

Legal aspects are considered in terms of the legislative framework and regulatory tools governing the transport system. The analysis includes laws and regulations that prioritize environmentally friendly types of transport, regulate emissions, ensure road safety, and set standards for public transport.

The article also explores the implementation of innovative technologies in the field of urban mobility, such as electric vehicles, shared transport systems, and intelligent transport systems. The importance of regulatory support for the development of innovations, including standardization and certification of new technologies, is emphasized.

Public involvement in the decision-making process is another important aspect discussed in the article. Mechanisms for holding public consultations, taking residents' opinions into account, and ensuring transparency in the implementation of sustainable mobility projects are highlighted.

It can be concluded that institutional and legal aspects are crucial for the successful implementation of sustainable urban mobility. They provide the necessary foundation for a comprehensive approach to urban mobility management, coordination of actions by various stakeholders, and the creation of legal conditions for the development of environmentally friendly, safe, and efficient transport systems in cities. These measures contribute to improving the quality of life of citizens, reducing the negative impact of transport on the environment, and ensuring sustainable urban development.

**legislation, urbanization, urban mobility, sustainable development, public transport, transport infrastructure, environmental aspects, traffic safety**

*Одержано (Received) 13.05.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 14.06.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 26.06.2024*

УДК 656:338

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).2.256-272](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.256-272)

**В.А. Войтов**, проф., д-р техн. наук, **А.Г. Кравцов**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Войтов**, доц., канд. техн. наук, **Н.Г. Бережна**, доц., канд. техн. наук, **І.І. Сисенко**, канд. техн. наук, **Л.Ф. Кривенко**, директор АТП 16363, **І. Г. Бабарика**, доц., канд. с-г. наук  
*Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна*  
*e-mail: vavoitovva@gmail.com*

## Концепція оцінки ергономічної стійкості транспортного потоку великих міст з урахуванням динамічності зміни впливових факторів

Представлено концепцію оцінки стійкості руху транспортних потоків з урахуванням динамічності зміни впливових факторів. У роботі розроблено методичний підхід прогнозування завантаженості вулиць великих міст. Методичний підхід враховує коливання динамічності транспортного потоку у вигляді зміни прискорення руху автомобілів в потоці та коливання зміни інфраструктури дорожнього середовища, яке пов'язане з кількістю світлофорів, пішохідних переходів та кількістю смуг руху. Сформульовано концепцію моделювання та прогнозування стійкості транспортних потоків великих міст до утворення заторів. Обґрунтовано основні складові концепції, за якими поетапно виконується така оцінка з урахуванням динамічності зміни впливових факторів. Запропонована концепція відрізняється від відомих тим, що враховує коливання параметрів транспортного потоку – щільності та швидкості руху автомобілів, як функції часу.

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

**Постановка проблеми.** Транспортний потік та затори на вулицях великих міст, особливо у «години пік», є проблемою, яка впливає на надійність транспортного обслуговування населення. Тому прогнозування та управління транспортними потоками, прогнозування виникнення заторів є актуальною задачею та потребує застосування системного підходу. Особливо впливовим є коливання параметрів транспортного потоку, таких як щільність та швидкість руху. В останні роки було опубліковано багато наукових статей де представлено методичні підходи вирішення таких проблемних питань. Аналіз публікацій показує, що застосування моделювання є найбільш перспективним при вирішенні таких завдань та дозволяє врахувати коливання на перевантажених ділянках. Для цього автори робіт застосовують різноманітні критерії, які дозволяють прогнозувати стійкість транспортних потоків та умови появи заторів.

Робота є продовженням робіт [1-4], де в роботі [1] розроблено математичну модель ергономічної стійкості транспортного потоку. Модель дозволяє прогнозувати затори на різних ділянках дорожньої мережі. Відмінністю моделі є те, що враховується динаміка транспортного потоку [1]. В роботі [2] розроблено критерій оцінки стійкості транспортного потоку, який отримав назву критерій робастності [3]. Подальший розвиток прогнозування появи заторів з урахуванням коливань щільності потоків та коливання швидкості руху автомобілів, представлено в роботі [4].

Відмінною особливістю представленого нами дослідження є обґрунтування критерію визначення моменту чи межі виникнення заторів. Величина критерію, яка має фізичне значення «запасу стійкості» до заторів, дозволила отримати рейтинг факторів, що впливають на запас стійкості транспортного потоку. Наявність такого рейтингу дає змогу обирати раціональні маршрути доставки кореспонденцій з урахуванням міської транспортної мережі, виконувати експертну оцінку існуючої транспортної мережі, розробляти практичні рекомендації щодо організації дорожнього руху.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Авторами роботи [5] представлено оцінку вразливості міських систем дорожнього руху. Автори відзначають, що більшість існуючих робіт зосереджена, головним чином, на ефективності дорожньої мережі з погляду її структури, але ігнорує аналіз її функціональної вразливості. Таким чином, у цій статті пропонується нова концепція для аналізу вразливості дорожніх мереж на основі аналізу реального транспортного потоку. По-перше, будується зважена модель мережі дорожнього руху з використанням параметрів транспортного потоку, отриманого з використанням моделі рівноваги. По-друге, формується комплексний індикатор важливості вузла, який запроваджується шляхом інтеграції методу ентропійних ваг. Вразливість мережі у різних сценаріях аналізується як із структурного так і з функціонального погляду.

У роботах [6-8] представлено огляд літератури та оцінка впливових факторів на завантаження дорожньої мережі. Наприклад, у роботі [6] розроблено методологію вирішення проблеми пошуку кращої детермінованої моделі для опису емпіричного взаємозв'язку між фундаментальними параметрами транспортного потоку, середньою швидкістю, щільністю потоку на основі простих критеріїв. Авторами розглядалися як однорежимні, так і багаторежимні моделі, всього 17 моделей. Отримані результати дослідження допомогли визначити найбільш ефективні моделі, що відповідають граничним умовам та забезпечують простоту, емпіричну точність та гарну оцінку параметрів транспортного потоку.

У роботах [7,8], з метою оцінки дорожніх конфліктів, прийнято макроскопічний показник, названий «час, проведений у конфлікті ( TSC )». Для оцінки TSC пропонується і використовується двовимірна структура, заснована на

характеристиках транспортного засобу, що розглядається. TSC моделюється як функція макроскопічних змінних транспортного потоку, а саме щільності транспортного потоку, швидкості, стандартного відхилення швидкості та складу транспортного потоку, в рамках двоетапної моделі. Результати показали, що умови завантаження транспортних потоків мають вирішальне значення для безпеки дорожнього руху.

У роботах [9-13], з метою підвищення точності прогнозування, враховується динаміка транспортних потоків. У роботі [9] описано набір керованих моделей транспортних потоків, що ґрунтуються на концепції марківського процесу. На думку авторів, базові моделі можуть бути додатково модифіковані для отримання ефектів, аналогічних моделям високого порядку, при реєстрації нестабільної поведінки транспортного потоку під час перевантажень. У роботі [10] представлена модель динамічного розподілу транспортного потоку (DTA), яка може оцінити вплив переміщення вузьких місць на продуктивність дорожньої мережі, з точки зору часу в дорозі, так і маршрутів руху. У роботі [11] проаналізовано ключові характеристики нестабільності дорожнього руху, на основі тимчасових рядів швидкості, які отримані з стаціонарних детекторів. Автори стверджують, що такий підхід можна використовувати для перевірки моделей, відкаліброваних за іншими критеріями щодо їхньої колективної динаміки. Автори застосовують запропоновані критерії до статистичних баз даних транспортних потоків на кількох автомагістралях у Німеччині, що містять близько 400 випадків заторів, тим самим забезпечуючи основу для калібрування моделі та оцінки якості з урахуванням просторово-часової динаміки. Перші тести з мікроскопічними та макроскопічними моделями показують, що критерії одночасно надійні та інформативні, тобто чітко розрізняють моделі з більш високою та нижчою інформативною здатністю. У роботах [12,13] проводилася оцінка домінування міського руху шляхом інтеграції теорії складних мереж із просторово-часовими даними про траєкторії з кількох джерел, враховуючи динамічний характер різних видів транспорту, включаючи громадський транспорт. Показано, що інтеграція динамічних оцінок суттєво змінює традиційні статичні результати. З цієї точки зору, стаття покликана об'єднати дві точки зору в літературі, а саме ймовірнісний аналіз нестабільності дорожнього руху з характеристикою швидкісних випадкових процесів та аналіз аварій. З цією метою в роботі [13] описується процедура, яка ґрунтується на оцінці та моделюванні моделей ARIMA для випадкових процесів зміни швидкості на ділянці автомагістралі, особливо на крайній лівій смугі.

У роботі [14] представлена системна динаміка (SD) як методологія, яку можна використовувати для розуміння поведінки та динаміки складних систем з часом. SD використовує ряд інструментів та методів, таких як діаграми впливу та причинно-наслідкові зв'язки, комп'ютерне моделювання та оптимізація. Системна динаміка застосовується для полегшення аналізу складних фізичних та соціальних систем.

Проведений аналіз літературних джерел дозволяє стверджувати, що облік динаміки транспортного потоку дозволить підвищити ймовірність прогнозу виникнення заторів на міських дорожніх мережах. Основними значущими факторами, що впливають на виникнення заторів, є величини та коливання щільності транспортного потоку, а також величини та коливання швидкості транспортних засобів у потоці з урахуванням середньоквадратичного відхилення зазначених параметрів у часі.

Підвищені значення щільності транспортного потоку та швидкості руху транспортних засобів у потоці впливають на виникнення дорожньо-транспортних пригод. Така закономірність зазначається в роботах [15-19]. Авторами робіт проаналізовано різні параметри транспортного потоку та зроблено висновок, що

швидкість транспортних засобів у потоці є найбільш значущим фактором, що впливає на виникнення дорожньо-транспортних пригод. Наприклад, у роботі [20] представлені докази сильного зв'язку між параметрами транспортного потоку та ймовірністю дорожньо-транспортних пригод. Змінні транспортного потоку вимірюються за допомогою стандартних пристроїв моніторингу, таких як детектори з однією індуктивною петлею. Встановлено, що ключовими елементами транспортного потоку, що впливають на безпеку, є щільність та швидкість, а також тимчасові зміни щільності транспортного потоку та швидкості транспортних засобів у потоці. Автори роботи [21] досліджують модель часових рядів, яка побудована з використанням моделі передачі даних осередків для відображення стану транспортного потоку за допомогою трійних чисел. Потім за допомогою кластерного аналізу досліджувалась динаміка транспортного потоку. Проведено чисельне моделювання, результат якого показав ефективність запропонованого методу. На думку авторів, розроблений метод дозволить краще зрозуміти динаміку транспортних потоків на автомагістралях та вплив на дорожньо-транспортні пригоди.

Нестабільність транспортного потоку досліджується у роботі [22]. На основі експериментальних результатів автори стверджують, що швидкість руху, а не відстань між транспортними засобами (або щільність), може бути кращим індикатором нестабільності дорожнього руху, оскільки транспортні засоби можуть мати різну відстань за однакової швидкості. Для транспортних засобів існує критична швидкість між 30-40 км/год, вище за яку стандартне відхилення швидкості автомобіля майже досягає насичення, що вказує на те, що транспортний потік, ймовірно, буде стабільним. Навпаки, нижче за цю критичну швидкість транспортний потік нестабільний і може призвести до утворення заторів.

Автори робіт [23, 24], досліджуючи параметри транспортного потоку, приходять до висновку, що швидкість транспортних засобів у потоці є найбільш важливим фактором, що сприяє виникненню дорожньо-транспортних пригод. Тому в низці країн широко впроваджується регулювання швидкості з метою підвищення безпеки дорожнього руху. Для цього впроваджуються автоматизовані системи контролю швидкості на ділянках доріг.

З аналізу представлених робіт [15-24] випливає, що найбільш значущим фактором, що впливає на стабільність транспортного потоку міської дорожньої мережі, є швидкість транспортних засобів у потоці. Існує критична швидкість між 30 і 40 км/год, вище за яку транспортний потік буде стабільним. Навпаки, нижче за цю критичну швидкість транспортний потік нестабільний і може призвести до утворення заторів. Однак підвищення швидкості до рівня критичної негативно впливає на безпеку дорожнього руху. З метою зниження ймовірності виникнення дорожньо-транспортних пригод швидкість обмежують. Наявний конфлікт інтересів.

Вплив інфраструктури дорожньої мережі на виникнення заторів присвячені роботи [25-28]. Наприклад, у роботі [25] зазначається, що незважаючи на те, що смуги руху мають однакову ширину, транспортний потік не буде однаковим, оскільки навколишнє середовище різне. Автори роботи [26] роблять висновок, що виникнення заторів мимовільно, якщо середня щільність транспортного потоку перевищує певне критичне значення. Таким чином, "вузьке місце" є лише спусковим гачком, а не основною причиною заторів. Автори роботи показують, що виникнення заторів — це колективне явище, подібне до «динамічних» фазових переходів та формування закономірностей у нерівноважній системі. Коливання щільності транспортного потоку викликає нестабільність, і тоді однорідний рух не може підтримуватися. Зрештою,

з'являється кластер перешкод, який поширюється назад як одиночна хвиля з тією ж швидкістю, що і кластер перешкод на дорозі.

Автори робіт [27,28], для аналізу причин виникнення заторів у міській дорожній мережі, пропонують застосовувати кластерний аналіз. Такий аналіз дозволяє визначити найбільш перевантажені ділянки доріг. Автори використовують метод плаваючих даних про автомобілі, для визначення кластерів, де можуть виникати затори. Для визначення кореляції між кластерами проведено статистичні розрахунки, виходячи з яких зроблено висновки, що такий підхід може ефективно визначати характер заторів у міській дорожній мережі. Аналіз поведінки заторів показав, що у вечірні години пік затори більш серйозні та поширені, ніж у ранкові. Загалом результати можуть бути використані для розробки схеми опису потенційних проблем у дорожньому русі та систем прогнозування заторів.

Аналізу впливу кількості пішохідних переходів та світлофорів дорожньої мережі на виникнення заторів та дорожньо-транспортних пригод присвячені роботи [29-34]. Наприклад, у роботі [29] використовується статистичне моделювання вивчення впливу елементів дорожньої інфраструктури, насамперед тих, які пов'язані з конструкцією поперечних перерізів, на кількість аварій у міських районах. Автори відзначають, що проектування поперечного перерізу є важливим етапом у процесі геометричного проектування дорожньої мережі, оскільки він впливає на ключові експлуатаційні характеристики, такі як пропускна здатність, вартість, безпека та загальна функціональність об'єкта транспортної системи. У статті [30] досліджувалася взаємодія транспортних та пішохідних потоків високої інтенсивності на регульованих перехрестях з метою підвищення пропускної спроможності таких перехресть. Для дослідження довжини затору використовувалася модель транспортного потоку, що включає психофізіологічну модель слідування за транспортним засобом, що рухається попереду. Щоб проаналізувати вплив пішохідних переходів на потоки транспортних засобів у роботі [31] було побудовано дві міські двосмугові клітинно-автоматні моделі транспортного потоку, одна з яких стосується ділянок з нерегульованим пішохідним переходом, а інша - нерегульованих ділянок із випадковим переходом вулиці пішоходами. MATLAB використовується для чисельного моделювання різних умов дорожнього руху, при цьому формуються просторово-часова діаграма та реляційні графіки параметрів транспортних потоків, які потім зазнають порівняльного аналізу. Результати моделювання показують, що коли щільність транспортних засобів нижче 25 автомобілів/(км. смуги), пішоходи помірно впливають на транспортний потік. Коли щільність транспортних засобів вище 60 автомобілів/(км. смуги), швидкість транспортних засобів значно зменшується, особливо на ділянках з нерегульованим пішохідним переходом.

У роботах [32-34] представлені різні моделі, що дозволяють зрозуміти різноманітність фізичних явищ, пов'язаних із дорожнім рухом. Для дослідження цих моделей застосовуються аналітичні та чисельні методи. Наприклад, в роботі [32] представлені результати, отримані на мікроскопічних моделях руху автомобілів. Типовим явищем є динамічний перехід перешкод від вільного транспортного потоку (FT) з низькою щільністю до перевантаженого транспортного потоку з високою щільністю. Перехід із перешкодами має фазову діаграму. Затори в перевантаженому русі показують різні хвилі щільності. Деякі з цих хвиль щільності демонструють типові нелінійні хвилі, такі як солітон, трикутна ударна хвиля та кінк. Хвилі щільності описуються нелінійними хвильовими рівняннями: рівнянням Кортевега-де-Вріса (КдВ); рівнянням Бюргерса та модифікованим рівнянням КдВ. У роботі [33] використовується

модель клітинних автоматів, у роботі [34] модель TST-кластеризації, яка є адаптацією алгоритму DB-Scan, який дозволяє кластеризувати процес за простором, часом і типом.

Підсумовуючи роботи, які присвячені появі заторів, можна зробити висновок, що при вирішенні таких завдань необхідно враховувати інфраструктуру дорожньої мережі, наприклад, кількість смуг руху, кількість світлофорів та пішохідних переходів на ділянках (кластерах) дорожньої мережі, що досліджується. Перераховані параметри впливають на щільність потоку і швидкість руху автомобілів в потоці, викликають коливання, особливо в «години пік».

Аналіз публікацій, які враховують та моделюють коливання параметрів транспортних потоків на дорожніх мережах великих міст, вплив коливань на виникнення заторів, дозволяють зробити висновок, що впливовими факторами є щільність транспортного потоку та швидкість руху автомобілів у потоці та зміна зазначених факторів в часі. Перераховані фактори повинні входити в загальну систему (концепцію) прогнозування ергономічної стійкості транспортних потоків великих міст. Концепція повинна враховувати середньостатистичне (стаціонарне) значення критерія робастності потоку та вносити корегування для окремих кластерів дорожньої мережі. Корегування враховує функції зміни факторів в реальному часі.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розробка концепції прогнозування ергономічної стійкості транспортних потоків великих міст. Концепція повинна враховувати середньостатистичне (стаціонарне) значення критерія робастності та вносити корегування для окремих кластерів дорожньої мережі. Корегування враховує функції зміни впливових факторів, наявність смуг руху, кількість пішохідних переходів та світлофорів.

**Виклад основного матеріалу.** Дана робота є продовженням публікацій [1-4] і відрізняється тим, що має враховувати коливання динамічності транспортного потоку у вигляді зміни прискорення руху автомобілів під час руху та коливання зміни інфраструктури дорожнього середовища, яке пов'язане з кількістю світлофорів, пішохідних переходів та кількістю смуг для руху.

Коефіцієнт підсилення  $K_2$ , який враховує динаміку транспортного потоку, в роботі [4] представлено формулою:

$$K_2 = \frac{\sigma_a \cdot N^2 \cdot l_a^3}{v^2 \cdot L^2} = \sigma_a \cdot p^2 \frac{l_a^3}{v^2}. \quad (1)$$

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

$N$  – кількість автомобілів на ділянці дороги довжиною 1000 м;

$l_a$  – довжина автомобіля, м;

$v$  – швидкість руху автомобілів у транспортному потоці, м/с;

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

$p$  – щільність транспортного потоку, 1/м.

Коефіцієнт підсилення  $K_3$ , який враховує дорожню інфраструктуру, в роботі [4] представлено формулою:

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

де  $k$  – кількість пішохідних переходів на ділянці дороги довжиною 1000 м;  
 $s$  – кількість світлофорів на ділянці дороги довжиною 1000 м.

Наведені вирази (1) – (2) дозволять визначити значення критерія робастності і виконати моделювання його зміни в часі з урахуванням амплітуди коливань та періоду коливань.

Величину прискорення автомобілів у транспортному потоці розрахуємо за виразом:

$$a = \frac{N_e}{v \cdot M}, \text{ м/с}^2, \quad (3)$$

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

$v$  – швидкість руху автомобіля, розмірність м/с;

$M$  – маса автомобіля, розмірність кг.

Середньоквадратичне відхилення прискорення автомобілів у транспортному потоці ( $\sigma_a$ ) виразимо формулою:

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (a_i - a_{cp})^2}, \text{ м/с}^2, \quad (4)$$

де  $m$  – кількість вимірювань прискорення автомобілів на ділянці дороги довжиною 1000 м;

$a_i$  – величина прискорення автомобіля у транспортному потоці  $i$ -го виміру, м/с<sup>2</sup>;

$a_{cp}$  – середнє значення прискорення автомобілів у транспортному потоці, м/с<sup>2</sup>.

Коливання параметра щільності транспортного потоку з урахуванням динамічності (прискорення) автомобілів у потоці, представимо виразом:

$$p(t) = p_{cp} + p_{cp} \left( A_a \cdot \sin \frac{K \cdot t}{T_{nep}} \right), \text{ 1/м}, \quad (5)$$

де  $p_{cp}$  - середнє значення параметра щільності розраховується за формулою, яку наведено в роботі [4]:

$A_a$  – амплітуда коливань прискорення автомобілів на ділянці дороги довжиною 1000 м розраховується за формулою:

$$A_a = \frac{\sigma_a}{a_{cp}}, \quad (6)$$

$K$  – коефіцієнт, який враховує діапазони моделювання;

$t$  – реальний час, година;

$T_{nep}$  – період коливань, година.

Коливання параметра швидкості руху автомобілів, представимо у вигляді:

$$v(t) = v_{cp} + v_{cp} \left( A_a \cdot \sin \frac{K \cdot t}{T_{nep}} \right), \text{ м/с}, \quad (7)$$

де  $v_{cp}$  – середнє значення швидкості руху автомобілів, розраховується за формулою, яку наведено в роботі [4]:

Коефіцієнт, що враховує зміну дорожньої інфраструктури на ділянках (кластерах) дорожньої мережі довжиною  $L=1000$  м, розраховується за формулою:

$$K_3 \approx \frac{k \cdot s}{n} = d, \quad (8)$$

де  $n$  – кількість смуг руху на контрольованій ділянці.

Коефіцієнт  $d$ , що враховує зміну дорожньої інфраструктури, формула (8) прямо пропорційний кількості пішохідних переходів і світлофорів і зворотно пропорційний кількості смуг руху, безрозмірна величина.

Середньоквадратичне відхилення зміни дорожньої інфраструктури на окремих кластерах виразимо формулою:

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (d_i - d_{cp})^2}, \quad (9)$$

де  $m$  – кількість вимірювань величини зміни дорожньої інфраструктури на контрольованій ділянці.

$A_d$  – амплітуда коливань зміни дорожньої інфраструктури в часі що досліджується, безрозмірна величина, розраховується за формулою:

$$A_d = \frac{\sigma_d}{d_{cp}}, \quad (10)$$

$d_{cp}$  – середнє значення зміни дорожньої інфраструктури на ділянці дорожньої мережі довжиною  $L=1000$  м, або кластері.

Вираз для моделювання коливання щільності транспортного потоку в часі що досліджується з урахуванням зміни дорожньої інфраструктури, представимо у вигляді:

$$p(t) = p_{cp} + p_{cp} \left( A_d \cdot \sin \frac{K \cdot t}{T_{nep}} \right), \text{ 1/м}, \quad (11)$$

Вираз для моделювання коливання швидкості руху автомобілів у транспортному потоці в часі що досліджується з урахуванням зміни дорожньої інфраструктури, представимо у вигляді:



$$v(t) = v_{cp} + v_{cp} \left( A_d \cdot \sin \frac{K \cdot t}{T_{nep}} \right), \text{ м/с}, \quad (12)$$

Отримані вирази зміни щільності транспортного потоку в реальному часі, вираз (5) та (11) та вирази зміни швидкості руху автомобілів в реальному часі, вираз (7) та (12) дозволяють виконати моделювання впливу змін прискорення руху автомобілів та зміну дорожньої інфраструктури на щільність та швидкість руху.

Залежності зміни критерію робастності ( $RR$ ) для різних значень щільності ( $p$ ) при зміні величин прискорення автомобілів ( $a$ ) у потоці представлено на рис. 1.

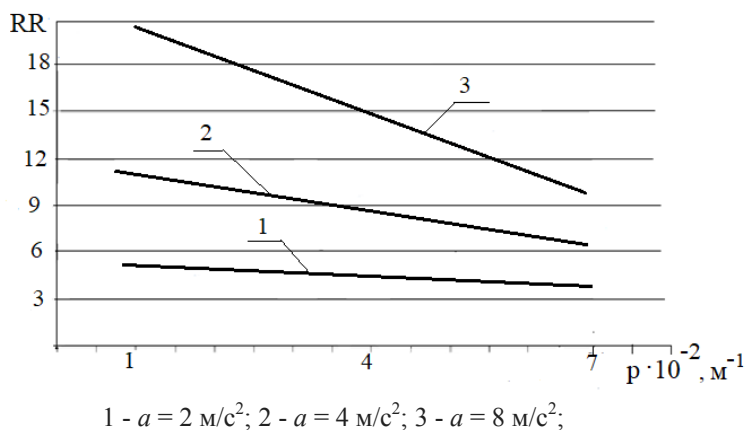


Рисунок 1 - Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні величин прискорення автомобілів у потоці  
Джерело: розроблено авторами

Аналіз представлених залежностей, рис.1, дозволяє зробити наступні висновки. Збільшення величин прискорення автомобілів у потоці значно збільшує діапазон робастності. Крива 3 на рис.1 відповідає величині прискорення  $8 \text{ м/с}^2$ , що характеризує динамічність транспортного потоку. При малих значеннях прискорення автомобілів, крива 1, запас стійкості до утворення заторів зменшується, що негативно впливає на транспортний потік, є вірогідність утворення заторів. Отримані залежності не суперечать висновкам роботи [22], але збільшення прискорення вплине на появу дорожньо-транспортних пригод. Має місце конфлікт інтересів.

Наявність коливань щільності транспортного потоку, формула (5) з амплітудою, яка розраховується за формулою (6) дозволяє внести корегування у величину критерію робастності. Корегування можна робити для різних кластерів дорожньої мережі, для різного часу доби та враховувати період коливань.

Аналогічне прогнозування можна зробити при зміні швидкості руху автомобілів у транспортному потоці, формула (7), та оцінити вплив на діапазон робастності за наявності коливань швидкості з амплітудою, яка розраховується за формулою (6). Це дозволяє внести корегування у величину критерію робастності.

Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку ( $RR$ ) для різних значень щільності ( $p$ ) при зміні інфраструктури дорожньої мережі ( $d$ ), представлено на рис.2.

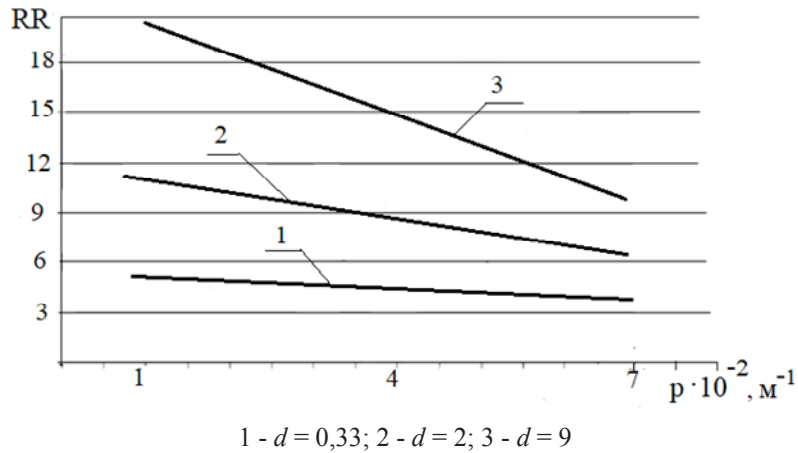


Рисунок 1 - Залежності критерію робастності при зміні щільності та прискорення автомобілів у потоці

Джерело: розроблено авторами

Аналіз залежностей, які наведено на рис.1, дозволяє зробити наступні висновки. Збільшення величин прискорення автомобілів сприяє збільшенню критерію робастності. При величині прискорення автомобілів у потоці  $8 \text{ м/с}^2$ , крива 3, спостерігається максимальна величина робастності. Зниження величин прискорення автомобілів, крива 1, зменшує діапазон робастності, що негативно впливає на транспортний потік, є вірогідність утворення заторів. Отримані залежності не суперечать висновкам роботи [22], але збільшення прискорення вплине на появу дорожньо-транспортних пригод. Має місце конфлікт інтересів.

Наявність коливань параметра щільності, формула (5) з амплітудою, яка розраховується за формулою (6) дозволяє внести корегування у величину критерію робастності. Корегування можна робити для різних кластерів дорожньої мережі, для різного часу доби та враховувати період коливань.

Аналогічне прогнозування можна зробити при зміні швидкості руху автомобілів у транспортному потоці, формула (7), та оцінити вплив на діапазон робастності за наявності коливань швидкості з амплітудою, яка розраховується за формулою (6). Це дозволяє внести корегування у величину критерію робастності.

Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку ( $RR$ ) для різних значень щільності ( $p$ ) при зміні інфраструктури дорожньої мережі ( $d$ ), представлено на рис.2.

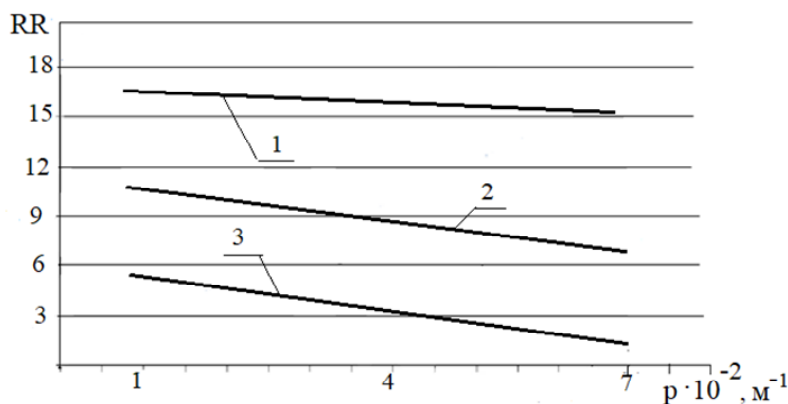


Рисунок 2 - Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні дорожньої інфраструктури

Джерело: розроблено авторами

Залежності побудовано для різних значень параметра ( $d$ ), який розраховується за формулою (8). Збільшення кількості смуг та одночасно зменшення кількості світлофорів та пішохідних переходів на контрольованому кластері, крива 1, значно збільшує стійкість руху транспортних засобів у потоці. І навпаки, зменшення кількості смуг, збільшення кількості світлофорів та пішохідних переходів на контрольованому кластері, крива 3, значно зменшує стійкість руху транспортних засобів у потоці. Корегування щільності, формула (11) та швидкості руху, формула (12), можна виконати з урахуванням амплітуди коливань, формула (10). Корегування можна робити для різних кластерів дорожньої мережі, для різного часу доби та враховувати період коливань.

Як впливає з поданих залежностей дана стаття доповнює роботу [4]. Додатково враховуються параметри динамічності транспортного потоку у вигляді величин прискорення та параметри дорожньої інфраструктури у вигляді кількості смуг на проїжджій частині, кількості світлофорів та пішохідних переходів. Аналогічно враховується амплітуда коливань та період коливань в часі, в період появи «години пік». Для підвищення точності моделювання можна застосовувати основні положення кластерного аналізу.

Підсумовуючи результати досліджень, які наведено в роботах [1-4] та враховуючи результати представленої роботи, можна сформулювати систему поглядів (понять) на процеси стійкості транспортних потоків великих міст до утворення заторів. Така система у науковій літературі носить назву концепція.

Основні складові концепції оцінки ергономічної стійкості транспортного потоку представлено у вигляді структурно-логічної схеми на рис.3.

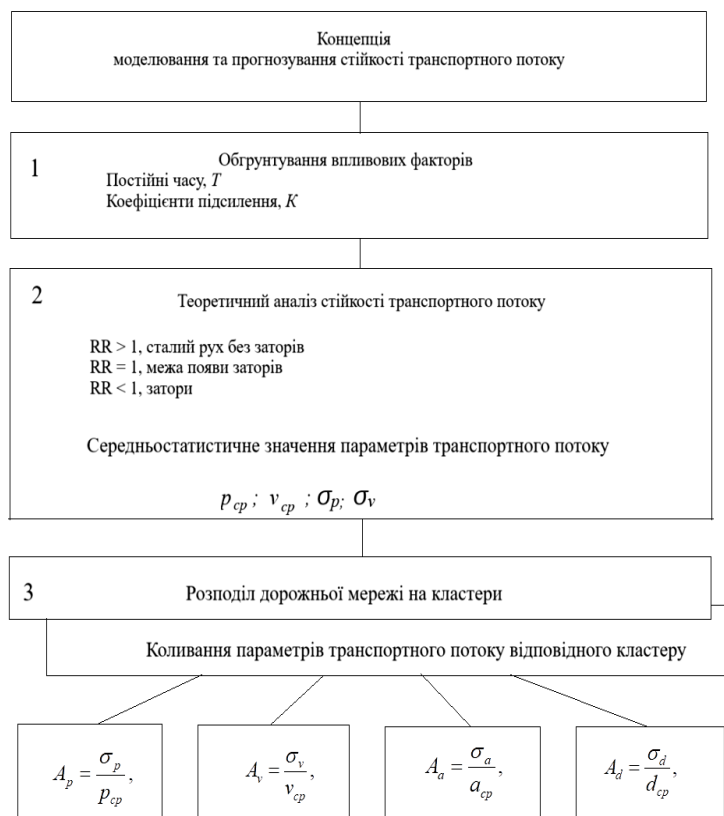


Рисунок 3 – Структурно-логічна схема концепції оцінки ергономічної стійкості транспортного потоку великих міст

Джерело: розроблено авторами

Системний підхід такої концепції можна поділити на три рівні.

Перший рівень – теоретичне обґрунтування значимих факторів, які характеризують транспортний процес і дуже впливають на виникнення заторів у міській дорожній мережі. Такі фактори об'єднані в комплексні показники, які отримали назву постійні часу  $T_i$ , розмірність секунда та коефіцієнти підсилення  $K_i$ , безрозмірні величини. Формули визначення постійних часу  $T_i$  і коефіцієнтів підсилення  $K_i$ , представлені у роботах [1,3].

Другий рівень – теоретичне обґрунтування межі втрати стійкості, критерій робастності  $RR$  дорівнює одиниці, що характеризує межу виникнення заторів у міській дорожній мережі. Критерій отримано у роботі [2] шляхом аналізу диференційного рівняння, яке описує транспортний потік. Однак другий рівень концепції має недолік, побудований для стаціонарного процесу та не враховує динамічність потоку у часі. Такі зміни характерні для міської дорожньої мережі в «години пік».

Третій рівень – корекція значення критерію робастності ( $RR$ ) міської дорожньої мережі з урахуванням коливань. Коливання щільності та швидкості транспортних засобів розглянуті у роботі [4]. Додатково враховуються динаміка транспортного потоку у вигляді прискорення автомобілів у потоці та наявність смуг руху, пішохідних переходів та світлофорів на окремих ділянках дорожньої мережі. Для підвищення інформативності, ділянки дорожньої мережі розбиваються на кластери.

**Висновки.** Отримав подальший розвиток підхід в моделюванні та прогнозуванні утворення заторів на дорогах великих міст. Методичний підхід враховує коливання динамічності транспортного потоку у вигляді зміни прискорення руху автомобілів в потоці та коливання зміни інфраструктури дорожнього середовища, яке пов'язане з кількістю світлофорів, пішохідних переходів та кількістю смуг для руху транспортних засобів.

Шляхом моделювання встановлено, що збільшення величин прискорення транспортних засобів під час руху у потоці значно збільшує діапазон робастності. При малих значеннях прискорення автомобілів, запас стійкості до утворення заторів зменшується, що негативно впливає на транспортний потік, є вірогідність утворення заторів. Наявність коливань, за рахунок зміни прискорення автомобілів, дозволяє внести корегування у значення діапазону робастності. Корегування можна робити для різних кластерів дорожньої мережі, для різного часу доби та враховувати період коливань.

Наведено залежності зміни діапазону робастності при зміні інфраструктури дорожньої мережі. Встановлено, що збільшення кількості смуг та одночасно зменшення кількості світлофорів та пішохідних переходів на контрольованому кластері, значно збільшує стійкість руху транспортних засобів у потоці. І навпаки, зменшення кількості смуг, збільшення кількості світлофорів та пішохідних переходів на контрольованому кластері, значно зменшує стійкість руху транспортних засобів у потоці. Корегування щільності та швидкості руху можна виконати з урахуванням амплітуди коливань.

Сформульовано концепцію моделювання та прогнозування стійкості транспортних потоків великих міст до утворення заторів. Обґрунтовано основні складові концепції, за якими поетапно виконується така оцінка з урахуванням динамічності зміни впливових факторів. Запропонована концепція відрізняється від відомих тим, що враховує коливання параметрів транспортного потоку – щільності та швидкості руху транспортних засобів у часі. Такі зміни характерні для міської дорожньої мережі в «години пік».

## Список літератури

1. Оцінка ергономічної стійкості транспортного потоку на дільницях дорожньої мережі. Ідентифікація математичної моделі / Войтов В.А. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7(38), ч.І. С. 236-245. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.236-245](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.236-245)
2. Обґрунтування критерію стійкості транспортного потоку на дільницях дорожньої мережі / Кравцов А.Г. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7(38), ч.ІІ. С. 222-230. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.222-230](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.222-230)
3. Дослідження математичної моделі стійкості транспортного потоку на дільницях дорожньої мережі міста / Горяїнов О.М. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39), ч.І. С. 183-195. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.183-195](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.183-195)
4. Прогнозування завантаженості вулиць великих міст з урахуванням коливань щільності та швидкості руху транспортних потоків / Войтов В.А. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 9(40), ч.І. С. 165-177. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.165-177](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.165-177)
5. Wang, S., Chen, C., Zhang, J., Gu, X., & Huang, X. Vulnerability assessment of urban road traffic systems based on traffic flow. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2022. 38, 100536. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2022.100536>
6. Romanowska, A., & Jamroz, K. Comparison of traffic flow models with real traffic data based on a quantitative assessment. *Applied Sciences*. 2021. 11(21), 9914. <https://doi.org/10.3390/app11219914>
7. Gore, N., Chauhan, R., Easa, S., & Arkatkar, S. Traffic conflict assessment using macroscopic traffic flow variables: A novel framework for real-time applications. *Accident Analysis & Prevention*. 2023. 185, 107020. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2023.107020>
8. Mohammadian, S., Haque, M. M., Zheng, Z., & Bhaskar, A. Integrating safety into the fundamental relations of freeway traffic flows: A conflict-based safety assessment framework. *Analytic methods in accident research*. 2021. 32, 100187. <https://doi.org/10.1016/j.amar.2021.100187>
9. Lan, C. J., & Davis, G. A. Empirical assessment of a Markovian traffic flow model. *Transportation research record*. 1997. 1591(1), P. 31-37. <https://doi.org/10.3141/1591-05>
10. Juran, I., Prashker, J. N., Bekhor, S., & Ishai, I. A dynamic traffic assignment model for the assessment of moving bottlenecks. *Transportation research part C: emerging technologies*. 2009. 17(3), P. 240-258. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2008.10.003>
11. Treiber, M., & Kesting, A. Validation of traffic flow models with respect to the spatiotemporal evolution of congested traffic patterns. *Transportation research part C: emerging technologies*. 2012. 21(1), P. 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.09.002>
12. Mei, Y., Wang, S., Gong, M., & Chen, J. Urban Traffic Dominance: A Dynamic Assessment Using Multi-Source Data in Shanghai. *Sustainability*. 2024. 16(12), 4956. <https://doi.org/10.3390/su16124956>
13. Pompigna, A., & Mauro, R. A Statistical Simulation Model for the Analysis of the Traffic Flow Reliability and the Probabilistic Assessment of the Circulation Quality on a Freeway Segment. *Sustainability*. 2022. 14(23), 16019. <https://doi.org/10.3390/su142316019>
14. Goh, Y. M., & Love, P. E. Methodological application of system dynamics for evaluating traffic safety policy. *Safety science*. 2012. 50(7), P. 1594-1605. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.03.002>
15. Zeng, J., Qian, Y., Wang, B., Wang, T., & Wei, X. The impact of traffic crashes on urban network traffic flow. *Sustainability*. 2019. 11(14), 3956. <https://doi.org/10.3390/su11143956>
16. Xiao, D., Ding, H., Sze, N. N., & Zheng, N. Investigating built environment and traffic flow impact on crash frequency in urban road networks. *Accident Analysis & Prevention*. 2024. 201, 107561. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107561>
17. Ognjenovic, S., Donceva, R., & Vatin, N. Dynamic homogeneity and functional dependence on the number of traffic accidents, the role in urban planning. *Procedia Engineering*, 2015. 117. P. 551-558. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.212>

18. Theofilatos, A., & Yannis, G. A review of the effect of traffic and weather characteristics on road safety. *Accident Analysis & Prevention*. 2014. 72, P. 244-256. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.06.017>
19. Cheng, Z., Lu, J., & Li, Y. Freeway crash risks evaluation by variable speed limit strategy using real-world traffic flow data. *Accident Analysis & Prevention*. 2018. 119, P. 176-187. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.07.009>
20. Golob, T. F., Recker, W. W., & Alvarez, V. M. Freeway safety as a function of traffic flow. *Accident Analysis & Prevention*. 2004. 36(6), P. 933-946. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2003.09.006>
21. Shi, A., Tao, Z., Xinming, Z., & Jian, W. Evolution of traffic flow analysis under accidents on highways using temporal data mining. In *2014 Fifth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications*. 2014. P. 454-457. <https://doi.org/10.1109/ISDEA.2014.109>
22. Jiang, R., Jin, C. J., Zhang, H. M., Huang, Y. X., Tian, J. F., Wang, W., ... & Jia, B. Experimental and empirical investigations of traffic flow instability. *Transportation research part C: emerging technologies*. 2018. 94, P. 83-98. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.08.024>
23. Shen, J., & Yang, G. Crash risk assessment for heterogeneity traffic and different vehicle-following patterns using microscopic traffic flow data. *Sustainability*. 2020. 12(23), 9888. <https://doi.org/10.3390/su12239888>
24. Cascetta, E., Punzo, V., & Montanino, M. Empirical analysis of effects of automated section speed enforcement system on traffic flow at freeway bottlenecks. *Transportation research record*. 2011. 2260(1), P. 83-93. <https://doi.org/10.3141/2260-10>
25. Hafram, S. M., & Asrib, A. R. Traffic Conditions and Characteristics: Investigation of Road Segment Performance. *International Journal of Environment, Engineering and Education*. 2022. 4(3), P. 108-114. <http://ijeedu.com/index.php/ijeedu/article/view/77>
26. Sugiyama, Y., Fukui, M., Kikuchi, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Nishinari, K., ... & Yukawa, S. Traffic jams without bottlenecks—experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam. *New journal of physics*. 2008. 10(3), 033001. DOI 10.1088/1367-2630/10/3/033001
27. Feng, X., Zhang, Y., Qian, S., & Sun, L. The traffic capacity variation of urban road network due to the policy of unblocking community. *Complexity*. 2021. 9292389. <https://doi.org/10.1155/2021/9292389>
28. Almatar, K. M. Traffic congestion patterns in the urban road network: (Dammam metropolitan area). *Ain Shams engineering journal*. 2023. 14(3), 101886. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101886>
29. Khattak, M. W., De Backer, H., De Winne, P., Brijs, T., & Pirdavani, A. Analysis of Road Infrastructure and Traffic Factors Influencing Crash Frequency: Insights from Generalised Poisson Models. *Infrastructures*. 2024. 9(3), 47. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9030047>
30. Ernazarov, A. Efficiency of functioning of intersections with high-intensity traffic and pedestrian flows. *Technical science and innovation*. 2022. P. 192-197. <https://doi.org/10.51346/tstu-01.22.1-77-0162>
31. Zhao, H. T., Yang, S., & Chen, X. X. Cellular automata model for urban road traffic flow considering pedestrian crossing street. *Physica A: statistical mechanics and its applications*. 2016. 462, P. 1301-1313. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.06.146>
32. Nagatani, T. The physics of traffic jams. *Reports on progress in physics*. 2002. 65(9), 1331. DOI 10.1088/0034-4885/65/9/203
33. Fei, L., Zhu, H. B., & Han, X. L. Analysis of traffic congestion induced by the work zone. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2016. 450, P. 497-505. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.01.036>
34. Rodriguez, E., Ferreira, N., & Poco, J. JamVis: exploration and visualization of traffic jams. *The European Physical Journal Special Topics*. 2022. 231 (9), P. 1673-1687. <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-021-00424-2>

## References

1. Vojtov, V.A. et al. (2023). Otsinka erhonomichnoi stijkosti transportnoho potoku na dil'nytsiakh dorozhn'oi merezhi. Identyfikatsiia matematychnoi modeli [Assessment of ergonomic sustainability of traffic flow at road network sections. Identification of a mathematical model]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical Sciences*, 7(38), 236-245. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.236-245](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.236-245) [in Ukrainian].
2. Kravtsov, A.H. et al. (2023). Obhruntuvannia kryteriiu stijkosti transportnoho potoku na dil'nytsiakh dorozhn'oi merezhi [Justification of the traffic flow stability criterion at the sections of the road network]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical Sciences*, 7(38), 222-230. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.222-230](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.222-230) [in Ukrainian].
3. Horiainov, O.M. et al. (2023). Doslidzhennia matematychnoi modeli stijkosti transportnoho potoku na dil'nytsiakh dorozhn'oi merezhi mista [Study of the mathematical model of the stability of the traffic flow in the sections of the city's road network]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical Sciences*, 8(39), 1, 183-195 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.183-195](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.183-195) [in Ukrainian].
4. Vojtov V.A. et al. (2024). Prohnozuvannya zavantazhenosti vulyts' velykykh mist z urakhuvanniam kolyvan' shchil'nosti ta shvydkosti rukhu transportnykh potokiv [Forecasting the congestion of the streets of large cities, taking into account fluctuations in the density and speed of traffic flows]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical Sciences*, 9(40), 1 pp. 165-177. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.165-177](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.165-177) [in Ukrainian].
5. Wang, S., Chen, C., Zhang, J., Gu, X., & Huang, X. (2022). Vulnerability assessment of urban road traffic systems based on traffic flow. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 38, 100536. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2022.100536> [in English].
6. Romanowska, A., & Jamroz, K. (2021). Comparison of traffic flow models with real traffic data based on a quantitative assessment. *Applied Sciences*. 11(21), 9914. <https://doi.org/10.3390/app11219914> [in English].
7. Gore, N., Chauhan, R., Easa, S., & Arkatkar, S. (2023). Traffic conflict assessment using macroscopic traffic flow variables: A novel framework for real-time applications. *Accident Analysis & Prevention*. 185, 107020. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2023.107020> [in English].
8. Mohammadian, S., Haque, M. M., Zheng, Z., & Bhaskar, A. (2021). Integrating safety into the fundamental relations of freeway traffic flows: A conflict-based safety assessment framework. *Analytic methods in accident research*. 32, 100187. <https://doi.org/10.1016/j.amar.2021.100187> [in English].
9. Lan, C. J., & Davis, G. A. (1997). Empirical assessment of a Markovian traffic flow model. *Transportation research record*. 1591(1), P.31-37. <https://doi.org/10.3141/1591-05> [in English].
10. Juran, I., Prashker, J. N., Bekhor, S., & Ishai, I. (2009). A dynamic traffic assignment model for the assessment of moving bottlenecks. *Transportation research part C: emerging technologies*. 17(3), P. 240-258. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2008.10.003> [in English].
11. Treiber, M., & Kesting, A. (2012). Validation of traffic flow models with respect to the spatiotemporal evolution of congested traffic patterns. *Transportation research part C: emerging technologies*. 21(1), P. 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.09.002> [in English].
12. Mei, Y., Wang, S., Gong, M., & Chen, J. (2024). Urban Traffic Dominance: A Dynamic Assessment Using Multi-Source Data in Shanghai. *Sustainability*. 16(12), 4956. <https://doi.org/10.3390/su16124956> [in English].
13. Pompigna, A., & Mauro, R. A (2022). Statistical Simulation Model for the Analysis of the Traffic Flow Reliability and the Probabilistic Assessment of the Circulation Quality on a Freeway Segment. *Sustainability*. 14(23), 16019. <https://doi.org/10.3390/su142316019> [in English].
14. Goh, Y. M., & Love, P. E. (2012). Methodological application of system dynamics for evaluating traffic safety policy. *Safety science*. 50(7), P. 1594-1605. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.03.002> [in English].
15. Zeng, J., Qian, Y., Wang, B., Wang, T., & Wei, X. (2019). The impact of traffic crashes on urban network traffic flow. *Sustainability*. 11(14), 3956. <https://doi.org/10.3390/su11143956> [in English].

16. Xiao, D., Ding, H., Sze, N. N., & Zheng, N. (2024). Investigating built environment and traffic flow impact on crash frequency in urban road networks. *Accident Analysis & Prevention*. 201, 107561. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107561> [in English].
17. Ognjenovic, S., Donceva, R., & Vatin, N. (2015). Dynamic homogeneity and functional dependence on the number of traffic accidents, the role in urban planning. *Procedia Engineering*, 117, P. 551-558. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.212> [in English].
18. Theofilatos, A., & Yannis, G. (2014). A review of the effect of traffic and weather characteristics on road safety. *Accident Analysis & Prevention*. 72, P. 244-256. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.06.017> [in English].
19. Cheng, Z., Lu, J., & Li, Y. (2018). Freeway crash risks evaluation by variable speed limit strategy using real-world traffic flow data. *Accident Analysis & Prevention*. 119, P. 176-187. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.07.009> [in English].
20. Golob, T. F., Recker, W. W., & Alvarez, V. M. (2004). Freeway safety as a function of traffic flow. *Accident Analysis & Prevention*. 36(6), P. 933-946. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2003.09.006> [in English].
21. Shi, A., Tao, Z., Xinming, Z., & Jian, W. (2014). Evolution of traffic flow analysis under accidents on highways using temporal data mining. In *2014 Fifth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications*. P. 454-457. <https://doi.org/10.1109/ISDEA.2014.109> [in English].
22. Jiang, R., Jin, C. J., Zhang, H. M., Huang, Y. X., Tian, J. F., Wang, W., ... & Jia, B. (2018). Experimental and empirical investigations of traffic flow instability. *Transportation research part C: emerging technologies*. 94, P. 83-98. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.08.024> [in English].
23. Shen, J., & Yang, G. (2020). Crash risk assessment for heterogeneity traffic and different vehicle-following patterns using microscopic traffic flow data. *Sustainability*. 12(23), 9888. <https://doi.org/10.3390/su12239888> [in English].
24. Cascetta, E., Punzo, V., & Montanino, M. (2011). Empirical analysis of effects of automated section speed enforcement system on traffic flow at freeway bottlenecks. *Transportation research record*. 2260(1), P. 83-93. <https://doi.org/10.3141/2260-10> [in English].
25. Hafram, S. M., & Asrib, A. R. (2022.) Traffic Conditions and Characteristics: Investigation of Road Segment Performance. *International Journal of Environment, Engineering and Education*. 4(3), P. 108-114. <http://ijeedu.com/index.php/ijeedu/article/view/77> [in English].
26. Sugiyama, Y., Fukui, M., Kikuchi, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Nishinari, K., ... & Yukawa, S. (2008). Traffic jams without bottlenecks—experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam. *New journal of physics*. 10(3), 033001. DOI 10.1088/1367-2630/10/3/033001 [in English].
27. Feng, X., Zhang, Y., Qian, S., & Sun, L. (2021). The traffic capacity variation of urban road network due to the policy of unblocking community. *Complexity*. 9292389. <https://doi.org/10.1155/2021/9292389> [in English].
28. Almatar, K. M. (2023). Traffic congestion patterns in the urban road network: (Dammam metropolitan area). *Ain Shams engineering journal*. 14(3), 101886. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101886> [in English].
29. Khattak, M. W., De Backer, H., De Winne, P., Brijs, T., & Pirdavani, A. (2024). Analysis of Road Infrastructure and Traffic Factors Influencing Crash Frequency: Insights from Generalised Poisson Models. *Infrastructures*. 9(3), 47. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9030047> [in English].
30. Ernazarov, A. (2022). Efficiency of functioning of intersections with high-intensity traffic and pedestrian flows. *Technical science and innovation*. P. 192-197. <https://doi.org/10.51346/tstu-01.22.1-77-0162> [in English].
31. Zhao, H. T., Yang, S., & Chen, X. X. (2016). Cellular automata model for urban road traffic flow considering pedestrian crossing street. *Physica A: statistical mechanics and its applications*. 462, P. 1301-1313. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.06.146> [in English].
32. Nagatani, T. (2002). The physics of traffic jams. *Reports on progress in physics*. 65(9), 1331. DOI 10.1088/0034-4885/65/9/203 [in English].
33. Fei, L., Zhu, H. B., & Han, X. L. (2016). Analysis of traffic congestion induced by the work zone. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 450, P. 497-505. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.01.036> [in English].



34. Rodriguez, E., Ferreira, N., & Poco, J. (2022). JamVis: exploration and visualization of traffic jams. *The European Physical Journal Special Topics*. 231 (9), P. 1673-1687. <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-021-00424-2> [in English].

**Viktor Vojtov**, Prof., DSc., **Andriy Kravtsov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anton Voitov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Natalija Berezna**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Igor Sysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Leonid Kryvenko**, Director of the enterprise 16363, **Ihor Babaryka**, Assoc. Prof., PhD ag-s. sci.  
*State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine*

### **The concept of assessing the ergonomic stability of the traffic flow of large places with the balance of the dynamics of changes in flow factors**

The methodological approach of forecasting the congestion of the streets of large cities, taking into account the fluctuations in the density of traffic flows and the speed of movement of cars in the flow, received further development. The methodical approach takes into account fluctuations in the dynamics of the traffic flow in the form of changes in the acceleration of the movement of cars in the flow and fluctuations in changes in the infrastructure of the road environment, which is associated with the number of traffic lights, pedestrian crossings and the number of lanes for the movement of vehicles.

Through modeling, it was found that increasing the acceleration values of cars in the stream significantly increases the range of robustness. At low values of acceleration of cars, the reserve of resistance to the formation of traffic jams decreases, which negatively affects the traffic flow, there is a probability of the formation of traffic jams. The presence of fluctuations in the density of the traffic flow and the speed of movement of cars in the flow, due to changes in the acceleration of cars, allows making adjustments to the value of the robustness criterion. Adjustments can be made for different clusters of the road network, for different times of the day, and take into account the period of fluctuations. The dependences of the change in the robustness range of the traffic flow upon changing the infrastructure of the road network are given. It has been established that increasing the number of lanes and simultaneously reducing the number of traffic lights and pedestrian crossings on the controlled cluster significantly increases the stability of the movement of vehicles in the flow. Conversely, reducing the number of lanes, increasing the number of traffic lights and pedestrian crossings on the controlled cluster significantly reduces the stability of the movement of vehicles in the flow. Adjustment of density and movement speed can be performed taking into account the amplitude of oscillations.

The concept of modeling and forecasting the stability of traffic flows of large cities to the formation of traffic jams is formulated. The main components of the concept, according to which such an assessment is performed step by step, taking into account the dynamics of changes in influencing factors, are substantiated. The proposed concept differs from the known ones in that it takes into account fluctuations in traffic flow parameters - the density and speed of movement of vehicles over time. Such changes are characteristic of the city's road network during "peak hours".

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

*Одержано (Received) 16.05.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 17.06.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 26.06.2024*