

УДК 656.13:531:004

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2026.2\(505\).5](https://doi.org/10.15589/znп2026.2(505).5)

INTEGRATION OF APPLIED MECHANICS METHODS AND MODERN TECHNOLOGIES TO OPTIMIZE THE WORK OF MOTOR TRANSPORT ENTERPRISES

ІНТЕГРАЦІЯ МЕТОДІВ ПРИКЛАДНОЇ МЕХАНІКИ І СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ АВТОТРАНСПОРТНИХ ПІДПРИЄМСТ

Dmytro A. Ivanchenko

ivanchenko_d_a@pstu.edu

ORCID: 0000-0002-3024-3930

Anna M. Fomina

fomina_a_n@pstu.edu

ORCID: 0000-0002-9810-8997

Dmytro I. Ganzheev

ganzheev_d_i@pstu.edu

ORCID: 0000-0002-3438-0086

Д. А. Іванченко,

канд. техн. наук

А. М. Фоміна,

PhD

Д. І. Ганжеєв,*Pryazovskyi State Technical University, Dnipro**Прийзовський державний технічний університет, м. Дніпро*

Abstract. The article considers the issue of integrating methods of applied mechanics and modern digital technologies to increase the efficiency of the functioning of motor transport enterprises. The need to combine physical models of vehicle operation with intelligent data processing and control systems is substantiated. The main areas of integration are identified, covering design, operation and logistics management. The impact of digitalization on increasing the reliability, energy efficiency and competitiveness of enterprises is shown

The goal is to develop scientific and methodological principles for integrating methods of applied mechanics and modern information technologies to optimize the operation of motor transport enterprises and increase the efficiency of their resource use.

Methodology. The work applies a systematic approach to the analysis of a motor transport enterprise as a complex mechanical and technological system. Methods of mathematical and numerical modeling are used, in particular the finite element method, as well as methods of optimization, statistical analysis and structural-parametric synthesis. The study is based on the use of telemetric data and modern digital information processing tools.

Results. A comprehensive model of integration of methods of applied mechanics and digital technologies has been developed, covering the physical, information and management levels of the enterprise's functioning. Approaches to optimizing the design parameters of vehicles, their operating modes and resource allocation have been proposed. The effectiveness of using digital twins, intelligent control systems and predictive maintenance has been proven.

The scientific novelty lies in the formation of a holistic concept of integrating classical methods of applied mechanics with modern digital technologies and algorithms of intelligent data analysis. A new approach to modeling the processes of vehicle operation has been proposed, taking into account their real technical condition and operating conditions.

The practical significance lies in the possibility of implementing the developed models and methods in the activities of motor transport enterprises to reduce operating costs, increase the reliability of rolling stock and optimize logistics processes. The results obtained can be used in the creation of decision support systems and digital transport management platforms.

Key words: applied mechanics; transport; motor transport enterprise; optimization; intelligent systems; technical operation; mathematical modeling.

Анотація. У статті розглянуто питання інтеграції методів прикладної механіки та сучасних цифрових технологій для підвищення ефективності функціонування автотранспортних підприємств. Обґрунтовано необхідність поєднання фізичних моделей роботи транспортних засобів із інтелектуальними системами обробки даних та управління. Визначено основні напрями інтеграції, що охоплюють проєктування, експлуатацію та логістичне

управління. Показано вплив цифровізації на підвищення надійності, енергоефективності та конкурентоспроможності підприємств.

Метою є розробка науково-методологічних засад інтеграції методів прикладної механіки та сучасних інформаційних технологій для оптимізації роботи автотранспортних підприємств і підвищення ефективності використання їх ресурсів.

Методика. У роботі застосовано системний підхід до аналізу автотранспортного підприємства як складної механіко-технологічної системи. Використано методи математичного та чисельного моделювання, зокрема метод скінченних елементів, а також методи оптимізації, статистичного аналізу та структурно-параметричного синтезу. Дослідження базується на використанні телеметричних даних та сучасних цифрових інструментів обробки інформації.

Результати. Розроблено комплексну модель інтеграції методів прикладної механіки та цифрових технологій, що охоплює фізичний, інформаційний та управлінський рівні функціонування підприємства. Запропоновано підходи до оптимізації конструктивних параметрів транспортних засобів, режимів їх роботи та розподілу ресурсів. Доведено ефективність використання цифрових двійників, інтелектуальних систем керування та предиктивного технічного обслуговування.

Наукова новизна полягає у формуванні цілісної концепції інтеграції класичних методів прикладної механіки з сучасними цифровими технологіями та алгоритмами інтелектуального аналізу даних. Запропоновано новий підхід до моделювання процесів експлуатації транспортних засобів з урахуванням їх реального технічного стану та умов функціонування.

Практична значимість полягає у можливості впровадження розроблених моделей і методів у діяльність автотранспортних підприємств для зниження експлуатаційних витрат, підвищення надійності рухомого складу та оптимізації логістичних процесів. Отримані результати можуть бути використані при створенні систем підтримки прийняття рішень та цифрових платформ управління транспортом.

Ключові слова: прикладна механіка; транспорт; автотранспортне підприємство; оптимізація; інтелектуальні системи; технічна експлуатація; математичне моделювання.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Стале функціонування транспортної галузі вимагає впровадження високоефективних рішень для підвищення конкурентоспроможності автотранспортних підприємств. Ефективне використання ресурсів підприємства безпосередньо залежить від точності математичного моделювання робочих процесів. Розробка нових підходів до інтеграції технологій забезпечує фундамент для переходу до індустрії 4.0 у транспортній сфері.

Стрімка цифровізація економіки створює передумови для якісного оновлення підходів до управління технічним станом рухомого складу. Інтеграція сучасних технологій, зокрема цифрових двійників та систем моніторингу, стає критичним фактором мінімізації експлуатаційних витрат. Впровадження інноваційних інструментів аналізу сприяє зниженню аварійності та підвищенню екологічної безпеки транспорту.

Оптимізація роботи підприємств сьогодні неможлива без врахування динамічних навантажень, що діють на елементи конструкцій в реальних умовах експлуатації. Використання методів прикладної механіки дозволяє глибше зрозуміти фізичні процеси зношування та деформації вузлів транспортних засобів. Поєднання інженерних розрахунків із програмними комплексами дозволяє прогнозувати залишковий ресурс агрегатів із високою точністю. Застосування сучасних методів оптимізації дозволяє суттєво скоротити час простою техніки на ремонті.

Існує нагальна потреба в розробці комплексних методик, що поєднують теоретичну механіку

з практичними алгоритмами цифрової обробки даних. Глобальні виклики у сфері логістики вимагають від автотранспортного сектору високої адаптивності та технологічної зрілості. Дослідження механічних характеристик матеріалів у поєднанні з ІТ-рішеннями відкриває шлях до створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.

Пошук балансу між механічною надійністю та економічною доцільністю залишається одним із головних завдань прикладної науки. Результати таких досліджень мають безпосередній вплив на сталий розвиток транспортної інфраструктури країни.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В роботі Ulvi, H., Yerlikaya, M. A., & Yildiz, K. [1] пропонують інноваційну математичну модель оптимізації транспортних потоків у промислових зонах, яка інтегрує підходи прикладної механіки та теорії систем. Автори враховують динамічні параметри руху транспортних засобів і взаємодію потоків, що дозволяє підвищити ефективність управління. Особливістю є використання сучасних алгоритмів оптимізації для адаптації до змінних умов функціонування. Результати демонструють значний потенціал для впровадження в автотранспортних підприємствах.

Samaj, J., Bulková, Z., & Gašparík, J. [2] розглядають оптимізацію матеріальних потоків як ключовий інструмент удосконалення логістичних процесів підприємства. У дослідженні застосовано методи системного аналізу та моделювання для підвищення

ефективності транспортно-складських операцій. Автори підкреслюють важливість інтеграції цифрових технологій у традиційні механічні процеси. Практичні результати підтверджують зниження витрат і підвищення продуктивності.

Yu, Z., & Li, B. [3] аналізують режими функціонування транспортних потоків у залізничних вузлах з позицій оптимізації та керування. У роботі використано математичні моделі, що враховують кінематичні та динамічні характеристики руху поїздів. Запропоновані рішення спрямовані на зменшення затримок і підвищення пропускної здатності. Дослідження має прикладне значення для інтеграції з автотранспортними системами.

Vovk, Y., Aulin, V., Vovk, I., & Romaniuk, S. [4] досліджують оптимізацію інфраструктури зарядних станцій електромобілів на міжнародних транспортних коридорах. У роботі поєднано економічні моделі з технічними аспектами експлуатації транспортних систем. Особлива увага приділяється відповідності європейським нормативам та інтеграції в транспортні мережі України. Результати сприяють розвитку сталих автотранспортних підприємств.

Viniukov-Proshchenko, A. S., Maksymov, S., Panasiuk, I., & Petrenko, O. [5] аналізують застосування механізмів державно-приватного партнерства для розвитку транспортно-логістичної інфраструктури. У дослідженні обґрунтовано економічну доцільність залучення інвестицій у транспортні проекти. Автори демонструють, як управлінські та організаційні рішення впливають на ефективність транспортних систем. Це створює основу для оптимізації роботи автотранспортних підприємств.

Fomin, O., Sulym, A., Kulbovskyi, I., Khozia, P., & Ishchenko, V. [6] присвячують дослідження визначенню раціональних параметрів ємнісних накопичувачів енергії для рухомого складу метро. Використано методи прикладної механіки та енергетичного моделювання для оцінки ефективності систем. Отримані результати дозволяють знизити енергоспоживання та підвищити надійність транспортних засобів. Підходи можуть бути адаптовані для автотранспортних підприємств.

Sulym, A. O., Fomin, O. V., Khozia, P. O., Mastepan, A. G. [7] досліджують параметри бортових ємнісних накопичувачів енергії для рухомого складу. У роботі поєднано теоретичні розрахунки та експериментальні дослідження. Автори визначають оптимальні режими роботи систем з урахуванням динамічних навантажень. Що сприяє підвищенню енергоефективності транспортних систем.

Svichynska, O. [8] розглядає формування стратегії управління міжнародними перевезеннями на основі закономірностей розподілу логістичних показників.

У дослідженні використано статистичні та математичні методи аналізу. Авторка підкреслює значення інтеграції аналітичних інструментів у процес управління транспортними потоками. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації діяльності автотранспортних підприємств.

Chernetskaya-Beletskaya, N., Baranov, I., Miroshnykova, M., & Berezhna, S. [9] досліджують оптимізацію пасажирських перевезень на основі організації приміських потоків. У роботі застосовано методи моделювання та аналізу транспортного попиту. Автори пропонують підходи до підвищення ефективності використання транспортних засобів.

Danyliuk, A., & Mulyarevych, O. [10] аналізують особливості застосування методів управління транспортними потоками. У дослідженні розглянуто сучасні інструменти регулювання руху та їх ефективність. Автори наголошують на необхідності використання інтелектуальних систем керування.

Kulikov, A. V., Efimov, M. A., Halbaev, D., & Soltanov, Y. [11] досліджують економічно обґрунтовану оптимізацію поточкових процесів у транспорті. У роботі поєднано економічний аналіз з математичним моделюванням. Автори визначають критерії ефективності транспортних операцій. Сказане дозволяє підвищити конкурентоспроможність автотранспортних підприємств.

Eppenberger, N., & Richter, M. A. [12] розглядають потенціал спільного використання автономних транспортних засобів для підвищення просторової доступності. У дослідженні використано моделювання транспортних систем та соціально-економічний аналіз. Автори демонструють вплив новітніх технологій на розвиток міської мобільності. Отримані результати підтверджують важливість інтеграції інновацій у транспортні підприємства.

Аналіз літературних джерел показав наявність значної кількості праць, присвячених окремим аспектам механіки транспортних засобів та автоматизації процесів. Проте питання цілісної інтеграції методів прикладної механіки і сучасних технологій для комплексної оптимізації роботи автотранспортних підприємств висвітлені лише фрагментарно. Більшість авторів зосереджуються на локальних задачах технічного сервісу або логістичного менеджменту, не враховуючи глибокий взаємозв'язок між фізичним станом машин та цифровими системами управління. Відсутність єдиного методологічного підходу до поєднання розрахункових моделей механіки з хмарними обчисленнями створює прогалину в теоретичній базі галузі. Таким чином, аналіз літератури засвідчив, що питанням комплексної інтеграції інженерних методів та сучасних ІТ-рішень для оптимізації діяльності підприємств не приділено достатньої уваги.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Функціонування сучасних автотранспортних підприємств супроводжується постійним зростанням навантажень на рухомий склад та складністю логістичних ланцюгів. Існуючі методи управління часто базуються на емпіричних даних, які не враховують реальну кінематику та динаміку механічних систем у критичних режимах. Спостерігається розрив між фундаментальними досягненнями прикладної механіки та їх впровадженням у щоденну практику експлуатації транспорту.

Застосування застарілих регламентів технічного обслуговування призводить до передчасного виходу з ладу вартісних компонентів. Водночас бурхливий розвиток сенсорних технологій та засобів передачі даних випереджає розробку науково обґрунтованих алгоритмів їх інтерпретації. Підприємства стикаються з проблемою обробки великих масивів інформації, які не трансформуються у конкретні інженерні рішення.

Відсутність інтегрованих моделей перешкоджає створенню ефективних систем предиктивного аналізу. Проблема посилюється дефіцитом інструментів, що дозволяють у реальному часі коригувати режими роботи техніки на основі її фактичного механічного стану.

Низький рівень цифровізації традиційних методів розрахунку міцності та довговічності знижує загальну ефективність логістичних операцій. Необхідність підвищення енергоефективності вимагає перегляду конструктивних та експлуатаційних параметрів з використанням новітніх технологій. Виникає гостре протиріччя між потребою у швидкій оптимізації відповідних процесів та обмеженим інструментарієм для глибокого аналізу механічних підсистем. Вирішення цих питань потребує створення нової наукової концепції інтеграції технологій.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є розробка науково-методологічних засад інтеграції методів прикладної механіки та цифрових технологій для підвищення ефективності функціонування автотранспортних підприємств. Робота спрямована на створення комплексних моделей оптимізації, що враховують фізичні параметри техніки в поєднанні з сучасними інструментами автоматизації. Досягнення мети забезпечить мінімізацію витрат та подовження терміну експлуатації рухомого складу в реальних умовах.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

У ході дослідження застосовано системний підхід для аналізу структури автотранспортного підприємства як складної механіко-технологічної системи. Використано методи математичного моделювання для опису динамічних процесів у вузлах

транспортних засобів. Застосовано методи чисельного аналізу (зокрема метод скінченних елементів) для оцінки напружено-деформованого стану конструкцій. Впроваджено методи теорії оптимізації для пошуку найкращих рішень у сфері логістики та сервісу. Використано статистичні методи для обробки даних, отриманих за допомогою сучасних систем телеметрії. Застосовано методи структурно-параметричного синтезу для формування оптимальної архітектури інтегрованої системи управління.

Об'єктом дослідження є процеси технічної та технологічної експлуатації автотранспортних засобів у межах діяльності сучасних підприємств.

Предметом дослідження виступають закономірності інтеграції методів прикладної механіки та сучасних технологій для оптимізації параметрів роботи транспортних систем. У роботі розглядаються зв'язки між конструктивною надійністю вузлів та алгоритмами цифрового управління. Особлива увага приділяється механізмам трансформації теоретичних моделей у прикладні інструменти підвищення ефективності.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Інтеграція методів прикладної механіки та сучасних технологій на автотранспортному підприємстві (АТП) базується на тривірневій структурі: фізичному, інформаційному та управлінському рівнях. На фізичному рівні досліджуються механічні процеси в елементах конструкцій автомобілів, де застосовуються закони динаміки та теорії опору матеріалів. Інформаційний рівень відповідає за збір даних через сенсори та їх передачу в хмарні сховища. Управлінський рівень забезпечує прийняття рішень на основі інтегрованого аналізу.

Класифікація технологій інтеграції включає три основні групи. До першої групи належать технології моніторингу технічного стану в реальному часі (телеметрія, вібродіагностика). Друга група охоплює методи віртуального моделювання (цифрові двійники, CAD/CAE системи). Третя група включає інтелектуальні алгоритми управління ресурсами підприємства (ERP та Fleet Management системи). Кожна група взаємодіє з базовими методами прикладної механіки для створення синергетичного ефекту.

Інтеграція методів прикладної механіки і сучасних технологій для оптимізації роботи автотранспортних підприємств відбувається за трьома ключовими напрямками, які умовно можна назвати «фізика», «дані» та «система». Нижче розглянуто кожен з них детально.

Напрямок 1. Гібридне проєктування (Механіка + Цифрові двійники). Традиційний підхід до проєктування транспортних засобів передбачає створення універсальних моделей, здатних працювати в будь-яких умовах. Однак, згідно з дослідженнями Chalmers University of Technology, це призводить до

зайвих витрат: оптимізація конструкції під конкретний маршрут або специфічне завдання дозволяє зменшити загальну вартість володіння парком до 35 %. Ключовим інструментом тут є віртуальна розробка. Замість створення фізичних прототипів, інженери використовують цифрові двійники, інтегруючи методи прикладної механіки (розрахунки міцності, вібрації, втоми матеріалів) з машинним навчанням.

Оптимізація трансмісії. Один з найяскравіших прикладів – проєкт ESCALATE, де дослідники застосували багатопарову вкладену оптимізацію для створення електроосі (e-Axle). Використовуючи генетичні алгоритми та контроль шуму-вібрації, вони змогли точно підібрати параметри двигуна та коробки передач. Результат – досягнення цільової пікової потужності з похибкою лише 0.2 %.

Довговічність. Європейські проєкти демонструють ефективність «паралельного інжинірингу», де розрахунки динаміки та втоми матеріалів інтегруються в єдиний цикл CAE/CAT. Це скорочує час на доводку вантажівок на 30–50 %.

Напрямок 2. Інтелектуальне управління (Механіка + AI). Якщо перший напрямок стосується проєктування «заліза», то другий – його роботи в реальному часі. Це перехід від статичних механічних систем до адаптивних кіберфізичних систем. Сучасні системи управління вже не просто реагують на дії водія, а передбачають майбутній стан автомобіля. Найбільш значущою технологією тут є прогнозоване круїз-контроль.

Економія енергії. Завдяки використанню топографічних карт та машинного навчання, контролер попередньо «знає» про майбутній підйом чи спуск. Він оптимізує швидкість і перемикає передачі, щоб уникнути неефективних режимів роботи двигуна. Дослідження підтверджують, що це зменшує споживання енергії додатково на 2.6 %–3.4 %, що є значною економією для великого парку.

Термальний менеджмент. Прикладна механіка вчиться «думати». Сучасні моделі прогнозують теплове навантаження на батарею та електродвигун, активуючи охолодження заздалегідь, що підвищує ресурс компонентів.

Напрямок 3. Системна логістика (Техніка + Бізнес-процеси). Найвищий рівень інтеграції – це об'єднання інженерних знань про машину з операційним менеджментом підприємства. Дослідження показують, що найбільший ефект досягається, коли технічні характеристики ТЗ підлаштовуються під бізнес-завдання у реальному часі.

Маршрутизація з урахуванням типу приводу. Алгоритми підбирають, який саме автомобіль (електричний, дизельний, гібрид) направити на маршрут, виходячи з наявності зарядних станцій, ваги вантажу та тривалості рейсу.

Оптимізація парку. Використання систем TMS (Transportation Management System) дозволяє

аналізувати ККД кожного автомобіля в парку. Якщо одна машина показує аномальну витрату палива, алгоритми прикладної механіки у поєднанні з телеметрією можуть діагностувати підвищений опір коченню або проблеми з аеродинамікою ще до того, як це помітить водій.

Нижче наведено математичне описання розробки та застосування інтегрованих методів прикладної механіки і сучасних технологій для оптимізації роботи АТП. Опис базується на трьох рівнях інтеграції: проєктування (цифрові двійники), управління (прогнозований круїз-контроль) та системна логістика (розподіл парку).

1. Рівень проєктування: оптимізація конструкції ТЗ під заданий маршрут.

1.1. Цільова функція оптимізації. Для конкретного ТЗ або парку машин, що працюють на маршруті M , вводимо комплексний критерій вартості володіння (TCO – Total Cost of Ownership) за період T :

$$\min_p TCO(T) = C_{cap}(p) + \int_0^T [C_{fuel}(p, t) + C_{maint}(p, t) + C_{downtime}(p, t)] dt, \quad (1)$$

де: $p \in \mathbb{R}^n$ – вектор параметрів конструкції (передаточні числа трансмісії, жорсткість підвіски, аеродинамічний коефіцієнт, ємність батареї тощо); C_{cap} – капітальні витрати (залежать від p); C_{fuel} – миттєві витрати на енергію (паливо/електроенергію); C_{maint} – витрати на техобслуговування та ремонт; $C_{downtime}$ – втрати від простоїв.

1.2. Модель руху (прикладна механіка). Рівняння поздовжньої динаміки ТЗ:

$$m_{eff} \dot{v}(t) = F_{trac}(t) - F_{grade}(s(t)) - F_{roll} - F_{aero}(v(t)), \quad (2)$$

де: $m_{eff} = m_{veh} + m_{pay} + \frac{I_w}{r_w^2} + \frac{I_{drv} \gamma^2}{r_w^2}$ – ефективна маса

(з урахуванням обертових мас); $F_{trac}(t) = \frac{T_e(t) \gamma_{drv}}{r_w}$ –

сила тяги; $F_{grade}(s) = m_{veh} g \sin \theta(s)$ – складова від ухилу дороги; $F_{roll} = m_{veh} g f_r \cos \theta(s)$ – сила опору коченню;

$F_{aero}(v) = \frac{1}{2} \rho C_d A_f v^2$ – аеродинамічний опір.

1.3. Цифровий двійник + машинне навчання. Для швидкого пошуку p^* використовується вкладена оптимізація (наприклад, багатопаровий генетичний алгоритм). Нехай $\mathcal{M}(p)$ – симуляційна модель ТЗ. Тоді:

$$p^* = \arg \min_p TCO(\mathcal{M}(p), \text{маршрут } M). \quad (3)$$

Критерій збіжності (залишкова похибка цільової функції):

$$\varepsilon = \frac{|TCO(p_{k+1}) - TCO(p_k)|}{TCO(p_k)} \leq \varepsilon_{tol}. \quad (4)$$

Результат: для кожного ТЗ або типу маршруту отримуємо унікальний набір p^* . У дослідженнях ESCALATE досягнуто похибки за потужністю $\delta P \leq 0.2\%$.

2. Рівень управління: прогнозований круїз-контроль (PCC)

2.1. Задача оптимального керування швидкістю. Для заданого маршруту з відомою функцією висоти $h(s)$ (топографічні дані) та обмеженнями швидкості $v_{\min} \leq v(s) \leq v_{\max}$, розв'язуємо задачу:

$$\min_{v(s)} \int_0^s \frac{P_{req}(s, v, \dot{v})}{v(s)} ds \quad (\text{мінімізація енергії на шляху}) \quad (5)$$

де P_{req} – потужність на колесах:

$$P_{req}(s) = v(s) [F_{grade}(s) + F_{roll}(s) + F_{aero}(v(s)) + m_{eff} \dot{v}(s)]. \quad (6)$$

2.2. Динамічне програмування або модельно-прогнозуюче керування (MPC). На практиці використовується MPC. На кожному кроці k розв'язується скінченна задача:

$$\min_{u_{kk+N-1}} \sum_{i=0}^{N-1} [\alpha P_{req}(s_{k+i}, v_{k+i}, u_i) + \beta (v_{k+i} - v_{ref})^2 + \gamma |u_{i+1} - u_i|] \quad (7)$$

за умов:

$$v_{k+i+1} = v_{k+i} + \Delta t \frac{F_{trac}(u_i) - F_{res}(s_{k+i}, v_{k+i})}{m_{eff}} \quad (8)$$

$u_{\min} \leq u_i \leq u_{\max}$ (керування: крутний момент або гальмівне зусилля).

Результат: додаткова економія енергії $\Delta E = 2.6\% - 3.4\%$ відносно звичайного круїз-контролю.

2.3. Прогнозування теплового стану батареї. Для електромобілів додається тепла модель:

$$C_{th} \frac{dT_{batt}}{dt} = P_{loss}(I, T_{batt}) - h_{cool} A (T_{batt} - T_{amb}) + P_{aux}. \quad (9)$$

Алгоритм завчасно знижує навантаження, якщо прогнозується перегрів: $T_{batt} > T_{\max}$.

3. Рівень системної логістики: розподіл парку ТЗ.

3.1. Задача призначення ТЗ на маршрути. Маємо N транспортних засобів (кожен зі своїм вектором p_j) та K маршрутів (кожен із профілем $h_k(s)$, обмеженнями та графіком). Оптиміальне призначення:

$$\max_{x_{jk} \in \{0,1\}} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K x_{jk} \cdot [R_k - TCO_{jk}(T)] \quad (10)$$

за умов:

$\sum_k x_{jk} \leq 1$ (один ТЗ максимум на один маршрут одночасно),

$\sum_j x_{jk} = 1$ (на маршрут призначається один ТЗ).

Тут $TCO_{jk}(T)$ – розрахована вартість володіння ТЗ j на маршруті k .

3.2. Динамічне перепризначення. Коефіцієнт ефективності використання парку:

$$\eta_{fleet} = \frac{\sum_j \sum_k x_{jk} \cdot U_{jk}}{\sum_j U_{j,max}}, \quad (11)$$

де U_{jk} – фактичний корисний виробіток (тонно-кілометри, години), а $U_{j,max}$ – максимально можливий. Інтеграція з TMS дозволяє перепризначати ТЗ при зміні умов (затори, погода, поломки) з періодом $\Delta t_{reopt} = 15-30$ хв.

4. Предиктивне техобслуговування (на основі втоми матеріалів).

Накопичене пошкодження за методом Палмгренна-Майнера:

$$D(t) = \sum_i \frac{n_i(\sigma_i)}{N_f(\sigma_i)}, \quad (12)$$

де: n_i – кількість циклів навантаження з амплітудою σ_i (отримано з телеметрії), $N_f(\sigma_i) = C \cdot \sigma_i^{-m}$ – крива втоми (Веллера).

Прогноз залишкового ресурсу до руйнування: знаходимо t_{rem} таке, що $D(t_{rem}) = 1$. Планове ТО призначається при $D(t) \geq 0.8$.

5. Узагальнений алгоритм застосування (покроково).

1. Збір даних для кожного ТЗ і маршруту реєструємо $v(t)$, $s(t)$, $T_e(t)$, $\theta(s)$, $T_{batt}(t)$.

2. Ідентифікація параметрів методом найменших квадратів уточнюємо m_{eff} , C_d , f_r , η_{drv} для конкретної машини.

3. Запускаємо вкладену оптимізацію (генетичний алгоритм + САЕ-симуляцію) для типових маршрутів.

4. Завантажуємо топографічну карту маршруту, налаштовуємо MPC з горизонтом N (типово 1–5 км).

5. Моніторинг та адаптація. Кожні Δt оновлюємо $\Delta(t)$, перераховуємо призначення x_{jk} та коригуємо параметри.

Це формульне ядро може бути безпосередньо реалізоване у вигляді програмного модуля для АТП, що працює на стику САЕ-симуляцій, MPC-контролера та системи телеметрії.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Аналіз змодельованих процесів засвідчив, що врахування реальних механічних навантажень дозволяє точніше прогнозувати термін служби вузлів.

Впровадження інтегрованих технологій сприяє прозорості всіх етапів експлуатації рухомого складу. Виявлено, що цифрові двійники механічних систем є потужним інструментом для тестування різних сценаріїв роботи без ризику для реальної техніки.

Дискусійним залишається питання вартості початкового впровадження складних систем моніторингу на малих підприємствах. Проте довгострокові переваги у вигляді зниження витрат на паливо та ремонти перебивають капітальні вкладення.

Результати дослідження вказують на необхідність створення уніфікованих програмних інтерфейсів для об'єднання різних засобів діагностики.

Отримані результати підтверджують гіпотезу про високу ефективність поєднання інженерних розрахунків із цифровими інструментами управління. Подальший розвиток наряду може бути пов'язаний з використанням штучного інтелекту для автоматичної інтерпретації механічних сигналів.

ВИСНОВКИ

Інтеграція новітніх технологій забезпечує якісно новий рівень контролю за станом складних технічних систем. Розроблена структура взаємодії рівнів підприємства створює надійну базу для впровадження принципів індустрії 4.0. Дослідження підтвердило фундаментальну роль прикладної механіки у процесах сучасної модернізації транспортного сектору

Встановлено, що використання математичних моделей зносу в реальному часі суттєво підвищує точність планування сервісних робіт.

Класифікація технологій дозволяє підприємствам обирати найбільш релевантні інструменти оптимізації залежно від їхньої специфіки. Запропоноване формульне описання дає можливість формалізувати цілі управління та оцінювати їх досягнення.

Зменшення експлуатаційних витрат безпосередньо корелює з якістю обробки даних про механічний стан машин.

Оптимізація роботи автотранспортних підприємств може базуватися на об'єктивних фізичних показниках, а не лише на статистичних середніх. Наукова новизна роботи полягає у синтезі класичних методів механіки та алгоритмів цифрової трансформації.

Результати можуть бути використані для розробки нових стандартів обслуговування техніки. Дослідження відкриває перспективи для подальшої автоматизації логістичних центрів. Впровадження запропонованих рішень сприятиме підвищенню загальної стійкості транспортної системи України.

REFERENCES

- [1] Ulvi, H., Yerlikaya, M. A., & Yildiz, K. (2025). An innovative mathematical model for integrated traffic flow optimization in organized industrial zones. *Scientific Reports*, 15, 29427. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14761-y>
- [2] Camaj, J., Bulková, Z., & Gašparík, J. (2025). Material flow optimization as a tool for improving logistics processes in the company. *Applied Sciences*, 15(6), 3116. <https://doi.org/10.3390/app15063116>
- [3] Yu, Z., & Li, B. (2025). Optimization of traffic flow operation mode in railway hubs. *Transportation Research Record*, 2679(11), 1097–1118. <https://doi.org/10.1177/03611981251351882>
- [4] Vovk, Y., Aulin, V., Vovk, I., & Romaniuk, S. (2025). Electric vehicle charging infrastructure optimization on international transport corridors: Economic analysis and EU regulatory alignment in Ukraine. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 10(2), 6–28. <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2025.10-2.1>
- [5] Viniukov-Proshchenko, A. S., Maksymov, S., Panasiuk, I., & Petrenko, O. (2025). Public-private partnership mechanism application for transport-logistics infrastructure facilities development. *E3S Web of Conferences*, 654, 03005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202565403005>
- [6] Fomin, O., Sulym, A., Kulbovskiy, I., Khozia, P., & Ishchenko, V. (2018). Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(1 (92)), 63–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>
- [7] Sulym, A. O., Fomin, O. V., Khozia, P. O., Mastepan, A. G. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock (2018) *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2018 (5), pp. 79–87. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
- [8] Svichynska, O. (2025). The formation of the international transportation management strategy based on the regularities of the distribution of logistics indicators. *Advances in Mechanical Engineering and Transport*, 1(24), 392–398. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1746>
- [9] Chernetskaya-Beletskaya, N., Baranov, I., Miroshnykova, M., & Berezhna, S. (2024). Optimization of passenger transport based on the organization of suburban passenger flow. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 18(2), 183–189. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-18-2-183-189>
- [10] Danyliuk, A., & Mulyarevych, O. (2024). Features of the application of traffic flow management methods and tools. *ACPS*, 9(1), 68–74. <https://doi.org/10.23939/acps2024.01.068>
- [11] Kulikov, A. V., Efimov, M. A., Halbaev, D., & Soltanov, Y. (2022). Economically justified optimization of flow processes in the organization of transportation. *Actual Directions of Scientific Researches of the XXI Century*, 10(1), 57–74. <https://doi.org/10.34220/2308-8877-2022-10-1-57-74>
- [12] Eppenberger, N., & Richter, M. A. (2021). The opportunity of shared autonomous vehicles to improve spatial equity in accessibility and socio-economic developments in European urban areas. *European Transport Research Review*, 13(1), 32. <https://doi.org/10.1186/s12544-021-00484-4>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ulvi, H., Yerlikaya, M. A., & Yildiz, K. (2025). An innovative mathematical model for integrated traffic flow optimization in organized industrial zones. *Scientific Reports*, 15, 29427. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14761-y>
- [2] Camaj, J., Bulková, Z., & Gašparik, J. (2025). Material flow optimization as a tool for improving logistics processes in the company. *Applied Sciences*, 15(6), 3116. <https://doi.org/10.3390/app15063116>
- [3] Yu, Z., & Li, B. (2025). Optimization of traffic flow operation mode in railway hubs. *Transportation Research Record*, 2679(11), 1097–1118. <https://doi.org/10.1177/03611981251351882>
- [4] Vovk, Y., Aulin, V., Vovk, I., & Romaniuk, S. (2025). Electric vehicle charging infrastructure optimization on international transport corridors: Economic analysis and EU regulatory alignment in Ukraine. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 10(2), 6–28. <https://doi.org/10.14254/jstdl.2025.10-2.1>
- [5] Viniukov-Proshchenko, A. S., Maksymov, S., Panasiuk, I., & Petrenko, O. (2025). Public-private partnership mechanism application for transport-logistics infrastructure facilities development. *E3S Web of Conferences*, 654, 03005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202565403005>
- [6] Fomin, O., Sulym, A., Kulbovskyi, I., Khozia, P., & Ishchenko, V. (2018). Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(1 (92)), 63–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>
- [7] Sulym, A.O., Fomin, O.V., Khozia, P.O., Mastepan, A.G. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2018 (5), pp. 79–87. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
- [8] Svichynska, O. (2025). The formation of the international transportation management strategy based on the regularities of the distribution of logistics indicators. *Advances in Mechanical Engineering and Transport*, 1(24), 392–398. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1746>
- [9] Chernetskaya-Beletskaya, N., Baranov, I., Miroshnykova, M., & Berezha, S. (2024). Optimization of passenger transport based on the organization of suburban passenger flow. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 18(2), 183–189. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-18-2-183-189>
- [10] Danyliuk, A., & Mulyarevych, O. (2024). Features of the application of traffic flow management methods and tools. *ACPS*, 9(1), 68–74. <https://doi.org/10.23939/acps2024.01.068>
- [11] Kulikov, A. V., Efimov, M. A., Halbaev, D., & Soltanov, Y. (2022). Economically justified optimization of flow processes in the organization of transportation. *Actual Directions of Scientific Researches of the XXI Century*, 10(1), 57–74. <https://doi.org/10.34220/2308-8877-2022-10-1-57-74>
- [12] Eppenberger, N., & Richter, M. A. (2021). The opportunity of shared autonomous vehicles to improve spatial equity in accessibility and socio-economic developments in European urban areas. *European Transport Research Review*, 13(1), 32. <https://doi.org/10.1186/s12544-021-00484-4>

© Іванченко Д. А., Фоміна А. М., Ганжесв Д. І.

Дата першого надходження статті до видання: 14.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)