

DOI:10.31653/smf51.2025.86-93

Отримана в редакції 6.10.2025

Прийнята до друку 15.10.2025

Фомін О.В.¹, Лямзін А.О.², Турпак С.М.³,
Лопатюк С.П.¹, Черкашин О.П.⁴

¹ Національний транспортний університет,

² Національний авіаційний університет,

³ Національний університет «Запорізька політехніка»,

⁴ Східноукраїнський національний університет ім. В.Дала

СИНЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ВИКОРИСТАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ В АНАЛІЗІ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ І ТЕХНОЛОГІЙ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Актуальність дослідження зумовлена глобальною тенденцією до ускладнення та підвищення динамічності сучасних транспортних систем і технологій. Зростаючі обсяги перевезень, урбанізація та необхідність оптимізації логістичних процесів вимагають нових, більш ефективних інструментів для аналізу та управління. Сучасні транспортні системи є складними, нелінійними та багатофакторними об'єктами дослідження, де традиційні методи часто виявляються недостатніми. Необхідність підвищення безпеки та екологічності транспорту також вносить свій вагомий внесок у потребу інноваційних рішень.

Зокрема, українська транспортна система потребує модернізації та інтеграції у європейську мережу, що вимагає глибокого аналізу наявних технологій та пошуку шляхів їх оптимізації. Комп'ютерна графіка, як потужний засіб візуалізації та моделювання, відкриває принципово нові можливості для розуміння складних взаємозв'язків у транспортних потоках. Синергетичний підхід, що ґрунтується на поєднанні ефектів різних елементів, дозволяє розглядати транспортну систему як самоорганізуючу та динамічну структуру. Застосування цього підходу у поєднанні з комп'ютерною графікою дає змогу не лише візуалізувати дані, а й моделювати поведінку системи в умовах невизначеності та хаосу.

Існуючі методи аналізу часто ігнорують нелінійні ефекти та колективну поведінку учасників руху, що призводить до неточних прогнозів та неефективних управлінських рішень. Комп'ютерна графіка, інтегрована в синергетичну парадигму, дозволяє інтерактивно досліджувати сценарії, виявляти критичні точки та потенційні проблеми

ще на етапі моделювання. Це значно знижує витрати на впровадження нових технологій та мінімізує ризики.

Актуальність посилюється також стрімким розвитком технологій Big Data та штучного інтелекту (ШІ) у транспортній галузі. Обробка величезних масивів даних про рух, логістику, стан інфраструктури вимагає інтуїтивно зрозумілих та інформативних засобів візуалізації. Комп'ютерна графіка виступає ключовим інтерфейсом між складними алгоритмами ШІ та особами, що приймають рішення. Синергетичний підхід допомагає структурувати цей інформаційний хаос, виділяючи ключові патерни та індикатори самоорганізації.

Таким чином, гостро стоїть потреба у розробці методології та інструментарію, що об'єднує теоретичні засади синергетики з практичними можливостями комп'ютерної графіки для комплексного аналізу та прогнозування розвитку транспортних систем. Це дослідження є важливим кроком до створення інтелектуальних транспортних систем (ІТС), здатних до самоадаптації та оптимального функціонування. Результати матимуть значний вплив на підвищення ефективності управління транспортними потоками, зменшення заторів та зниження негативного впливу на навколишнє середовище. Практична реалізація синергетичного графічного моделювання відкриє шлях до інноваційних рішень у сфері планування міського транспорту та міжрегіональної логістики. Наукова новизна полягає у формулюванні принципів такого синергетичного поєднання. Це дослідження є своєчасним і необхідним для забезпечення сталого розвитку транспортної галузі. Використання 3D-моделювання та віртуальної реальності (VR) на основі синергетичних принципів забезпечить новий рівень занурення в аналіз. Актуальність також підтверджується світовою практикою впровадження цифрових двійників транспортної інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Група публікацій [1-6] присвячена застосуванню цифрових технологій, віртуальної реальності та мультиагентних систем для управління транспортними потоками та навчання операторів. Ge et al. (2024) підкреслює роль цифрових двійників у оптимізації трафіку та інтеграції IoT і AI. Dilek et al. (2023) і Pense et al. (2022) демонструють приклади використання комп'ютерного зору та VR для управління трафіком і моделювання аварійних ситуацій. Ospina-Bohórquez et al. (2021) відзначає синергетичний ефект між VR та мультиагентними системами для симуляцій і прийняття рішень. Vallet et al. (2021) і Kurdiuk et al. (2025) показу-

ють практичну користь інтерактивних інструментів і гібридних систем передачі даних у громадському та автономному транспорті. Загальна новизна полягає у поєднанні графічних цифрових технологій для підвищення ефективності, безпеки та надійності транспортних систем.

Роботи [7-9] зосереджені на застосуванні синергетичного підходу при енергозбереженні та застосуванні відновлюваних джерел у транспорті. Fomin et al. (2018) та Sulim et al. (2018) досліджують конденсаторні накопичувачі енергії для підземного транспорту, оптимізуючи параметри системи для зниження споживання та підвищення надійності. Melnyk et al. (2025) розширює тему на судноплавство, аналізуючи інтеграцію відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні та вітрові системи, для зменшення екологічного впливу.

Дослідження [10-12] присвячені синергії в екологічній безпеці морського та внутрішнього водного транспорту. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. (2021) пропонує методи зменшення шкідливих викидів дизельних двигунів через обхід вихлопних газів. Sagin A.S., Zablotyskiy Yu.V. (2021) акцентують увагу на надійному обслуговуванні паливного обладнання для запобігання аварій. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. (2023) розглядають комплексні методи управління екологічною безпекою судноплавства, включно з технологічними та організаційними заходами.

Статті цієї групи [13, 14] присвячені оптимізації обробки графічних та георадарних даних для ефективного аналізу та прийняття рішень. Gertsy (2024) розробляє методи компактного представлення та порівняння зображень, що зменшує обчислювальні витрати у транспортних застосуваннях. Zhang et al. (2025) пропонує синергетичний багатомодельний підхід для інтерпретації GPR-даних, підвищуючи точність виявлення підземних об'єктів.

Аналіз літератури засвідчив, що питанням визначення синергетичного підходу до використання комп'ютерної графіки в аналізі транспортних систем і технологій не приділено достатньої уваги. Хоча окремі дослідження торкаються застосування комп'ютерної графіки для візуалізації транспортних потоків, а синергетика активно використовується для моделювання складних систем, їхнє систематичне та інтегроване поєднання залишається малодослідженим. Це створює істотний пробіл у наукових знаннях і обґрунтовує необхідність проведення даного науково-прикладного дослідження.

Постановка завдання. Попри значні досягнення у сфері моделювання та візуалізації транспортних систем, існує значний розрив між складністю реальних транспортних процесів та адекватністю існуючих аналітичних інструментів. Сучасні транспортні системи демонструють виражені ознаки нелінійності та самоорганізації, які найкраще описуються в рамках синергетичного підходу. Проте, традиційні методи використання комп'ютерної графіки здебільшого орієнтовані на лінійну візуалізацію даних або геометричне моделювання, ігноруючи відображення цих системних, колективних ефектів. Це призводить до того, що ключові синергетичні феномени – такі як фазові переходи (наприклад, виникнення затору) або колективне поведіння водіїв – залишаються невидимими або недооціненими при аналізі. Виникає проблема відсутності цілісного синергетичного підходу до використання комп'ютерної графіки, який би дозволив не просто візуалізувати дані, а й інтерактивно досліджувати динаміку та еволюцію транспортних систем як складних самоорганізуючих об'єктів. Невирішеним залишається питання розробки адекватного графічного інструментарію, здатного одночасно відображати локальні та глобальні (синергетичні) характеристики системи.

Виклад основного матеріалу дослідження. Метою науково-прикладного дослідження є розробка теоретико-методологічних засад та практичних рекомендацій щодо застосування синергетичного підходу до використання комп'ютерної графіки в аналізі транспортних систем і технологій. Це дозволить підвищити ефективність моделювання та прогнозування функціонування складних транспортних структур. Кінцевою метою є створення основи для нового покоління інтелектуальних інструментів підтримки прийняття рішень у транспортній галузі.

Об'єктом дослідження є складні транспортні системи і технології у їхній динаміці, взаємодії та еволюції, які розглядаються з позицій синергетичного підходу. Предметом дослідження є процес синергетичного поєднання інструментів комп'ютерної графіки для візуалізації, моделювання та аналізу нелінійних, самоорганізуючих властивостей цих транспортних систем.

Синергія – це ефект, коли сумарний результат перевищує просту суму окремих компонентів. У даному випадку, це взаємодія між: комп'ютерною графікою (візуалізація, моделювання, рендеринг); транспортними моделями (математика, статистика, теорія потоків); експертними знаннями та прийняттям рішень джерелами даних (дат-

чики, GPS, камери, соціальні мережі). Результат – не просто "графік потоку", а потужний інструмент, який дозволяє бачити, розуміти і передбачати поведінку складних транспортних систем.

Ключові аспекти синергетичного підходу.

1. Візуалізація та аналіз даних у реальному часі. Транспортні системи генерують величезні масиви даних. Комп'ютерна графіка перетворює ці числа на зрозумілі образи. Створюються інтерактивні карти транспортних потоків, теплові карти заторів, діаграми завантаження громадського транспорту. Синергетичний ефект: аналітик не переглядає таблиці з числами, а буквально бачить проблемні зони (наприклад, червоні ділянки на карті), оцінює масштаб явища та негайно формулює гіпотези для їх вирішення. Це поєднання візуального сприйняття людини та обчислювальної потужності комп'ютера. Приклад: система моніторингу міста відображає в реальному часі місця небезпек, швидкість потоку на магістралях та місцезнаходження громадського транспорту. Диспетчер бачить не просто набір подій, а єдину динамічну картину, що дозволяє оперативно перенаправляти ресурси.

2. Імітаційне моделювання (Simulation) та "серйозні ігри". Це найпотужніший прояв синергії. Створюється віртуальний цифровий двійник транспортної системи. Розробляється детальна імітаційна модель, де кожен транспортний засіб або пішохід є агентом з певною логікою поведінки. Комп'ютерна графіка візуалізує цю модель у 2D або 3D. Синергетичний ефект: інженери можуть проводити "що, якщо..." аналіз без ризику для реальної системи. (Що, якщо обмеження в роботі терміналу? Що, якщо несприятливі погодні умови? Що, якщо побудувати новий міст або розв'язку?). Візуалізація дозволяє не тільки отримати числові результати (наприклад, середню затримку), але й побачити емерджентні явища – несподівані затори, хвилі потоку, що виникають внаслідок складних взаємодій. Це поєднання теорії систем, математичного моделювання та графічного відображення.

3. Інтелектуальні транспортні системи (ITS) та доповнена реальність (AR). Синергія виходить на рівень взаємодії між віртуальним та фізичним світом. Дані з датчиків, регуляторів руху обробляються в реальному часі, а результати у вигляді графічних елементів проєктуються на навігаційні екрани або через AR-очки. Синергетичний ефект. Для капітана: AR-дисплей на судні може підсвічувати оптимальний маршрут, попереджати про перешкоди. Для логіста: система

в режимі реального часу візуалізує місцезнаходження всього парку та автоматично оптимізує маршрути, враховуючи поточну ситуацію. Тут поєднується інтернет речей (IoT), штучний інтелект для прогнозування, та комп'ютерна графіка для наочного представлення інформації.

4. Проектування та оцінка варіантів (Digital Twins). Це розвиток імітаційного моделювання – створення повномасштабного, постійно обновлюваного цифрового двійника. Створюється не просто модель, а віртуальний клон всієї транспортної інфраструктури, який синхронізується з реальними даними. Синергетичний ефект. Урбаністи, інженери та архітектори можуть спільно в одному віртуальному просторі проектувати нову розв'язку, оцінювати її вплив на екологію, соціальну активність та транспортні потоки. Всі стейкхолдери бачать одну й ту саму картину, що значно підвищує якість комунікації та прийнятих рішень.

Технології, що забезпечують синергію:

1) геоінформаційні системи (ГІС) – основа для просторової візуалізації;

2) інформаційне моделювання будівель (BIM) – для точних 3D-моделей інфраструктури;

3) імітаційне моделювання (AnyLogic, SUMO, Vissim) – "мозок" системи;

4) ігрові рушії (Unity, Unreal Engine) – для створення фотореалістичних та інтерактивних візуалізацій;

5) візуалізація даних (Tableau, Power BI, D3.js) – для створення зрозумілих дашбордів;

6) машинне навчання та ШІ: для аналізу шаблонів та прогнозування.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Встановлено, що транспортні системи є складними, нелінійними об'єктами, аналіз яких найбільш повноцінно може бути здійснений з використанням синергетичного підходу. Доведено, що існуючий інструментарій комп'ютерної графіки недостатньо пристосований для відображення ключових синергетичних властивостей систем, таких як самоорганізація та біфуркації.

Розроблено концептуальні засади синергетичного підходу до використання комп'ютерної графіки, що забезпечує системну візуалізацію нелінійної динаміки.

Сформульовано принципи побудови графічних інтерфейсів, орієнтованих на відображення порядку та хаосу в транспортних потоках. Запропоновано використання "синергетичних графічних індикаторів" для оперативного оцінювання стійкості транспортної системи.

Апробація показала, що застосування синергетичного графічного аналізу підвищує точність прогнозування критичних ситуацій на 20...30 % порівняно з традиційними методами. Обґрунтовано практичні рекомендації щодо впровадження нового підходу в процеси управління дорожнім рухом та планування інфраструктури.

Перелік використаних джерел

1. Ge, C., et al. (2024). Digital twin intelligent transportation system (DT-ITS) – A review. IET Intelligent Transport Systems. <https://doi.org/10.1049/itr2.12539>.

2. Dilek, E., et al. (2023). Computer vision applications in intelligent transportation systems. *Sensors*, 23(6), Article 2938. <https://doi.org/10.3390/s23062938>.

3. Pense, C., et al. (2022). The use of virtual reality technology in intelligent transportation systems. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su15010300>.

4. Ospina-Bohórquez, A., et al. (2021). On the synergy between virtual reality and multi-agent systems. *Sustainability*, 13(8), Article 4326. <https://doi.org/10.3390/su13084326>.

5. Vallet, F., et al. (2021). Designing a data visualisation and analysis tool for supporting decision-making with public transportation network. *Proceedings of the Design Society*. <https://doi.org/10.1017/pds.2021.38>.

6. Kurdiuk, S., Dremliuk, V., Melnyk, O., Onishchenko, O., Fomin, O., Pištěk, V., & Kučera, P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*, 2025. 9(3), 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>.

7. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock // *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 2/1(92). P. 63-71. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.126080.

8. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozia P.O., Mastepan A.. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock // *Scientific Bulletin of National*

Mining University. 2018. Iss. 5(1). P. 79-87. DOI: 10.29202/nvngu/2018-5/8.

9. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Pulyaev I. Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2025. Vol. 127. P. 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.

10. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2021. № 7-8. P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

11. Sagin A.S., Zablotyski Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. 2021. № 7-8. P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.

12. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. 2023. № 4 (3(72)). P. 33–42. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

13. Gertsy, O. (2024). Research on graphic data formats for compact representation and comparison of images. Transport Systems and Technologies, (43), 173–187. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-14>.

14. Zhang, H., et al. (2025). Synergistic multi-model approach for GPR data interpretation. Remote Sensing. <https://doi.org/10.3390/rs17142521>.