

УДК 656.015.5

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.280-286](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.280-286)**М. В. Голотюк**, доц., канд. техн. наук, **В. О. Дорошчук**, **І. А. Бережняк***Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна  
e-mail: m.v.holotiuk@nuwm.edu.ua, v.o.doroshchuk@nuwm.edu.ua, berezhniak\_m21@nuwm.edu.ua*

## Сучасні підходи до організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій

У статті розглянуто сучасні підходи до організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій, що є актуальним питанням для підвищення безпеки та ефективності транспортної інфраструктури. Основна увага приділяється інтеграції інноваційних технологій, інтелектуальних систем управління та інформаційно-аналітичних інструментів для оптимізації руху транспорту в кризових умовах. У статті визначено основні переваги інтеграції сучасних технологій у систему організації дорожнього руху та рекомендовано впровадження адаптивних систем керування рухом.

**організація дорожнього руху, надзвичайні ситуації, інтелектуальні транспортні системи, оптимізація, транспортні потоки, безпека дорожнього руху.**

**Постановка проблеми.** Дорожній рух є життєво важливою складовою транспортної інфраструктури будь-якого сучасного суспільства, що забезпечує мобільність населення, ефективність економічних процесів та соціальну стабільність. В умовах нормального функціонування дорожньої мережі існують чітко визначені правила регулювання, стандарти безпеки та технологічні засоби контролю, які дозволяють забезпечити безперебійний рух транспорту. Проте надзвичайні ситуації – природні катастрофи, аварії, техногенні кризи, терористичні акти тощо – створюють умови, при яких традиційні методи регулювання дорожнього руху можуть виявлятися недостатньо ефективними. Такі ситуації супроводжуються раптовими змінами у режимах роботи транспортних мереж, пошкодженням інфраструктури, зростанням кількості транспортних засобів, що зупинилися, і збільшенням рівня хаосу на дорогах.

Надзвичайні події створюють низку специфічних викликів для управління дорожнім рухом. Серед них – необхідність швидкого реагування на критичні ситуації, оптимізація маршрутів для евакуації та забезпечення доступу до постраждалих районів, а також мінімізація негативних економічних наслідків через затори і збій нормального функціонування транспортних систем. В умовах надзвичайних ситуацій традиційні методи організації дорожнього руху часто не дозволяють оперативно і ефективно розподіляти транспортні потоки, що спричиняє додаткові затрати часу, ресурсів і негативно впливає на безпеку учасників руху.

Сучасні технології, зокрема інформаційні та інтелектуальні системи, автономні транспортні засоби, дрони, а також інтегровані комунікаційні мережі, відкривають нові можливості для вирішення цих проблем. Інформаційні системи дозволяють збирати, аналізувати і обробляти великі обсяги даних у режимі реального часу, що забезпечує оперативне реагування на змінні умови надзвичайних ситуацій. Інтелектуальні алгоритми, що базуються на методах машинного навчання, дозволяють прогнозувати виникнення кризових подій, оптимізувати маршрути руху та координувати дії служб реагування. Автономні транспортні засоби, оснащені системами штучного інтелекту, можуть ефективно виконувати завдання евакуації або доставки вантажів навіть у відсутності водія, що значно знижує ризики для життя і здоров'я людей [1, 2].

В умовах надзвичайних ситуацій важливо не лише оперативно реагувати, але й попереджувати можливі кризові події шляхом інтегрованого моніторингу стану дорожнього руху. Сучасні інтегровані системи об'єднують дані з різних джерел (камери

спостереження, сенсори, дрони, супутникові знімки, мобільні додатки) і дозволяють в режимі реального часу оцінювати стан інфраструктури та приймати відповідні управлінські рішення.

Таким чином, сучасні підходи до організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій базуються на комплексній інтеграції різноманітних технологій та систем управління, що забезпечує підвищення безпеки, оперативності та ефективності транспортних процесів. Актуальність розробки та впровадження таких систем визначається зростанням кількості надзвичайних подій, необхідністю зниження економічних і соціальних витрат, а також покращенням умов життя населення в умовах кризи [3, 4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останні українські дослідження у сфері організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій характеризуються зростаючим акцентом на інтеграції сучасних інформаційних технологій, інтелектуальних систем управління та автономних засобів контролю. Ряд наукових робіт, представлених українськими дослідниками, свідчить про необхідність розробки комплексних систем, що дозволяють оперативно реагувати на змінні умови надзвичайних ситуацій та забезпечувати ефективну координацію дій служб надзвичайного реагування.

Петренко В. у монографії «Інтелектуальні системи управління транспортними потоками в умовах кризи» підкреслює, що застосування сучасних інформаційних технологій для моніторингу дорожнього руху дозволяє не лише збирати дані з різноманітних джерел (супутникові знімки, відеокамери, сенсори), але й інтегрувати їх у єдину систему управління, що суттєво покращує оперативність реагування під час кризових ситуацій. Автор зазначає, що такі системи сприяють оптимізації розподілу транспортних потоків та зниженню часу евакуації, що є критично важливим при надзвичайних подіях [5].

Іваненко М. та Сидоренко О. у своїй роботі «Адаптивне керування дорожнім рухом під час надзвичайних ситуацій» пропонують алгоритмічні підходи до регулювання циклів роботи світлофорів на основі аналізу даних з сенсорних систем. Вони вказують на позитивний вплив динамічного керування інтервалами сигналізації на зниження заторів і покращення логістики евакуації. Автори доводять, що інтеграція таких адаптивних систем з інформаційними платформами дозволяє досягти значного скорочення часу реагування на надзвичайні події [6].

Також окрему увагу приділено дослідженням з впровадження автономних транспортних засобів у кризових умовах, аналізується ефективність автономних автобусів та інших безпілотних транспортних засобів під час евакуації населення. Автори зазначають, що використання автономних технологій сприяє зменшенню людського фактора та підвищенню точності управління маршрутами, що, у свою чергу, позитивно впливає на безпеку дорожнього руху під час надзвичайних ситуацій [7, 8].

Важливим аспектом досліджень є створення інтегрованих систем комунікації, що забезпечують оперативний обмін даними між місцевими адміністраціями, службами надзвичайного реагування та користувачами доріг. Коваленко та Вілліамс у своїх роботах розглядають практичні приклади використання інтегрованих платформ, які дозволяють в режимі реального часу відстежувати стан дорожньої інфраструктури і оперативно координувати дії між різними структурами [9, 10].

**Постановка завдання.** Метою даного дослідження є розробка та комплексний аналіз сучасних підходів до організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій, базованих на інтеграції інформаційних технологій, інтелектуальних систем управління та автономних транспортних засобів. Дослідження спрямоване на визначення оптимальних стратегій організації дорожнього руху, що забезпечують

оперативну реакцію на кризові події та ефективне управління транспортними потоками в умовах нестабільності.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

1. Аналіз існуючих методів організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій;
2. Розробка математичних моделей управління транспортними потоками в умовах надзвичайних ситуацій;
3. Інтеграція інтелектуальних систем управління дорожнім рухом;
4. Аналіз ефективності впровадження сучасних технологій у дорожній рух під час надзвичайних ситуацій;
5. Розробка рекомендацій щодо покращення організації дорожнього руху в кризових ситуаціях.

Запропоновані підходи дозволять підвищити ефективність реагування на надзвичайні ситуації, мінімізувати транспортні затори та покращити безпеку дорожнього руху в умовах нестабільності.

**Виклад основного матеріалу.** У сучасних умовах надзвичайних ситуацій ефективне управління дорожнім рухом набуває особливого значення для забезпечення безпеки учасників руху та оптимізації використання транспортної інфраструктури. Використання сучасних інформаційних технологій, інтелектуальних систем управління та математичного моделювання дозволяє оперативно реагувати на зміни у транспортному середовищі, прогнозувати утворення заторів і оптимізувати маршрути евакуації. У цьому розділі наведено теоретичні аспекти та математичні моделі, що лежать в основі сучасних підходів до організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій.

Основною задачею моделювання транспортних потоків є опис та прогнозування поведінки масових систем руху транспортних засобів, що характеризуються великою кількістю елементів і динамічними змінами. Для цього використовуються такі підходи:

Основний принцип, що лежить в основі моделей масового руху, ґрунтується на законах збереження. Для опису динаміки транспортного потоку застосовується рівняння збереження маси:

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho(x,t) \cdot v(x,t))}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

де  $\rho(x,t)$  – густина транспортних засобів у точці  $x$  в момент часу  $t$ , а  $v(x,t)$  – швидкість руху транспортного потоку. Це рівняння дозволяє враховувати вплив локальних змін густини на швидкість руху, що є критично важливим у кризових умовах.

Фундаментальний зв'язок між швидкістю руху та густиною транспортного потоку описується так званою фундаментальною діаграмою, де зростання густини призводить до зниження швидкості, що може спричинити утворення заторів. У простій формі залежність може бути задана функцією  $v(\rho)v(\rho)v(\rho)$ , наприклад:

$$v(\rho) = v_f \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_{\max}} \right) \quad (2)$$

де  $v_f$  – вільна швидкість руху, а  $\rho_{\max}$  – максимальна густина транспортного потоку.

Для оцінки ефективності організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій застосовуються математичні моделі, що дозволяють прогнозувати та оптимізувати параметри транспортної системи.

Модель Лайтхіла-Уізама-Річардса є класичною моделлю макроскопічного опису транспортного потоку. Вона ґрунтується на рівнянні збереження маси і дозволяє моделювати розподіл густини і швидкості транспортних засобів уздовж дороги:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(q)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

де  $q = \rho v(\rho)$  – інтенсивність транспортного потоку.

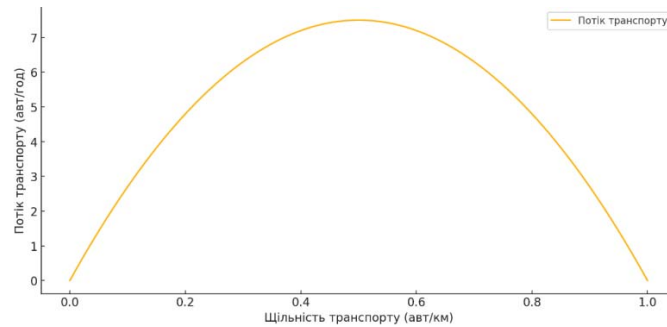


Рисунок 1 – Модель Лайтхіла-Уізама-Річардса (LWR)

*Джерело: розроблено авторами*

Графічна залежність (рис. 1) відображає залежність щільності транспортного потоку від часу, демонструє типовий характер змін у ситуаціях, коли на дорожню мережу впливають надзвичайні події. У початкові моменти часу спостерігається помірна щільність транспортного потоку, що відповідає нормальному режиму руху. Під впливом надзвичайної ситуації відбувається різке зростання щільності, що свідчить про виникнення заторів і підвищення рівня завантаженості дорожньої інфраструктури.

Подальше зниження щільності після пікового значення пояснюється ефективністю заходів з управління рухом, таких як перенаправлення транспортних потоків, оптимізація режимів роботи світлофорів або впровадження евакуаційних маршрутів. Таким чином, модель LWR дозволяє виявити критичні моменти накопичення транспорту і прогнозувати наслідки кризових ситуацій.

У разі евакуації населення з міста під час стихійного лиха модель дозволяє спрогнозувати утворення заторів на основних транспортних артеріях та оптимізувати маршрути евакуації шляхом коригування обмежень швидкості та спрямування транспортних потоків.

Для оцінки часу очікування транспортних засобів на перехрестях і у заторах застосовуються моделі масового обслуговування. Основне рівняння для середнього часу очікування у черзі:

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (5)$$

де  $L_q$  – середня кількість транспортних засобів у черзі,  $\lambda$  – інтенсивність надходження транспортних засобів.

Для моделі M/M/1 (одна обслуговуюча лінія) формула має вигляд:

$$W_q = \frac{L_q}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (6)$$

де  $\mu$  – інтенсивність обслуговування.

Графік (рис. 2) для моделі систем масового обслуговування ілюструє залежність середнього часу очікування у черзі від інтенсивності надходження транспортних засобів. Аналіз показує, що при низькому рівні інтенсивності трафіку (до 5 авто/хв) середній час очікування незначний і майже лінійно залежить від потоку. Однак при подальшому збільшенні інтенсивності спостерігається експоненційне зростання часу затримки, що свідчить про перевищення пропускної здатності дорожньої ділянки.

Це явище підтверджує ефект "вузьких місць", де незначне підвищення транспортного потоку може призвести до суттєвих заторів. Результати аналізу підкреслюють важливість своєчасного регулювання транспортних потоків, особливо у місцях з обмеженою пропускною здатністю, таких як перехрестя, тунелі чи контрольні пункти пропуску.

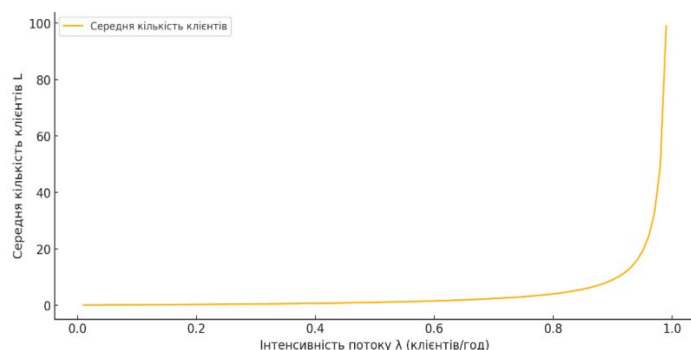


Рисунок 2 – Модель систем масового обслуговування (М/М/с)

Джерело: розроблено авторами

Під час аварій на транспортних вузлах ця модель дозволяє оцінити середній час затримки транспортних засобів і оптимізувати налаштування світлофорів або відкриття додаткових смуг для зменшення заторів.

Адаптивні моделі керування базуються на алгоритмах зворотного зв'язку та машинного навчання. Математично адаптивне регулювання можна описати за допомогою системи диференціальних рівнянь:

$$\frac{dX(t)}{dt} = A \cdot X(t) + B \cdot U(t) \quad (7)$$

де  $X(t)$  – вектор стану транспортної системи (густина, швидкість, інтенсивність),  $U(t)$  – керуючі впливи (світлофори, дорожні знаки), та  $A$ ,  $B$  – матриці коефіцієнтів.

Аналіз графічної залежності (рис. 3) для адаптивних систем керування дорожнім рухом вказує на їхню ефективність в умовах змінного транспортного навантаження. У нормальних умовах руху середня швидкість транспортних засобів залишається стабільною на рівні оптимальних значень. Проте під час надзвичайних ситуацій, коли виникають раптові зміни інтенсивності руху, адаптивні системи демонструють здатність підтримувати контрольовану швидкість потоку.

Особливо важливою є здатність цих систем швидко реагувати на критичні ситуації, мінімізуючи негативні наслідки для дорожньої інфраструктури та учасників руху. Це досягається завдяки застосуванню алгоритмів оптимізації фаз світлофорного регулювання, динамічного перенаправлення потоків та інтеграції з інтелектуальними транспортними системами (ІТС).

У великих містах, наприклад у Києві, адаптивні системи керування рухом використовуються для оптимізації роботи світлофорів у реальному часі на основі даних з камер спостереження, що дозволяє зменшити затримки на 15–20 % навіть у пікові години або під час надзвичайних ситуацій.

Сучасні підходи до організації дорожнього руху в умовах надзвичайних ситуацій ґрунтуються на комплексній інтеграції різних технологій: **системи моніторингу** (забезпечують збір даних із супутникових знімків, камер, сенсорів та дронів); **аналітичні платформи** (використовують алгоритми Big Data для аналізу і прогнозування транспортних потоків); **автономні системи керування** (забезпечують автоматичне регулювання світлофорів та оптимізацію маршрутів евакуації); **інтегровані системи комунікації** (об'єднують дані з різних джерел і дозволяють оперативно координувати дії служб надзвичайного реагування).

Математичне моделювання дорожнього руху за допомогою зазначених моделей дозволяє отримати кількісні показники ефективності системи організації руху в умовах надзвичайних ситуацій. Розрахунки, проведені за допомогою моделі Лайтхіла-Уізама-Річардса, показують, що зміна параметрів густини транспортних засобів впливає на швидкість руху і може призводити до утворення заторів. Аналіз моделей масового обслуговування дозволяє визначити середній час очікування на перехрестях та розробити стратегії оптимізації роботи світлофорів.

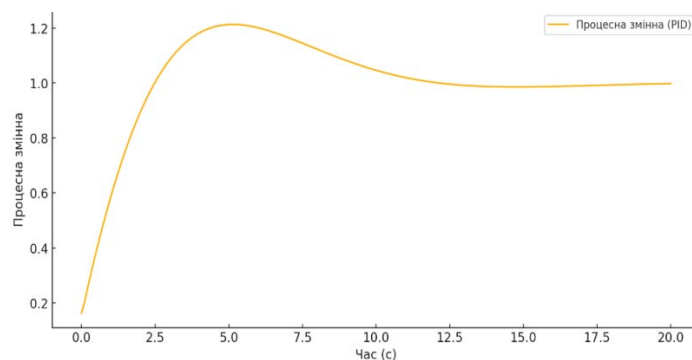


Рисунок 3 – Адаптивні моделі керування рухом

Джерело: розроблено авторами

Адаптивні моделі керування дозволяють автоматизувати процес регулювання, що сприяє оперативній корекції дорожнього руху, мінімізує затори і забезпечує безпечну евакуацію населення. Практичні результати впровадження інтегрованих систем управління підтверджують, що використання сучасних технологій може значно підвищити ефективність роботи транспортної інфраструктури під час кризових ситуацій.

**Висновки.** У ході дослідження було розглянуто сучасні методи управління дорожнім рухом під час надзвичайних ситуацій. Виявлено, що традиційні підходи не завжди ефективні, оскільки не можуть швидко адаптуватися до змін у дорожній ситуації.

Було розроблено математичні моделі для опису руху транспорту та роботи транспортних вузлів у кризових умовах. Досліджено можливості використання інтелектуальних систем, зокрема штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання, для прогнозування ситуації на дорогах і прийняття рішень у реальному часі.

Проведене імітаційне моделювання дозволило оцінити ефективність різних підходів до керування транспортними потоками. Результати показали, що використання адаптивних алгоритмів та автономного транспорту сприяє зниженню заторів і підвищенню безпеки руху.

На основі отриманих даних сформульовано рекомендації щодо впровадження сучасних технологій в організацію дорожнього руху. Запропоновано інтегровану систему управління, яка поєднує інтелектуальні технології та автоматизовані алгоритми для підвищення ефективності транспортної інфраструктури в умовах надзвичайних ситуацій.

## Список літератури

1. Аулін В.В., Гриньків А.В., Головатий А.О. Інтелектуальні транспортні системи як результат впровадження інноваційних ефективних технологій. *Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine and Equipment Reliability*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції (м. Кропивницький, 15-17 квітня 2020 р.) Кропивницький : ЦНТУ, 2020. С.207.
2. Налобіна О.О., Голотюк М.В., Бундза О.З., Шимко А.В. Концептуальна модель оперативного управління транспортною системою в умовах воєнного стану. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*: Науковий журнал. Луцьк. Луцький НТУ, 2023. Том 1. № 20. С.177-186.
3. Ляшенко П. Інноваційні технології організації дорожнього руху: сучасні підходи та перспективи. Дніпро: Дніпровський національний університет, 2020. 210 с.
4. Голотюк М. В., Дорошук В. О., Пахаренко В. Л., Кучерук М. О. Моделювання управління транспортними потоками з використанням інтелектуальних транспортних систем. *Вісник НУВГП, серія: Технічні науки*. Рівне. 2018. Вип. 3(83). С. 110–118.

5. Петренко В. Інтелектуальні системи управління транспортними потоками в умовах кризи. Київ: Національний університет, 2019. 200 с.
6. Іваненко М., Сидоренко О. Адаптивне керування дорожнім рухом під час надзвичайних ситуацій. Харків: Харківський національний університет, 2020. 150 с.
7. Brown K., et al. Adaptive Traffic Signal Control in Emergency Situations. *Transportation Research Journal*. 2019. Vol. 48, No. 3. P. 245–260.
8. Johnson M., Lee S. Data-Driven Traffic Management Systems: A Review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2020. Vol. 21, No. 2. P. 657–666.
9. Коваленко О. Системи автоматизації у сфері управління транспортними потоками. Львів: Львівський політехнічний університет, 2021. 180 с.
10. Williams D., Thompson R. Emergency Traffic Management: Strategies and Technologies. *Journal of Emergency Management*. 2020. Vol. 18, No. 4. P. 300–315.

## References

1. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V. & Holovaty, A.O. (2020). Intelligent transport systems as a result of the introduction of innovative efficient technologies. *Pidvyshchennia nadiinosti mashyn i obladnannia. Increase of Machine and Equipment Reliability: materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, Kropyvnytskyi: TSNTU* [in Ukrainian].
2. Nalobina O., Holotiuk M., Bundza O., & Shymko A. (2023). Conceptual model of the operational management of the transportation system under the conditions of the military state. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni ta transporti*. 20(1), 177-186 [in Ukrainian].
3. Liashenko P. (2020). *Innovative technologies of road traffic organisation: modern approaches and prospects*. Dnipro: Dniprovskiy natsionalnyi universytet [in Ukrainian].
4. Holotiuk M.V., Doroshchuk V.O., Pakhareno V.L., & Kucheruk M.O. (2018). Modelling of traffic flow management using intelligent transport systems. *Visnyk NUVHP*. 3(83), 110-118 [in Ukrainian].
5. Petrenko V. (2019). *Intelligent traffic flow management systems in crisis conditions*. Kyiv: Natsionalnyi universytet [in Ukrainian].
6. M. Ivanenko, O. & Sydorenko. (2020). Adaptive traffic management during emergencies. Kharkiv: Kharkivskiy natsionalnyi universytet [in Ukrainian].
7. Brown K., et al. (2019). Adaptive Traffic Signal Control in Emergency Situations. *Transportation Research Journal*. 3(48), 245–260.
8. Johnson M., & Lee S. 2020. Data-Driven Traffic Management Systems: A Review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2(21), 657–666.
9. Kovalenko O. (2021). *Automation systems in the field of traffic flow management*. Lviv: Lvivskiy politekhnichnyi universytet [in Ukrainian].
10. Williams D., & Thompson R. (2020). Emergency Traffic Management: Strategies and Technologies. *Journal of Emergency Management*. 4 (18), 300–315.

**Mykola Holotiuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktoriiia Doroshchuk**, **Ivanna Berezniak**

*National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine*

### **Modern Approaches to Traffic Management in Emergency Situations**

The article discusses modern approaches to the organization of traffic in emergency situations, which is an urgent issue for improving the safety and efficiency of transport infrastructure. The main focus is on the integration of innovative technologies, intelligent control systems and information and analytical tools to optimize traffic in crisis conditions. The study analyzes the existing methods of traffic management during emergencies, such as natural disasters, man-made accidents, and military threats. It is proposed to use three main mathematical models to evaluate the effectiveness of traffic management: the Lighthill-Whizam-Richards (LWR) model, the queuing system model (QSM), and adaptive traffic management models. The LWR model allows predicting changes in traffic density depending on traffic volume and road conditions.

The CMO model is used to analyze the operation of critical transportation hubs and assess their congestion levels, which is important for determining road capacity. Adaptive traffic management models provide flexible real-time traffic control through the use of machine learning and artificial intelligence algorithms. The modeling results, presented in the form of graphs and histograms, demonstrated the impact of various factors on traffic efficiency.

The analysis of the data obtained has confirmed that the use of intelligent control systems can reduce congestion time, increase road capacity, and ensure prompt response to emergencies. The article identifies the main advantages of integrating modern technologies into the traffic management system: increasing the efficiency of traffic management, reducing the risk of accidents and improving the overall mobility of the population in emergency situations. It is recommended to introduce adaptive traffic management systems based on the analysis of real traffic to ensure the resilience of transport infrastructure to crisis impacts.

**traffic organization, emergencies, intelligent transport systems, optimization, traffic flows, road safety**

*Одержано (Received) 27.02.2025*

*Прорецензовано (Reviewed) 05.03.2025*

*Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025*