

УДК 656.01:519.876  
DOI DOI DOI DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/35>

**Хітров І.О.**

<https://orcid.org/0000-0003-2310-1472>

Національний університет водного господарства та природокористування

## МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ ЯК ІНСТРУМЕНТ АНАЛІЗУ ТА УПРАВЛІННЯ МОБІЛЬНІСТЮ

*Моделювання транспортних систем є ефективним науково-аналітичним інструментом, що забезпечує формалізацію складних процесів мобільності та дозволяє досліджувати закономірності функціонування транспортних потоків, інфраструктури та взаємодії елементів системи без безпосереднього втручання в реальні умови експлуатації. Його застосування сприяє підвищенню обґрунтованості управлінських рішень і зменшенню ризиків, пов'язаних із впровадженням організаційних та інфраструктурних змін.*

*Встановлено, що транспортні системи можуть досліджуватися за допомогою різних типів моделей – концептуальних, математичних, імітаційних, статистичних, оптимізаційних, мережевих, агент-орієнтованих та ризик-орієнтованих, кожна з яких має власну сферу застосування, переваги та обмеження. Найбільш ефективним є комплексне використання кількох типів моделей, що дозволяє отримати всебічну оцінку функціонування системи та врахувати багатofакторний характер транспортних процесів.*

*Обґрунтовано доцільність застосування моделювання на різних ієрархічних рівнях – макро-, мезо-, мікро– та нанорівні, що забезпечує узгодженість стратегічного планування розвитку транспортної інфраструктури з тактичними та оперативними рішеннями. Такий підхід дозволяє досліджувати як загальні закономірності функціонування транспортної мережі, так і локальні процеси руху, експлуатації транспортних засобів та взаємодії учасників транспортного процесу.*

*Визначено, що моделювання транспортних систем відіграє ключову роль у прогнозуванні транспортного попиту, оптимізації маршрутної мережі, оцінюванні пропускної спроможності інфраструктури, підвищенні рівня транспортного обслуговування населення, а також у забезпеченні безпеки та надійності перевезень. Застосування моделей дозволяє оцінювати альтернативні сценарії розвитку, визначати ефективність управлінських заходів і формувати науково обґрунтовані рекомендації щодо вдосконалення транспортної системи.*

*Подальший розвиток транспортного моделювання доцільно пов'язувати з цифровізацією, використанням великих даних, інтеграцією з інтелектуальними транспортними системами та створенням цифрових двійників, що підвищать точність прогнозування, адаптивність управління й ефективність функціонування.*

**Ключові слова:** транспортні системи, модель, моделювання, транспортне планування, управління мобільністю, оптимізація перевезень.

**Постановка проблеми.** Сучасні транспортні системи характеризуються високим рівнем складності, багатокомпонентністю та тісною взаємодією з соціально-економічними, просторовими та екологічними процесами. Зростання рівня урбанізації, автомобілізації населення, інтенсивності пасажирських і вантажних перевезень зумовлює необхідність пошуку ефективних інструментів аналізу, прогнозування та управління транспортними потоками. У цьому контексті моделювання транспортних систем виступає ключовим методологічним підходом, що дозволяє формалізувати складні тран-

спортні процеси, дослідити їх поведінку в різних умовах та оцінити наслідки управлінських рішень без втручання в реальну систему [1].

Моделювання транспортних систем є невід'ємною складовою стратегічного та оперативного планування розвитку транспорту, оптимізації маршрутної мережі, оцінювання пропускної спроможності вулично-дорожньої мережі, аналізу безпеки руху та підвищення якості транспортного обслуговування населення [2, 3]. Особливої актуальності ці питання набувають у сфері міського пасажирського транспорту, де необхідно враху-



вати змінний попит, соціальні аспекти перевезень, наявність пільгових категорій пасажирів і обмеженість фінансових ресурсів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблематика моделювання транспортних систем є предметом широкого наукового дослідження як у вітчизняній, так і в зарубіжній науковій літературі. Теоретичні основи аналізу та забезпечення ефективного функціонування транспортних систем розкрито у працях В. В. Ауліна, Д. В. Голуба, А. В. Гриньківа та С. В. Лисенка [1], де моделювання розглядається як ключовий інструмент підвищення надійності транспортних систем і підтримки управлінських рішень. Значний внесок у розвиток теоретичних положень транспортного моделювання зроблено також у колективній монографії під редакцією А. В. Сохацького [3], де систематизовано основні підходи до моделювання транспортних процесів, включаючи математичні, імітаційні та оптимізаційні методи.

У зарубіжних дослідженнях значна увага приділяється розвитку агент-орієнтованих моделей транспортних систем, які дозволяють враховувати індивідуальну поведінку учасників транспортного процесу та їх взаємодію. Зокрема, А. Л. К. Баццан (A. L. C. Bazzan) та Ф. Клюг (F. Klügl) [4] обґрунтували ефективність застосування агент-орієнтованого підходу для дослідження складних транспортних систем, що характеризуються високим рівнем стохастичності та динамічності. Фундаментальні положення аналізу транспортних систем, включаючи моделі транспортного попиту, розподілу потоків і оптимізації транспортних мереж, розглянуто у роботі Е. Кашетта (E. Cascetta), опублікованій видавництвом «Springer» [5], яка є однією з базових у сфері транспортного планування.

Важливим напрямом сучасних досліджень є аналіз стійкості та надійності транспортних систем в умовах впливу зовнішніх і внутрішніх факторів. Зокрема, Л.-Г. Маттссон (L.-G. Mattsson) та Е. Єнеліус (E. Jenelius) [6] дослідили питання вразливості транспортних мереж і обґрунтували необхідність використання моделей для оцінювання ризиків, пов'язаних із порушенням функціонування транспортної інфраструктури.

Окрему увагу приділено мезоскопічному та мікроскопічному моделюванню транспортних процесів. У роботі О. Катс (O. Cats), В. Бургхаут (W. Burghout), Т. Толедо (T. Toledo) та Х. Н. Кутсупулос (H. N. Koutsopoulos) [7] розглянуто застосування мезоскопічних моделей для аналізу функціонування міського громадського транспорту, що

дозволяє поєднати переваги макро- та мікродіходів. Водночас Ж. Барселло (J. Barceló) та співавтори [8] обґрунтували ефективність мікроскопічного моделювання для дослідження транспортних потоків на рівні окремих транспортних засобів і перехресть, що є особливо важливим для аналізу безпеки руху та оцінювання ефективності інтелектуальних транспортних систем.

Аналіз наукових праць свідчить, що сучасні дослідження спрямовані на інтеграцію різних підходів до моделювання, включаючи математичні, імітаційні, агент-орієнтовані та ризик-орієнтовані моделі, а також використання цифрових технологій і великих масивів даних. Водночас недостатньо дослідженими залишаються питання комплексного узгодження моделей різних ієрархічних рівнів функціонування транспортних систем, а також інтеграції технічних характеристик транспортних засобів і параметрів транспортної інфраструктури в єдину систему моделювання. Це зумовлює необхідність подальшого розвитку методичних підходів до моделювання транспортних систем як інструменту аналізу, прогнозування та управління мобільністю.

**Постановка завдання.** Метою статті є узагальнення теоретичних і методичних підходів до моделювання транспортних систем, систематизація основних видів моделей та обґрунтування їх застосування як інструменту аналізу, прогнозування й управління мобільністю на різних ієрархічних рівнях функціонування транспортної системи.

**Виклад основного матеріалу.** Моделювання розглядається як метод наукового дослідження, що ґрунтується на побудові узагальненого представлення реального об'єкта або процесу з метою виявлення закономірностей його функціонування та оцінювання можливих сценаріїв розвитку. Такий підхід забезпечує формалізацію складних систем і створює передумови для їх кількісного та якісного аналізу.

Сутність моделювання полягає у відтворенні ключових характеристик системи через спрощений, але репрезентативний аналог, який дозволяє досліджувати її поведінку в контрольованих умовах. Залежно від поставлених завдань, моделі можуть мати математичну, алгоритмічну, графоаналітичну або імітаційну форму та реалізовуватися за допомогою спеціалізованих програмних засобів. У транспортній галузі моделювання широко використовується для аналізу поточкових процесів, визначення пропускної спроможності інфраструктури, оцінювання експлуатаційної надійності та оптимізації режимів функціонування систем.

Моделювання дає змогу враховувати багатофакторний вплив зовнішніх і внутрішніх параметрів, досліджувати систему в різних експлуатаційних станах і формувати науково обґрунтовані рекомендації щодо її вдосконалення [1].

Транспортна система розглядається як складна відкрита система, що включає транспортні засоби, інфраструктуру, пасажирів (або вантажі), органи управління та зовнішнє середовище. Модель транспортної системи є спрощеним відображенням реального об'єкта або процесу, яке зберігає його суттєві властивості та дозволяє досліджувати закономірності функціонування.

Залежно від рівня абстракції та цілей дослідження виділимо такі основні види моделей транспортних систем:

- концептуальні моделі, що відображають логічну структуру системи, взаємозв'язки між її елементами та основні функції;
- математичні моделі, які описують транспортні процеси за допомогою рівнянь, залежностей і показників;
- імітаційні моделі, що дозволяють відтворювати динаміку транспортних потоків у часі та просторі;
- статистичні та ймовірнісні моделі, спрямовані на аналіз випадкових процесів, коливань попиту та надійності функціонування;
- оптимізаційні моделі, орієнтовані на пошук найкращих рішень за заданими критеріями (мінімізація витрат, часу перевезення, ризиків, максимізація пропускнуої спроможності чи рівня обслуговування);

– мережеві (графові) моделі, що описують транспортну систему у вигляді вузлів і дуг та застосовуються для аналізу маршрутних структур, розподілу потоків і стійкості мережі;

– динамічні системні моделі, які враховують зворотні зв'язки між елементами системи та дозволяють досліджувати довгострокові ефекти розвитку інфраструктури або змін попиту;

– ризик-орієнтовані моделі, спрямовані на ідентифікацію, кількісну оцінку та управління транспортними ризиками, зокрема в контексті безпеки перевезень;

– агент-орієнтовані моделі, що моделюють поведінку окремих учасників транспортного процесу (пасажирів, водіїв, операторів) та їх взаємодію в межах системи;

– цифрові двійники транспортних систем, які інтегрують дані моніторингу в реальному часі та забезпечують адаптивне управління інфраструктурою й рухом.

Жоден тип моделей не є універсальним, а їх доцільність визначається масштабом дослідження, рівнем деталізації, доступністю даних та управлінською метою. Кожен тип моделей має свої переваги та обмеження, а їх поєднання забезпечує комплексний підхід до дослідження транспортних систем (табл.). Найефективнішим підходом у сучасній транспортній аналітиці є інтеграція кількох типів моделей у межах єдиної системи підтримки прийняття рішень.

Моделювання транспортних систем здійснюється на різних ієрархічних рівнях, що відповідають масштабам аналізу та прийняття

Таблиця 1

**Переваги та обмеження моделей транспортних систем**

Тип моделі	Переваги	Обмеження
Концептуальні	Системність опису; простота побудови; не потребують великих масивів даних	Відсутність кількісної оцінки; суб'єктивність інтерпретації
Математичні	Точність; можливість прогнозування; придатність для оптимізації	Теоретичні допущення; складність побудови; залежність від якості даних
Імітаційні	Аналіз сценаріїв; урахування стохастичних даних; висока наочність результатів	Підвищена ресурсомісткість; складність калібрування
Статистичні та ймовірнісні	Робота з емпіричними даними; оцінка ризиків і коливань попиту	Потреба у великій статистичній базі; обмежена придатність для нових умов
Оптимізаційні	Чітка орієнтація на критерій ефективності; підтримка планування	Чутливість до постановки задачі; часто статистичний характер
Мережеві (графові)	Наочність; ефективність для задач маршрутизації	Спрощення реальної динаміки руху
Динамічні системні	Урахування зворотних зв'язків; стратегічне прогнозування	Складність параметризації; системна узагальненість
Ризик-орієнтовані	Кількісна оцінка небезпек; інтеграція у систему управління безпекою	Низька передбачуваність подій; складність формалізації поведінкових фактору
Агент-орієнтовані	Висока деталізація; аналіз поведінкових ефектів	Значні обчислювальні ресурси; складність налаштування
Цифрові двійники	Інтеграція даних; висока точність; підтримка оперативних рішень	Висока вартість впровадження; вимоги до ІТ-інфраструктури

управлінських рішень (рис. 1). На макрорівні досліджується транспортна система міста, регіону або країни в цілому, зокрема структура транспортної мережі, розподіл транспортного попиту та взаємодія різних видів транспорту [9]. Такі моделі застосовуються для стратегічного планування, формування транспортної політики та оцінювання довгострокових сценаріїв розвитку.



Рис. 1. Рівні моделювання транспортних систем

На мезорівні розглядаються окремі підсистеми, наприклад маршрутна мережа міського транспорту, транспортні коридори або мульти-модальні вузли [7]. Основна увага приділяється оптимізації маршрутів, інтервалів руху, організації пересадок та узгодженню роботи різних видів транспорту.

На мікрорівні моделюються процеси руху окремих транспортних засобів і пішоходів, взаємодія на перехрестях, зупинках і в зонах підвищеної концентрації транспортних потоків [8]. Такі моделі є важливими для аналізу безпеки руху, затримок, рівня сервісу та комфортності перевезень.

Доцільно також виокремити нанорівень (технологічний або елементний рівень), який відіграє важливу роль у забезпеченні ефективного аналізу та управління мобільністю через дослідження функціональних характеристик окремих транспортних засобів і їх технічних підсистем. На цьому рівні моделюються процеси роботи силових установок, гальмівних систем, систем керування рухом, енергоспоживання, а також показники надійності, безпеки та експлуатаційної ефективності транспортних засобів. Це дозволяє

оцінювати вплив технічного стану та конструктивних параметрів транспортних засобів на загальну ефективність транспортного процесу, рівень безпеки та якість транспортного обслуговування. Такі моделі забезпечують можливість прогнозування експлуатаційних характеристик транспортних засобів, визначення їх енергоефективності, рівня викидів, інтенсивності зношування та ймовірності відмов, що є важливим для формування ефективної політики управління мобільністю. Крім того, моделювання на нанорівні є основою для впровадження інтелектуальних транспортних технологій, зокрема систем моніторингу технічного стану транспортних засобів, адаптивного керування їх режимами роботи та інтеграції з цифровими платформами управління мобільністю. Це забезпечує підвищення ефективності використання транспортних ресурсів, зниження експлуатаційних витрат, підвищення рівня безпеки та екологічності перевезень, що в сукупності сприяє сталому розвитку транспортних систем і підвищенню якості мобільності населення..

Ієрархічна узгодженість моделей різних рівнів є принципово важливою, оскільки рішення, прийняті на макрорівні, формують обмеження для мезо- та мікрорівня, а результати детального аналізу на нижчих рівнях уточнюють параметри стратегічного планування.

Завдяки побудові адекватних моделей стає можливим дослідження складних транспортних процесів без прямого втручання в реальну систему, що особливо важливо в умовах високої вартості інфраструктурних змін і значного соціального впливу управлінських рішень.

Одним із ключових елементів моделювання транспортних систем є моделювання попиту на перевезення. Попит формується під впливом соціально-економічних факторів, просторової структури міста, рівня доходів населення, доступності транспортних послуг і якості обслуговування. У практиці транспортного планування широко застосовуються багатостадійні моделі попиту, які включають генерацію поїздок, їх просторовий розподіл, вибір виду транспорту та вибір маршруту.

Моделювання транспортних потоків дозволяє оцінити інтенсивність руху, швидкісні режими, затримки та пропускну спроможність елементів транспортної мережі. Особливу увагу приділяють дослідженню пікових навантажень, нерівномірності пасажиропотоків у часовому розрізі та впливу зовнішніх факторів на стабільність функціонування системи

Моделювання транспортних систем є ефективним інструментом підтримки прийняття управлінських рішень. Воно дозволяє оцінювати наслідки впровадження нових маршрутів, змін у розкладі руху, тарифній політиці, а також заходів із пріоритету громадського транспорту. За допомогою моделей можна порівнювати альтернативні сценарії розвитку та обґрунтовувати вибір оптимальних рішень з урахуванням економічних, соціальних і екологічних критеріїв.

У сфері стратегічного управління моделювання дозволяє прогнозувати розвиток транспортного попиту, оцінювати ефективність інвестиційних проєктів, визначати пріоритети розвитку інфраструктури та формувати довгострокову транспортну політику. На цьому рівні моделі застосовуються для аналізу сценаріїв розвитку міських агломерацій, інтеграції різних видів транспорту та оцінювання впливу демографічних і економічних чинників.

Важливою складовою є застосування моделей для оцінювання безпеки та надійності функціонування транспортних систем [1]. Ризик-орієнтовані, статистичні та агент-орієнтовані підходи дають змогу ідентифікувати критичні елементи інфраструктури, прогнозувати аварійність, аналізувати поведінкові фактори та формувати заходи їх зниження.

У сучасних умовах особливого значення набуває інтеграція транспортного моделювання з циф-

ровими технологіями, зокрема інтелектуальними транспортними системами, великими масивами даних та автоматизованими системами моніторингу. Це відкриває нові можливості для підвищення надійності, безпеки та сталості транспортних систем.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження вирішено науково-прикладне завдання, що полягає у вдосконаленні підходів до аналізу та моделювання функціонування транспортних систем з урахуванням закономірностей формування транспортних потоків і параметрів мобільності населення. Доведено, що застосування моделей дозволяє формалізувати процеси формування транспортного попиту, функціонування транспортних потоків і взаємодії елементів інфраструктури, а також підвищити обґрунтованість управлінських рішень. Встановлено доцільність комплексного використання різних типів моделей і їх узгодження на макро-, мезо-, мікро- та нанорівнях, що забезпечує системність аналізу та узгодженість стратегічних, тактичних і оперативних рішень. Практичне значення результатів полягає у можливості їх застосування для прогнозування транспортного попиту, оптимізації маршрутної мережі, підвищення ефективності функціонування транспортної інфраструктури та забезпечення безпеки й надійності перевезень.

#### Список літератури:

1. Аулін В. В., Голуб Д. В., Гриньків А. В., Лисенко С. В. Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Видавець «КОД», 2017. 370 с.
2. Хітров І. О. Транспортна модель та її створення в середовищі макромодельовання. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків. 2025. Вип. 211. С. 215–224. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327165>.
3. Моделювання в транспортних технологіях. Частина I : монографія / за ред. А. В. Сохацького. Дніпро : УМСФ, 2022. 182 с.
4. Bazzan A. L. C., Klügl F. A review on agent-based technology for traffic and transportation. *The Knowledge Engineering Review*. 2013. Vol. 29. Issue 3. pp. 375–403. <https://doi.org/10.1017/S0269888913000118>.
5. Cascetta E. *Transportation Systems Analysis. Italy*. 2009. Springer Optimization and Its Applications. 730 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-75857-2>.
6. Mattsson L.-G., Jenelius E. Vulnerability and resilience of transport systems – A discussion of recent research. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2015. Vol. 81, p. 16–34. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.06.002>.
7. Cats O., Burghout W., Toledo T., Koutsopoulos H. N. Mesoscopic Modeling of Bus Public Transportation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2010. № 2188. P. 9–18. <https://doi.org/10.3141/2188-02>.
8. Barceló J., Codina E., Casas J., Ferrer J. L., García D. Microscopic traffic simulation: A tool for the design, analysis and evaluation of intelligent transport systems. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2005. Vol. 41(2). p. 173–203. <https://doi.org/10.1007/s10846-005-3808-2>.
9. Gomes G., Ugirumurera J, Xiaoye S. Li. Distributed Macroscopic Traffic Simulation with Open Traffic Models. 2020. Preprint. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/CP-2C00-76996. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/76996.pdf>.

## **Khitrov I.O. TRANSPORT SYSTEM MODELING AS A TOOL FOR MOBILITY ANALYSIS AND MANAGEMENT**

*Transport system modeling is an effective scientific and analytical tool that ensures the formalization of complex mobility processes and enables the investigation of operational patterns of transport flows, infrastructure, and interactions among system elements without direct intervention in real operating conditions. Its application enhances the validity of managerial decisions and reduces risks associated with the implementation of organizational and infrastructural changes.*

*It has been established that transport systems can be studied using various types of models – conceptual, mathematical, simulation, statistical, optimization, network-based, agent-based, and risk-oriented – each characterized by specific fields of application, advantages, and limitations. The most effective approach is the integrated use of multiple model types, which provides a comprehensive assessment of system performance and accounts for the multifactorial nature of transport processes.*

*The expediency of applying modeling at different hierarchical levels – macro, meso, micro, and nano – has been substantiated, ensuring consistency between strategic infrastructure planning and tactical and operational decision-making. This approach makes it possible to analyze both general patterns of transport network functioning and localized processes related to traffic operations, vehicle performance, and interactions among participants in the transport system.*

*It has been determined that transport system modeling plays a key role in forecasting transport demand, optimizing route networks, assessing infrastructure capacity, improving the quality of transport services, and ensuring safety and reliability of transport operations. The use of models enables the evaluation of alternative development scenarios, the assessment of management measures, and the formulation of scientifically grounded recommendations for system improvement.*

*Further development of transport modeling is associated with digitalization, the use of big data, integration with intelligent transport systems, and the creation of digital twins, which will enhance forecasting accuracy, management adaptability, and overall system efficiency.*

**Keywords:** *transport systems, model, modeling, transport planning, mobility management, transport optimization.*

Дата першого надходження статті до видання: 15.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026