

УДК 656.1:519.6:656.3

## **КОМПЛЕКСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ МАЙБУТЬОГО З УРАХУВАННЯМ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ**

**І.О. Хітров, доц., канд. техн. наук**

*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне*

Розвиток сучасних транспортних систем визначається зростанням потреб у мобільності, підвищенні ефективності перевезень та забезпеченні безпеки дорожнього руху. Проблеми перевантаженості міської інфраструктури, аварійності та неефективного використання транспортних ресурсів актуалізують необхідність впровадження сучасних технологій планування та управління транспортними процесами [1].

Математичне та комп'ютерне моделювання транспортних систем виступає ключовим інструментом для аналізу та оптимізації їх роботи. Завдяки моделюванню можна прогнозувати наслідки різних управлінських рішень, оцінювати ефективність інноваційних технологій, досліджувати сценарії розвитку транспортної інфраструктури та визначати фактори ризику для безпеки дорожнього руху [2].

Особливої уваги потребує концепція транспортних систем майбутнього, які інтегрують інтелектуальні технології, автоматизацію процесів та інноваційні підходи до організації руху. Дослідження таких систем дозволяє забезпечити баланс між ефективністю перевезень, екологічною стійкістю та високим рівнем безпеки учасників дорожнього руху.

Моделі транспортних систем можна класифікувати за метою та методами аналізу. Математичні моделі включають мережеві моделі транспортних потоків, які дозволяють оцінювати пропускну здатність та час у дорозі; стохастичні моделі, що враховують випадкові фактори, такі як аварійність або погодні умови; та оптимізаційні моделі для визначення ефективного розподілу транспортних потоків і організації руху.

Комп'ютерне та агентне моделювання дозволяє більш детально аналізувати транспортні процеси. Моделі на основі агентів представляють кожного учасника руху як самостійний агент із певною поведінкою, що дозволяє оцінювати вплив індивідуальної поведінки на загальну ефективність та безпеку. Мікроскопічні (мезоскопічні) моделі забезпечують детальне відтворення руху транспортних засобів і оцінку ризиків [3].

Системні та інтегровані моделі застосовуються для комплексного аналізу сучасних транспортних систем. До них належать моделі інтелектуальних транспортних систем (ITS), які інтегрують дані сенсорів, GPS і камер спостереження для оцінки ефективності в реальному часі. Моделі мультимодального транспорту дозволяють оцінювати взаємодію різних видів транспорту та їх вплив на загальну ефективність і безпеку системи [4].

Для оцінки ефективності транспортних систем використовують такі показники, як середня швидкість руху, час у дорозі, пропускну здатність коридорів, рівень завантаженості громадського транспорту, енергоефективність і екологічність перевезень. Показники безпеки включають частоту ДТП та тяжкість наслідків, індекси ризику для пішоходів і велосипедистів, прогнозовані аварійні точки та ефективність заходів регулювання руху.

На функціонування транспортних систем у майбутньому впливатимуть кілька ключових факторів. До технологічних належать впровадження автоматизованих і безпілотних транспортних засобів, інтеграція інтелектуальних транспортних систем та цифровізація процесів управління рухом. Інфраструктурні фактори включають розвиток виділених смуг руху, створення мультимодальних транспортних вузлів та підвищення якості дорожньої мережі. Соціальні та поведінкові фактори пов'язані зі зміною поведінки учасників

руху, дотриманням правил дорожнього руху та культурою безпечного керування транспортом. Економічні та екологічні фактори охоплюють обмеження викидів, стимулювання екологічно чистого транспорту та інвестиції в модернізацію інфраструктури.

Основні транспортні системи майбутнього можна розглядати через кілька ключових компонентів та концепцій.

Інтелектуальні транспортні системи є основою майбутніх транспортних мереж. Вони включають автоматизовані системи управління транспортними потоками, датчики, камери та GPS-трекери для збору даних у реальному часі, алгоритми прогнозування заторів і аварій, а також системи підтримки прийняття рішень для операторів. Такі системи дозволяють оптимізувати рух, підвищити пропускну здатність доріг, зменшити затори та знизити ризик ДТП.

Майбутнє транспорту передбачає широке впровадження автоматизованих та безпілотних транспортних засобів. Автономні автомобілі, автобуси та дрони для перевезення вантажів і пасажирів забезпечують зниження людського фактору у ДТП, оптимізацію маршрутів за рахунок систем самонавчання та інтеграцію з інтелектуальною інфраструктурою для безперервного контролю руху [5].

Особливу роль відіграють мультимодальні транспортні системи, які інтегрують автомобільний, громадський, велосипедний, пішохідний та водний транспорт. Вони передбачають ефективну організацію пересадок на транспортно-пересадкових вузлах, оптимізацію маршрутів із урахуванням часу та вартості, а також зменшення перевантаження міської інфраструктури [4].

Майбутні транспортні системи орієнтовані на екологічну стійкість. До ключових елементів належать використання електричного та гібридного транспорту, стимулювання громадського транспорту та велосипедного руху, а також управління потоками з метою зниження шкідливих викидів і шумового забруднення.

Важливим компонентом є цифровізація та використання великих даних з обробкою штучним інтелектом. Технології дозволяють збирати, аналізувати та прогнозувати транспортні потоки у реальному часі, прогнозувати аварійні ситуації, оптимізувати управління трафіком, планування маршрутів і логістики [6].

Питання безпеки та комфортності залишаються ключовими. Системи забезпечують контроль за дотриманням правил руху, раннє попередження аварій та комфортне пересування пасажирів, враховуючи мобільність людей з обмеженими можливостями.

Таки чином: транспортні системи майбутнього – це комплекс інтелектуальних, автоматизованих, мультимодальних і екологічно сталих рішень, що інтегруються через цифрові платформи та системи управління. Моделювання транспортних систем дозволяє комплексно оцінювати ефективність і безпеку як сучасних, так і перспективних систем. Комбінування математичних, агентних та системних моделей забезпечує реалістичні прогнози та оптимальні рішення для управління транспортними потоками.

#### Список використаних джерел

1. He Z., Haasis H.-D. A Theoretical Research Framework of Future Sustainable Urban Freight Transport for Smart Cities. *Sustainability*, Vol. 12(5), 2020, <https://doi.org/10.3390/su12051975>.
2. Vieira J., Martins P. J., Patrício H. Towards Resilient and Sustainable Rail and Road Networks: A Systematic Literature Review on Digital Twins. *Sustainability*, Vol. 14(12), 2022. <https://doi.org/10.3390/su14127060>.
3. Modelling and simulation of transportation systems: A scenario planning approach. *Automatika*. Vol. 50(1), 2009, P. 39-50.
4. Cherednichenko K., Ivannikova V., Sokolova O., Yanchuk M. Model of Transport Safety Assessment in Multi-Modal Transportation Systems. *Transport*, Vol. 38(4), 2023, P. 204–213. <https://doi.org/10.3846/transport.2023.20865>.
5. Autonomous Driving Systems for smartbuses. URL: <https://autonomous-systems.pl/>.
6. Rong R., Ma S., Ren N., Lin Q., Jia N. Generative Artificial Intelligence in Intelligent Transportation Systems: A Systematic Review of Applications. *Frontiers of Engineering Management*, Vol.1, 2025. <https://doi.org/10.1007/s42524-025-4241-9>.