пропускної спроможності доріг та забезпечення безпеки водіїв. Короткострокове прогнозування транспортних потоків є основним завданням інтелектуальної системи керування дорожнім рухом.

Підсумовуючи аналіз публікацій, присвячених моделюванню транспортних потоків, необхідно зазначити, що основними факторами в таких моделях виступають щільність та швидкість руху транспортних засобів у потоці, коливання швидкості руху (прискорення, уповільнення), реакція водіїв на зміну дорожньої ситуації, стійкість транспортного потоку до виникнення заторів. На нашу думку значимими факторами під час використання моделей мають виступати градієнт щільності [6] і градієнт швидкості транспортного потоку [10]. Дані фактори дозволять враховувати стохастичність транспортного потоку та підвищити рівень прогнозування стійкості транспортного потоку до заторів.

Саме такий підхід застосовано авторами роботи [19]. Для вирішення проблеми заторів на певній ділянці у роботі розроблено набір систем прийняття рішень, щодо оптимізації транспортного потоку. Для аналізу фактичних умов руху та розрахунку щільності та швидкості руху, створюється модель прогнозування, яка ітеративно оновлюється. На основі цієї моделі оцінюється ступінь завантаженості на ділянці дороги, у зв'язку з чим пропонуються методи інтелектуального прийняття рішень та узгодженої оптимізації. Однак відповіді на визначення межі втрати стійкості (виникнення заторів) дана робота не дає.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження математичної моделі стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі в залежності від зміни щільності потоку, коливань щільності, дії зовнішніх збурень та факторів, що впливають на стійкість.

Виклад основного матеріалу. У роботі [2] представлено критерій стійкості транспортного потоку, який отримав назву критерія робастності:

$$RR = \frac{[(T_1T_2 + T_1T_3 + T_2T_3) \times (T_1 + T_2 + T_3 + K_2K_3T_1)]}{[(T_1T_2T_3 \times K_2K_3) + T_1T_2T_3]} \quad (1)$$

Робастність RR 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.

Проводячи оцінку адекватності математичної моделі, яку наведено у роботі [1], було уточнено значення постійних часу і коефіцієнтів підсилення, 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.

Виконаємо дослідження математичної моделі стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі в залежності від зміни щільності потоку, коливань щільності, дії зовнішніх збурень та факторів, що впливають на стійкість.

Вираз для розрахунку щільності транспортного потоку на ділянці дорожньої мережі довжиною 1000 м представимо у вигляді:

$$p = \frac{(N \pm \sigma_N)}{L}, 1/m, \quad (8)$$

де σ_N – 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.

Дослідження стійкості (робастності) RR транспортного потоку, формула (1), під час руху міськими вулицями та магістралями, будемо виконувати залежно від зміни щільності транспортного потоку, формула (8). У формулу входить величина середньоквадратичного відхилення кількості транспортних засобів σ_N під час вимірювань. Додавання σ_N дозволяє врахувати коливання величини щільності транспортного потоку, як випадкової величини, що підвищить точність моделювання.

Додатково, до вхідних параметрів, від яких залежить робастність транспортного потоку, будуть враховані: довжина автомобіля l_a , м; маса автомобіля M , кг; потужність двигуна автомобіля N_e , Вт; час реакції водія на зміну дорожньої ситуації t_1 , с; час на маневр, який може використовувати автомобіль за зміни дорожньої ситуації t_2 , с; сумарний час затримок під час проходження по маршруту t_3 , с; кількість смуг руху на проїжджій частині n ; кількість пішохідних переходів k та світлофорів s на контрольованій ділянці дороги.

Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні довжини автомобіля, представлені на рис.1. За значенням критерію робастності $RR=1$, транспортний потік втрачає стійкість, тобто відбувається зупинка руху чи утворюється затор. 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. При RR менше одиниці відбувається зупинка руху в потоці, утворюється затор.

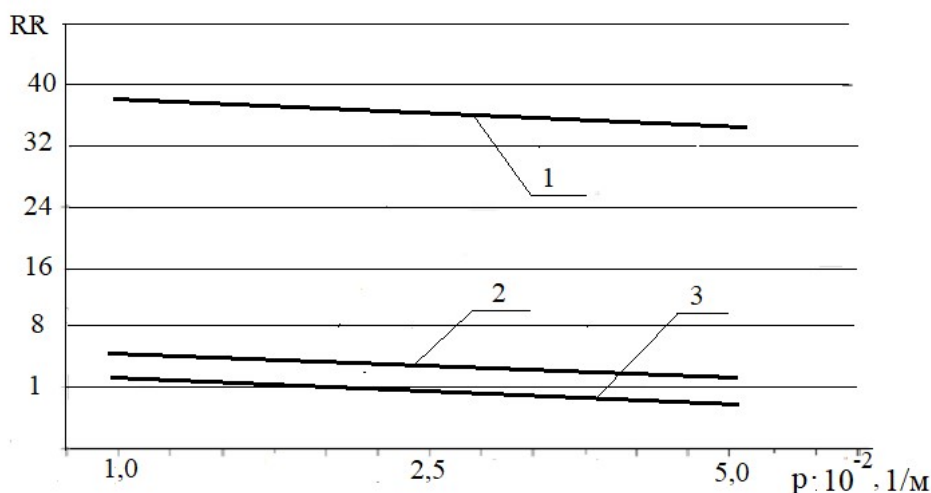


Рисунок 1 – Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні довжини автомобіля: 1 - $l_a = 4$ м; 2 - $l_a = 12$ м; 3 - $l_a = 20$ м
Джерело: розроблено атоами

Як впливає із аналізу залежностей, представлених на рис. 1, довжина автомобіля є значущим фактором, що впливає на робастність транспортного потоку. При довжині автомобіля, що дорівнює 20 м, крива 3, втрата стійкості (перетин лінії $RR=1$), настає при малих значеннях щільності. І навпаки, при довжині автомобіля $l_a = 4$ м, легкові автомобілі, крива 1, запас стійкості досягає максимального значення, що дорівнює 38 одиниць.

Другим, за значущістю фактором, що впливає на робастність транспортного потоку, є маса автомобіля. Залежності зміни діапазону робастності для різних значень щільності при зміні маси автомобіля представлені на рис. 2. Як впливає з наведених залежностей, збільшення маси автомобіля знижує робастність транспортного потоку. Необхідно відзначити, що діапазон робастності вдвічі менше, ніж при зміні довжини автомобіля і не перевищує значень $RR=18$. Однак втрата стійкості у русі настає при великих значеннях щільності.

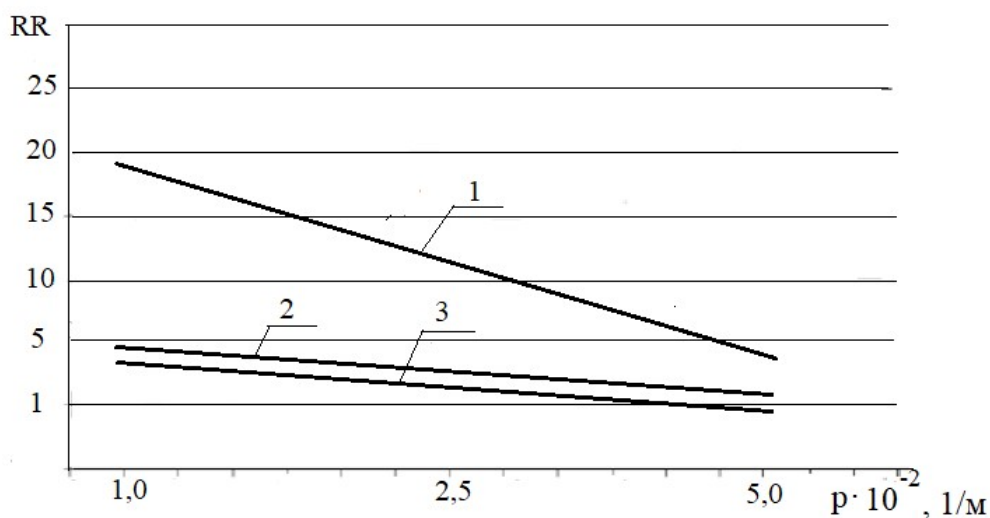


Рисунок 2 – Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні маси автомобіля: 1 - $M = 2000$ кг; 2 - $M = 10000$ кг; 3 - $M = 18000$ кг
Джерело: розроблено атоами

Третім, за значимістю фактором, що впливає на робастність транспортного потоку, є потужність двигуна автомобіля. Залежності зміни діапазону робастності для різних значень щільності при зміні потужності двигуна автомобіля, наведено на рис. 3.

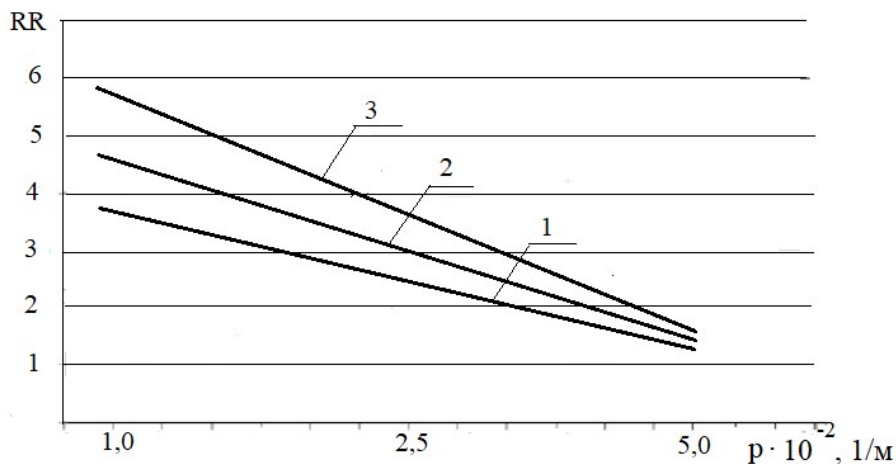


Рисунок 3 – Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні потужності двигуна автомобіля:
1 – $N_e = 100$ кВт; 2 – $N_e = 150$ кВт; 3 – $N_e = 200$ кВт

Джерело: розроблено атоами

Як впливає з представлених залежностей, збільшення потужності двигуна автомобіля збільшує робастність транспортного потоку. Однак ступінь впливу незначний і не перевищує значень $RR=6$. Втрата стійкості у русі настає при ще більших значеннях щільності.

Довжина автомобіля, рис.1, маса автомобіля, рис.2 та потужність двигуна автомобіля, рис.3, відповідають групі конструктивних факторів, які характеризують транспортний засіб та його вплив на робастність транспортного потоку.

Другу групу факторів можна назвати факторами, які враховують: час реакції водія на зміну дорожньої ситуації, рис. 4; час на маневр, який може використовувати автомобіль за зміни дорожньої ситуації, рис. 5; сумарний час затримок під час руху за маршрутом, рис. 6.

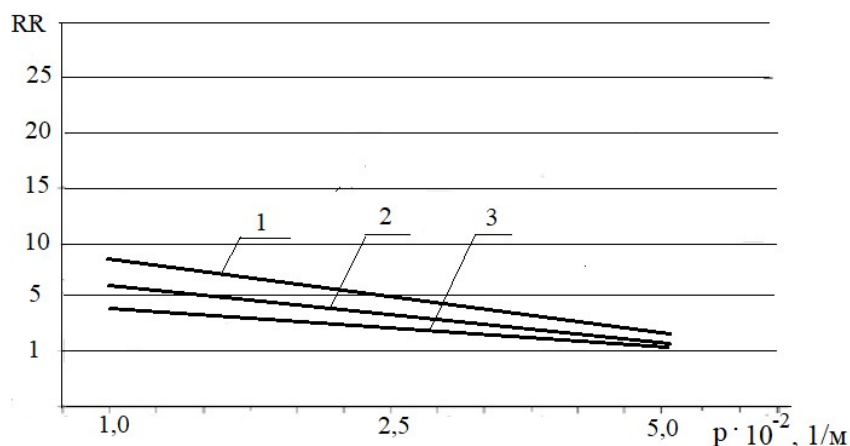


Рисунок 4 – Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні часу реакції водія на дорожню ситуацію:
1 – $t_r = 0,6$ с; 2 – $t_r = 1,0$ с; 3 – $t_r = 1,4$ с

Джерело: розроблено атоами

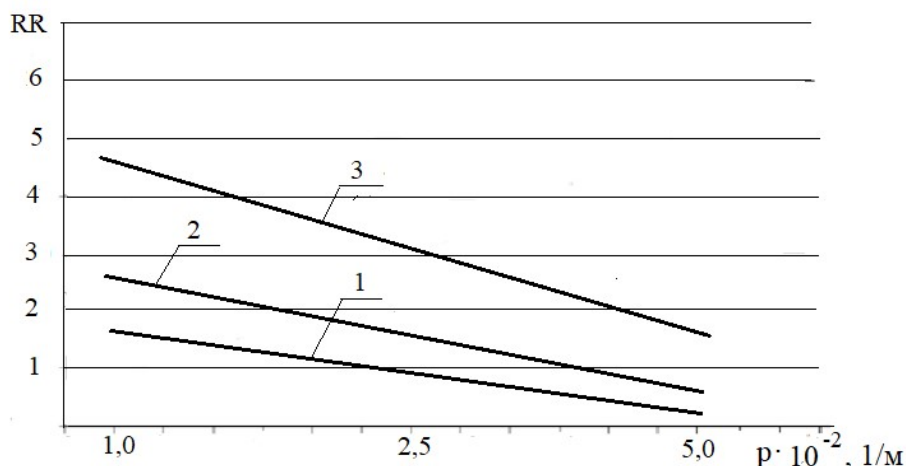


Рисунок 5 – Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні часу на маневр, який може використовувати автомобіль при зміні дорожньої ситуації: 1 – $t_2 = 4$ с; 2 – $t_2 = 7$ с; 3 – $t_2 = 10$ с

Джерело: розроблено атоами

Аналіз представлених залежностей дозволяє стверджувати про середній ступінь впливу на діапазон робастності транспортного потоку таких факторів як час реакції водія на дорожню ситуацію t_1 . Діапазон робастності за зміни t_1 не перевищує значень $RR=8$.

Ступінь впливу часу на маневр t_2 , який може використовувати автомобіль при зміні дорожньої ситуації, представлено на рис.5. Чим більший час, який може використовувати водій автомобіля на маневр, крива 3, тим вище робастність транспортного потоку. При мінімальному часі на маневр, крива 1, настає зупинка транспортного потоку. Значення критерію робастності при зміні величин щільності не перевищує 5 одиниць.

Необхідно відзначити, що діапазон робастності при зміні сумарного часу затримок під час проходження по маршруту t_3 значно вище, ніж при зміні t_1 та t_2 , але не перевищує значень $RR=15$.

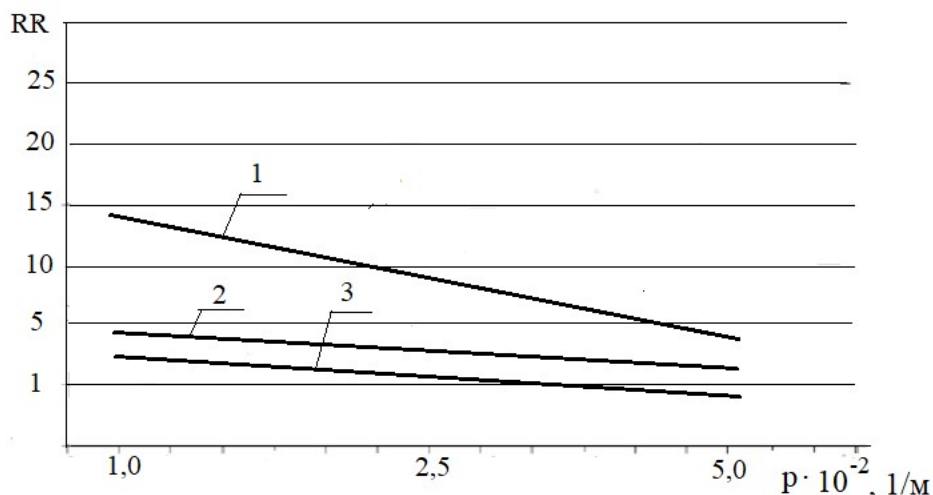


Рисунок 6 – Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні сумарного часу затримок під час руху за маршрутом: 1 – $t_3 = 50$ с; 2 – $t_3 = 150$ с; 3 – $t_3 = 250$ с

Джерело: розроблено атоами

Третя група факторів враховує особливості побудови інфраструктури дорожнього середовища. До таких факторів належать: кількість смуг руху на проїжджій частині n , рис. 7; кількість пішохідних переходів k та світлофорів s на контрольованій ділянці, рис. 8.

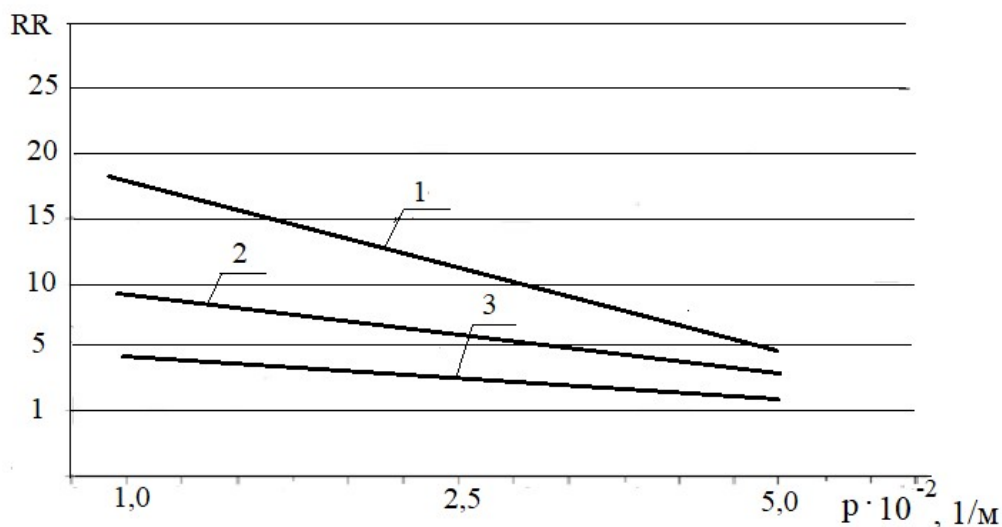


Рисунок 7 – Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні кількості смуг руху на проїжджій частині:
1 - $n = 4$; 2 - $n = 2$; 3 - $n = 1$

Джерело: розроблено атоами

Як впливає з представлених залежностей збільшення кількості смуг для руху на проїжджій частині підвищує критерій робастності до значень $RR=19$, крива 1. Це сприяє підвищенню стійкості транспортного потоку у всьому діапазоні зміни щільності. Імовірність утворення заторів мінімальна.

Збільшення кількості пішохідних переходів k та світлофорів s на контрольованій ділянці дороги призводить до зниження стійкості, що сприяє виникненню заторів. Слід зазначити, що діапазон робастності при зміні k і s не перевищує значень $RR=5$.

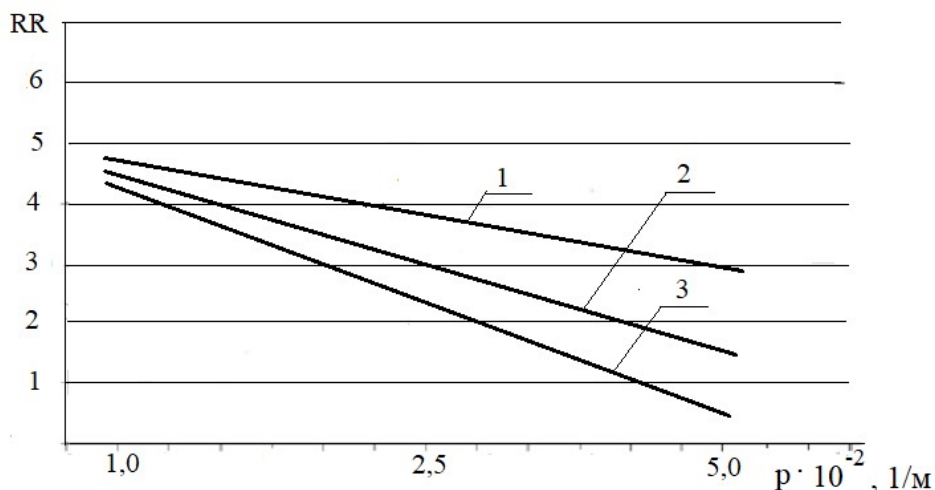


Рисунок 8 – Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні кількості пішохідних переходів та світлофорів на контрольованій ділянці:
1 - $k = 2$; $s = 2$; 2 - $k = 5$; $s = 5$; 3 - $k = 8$; $s = 8$

Джерело: розроблено атоами

Висновки. Аналіз виразу (1), який є критерієм робастності транспортного потоку, дозволяє сформулювати параметри від яких залежить стійкість. Як впливає з виразів, за якими розраховуються коефіцієнти підсилення K_1 , K_2 , K_3 , на стійкість транспортного потоку впливають щільність, інтенсивність потоку і зміна дорожньої ситуації. Їх необхідно розраховувати за формулами (5) - (7) для кожної ділянки дорожньої мережі чи магістралі, які підлягають дослідженню та підставляти у формулу (1). 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 (2) - (4) та підставляти у формулу (1).

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.

Критерії робастності RR 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 в огляді літературних джерел тим, що дозволяє шляхом моделювання визначити межі втрати стійкості – утворення заторів. Визначення граничних значень щільності транспортного потоку, облік багатосмугового руху, наявність світлофорів та пішохідних переходів, дозволить розробляти заходи щодо запобігання заторам.

Подані результати є продовженням досліджень, що викладені у роботах [1,2]. Відрізняються від відомих тим, що враховують динаміку розвитку процесу. Крім фактора щільності транспортних потоків, що застосовуються у наведеному аналізі робіт, враховуються конструктивні особливості транспортних засобів, багатосмугова дорожня мережа, а також час затримок на пішохідних переходах та світлофорах.

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 потоку. Сучасні електронні засоби контролю дозволяють виконати такі виміри. 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 транспортного потоку, прогнозування значень середньоквадратичного відхилення щільності від середнього значення у транспортному потоці. Це дозволить розробити єдину методологію моделювання стійкості транспортних потоків для побудови прогнозів завантаженості дорожньої мережі та магістралей.

На підставі результатів моделювання запропоновано всі вхідні фактори, що впливають на стійкість транспортного потоку, розділити на три групи. Перша група факторів характеризує конструкцію транспортного засобу: довжина автомобіля, маса автомобіля, потужність двигуна автомобіля.

Другу групу факторів названо факторами часу, які враховують: час реакції водія на зміну дорожньої ситуації; час на маневр, який може використовувати автомобіль у разі зміни дорожньої ситуації; сумарний час затримок під час руху за маршрутом.

Третя група факторів враховує особливості побудови інфраструктури дорожнього середовища. До таких факторів належать: кількість смуг руху на проїжджій частині; кількість пішохідних переходів та світлофорів на контрольованій ділянці.

На підставі результатів моделювання представлено рейтинг факторів, що впливають на величину запасу стійкості транспортного потоку. На першому місці, за впливом на втрату стійкості транспортного потоку – час на маневр, який може використовувати автомобіль у разі зміни дорожньої ситуації, рис. 5 та кількість пішохідних переходів та світлофорів на контрольованій ділянці дороги, рис.8. При зміні перерахованих факторів критерій робастності має мінімальні значення. На другому місці за впливом на втрату стійкості – група факторів, яка враховує час реакції водія на зміну дорожньої ситуації, рис. 4 та кількість смуг руху на проїжджій частині, рис. 7. На третьому місці за впливом на втрату стійкості – група факторів, яка враховує довжину автомобіля, рис.1 та масу автомобіля, рис.2.

Показано, що математичну модель та результати моделювання можна застосовувати під час аналізу стійкості транспортних потоків на контрольованих ділянках дорожньої мережі та розробляти заходи щодо підвищення запасу стійкості руху.

Список літератури

1. Войтов В.А., Кравцов А.Г., Карнаух М.В., Горяїнов О.М., Козенок А.С., Бабич І.А. Оцінка ергономічної стійкості транспортного потоку на дільницях дорожньої мережі. Ідентифікація математичної моделі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2023. Вип. 7(38). 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. / А.Г. Кравцов та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2023. Вип. 7(38). 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. Dorokhin S., Artemov A., Likhachev D., Novikov A., Starkov E. Traffic simulation: an analytical review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020. Vol. 918. No. 1, p. 012058. IOP Publishing, DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012058
4. Nagatani T. Macroscopic traffic flow in multiple-loop networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications.* 2023. P. 609. 128324. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.128324>
5. Herty M., Kolbe N. Data-Driven Models for Traffic Flow at Junctions. *arXiv preprint arXiv: 2022, 2212.08912.* <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.08912>
6. Karafyllis I., Theodosis D., Papageorgiou M. Stability analysis of nonlinear inviscid microscopic and macroscopic traffic flow models of bidirectional cruise-controlled vehicles. *IMA Journal of Mathematical Control and Information.* 2022. 39(2). P.609-642. <https://doi.org/10.1093/imamci/dnac003>
7. Li L., Ji X., Gan J., Qu X., Ran B. A macroscopic model of heterogeneous traffic flow based on the safety potential field theory. *IEEE Access.* 2021. 9. P. 7460-7470. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3049393>
8. Imran W., Khan Z. H., Gulliver T. A., Khattak K. S., Nasir H. A macroscopic traffic model for heterogeneous flow. *Chinese Journal of Physics,* 2020. 63. P.419-435. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2019.12.005>
9. Yuan C., Li Y., Huang H., Wang S., Sun Z., Li Y. Using traffic flow characteristics to predict real-time conflict risk: A novel method for trajectory data analysis. *Analytic methods in accident research.* 2022. 35. 100217. <https://doi.org/10.1016/j.amar.2022.100217>
10. Das A., Ahmed M. M. Adjustment of key lane change parameters to develop microsimulation models for representative assessment of safety and operational impacts of adverse weather using SHRP2 naturalistic driving data. *Journal of safety research.* 2022. 8. Pp. 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.01.002>
11. Lazar H. Comparison of microscopic car following models. In *2019 International Conference on Systems of Collaboration Big Data, Internet of Things & Security (SysCoBloTS).* 2019. pp. 1-6. IEEE. DOI:10.1109/SysCoBloTS48768.2019.9028040
12. Feng T., Liu K., Liang C. An Improved Cellular Automata Traffic Flow Model Considering Driving Styles. *Sustainability.* 2023. 15(2). P. 952. <https://doi.org/10.3390/su15020952>
13. Kušić K., Schumann R., Ivanjko E. A digital twin in transportation: Real-time synergy of traffic data streams and simulation for virtualizing motorway dynamics. *Advanced Engineering Informatics.* 2023. 55. 101858. <https://doi.org/10.3390/su15032050>

14. Shang X. C., Liu F., Li X. G., Janssens D., Wets G. The Impact of Three Specific Collaborative Merging Strategies on Traffic Flow. *Journal of Advanced Transportation*. 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/1375867>
15. Wen J., Hong L., Dai M., Xiao X., Wu C. A stochastic model for stop-and-go phenomenon in traffic oscillation: On the prospective of macro and micro traffic flow. *Applied Mathematics and Computation*. 2023. 440. 127637. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2022.127637>
16. Mittal U., Chawla P., Tiwari R. EnsembleNet: A hybrid approach for vehicle detection and estimation of traffic density based on faster R-CNN and YOLO models. *Neural Computing and Applications*. 2023. 35(6). 4755-4774. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07940-9>
17. Djenouri Y., Belhadi A., Srivastava G., Lin J. C. W. Hybrid graph convolution neural network and branch-and-bound optimization for traffic flow forecasting. *Future Generation Computer Systems*. 2023. 139. Pp. 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.09.018>
18. Xu X., Jin X., Xiao D., Ma C., Wong S. C. A hybrid autoregressive fractionally integrated moving average and nonlinear autoregressive neural network model for short-term traffic flow prediction. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2023. 27(1). 1-18. <https://doi.org/10.1080/15472450.2021.1977639>
19. 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>

References

1. Vojtov, V.A., Kravtsov, A.H., Karnaukh, M.V., Horyayinov, O.M., Kozenok, A.S. & Babych, I.A. (2023). Otsinka erhomichnoyi stiykosti transportnoho potoku na dil'nytsyakh dorozhn'oyi merezhi. Identyfikatsiya matematychnoyi modeli. [Assessment of ergonomic sustainability of traffic flow at road network sections. Identification of a mathematical model], *Tsentral'noukrayins'kyi naukovyy visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical Sciences, Vol. 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., Larina T.F., Horyayinov O.M., Kozenok A.S., Horodets'ka T.E., Babych I.A. (2023) Obhruntuvannya kryteriyu stiykosti transportnoho potoku na dil'nytsyakh dorozhn'oyi merezhi. [Justification of the traffic flow stability criterion at the sections of the road network], *Tsentral'noukrayins'kyi naukovyy visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical Sciences, Vol. 7(38)*, 222-239 [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. Dorokhin, S., Artemov, A., Likhachev, D., Novikov, A., & Starkov, E. (2020, September). Traffic simulation: an analytical review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 918, No. 1*, p. 012058). IOP Publishing. DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012058
4. Nagatani, T. (2023). Macroscopic traffic flow in multiple-loop networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 609, 128324. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.128324>
5. Herty, M., & Kolbe, N. (2022). Data-Driven Models for Traffic Flow at Junctions. *arXiv preprint arXiv:2212.08912*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.08912>
6. Karafyllis, I., Theodosis, D., & Papageorgiou, M. (2022). Stability analysis of nonlinear inviscid microscopic and macroscopic traffic flow models of bidirectional cruise-controlled vehicles. *IMA Journal of Mathematical Control and Information*, 39(2), 609-642. <https://doi.org/10.1093/imamci/dnac003>
7. Li, L., Ji, X., Gan, J., Qu, X., & Ran, B. (2021). A macroscopic model of heterogeneous traffic flow based on the safety potential field theory. *IEEE Access*, 9, 7460-7470. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3049393>
8. Imran, W., Khan, Z. H., Gulliver, T. A., Khattak, K. S., & Nasir, H. (2020). A macroscopic traffic model for heterogeneous flow. *Chinese Journal of Physics*, 63, 419-435. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2019.12.005>
9. Yuan, C., Li, Y., Huang, H., Wang, S., Sun, Z., & Li, Y. (2022). Using traffic flow characteristics to predict real-time conflict risk: A novel method for trajectory data analysis. *Analytic methods in accident research*, 35, 100217. <https://doi.org/10.1016/j.amar.2022.100217>
10. Das, A., & Ahmed, M.M. (2022). Adjustment of key lane change parameters to develop microsimulation models for representative assessment of safety and operational impacts of adverse weather using SHRP2 naturalistic driving data. *Journal of safety research*, 81, 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.01.002>
11. Lazar H. (2019). Comparison of microscopic car following models. In *2019 International Conference on Systems of Collaboration Big Data, Internet of Things & Security (SysCoBioTS) (pp. 1-6)*. IEEE. DOI:10.1109/SysCoBioTS48768.2019.9028040
12. Feng, T., Liu, K., & Liang, C. (2023). An Improved Cellular Automata Traffic Flow Model Considering Driving Styles. *Sustainability*, 15(2), 952. <https://doi.org/10.3390/su15020952>

13. Kušić, K., Schumann, R., & Ivanjko, E. (2023). A digital twin in transportation: Real-time synergy of traffic data streams and simulation for virtualizing motorway dynamics. *Advanced Engineering Informatics*, 55, 101858. <https://doi.org/10.3390/su15032050>
14. Shang, X. C., Liu, F., Li, X. G., Janssens, D., & Wets, G. (2023). The Impact of Three Specific Collaborative Merging Strategies on Traffic Flow. *Journal of Advanced Transportation*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/1375867>
15. Wen, J., Hong, L., Dai, M., Xiao, X., & Wu, C. (2023). A stochastic model for stop-and-go phenomenon in traffic oscillation: On the prospective of macro and micro traffic flow. *Applied Mathematics and Computation*, 440, 127637. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2022.127637>
16. Mittal, U., Chawla, P., & Tiwari, R. (2023). EnsembleNet: A hybrid approach for vehicle detection and estimation of traffic density based on faster R-CNN and YOLO models. *Neural Computing and Applications*, 35(6), 4755-4774. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07940-9>
17. Djenouri, Y., Belhadi, A., Srivastava, G., & Lin, J. C. W. (2023). Hybrid graph convolution neural network and branch-and-bound optimization for traffic flow forecasting. *Future Generation Computer Systems*, 139, 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.09.018>
18. Xu, X., Jin, X., Xiao, D., Ma, C., & Wong, S. C. (2023). A hybrid autoregressive fractionally integrated moving average and nonlinear autoregressive neural network model for short-term traffic flow prediction. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 27(1), 1-18. <https://doi.org/10.1080/15472450.2021.1977639>
19. 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>

Oleksiy Goryayinov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anna Kozenok**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Nataliia Berezhna**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Igor Sysenko**, PhD tech. sci., **Inna Babych**, Senior Lecturer, **Oleksiy Voytov**, Graduate student

State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

Study of the Mathematical Model of the Stability of the Traffic Flow in the Sections of the Road Network of the City

The paper presents the results of the research of the mathematical model of the stability of the traffic flow on the sections of the city's street and road network when external factors change. Based on the modeling results, it is proposed to divide all factors affecting the stability of the traffic flow into three groups. The first group of factors characterizes the construction of the vehicle: the length of the vehicle, the weight of the vehicle, the power of the engine. The second group of factors is called time factors, which take into account: the driver's reaction time to a change in the road situation; time for a maneuver that can be used by the car in case of a change in the road situation; the total time of delays while driving along the route. The third group of factors takes into account the peculiarities of the construction of the infrastructure of the road environment. Such factors include: the number of traffic lanes on the roadway; the number of pedestrian crossings and traffic lights.

Based on the results of modeling, a rating of factors affecting the amount of traffic flow stability margin is presented. The simulation results proved that, in the first place, the impact on the loss of stability of the traffic flow is the time for the maneuver that the car can use in the event of a change in the road situation and the number of pedestrian crossings and traffic lights on the controlled section of the road. When the listed factors change, the robustness criterion has minimal values. In second place in terms of influence on is a group of factors that take into account the driver's reaction time to a change in the road situation and the number of traffic lanes on the roadway. In third place is a group of factors that take into account the length of the car and the weight of the car.

It is proved that the mathematical model of traffic flow stability has limitations regarding its application. The limitations are related to the definition of the initial data for the simulation. It is necessary to determine the flow density on the controlled section of the road network. In addition, statistically determined values are the reaction time of drivers to a change in the road situation and the presence of pedestrian crossings and traffic lights on the controlled section of the road.

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

Одержано (Received) 02.09.2023

Прорецензовано (Reviewed) 14.09.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023