

ПРИКЛАДНА ГЕОМЕТРІЯ, ІНЖЕНЕРНА ГРАФІКА ТА ЕРГОНОМІКА

УДК 656.01:656.13

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/01>

Максимов С.В.

Криворізький національний університет

Максимова О.С.

Криворізький національний університет

Пристінський С.М.

Криворізький національний університет

АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ЗМІНІ ІНТЕНСИВНОСТІ РУХУ

Актуальність дослідження зумовлена зростанням інтенсивності транспортних потоків та підвищенням рівня невизначеності функціонування транспортних систем у сучасних урбанізованих середовищах. Під впливом глобальних логістичних трансформацій, динаміки мобільності населення, цифровізації транспортних послуг та, особливо, у контексті безпекових викликів, актуалізується потреба у науковому обґрунтуванні підходів до забезпечення стійкості транспортної інфраструктури. Метою дослідження є теоретичне обґрунтування підходів до аналізу стійкості транспортної системи за умов зміни інтенсивності руху та формування концептуальної моделі адаптивності й антикрихкості з урахуванням сучасних викликів і тенденцій розвитку транспортних мереж. Методологічну основу дослідження становлять мережевий аналіз, системно-динамічний підхід, теорія фазових переходів у транспортних потоках, критичний і компаративний аналіз наукових джерел, логіко-структурне узагальнення, а також елементи імітаційного моделювання транспортної поведінки. Отримані результати підтверджують, що стійкість транспортної системи визначається її здатністю підтримувати функціональні параметри за умов зовнішніх збурень і підвищеної інтенсивності руху, зберігаючи керованість потоків і мінімізуючи ризик переходу до заторового стану. Виявлено порогові явища, що характеризують критичні точки втрати стабільності, та визначено роль макромоделей і мікромоделей у прогнозуванні динаміки потоків. Сформовано авторську концепцію підсилення стійкості, адаптивності та антикрихкості транспортних систем, що включає мережеве резервування, сценарне планування, цифрове моделювання та інституційне навчання систем управління рухом. Практична значущість результатів полягає у можливості використання запропонованих положень для розроблення стратегій транспортної безпеки, модернізації міських систем управління рухом, підвищення готовності інфраструктури до кризових ситуацій та оптимізації рішень з планування транспортної політики на національному та муніципальному рівнях.

Ключові слова: мобільність населення, транспортні режими, мережевий аналіз, адаптивне управління, цифрові транспортні моделі.

Постановка проблеми. Сучасні транспортні системи функціонують в умовах суттєвого ускладнення мобільнісних процесів, зростання динаміки транспортного попиту та посилення впливу зовнішніх ризиків. Урбанізаційні тенден-

ції, інтенсифікація логістичних потоків, цифрова трансформація економіки та підвищення соціальної мобільності формують нові вимоги до стійкості транспортної інфраструктури, яка повинна забезпечувати безперервність руху, передбачува-

ність роботи та здатність до оперативного відновлення після збурень [1]. Особливої актуальності це питання набуває в умовах військових загроз і нестабільності, що характерні для України, де транспортні мережі виконують критичну роль у забезпеченні обороноздатності, гуманітарної мобільності та життєдіяльності територій.

Класичні підходи до управління транспортними потоками ґрунтуються на оптимізаційних моделях та інженерних рішеннях, що зосереджуються на підтриманні пропускну здатності та мінімізації затримок. Проте сучасні виклики, зокрема наявність порогових режимів, ефектів критичної щільності, фазових переходів та нерівномірності транспортних потоків, засвідчують обмеженість традиційних механізмів реагування [2]. У таких умовах стратегічне значення набуває розроблення адаптивних і антикрихких транспортних систем, здатних не лише витримувати стресові навантаження, а й використовувати їх для перегляду алгоритмів, підвищення ефективності та зміцнення функціональної стійкості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження демонструють зростання наукової уваги до стійкості транспортних систем, що виявляється у розвитку моделей оцінювання адаптивності та відновлюваності транспортних мереж під впливом дестабілізуючих факторів. У праці К. Мауаг та співавторів обґрунтовано системний підхід до моделювання транспортних потоків, який деталізує механізми пасивної й активної адаптації мережі [1]. J. Wassmer із колегами, використавши гравітаційну модель, показали вплив природних катастроф на доступність критичних служб і підкреслили важливість підтримання мобільності в кризових умовах [2]. Дослідження J. Wang та співавторів на прикладі Пекінського метрополітену дозволило ідентифікувати динамічні вузькі місця та оцінити здатність мережі до відновлення [3]. Н.М.І. Каус та колеги запропонували даноорієнтовану модель напрямності руху, у якій алгоритми машинного навчання поєднано з мережевими показниками для підвищення резильєнтності дорожніх мереж [4]. R. Mou та R. Kang удосконалили методи виявлення критичних вузлів аеропортових мереж, розробивши модель покращеної центральності для оптимізації стратегій відновлення [5]. M.N. Postorino та G.M.L. Sarnè інтегрували дані землекористування в оцінювання резильєнтності, запропонували концепцію «augmented link» [6]. У роботі R. Amghar та ін. представлено підхід «resilience as a service», що орієнтований на коор-

динацію ресурсів різних операторів у кризових ситуаціях [7]. Огляд A.S. Bergantino зі співавторами систематизував просторові закономірності та обмеження існуючих моделей оцінювання стійкості транспортних мереж [8]. Вагомий внесок належить і українським ученим. А. Кравцов та співавтори розробили критерій оцінки стійкості транспортного потоку, який дає змогу визначати робастний діапазон руху та виявляти проблемні ділянки [9]. В. Войтов із колегами створили математичну модель оцінки ергономічної стійкості транспортних потоків, що враховує багатосмуговість і вплив зовнішніх факторів [10], а в подальшій роботі автори сформулювали підхід до прогнозування заторів у містах на основі коливань інтенсивності та інфраструктурних параметрів [11]. Практичну значущість має дослідження Ю. Євчука та співавторів, які довели, що перенесення зупинок за перехрестя та впровадження виділених смуг підвищує стабільність руху та зменшує затримки в системах координованого регулювання [12].

Узагальнюючи представлені підходи, можна відзначити, що сучасний науковий дискурс трактує транспортну стійкість як інтегровану властивість, що об'єднує здатність системи підтримувати функціонування, адаптуватися до змін та еволюційно нарощувати потенціал розвитку. Така перспектива відповідає запитам складного урбаністичного середовища, де ефективне управління мобільністю стає критичним фактором економічної та соціальної стійкості.

З урахуванням попередніх досліджень стійкості транспортних систем залишається невирішеним питання комплексного узгодження підходів до оцінювання надійності, адаптивності та антикрихкості транспортних мереж у динамічно змінних умовах руху. Незважаючи на значний прогрес у моделюванні транспортних потоків, недостатньо досліджено взаємозв'язок між пороговими режимами руху, поведінковими чинниками та цифровими механізмами управління.

Наше дослідження було спрямоване на теоретичне обґрунтування концепції стійкості транспортної системи в умовах зміни інтенсивності руху та формування авторської моделі адаптивного й антикрихкого підходу до її функціонування. У роботі систематизовано наукові підходи, визначено критичні режими роботи інфраструктури та запропоновано концептуальні положення щодо посилення здатності транспортних мереж не лише відновлюватися, а й підвищувати ефективність після стресових впливів.

Постановка завдання. Метою статті є теоретичне обґрунтування підходів до оцінювання стійкості транспортної системи за умов зміни інтенсивності руху та формування концептуальної моделі розвитку адаптивних і антикрихких транспортних мереж, здатних забезпечувати стабільність функціонування в умовах невизначеності та зростання зовнішніх впливів.

Виклад основного матеріалу. Стійкість транспортної системи у сучасній науковій парадигмі розглядається як здатність забезпечувати безперервність транспортних процесів, зберігати оптимальні параметри функціонування та відновлювати роботу після впливу зовнішніх або внутрішніх дестабілізуючих чинників. У транспортній науці це поняття включає збереження пропускну здатності мережі, підтримання стабільності транспортних потоків і забезпечення передбачуваності руху за умов змін інтенсивності, аварійних ситуацій, інфраструктурних обмежень чи підвищення навантаження [13, р. 619].

Концепт стійкості транспорту має міждисциплінарну природу: він співвідноситься із фізичним розумінням стійкості як здатності системи повертатися в рівноважний стан після збурення; з економічним трактуванням, що пов'язане з підтриманням функціональних параметрів системи та мінімізацією втрат; а також із екологічним підходом, у межах якого стійкість означає збереження функціональної рівноваги системи за умов змін середовища та наявності нерівномірних потоків ресурсів [1]. Таке зіставлення демонструє спільну сутність феномену – здатність продовжувати виконання ключових функцій при дії стресорів – і водночас підкреслює специфіку транспортної системи як складного соціально-технічного утворення.

У структурі теоретичних підходів виділяють кілька типів стійкості транспортної системи. Статична стійкість характеризує здатність мережі підтримувати параметри руху за відсутності істотних коливань інтенсивності, тоді як динамічна стійкість відображає здатність системи адаптуватися до змін транспортного потоку, швидко реагувати на перевантаження та переходити між режимами функціонування без втрати ефективності. Структурна стійкість пов'язана зі здатністю інфраструктури та мережевих конфігурацій протистояти руйнуванням, а функціональна – зі збереженням ключових операційних можливостей за умов порушення окремих елементів системи [14]. Додатково виділяють операційну стійкість, яка характеризує щоденну здатність системи пра-

цювати в межах допустимих відхилень, та стратегічну стійкість, що відображає довгострокову життєздатність, адаптивність до трансформацій транспортного попиту й здатність інтегрувати інноваційні рішення [6].

Сучасний науковий дискурс доповнюється концепцією антикрихкості (N. Taleb), яка виходить за межі традиційного розуміння стійкості як простого збереження стану або відновлення параметрів. Антикрихкість передбачає здатність транспортної системи не лише протистояти дестабілізуючим впливам і повертатися до попереднього рівня функціонування, але й покращувати показники внаслідок стресу, тобто трансформуватися під дією навантажень і отримувати позитивний ефект від досвіду роботи в нестабільних умовах [15]. У контексті транспортної інфраструктури це може означати переорієнтацію потоків, впровадження інтелектуальних систем управління рухом, оптимізацію мережі та удосконалення логістичних рішень на основі аналізу кризових ситуацій.

Для транспортної інфраструктури стійкість означає здатність системи переналаштувати потоки, застосовувати інтелектуальні механізми керування рухом та оптимізувати мережеві рішення на основі аналізу кризових ситуацій. У сучасному підході вона еволюціонує від статичного збереження параметрів до динамічної моделі розвитку, що ґрунтується на адаптації, самоорганізації та використанні накопиченого досвіду в умовах змін середовища. Відтак управління інтенсивністю руху та прогнозування коливань транспортного попиту стають ключовими інструментами стабільності транспортної системи [14].

Інтенсивність руху є базовим параметром, що визначає кількість транспортних засобів, які проходять через елемент мережі за одиницю часу, та служить тригером переходу між режимами – від вільного руху до заторового стану. Підвищення попиту, нерівномірний розподіл потоків чи інфраструктурні обмеження зумовлюють необхідність здатності мережі ефективно поглинати пікові навантаження та підтримувати пропускну здатність, що безпосередньо формує рівень її стійкості [5].

Важливою ознакою стійкості транспортної системи є наявність порогових явищ. Точка насичення позначає рівень інтенсивності руху, за якого пропускну здатність мережі досягає максимуму, після чого подальше збільшення потоку спричиняє різке погіршення швидкісних та часових характеристик [1]. Ефект критичної щільності

засвідчує, що навіть незначний приріст транспортного навантаження на межі стійкості здатен ініціювати дисбаланс та переведення системи у нестабільний режим. Затвор у цьому контексті виступає фазою системної нестійкості, коли порушується структура потоків, зникає передбачуваність руху, а мережа втрачає здатність до саморегуляції без зовнішнього втручання [16].

Теоретичне пояснення цих процесів ґрунтується на низці моделей. Теорія черг інтерпретує транспортний потік як систему обслуговування зі змінною інтенсивністю надходження та обробки одиниць потоку, що дозволяє моделювати черги та точки перевантаження [17]. Модель Гріншилдса описує лінійну залежність між швидкістю і щільністю руху, демонструючи перехід від вільного стану до режиму перевантаження. Додатково застосовуються макро- та мікросимуляційні підходи, які відтворюють як агреговану динаміку потоків, так і поведінку окремих транспортних засобів, що дає змогу аналізувати турбулентність руху, взаємодію учасників та формування заторів [18].

З метою систематизації наукових підходів та концепцій впливу інтенсивності на стійкість транспортної системи у табл. 1 узагальнено ключові моделі, що описують порогові режими, фазові переходи та динаміку транспортних потоків у контексті забезпечення стійкості транспортної інфраструктури.

Узагальнюючи представлені підходи, можна зазначити, що інтенсивність руху виступає ключовим регулятором стійкості транспортної системи, визначаючи режим її функціонування, рівень навантаженості та чутливість до зовнішніх і внутрішніх збурень. Нерівномірний розподіл транспортних потоків, концентрація на окремих ділянках мережі та наявність критичних порогів формують багатофазну й адаптивну поведінку транспортної інфраструктури, що характеризується циклічними переходами між стабільними, перехідними та нестійкими режимами. Це, у свою чергу, обумовлює необхідність застосування комплексних підходів до прогнозування поведінки транспортних потоків, використання математичного апарату аналізу й моделювання, а також впровадження інтелектуальних систем управління та антикрихких механізмів реагування на дестабілізуючі впливи [6].

Саме тому оцінювання стійкості транспортної системи потребує системної методології, яка охоплює як технічні та експлуатаційні параметри, так і поведінкові, організаційні й стратегічні чинники [7]. Для теоретичного опису стійкості транспортної системи застосовується низка критеріїв, які відображають її продуктивність, надійність, адаптивність та здатність до відновлення в умовах підвищеного навантаження або кризових ситуацій. Узагальнений перелік таких критеріїв представлено у табл. 2.

Таблиця 1

Теоретичні підходи до аналізу впливу інтенсивності руху на стійкість транспортної системи

Підхід / концепція	Ключова ідея	Породжуване явище / режим	Значення для стійкості
Поняття інтенсивності руху	Кількість ТЗ на одиницю часу на відрізку дороги	Рівні навантаження: низьке, середнє, високе	Визначає статус системи: стабільна / потенційно нестійка / критична
Точка насичення (capacity limit)	Максимальна пропускна здатність мережі	Перехід від стабільного до нестійкого режиму	Ідентифікує граничний стан, після якого система деградує
Критична щільність потоку	Поріг, за яким навіть мала зміна інтенсивності спричиняє збій	Нелінійний стрибок до затору	Важлива для прогнозування фазового переходу
Транспортний затвор як фаза нестійкості	Самоорганізований хаос в мережі	Режим «jammed» – втрата керованості	Показник втрати стійкості й необхідності зовнішнього втручання
Теорія черг (queueing theory)	Потік як система обслуговування із чергами	Формування черг, перевантаження вузлів	Дозволяє оцінювати затори, час очікування, стабільність
Модель Гріншилдса	Залежність швидкості від щільності	Лінійний перехід free flow → congestion	Математична оцінка порогів стабільності потоку
Макросимуляційні моделі	Системний аналіз загальної динаміки потоків	Визначення глобальних режимів мережі	Дає змогу проектувати мережеву стійкість
Мікросимуляційні моделі	Моделювання поведінки окремих ТЗ та водіїв	Турбулентність, хвилі заторів	Виявлення локальних механізмів виникнення нестійкості
Антикрихкість (Taleb)	Система покращується після стресу	Адаптація й оптимізація руху після криз	Новий підхід – не просто витримати вплив, а посилити систему

Джерело: побудовано за [1; 8; 17; 18]

Теоретичні моделі та концепції аналізу транспортних потоків у контексті стійкості транспортної системи

Сутність	Ключові прояви для стійкості	Порогові / критичні явища	Обмеження / зауваги
Модель Гріншилдса			
Описує залежність швидкості та щільності потоку; використовує лінійну логіку змін	Допомагає визначити межу між нормальним рухом і початком перевантаження	Точка насичення, уповільнення потоку	Спрощує дійсність, не враховує різну поведінку водіїв
Теорія черг			
Розглядає рух як процес накопичення та обслуговування транспортних одиниць	Дозволяє прогнозувати утворення черг, пікові затримки, вузькі місця	Поріг навантаження, після якого черги зростають експоненційно	Найбільш ефективна для вузлів, перехресть, пунктів контролю
Хвильова теорія заторів (shockwaves)			
Описує формування й поширення «хвиль уповільнення» у потоці	Дозволяє виявляти механізми виникнення локальної нестійкості	Затори, що формуються «самостійно» навіть без аварій	Потребує детальних даних реального руху
Макромодельовання транспортних потоків			
Аналізує систему на рівні міста/ регіону як цілісну мережу	Пояснює поведінку системи під стресом, глобальні режими	Нелінійні переходи між режимами руху	Недостатньо точне для локальних ділянок
Мікромодельовання (agent-based)			
Аналіз окремих транспортних засобів і водіїв	Виявляє локальні ризики нестійкості, поведінкові ефекти	Різкі зупинки, «ланцюгові реакції» заторів	Високі обчислювальні витрати
Антикрихкість (Taleb)			
Система поліпшує роботу після стресу, а не лише повертається до норми	Формування адаптивних стратегій і цифрового управління	Зростання ефективності після кризових ситуацій	Потребує даних, цифрових технологій, адаптивного управління
Інтелектуальні транспортні системи (ITS)			
Використання сенсорів, камер, AI та адаптивного контролю	Підвищують контроль і здатність реагувати в реальному часі	Автокорекція режимів руху та сигналізації	Залежність від технологій та інфраструктури

Джерело: побудовано за [1; 6; 7; 8; 17; 18]

Таким чином, представлені моделі доповнюють одна одну, забезпечуючи можливість аналізу транспортної системи на різних рівнях – від мікроповедінки окремих учасників руху до макродинаміки мережі. Їх застосування дозволяє визначити критичні режими функціонування інфраструктури, виявляти точки втрати стійкості та формувати стратегічні й оперативні рішення для запобігання заторам і підвищення адаптивності транспортної системи [17]. Водночас теоретичні моделі є лише інструментом, ефективність якого визначається реальними параметрами функціонування транспортного середовища, включно зі структурою мережі, організацією дорожнього руху, технічним станом інфраструктури й поведінковими характеристиками користувачів [1]. Саме тому стійкість транспортної системи розглядається як результат взаємодії технічних, організаційних, поведінкових і зовнішніх чинників, які формують її здатність підтримувати функціонування, адаптуватися та відновлюватися за умов змін інтенсивності руху, непередбачених подій або кризових ситуацій [2].

Стійкість транспортної мережі є багатовимірною характеристикою, що включає еластичність (спроможність протидіяти навантаженням), адаптивність (здатність перебудовуватися відповідно до змін), відновлюваність (час повернення до нормальних режимів) і антикрихкість (отримання «позитивного ефекту» після стресу) [17]. Вона формується під впливом низки чинників, серед яких ключове значення мають конфігурація та щільність мережі, технологічний рівень управління рухом, організаційні механізми регулювання транспортних потоків, поведінкові особливості користувачів транспортної інфраструктури та зовнішні умови, включно з безпековим середовищем. Для систематизації цих чинників доцільно представити їх у табл. 3.

Узагальнюючи наведені чинники, стійкість транспортної системи постає як результат взаємодії інженерних рішень, організаційних механізмів, цифрових технологій та поведінкових особливостей учасників руху. Вона визначається не лише пропускнуою здатністю інфраструктури, а й ефек-

Основні чинники стійкості транспортної системи та їх вплив на її функціонування

Сутність	Прояви для стійкості	Потенційні ризики при порушенні	Практичні механізми підсилення
Структура транспортної мережі			
Топологія, зв'язність, наявність альтернативних маршрутів	Забезпечує можливість перенаправлення потоків	Концентрація заторів, мережевий колапс у вузлах	Децентралізація мережі, розвиток об'їздів, мультимодальність
Інтелектуальні транспортні системи (ITS)			
Системи моніторингу, сенсори, AI-керування світлофорами	Швидка реакція на зміни, стабілізація потоків	Затримки в управлінні, некерованість руху	Адаптивне управління, предиктивна аналітика, IoT-інфраструктура
Організація регулювання потоків			
Світлофори, пріоритети, реверсивні смуги	Зниження заторів, оптимізація часу руху	Затримки, хаотизація транспортних потоків	Гнучкі транспортні алгоритми, Smart-Traffic, Bus Priority
Поведінка водіїв та учасників руху			
Мікроповедінка, дисципліна, реакція на стрес	Стабільність і передбачуваність потоків	Агресивне керування, турбулентність потоку	Навчання, культура керування, інформаційні кампанії
Інфраструктурний стан і містопланування			
Пропускна здатність, якість покриття, вузли, розв'язки	Забезпечення стабільної роботи мережі	Швидке накопичення заторів, аварійність	Свочасний ремонт, розширення вузлів, інфра-резерви
Зовнішні фактори безпеки (військові дії)			
Вплив загроз, блокування, зміна напрямків руху	Гнучкість у кризових ситуаціях	Блокування маршрутів, логістичні затримки	Планування евакуаційних коридорів, адаптивні карти потоків
Стратегічне та оперативне управління			
Координація, планування, кризовий менеджмент	Узгодженість рішень, швидкість реагування	Дезорганізація, затримки, втрати ресурсів	Центри управління трафіком, мобільні команди реагування

Джерело: побудовано за [6; 8; 14]

тивністю керування потоками, рівнем цифровізації, доступністю інформації та здатністю системи й користувачів адаптуватися до змін. За таких умов комплексне оцінювання стійкості потребує інструментів, здатних відтворювати динаміку транспортних процесів та моделювати реакцію мережі на порушення режимів.

Сучасний аналіз стійкості ґрунтується на кількох групах моделей. Мережеві моделі дозволяють оцінити структурну конфігурацію транспортної системи, ступінь її зв'язності та критичні вузли, визначаючи вразливість мережі до локальних і глобальних збоїв [19]. Моделі системної динаміки забезпечують розуміння впливу часових лагів, зворотних зв'язків та накопичення ефектів, що формують адаптивну реакцію системи на зміни інтенсивності потоків. Імітаційні моделі (VISSIM, SUMO) відтворюють поведінкову та інфраструктурну динаміку руху, дозволяючи аналізувати сценарії аварій, ремонтів, обмежень і відновлення пропускної здатності в умовах, близьких до реальних [19]. Додатково застосовуються фазові підходи, які описують переходи між режимами вільного руху, синхронізації та затору, що дає можливість визначати критичні пороги та прогнозувати нестабільність транспортних потоків.

Поряд із класичними підходами до аналізу транспортних процесів все ширше застосовуються гібридні сценарні моделі, що інтегрують мережеву логіку, імітаційні методи та системну динаміку [20]. Використання таких інструментів забезпечує цілісний погляд на поведінку транспортної системи за умов різних типів навантажень, дозволяючи враховувати вплив цифрових технологій, інтелектуальних систем регулювання та алгоритмів адаптивного керування. Відповідно, сучасне трактування стійкості виходить за рамки традиційної функціональної інерційності, фокусуючись на проактивному оновленні, накопиченні знань та використанні кризових ситуацій для структурного і технологічного зміцнення транспортної мережі [20].

Сучасні дослідження засвідчують, що здатність транспортної системи підтримувати функціональні параметри за умов стресу є лише базовим рівнем. У середовищі високої невизначеності, зростання мобільнісних потреб, загроз безпеці та змін поведінкових патернів користувачів ключовою властивістю стає адаптивність – здатність оперативно змінювати конфігурацію руху, маршрути, пріоритети, а також залучати резервні рішення та цифрові сервіси для стабілізації

роботи. Концепція антикрихкості, у свою чергу, означає формування транспортної системи, що не лише витримує вплив зовнішніх шоків, але й здобуває стратегічну перевагу, використовуючи отриманий досвід для підвищення ефективності та стійкості у майбутньому.

У контексті українських реалій це завдання набуває особливої ваги. Функціонування транспортної інфраструктури в умовах військових загроз, динаміки евакуаційних потоків, змінних логістичних маршрутів та тимчасових обмежень вимагає від транспортної системи не лише здатності до швидкого відновлення, але й до підвищення рівня організованості та інтелектуалізації управління.

Саме тому формування адаптивної та антикрихкої транспортної мережі слід розглядати як ключовий стратегічний напрям, що визначає стійкість міських і національних логістичних систем, мобілізаційний потенціал і спроможність держави протидіяти довготривалим викликам – табл. 4.

Запропонована систематизація засвідчує, що формування адаптивної та антикрихкої транспортної системи неможливе лише через інфраструктурну модернізацію. Необхідним є комплексний підхід, що охоплює цифровізацію управління потоками, розвиток прогнозних та інформаційних сервісів, створення мережевих резервів і інституційних механізмів накопичення управлінського досвіду. За таких умов транспортна система розглядається не як суто технічний об'єкт, а як динамічна соціо-кіберфізична екосистема, здатна до самонавчання та проактивної адаптації. В українському контексті цей підхід набуває особливої ваги, оскільки стійкість транспортної інфраструктури безпосередньо пов'язана з безпекою, мобільністю, функціонуванням критичних об'єктів

і підтриманням життєдіяльності територій в умовах тривалих загроз. Інтеграція принципів адаптивності та антикрихкості дозволяє трактувати транспортну мережу як стратегічний ресурс держави, здатний забезпечувати функціонування суспільства навіть у періоди глибокої невизначеності. Таким чином, отримані результати формують методологічну основу для подальшого дослідження механізмів зміцнення транспортної інфраструктури й розроблення практичних інструментів оцінювання та управління стійкістю у довгостроковій перспективі, що створює основу для узагальнення висновків та визначення стратегічних напрямів розвитку стійких транспортних систем.

Висновки. Проведене дослідження засвідчує, що стійкість транспортної системи за змінної інтенсивності руху є багатофакторним явищем, сформованим на перетині інфраструктурних, організаційних, цифрових та поведінкових чинників. Транспортна мережа розглядається як динамічна соціо-технічна система, здатна не лише реагувати на зовнішні впливи, а й трансформувати механізми функціонування в умовах змін середовища. Встановлено, що ключову роль у втраті стійкості відіграють порогові режими руху – точка насичення, критична щільність та фазові переходи від вільного потоку до затору. Ігнорування цих явищ призводить до системної нестабільності, різкого зниження пропускної здатності та погіршення якості транспортного обслуговування. Порівняльний аналіз моделей довів необхідність переходу від статичних підходів до гібридних інструментів, що поєднують мережеве моделювання, системну динаміку, імітаційні алгоритми та цифрові платформи реального часу. Особливу значущість мають інтелектуальні транспортні системи, тех-

Таблиця 4

Концепція підсилення адаптивності та антикрихкості транспортної системи

Компонент	Сутність	Очікуваний ефект	Приклади інструментів
Цифрова проактивність	Використання даних у режимі реального часу та предиктивних моделей	Передбачення кризових режимів, скорочення часу реагування	Big Data-аналітика, AI-прогнозування інтенсивності, цифрові близнюки (digital twins)
Динамічне управління потоками	Гнучка зміна правил організації руху залежно від навантаження	Зменшення ймовірності транспортного колапсу	Адаптивні світлофорні цикли, Smart-routing, децентралізація потоків
Мережеве резервування	Створення альтернативних маршрутів і резервних сполучень	Підвищення стійкості до локальних порушень	Об'їзні шляхи, резервні коридори, мультимодальні вузли
Поведенкова адаптація	Формування гнучких моделей мобільності користувачів	Зниження пікових навантажень, рівномірність потоків	Інформаційні сервіси, попередження, динамічні рекомендації маршрутів
Безпеково-логістична гнучкість	Здатність зберігати функціональність в умовах загроз	Підтримка критичної мобільності та обороноздатності	Евакуаційні маршрути, резервні логістичні схеми, захищені об'єкти управління

Джерело: розроблено автором

нології цифрових двійників і прогностичні алгоритми, які забезпечують превентивне управління потоками. Запропонована концепція підсилення адаптивності та антикрихкості передбачає цифровізацію керування рухом, резервування транспортних маршрутів, побудову сценаріїв реагування та інституційне навчання системи на основі даних. Вона орієнтована не лише на відновлення

після стресу, а й на підвищення функціональності транспортної мережі у посткризовий період.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на побудову кількісних індикаторів антикрихкості, розроблення інтегральних методик оцінки стійкості транспортних мереж, а також емпіричну апробацію моделей на прикладі українських міст і міжнародних транспортних осей.

Список літератури:

1. Mayar K., Carmichael D. G., Shen X. Resilience and systems – A traffic flow case example. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*. 2024. Vol. 5. Article 4. DOI: <https://doi.org/10.1186/s43065-024-00097-w>
2. Wassmer J., Merz B., Marwan N. Resilience of transportation infrastructure networks to road failures. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2024. Vol. 34. Article 013124. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0165839>
3. Wang J., Liao F., Wu J., Sun H., Wang W., Gao Z. Measurement of functional resilience of transport network: The case of the Beijing subway network. *Transport Policy*. 2023. Vol. 140. P. 54–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.06.016>
4. Imran Kays H. M., Momin K. A., Muraleetharan K. K. M., Sadri A. M. A data-driven resilience framework of directionality configuration based on topological credentials in road networks. *arXiv preprint*. 2024. arXiv:2401.07371. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.07371>
5. Mou R., Kang R. Network resilience and rehabilitation strategies for an airport movement area considering traffic flow and road class. *International Journal of Aerospace Engineering*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1155/2024/9998215>
6. Postorino M. N., Sarnè G. M. L. A new approach to assessing transport network resilience. *Urban Science*. 2025. Vol. 9. No. 2. Article 35. DOI: <https://doi.org/10.3390/urbansci9020035>
7. Amghar R., Jaber S., Moghaddam S. M. H. M., Bhourri N., Ameli M. Resilience as a service for transportation networks: Definition and basic concepts. *Transportation Research Record*. 2023. Vol. 2678. No. 1. P. 177–189. DOI: <https://doi.org/10.1177/03611981231170180>
8. Bergantino A. S., Gardelli A., Rotaris L. Assessing transport network resilience: Empirical insights from real-world data studies. *Transport Reviews*. 2024. Vol. 44. No. 4. P. 834–857. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2024.2322434>
9. Arabi M., Gerasimidis S., Barchers C., Oke J. Resilience in multilayer transportation infrastructure networks: A review and conceptual framework for equity-based assessment. *Sustainable and Resilient Infrastructure*. 2024. Vol. 9. No. 6. P. 616–639. DOI: <https://doi.org/10.1080/23789689.2024.2344909>
10. Кравцов А. Г., Ларіна Т. Ф., Горяїнов О. М., Козенок А. С., Городецька Т. Е., Бабич І. А. Обґрунтування критерію стійкості транспортного потоку на дільницях дорожньої мережі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7(38), ч. II. С. 222–230. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.222-230](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.222-230)
11. Войтов В. А., Кравцов А. Г., Войтов А. В., Бережна Н. Г., Сисенко І. І., Кривенко Л. Ф., Бабарика І. Г. Концепція оцінки ергономічної стійкості транспортного потоку великих міст з урахуванням динамічності зміни впливових факторів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 9(40), ч. II. С. 256–272. 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)
12. 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), ч. I. С. 236–245. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.236-245](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.236-245)
13. Євчук Ю. Ю. Закономірності зміни затримки руху громадського транспорту за різних способів його пріоритизації. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 35 (74), № 6. С. 264–271. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/37>
14. Transport system resilience: Summary and conclusions. OECD, 2024. URL: <https://surl.lu/ermezkh>
15. Sun L., Makridis M. A., Genser A., Axenie C., Grossi M., Kouvelas A. Antifragile perimeter control: Anticipating and gaining from disruptions with reinforcement learning. *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2402.12665. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.12665>

16. Талєб Н. Антикрихкість та падіння імперій: лекція. Forbes Україна. 2022. URL: <https://surl.li/iewgve>
17. Ding S., Abdel-Aty M., Wang Z. et al. Insights into vehicle conflicts based on traffic flow dynamics. Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Article 1536. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50017-3>
18. Saliev D., Mladenov G., Petkov P. Research and analysis of traffic intensity on a street with high traffic load: Case study of Sofia. Engineering Proceedings. 2025. Vol. 100. No. 1. Article 37. DOI: <https://doi.org/10.3390/engproc2025100037>
19. Титар В. В. Системний аналіз транспортної системи національної економіки. Агросвіт. 2024. № 22. С. 167–172. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2024.22.167>
20. Митко М., Бурлака С., Ярошук Р. Аналіз технічних і технологічних форм взаємодії різних видів транспорту. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2025. № 349(2). С. 77–82. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-10>

Maksymov S.V., Maksymova O.S., Prystynskiy S.M. ANALYSIS OF TRANSPORT SYSTEM RESILIENCE UNDER CHANGING TRAFFIC INTENSITY

The relevance of the study is driven by the growing intensity of transport flows and the increasing uncertainty in the functioning of transport systems in modern urban environments. Under the influence of global logistics transformations, changing mobility patterns, digitalization of transport services, and – especially – in the context of security challenges, the need for scientifically grounded approaches to ensuring the resilience of transport infrastructure becomes increasingly urgent. The aim of the research is to theoretically substantiate approaches for assessing the resilience of the transport system under conditions of varying traffic intensity and to develop a conceptual model of adaptability and antifragility, taking into account contemporary challenges and trends in transportation network development. The methodological basis of the research comprises network analysis, system-dynamics approach, phase transition theory in traffic flows, critical and comparative analysis of scientific sources, logical-structural synthesis, as well as elements of simulation modeling of transport behavior. The obtained results confirm that the resilience of a transport system is determined by its ability to maintain functional performance parameters under external disruptions and high traffic intensity, while preserving flow controllability and minimizing the risk of transitioning into a congested state. Threshold phenomena indicating critical points of stability loss were identified, and the role of macro- and micro-models in forecasting traffic dynamics was determined. An original concept for strengthening transport system resilience, adaptability, and antifragility was developed, including network redundancy, scenario planning, digital modeling, and institutional learning in traffic management systems. The practical significance of the results lies in the possibility of applying the proposed framework to develop transport security strategies, modernize urban traffic management systems, enhance infrastructure preparedness for crisis situations, and optimize transport policy planning at the national and municipal levels.

Key words: population mobility, transport regimes, network analysis, adaptive management, digital transport models.

Дата надходження статті: 04.11.2025

Дата прийняття статті: 21.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025