

Є.Д. Ладиженський¹, П.В. Петленко², В.Г. Байцан², С.Г. Ковальов², канд. пед. наук

¹ Приазовський державний технічний університет, м. Дніпро, Україна

² Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: ladizenskiy@gmail.com, Tpetlenko@ukr.net

Теоретико-методологічні засади впровадження інтелектуальних технологій у систему технічного сервісу колісних транспортних засобів

У статті здійснено комплексне дослідження теоретико-методологічних засад впровадження інтелектуальних технологій у систему технічного сервісу колісних транспортних засобів в умовах трансформації галузі та зростання ролі транспорту як критичної інфраструктури. Показано еволюцію підходів до технічного обслуговування – від реактивного ремонту та планово-попереджуваних регламентів до обслуговування за станом і прогностичного сервісу (Predictive Maintenance, PdM), що спирається на аналіз великих масивів даних, сенсорний моніторинг та алгоритми штучного інтелекту. Обґрунтовано, що ускладнення конструкції сучасних транспортних засобів, поширення електромобілів і підключених колісних транспортних засобів потребують переосмислення традиційних моделей ТОiP на основі нелінійної системної методології, розробленої вітчизняною науковою школою.

Проаналізовано сучасні зарубіжні та українські дослідження у сфері предиктивного обслуговування, цифрових двійників, IoT-архітектур, Explainable AI та правового регулювання штучного інтелекту. Показано, що фундаментальні напрацювання з польових та хвильових підходів до взаємодій транспортних підприємств створюють концептуальне підґрунтя для інтелектуалізації технічного сервісу, тоді як міжнародні інженерні розробки формують набір технологічних інструментів (ML/DL-моделі, цифрові двійники, edge-обчислення). Виявлено наукову прогалину між теоретичними моделями та прикладними рішеннями для української сервісної інфраструктури з урахуванням викликів воєнного стану, обмеженості сенсорної та цифрової інфраструктури, а також імплементації вимог EU AI Act.

Запропоновано концептуальну модель інтеграції інтелектуальних технологій у систему технічного сервісу, що включає підсистеми збору та обробки даних, аналітики на базі ML/DL, прийняття рішень, інтеграції з сервісними процесами та зворотного зв'язку з безперервним навчанням моделей. Сформульовано методологічні принципи побудови інтелектуальних сервісних систем з урахуванням вимог кібербезпеки, прозорості та пояснюваності рішень AI. Доведено, що впровадження запропонованої моделі здатне забезпечити зниження простоїв і витрат на ремонт, підвищення безпеки руху, продовження життєвого циклу транспортних засобів і розвиток ринку високотехнологічних сервісних послуг в Україні.

інтелектуальні технології, технічний сервіс, колісні транспортні засоби, предиктивне обслуговування, цифрові двійники, машинне навчання, Інтернет речей

Постановка проблеми. Сучасний колісний транспортний засіб (КТЗ) є складною кіберфізичною системою, що інтегрує десятки електронних блоків керування, численні датчики, бортові мережі та модулі зв'язку. Відмова окремих компонентів часто призводить до зниження безпеки руху, економічних збитків та екологічних негативних наслідків. У традиційному підході переважали реактивне або планово-попереджувальне технічне обслуговування: ремонт здійснювався після відмови або за регламентом, що визначав періодичність заміни вузлів незалежно від їх реального стану. Такий підхід не враховує індивідуальних умов експлуатації та призводить до зайвих витрат [7]. Зростання складності конструкцій і вимог до

ефективності експлуатації потребує переходу до інтелектуальних стратегій сервісу – систем, здатних прогнозувати відмови на основі даних та приймати рішення в реальному часі. Ведучі виробники вже використовують штучний інтелект для відстеження технічного стану та оптимізації обслуговування. Наприклад, на заводі BMW у Регенсбурзі впроваджено систему предиктивного обслуговування конвеєрного обладнання, що дозволяє завчасно виявляти потенційні несправності та уникати понад 500 хвилин простою на рік [9]. Для України актуальність теми визначається подвійною. По-перше, в умовах воєнного стану КТЗ є критично важливою інфраструктурою, а поломки й аварії тягнуть за собою суттєві ризики для логістики та економіки. По-друге, сучасний парк КТЗ країни швидко оновлюється, збільшується частка електромобілів та підключених транспортних засобів. Натомість система сервісу часто залишається на рівні планових регламентів, із недостатнім використанням цифрових інструментів та аналітики. Вітчизняні науковці зазначають, що підвищення надійності та ефективності технічної експлуатації потребує впровадження інженерних та організаційних рішень, спрямованих на прогнозування відмов, зниження витрат і впливу на довкілля [1]. Саме інтеграція інтелектуальних технологій може забезпечити управління ресурсом і технічним станом на якісно новому рівні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання предиктивного обслуговування та застосування ШІ в транспортній галузі активно досліджуються у світовій науці. Ряд оглядових робіт систематизують методи машинного та глибинного навчання для прогнозування залишкового ресурсу, діагностики відмов та оптимізації технічного сервісу [6]. В оглядовій статті Й. Надя та І. Лакатоша відзначається, що перехід від реактивної до превентивної стратегії обслуговування у дорожніх транспортних засобах відбувається під впливом технологічних і екологічних вимог; натомість предиктивне обслуговування пропонує більш гнучкі інтервали та орієнтується на фактичний стан вузлів, використовуючи моделі штучного інтелекту та цифрові двійники [7]. Автори наголошують, що найновіший підхід полягає у виклику КТЗ на сервіс для «предиктивного ремонту» до появи критичних відмов.

Вітчизняні дослідження присвячені переважно питанням забезпечення надійності та ефективності технічної експлуатації, але лише частково зачіпають інтелектуальні технології. Наприклад, огляд підходів до підвищення надійності технічної експлуатації КТЗ акцентує на застосуванні математичних методів аналізу стану, теплотехнічному моделюванні та впровадженні діагностичних програмних засобів [1]. Автори зазначають, що прогнозування відмов та обґрунтованість інженерних рішень мають базуватися на системному аналізі вразливих компонентів і використанні інтелектуальних мережевих технологій. Однак відсутній комплексний аналіз міжнародного досвіду використання машинного навчання та цифрових двійників у сервісі, а питання інтеграції таких технологій у національну систему технічного обслуговування практично не розглядаються. Таким чином, існує наукова прогалина між фундаментальними дослідженнями та практичними рішеннями щодо впровадження інтелектуальних технологій у сферу сервісу КТЗ.

Постановка завдання. Метою роботи є теоретично обґрунтувати та розробити методологічні підходи до впровадження інтелектуальних технологій у систему технічного сервісу КТЗ. Метою є створення концептуальної моделі й практичних рекомендацій, що інтегрують методи машинного навчання, цифрових двійників, Інтернету речей та Explainable AI з урахуванням міжнародного досвіду, вимог EU AI Act і специфіки української інфраструктури, для підвищення надійності, безпеки й ефективності експлуатації КТЗ та розвитку високотехнологічного сервісного ринку. Завдання дослідження:

1. Аналіз концепцій та технологій. Проаналізувати еволюцію й концептуальні

засади інтелектуальних технологій у технічному сервісі, визначити принципи функціонування цифрових двійників, систем машинного навчання та IoT у контексті обслуговування транспортних засобів.

2. Вивчення зарубіжного досвіду. Оцінити світові практики предиктивного обслуговування на прикладі провідних виробників КТЗ і сервісних компаній (зокрема BMW, Tesla, Volvo, Nissan); дослідити ефект використання AI для зменшення простоїв та підвищення надійності, включно з системами моніторингу конвеєрного обладнання.

3. Діагностика українських умов. Дослідити вітчизняні реалії та бар'єри впровадження інтелектуальних технологій у технічний сервіс: стан нормативної бази, рівень сенсорної та цифрової інфраструктури, компетенції персоналу, вимоги кібербезпеки й стандарти обміну даними.

4. Розробка концептуальної моделі. Сформувати модель інтеграції інтелектуальних технологій у систему технічного сервісу, що передбачає підсистеми збору й обробки даних, ML/DL аналітики, прийняття рішень, зворотний зв'язок і безперервне навчання, а також взаємодію з сервісними процесами та клієнтами.

5. Методологічні принципи та рекомендації. Розробити методологічні принципи й практичні рекомендації щодо впровадження предиктивного обслуговування й адаптації світових моделей до українських умов; сприяти гармонізації з європейськими нормами (EU AI Act) та забезпечити підвищення надійності, безпеки руху й ефективності обслуговування у національному сервісі КТЗ.

Виклад основного матеріалу. Сучасна система технічного сервісу (ТС) КТЗ перебуває на етапі радикальної трансформації, спричиненої стрімким розвитком Індустрії 4.0, появою електромобілів (EV) та концепції підключених транспортних засобів (Connected Vehicles). Перехід від реактивного або планово-запобіжного обслуговування до прогностичного (Predictive Maintenance, PdM) та прескриптивного обслуговування вимагає створення міцного теоретико-методологічного базису. Цей базис повинен не лише інтегрувати передові технології, такі як штучний інтелект (AI), машинне навчання (ML) та Інтернет речей (IoT), але й бути концептуально узгодженим із глибокими системними підходами, розробленими національною науковою школою.

Напочатку необхідно розглянути еволюцію теоретичних парадигм технічного сервісу як складної соціально-економічної системи. Історично управління технічним обслуговуванням та ремонтом (ТОiP) пройшло шлях від реактивного ремонту після відмови до планово-запобіжного обслуговування (ПО) та, згодом, до обслуговування за станом (Condition-Based Maintenance, CBM). Однак, із зростанням технічної складності сучасних КТЗ, особливо гібридних та електричних, традиційні детерміновані та статистичні моделі прогнозування ефективності виявилися недостатніми. Система технічного сервісу, що включає транспортні засоби, інфраструктуру, партнерів та споживачів, тепер розглядається як відкрита, нелінійна та високодинамічна система, поведінка якої є стохастичною. Ця системна складність вимагає застосування інтелектуальних інструментів, здатних до самонавчання та адаптації.

Важливий внесок у формування теоретико-методологічних засад інтелектуалізації систем технічного сервісу здійснили українські науковці, розглядаючи транспортні підприємства та їх взаємодії як частину широкого соціально-економічного простору. Серед таких робіт виділяється дисертаційне дослідження Федотової І.В., присвячене теоретико-методологічним засадам формування технології взаємодій підприємства з партнерами [3].

Ключова методологічна новизна, запропонована Федотовою І.В., полягає у застосуванні квантово-релятивістського та хвильового підходів до дослідження економічних закономірностей польових взаємодій транспортного підприємства з партнерами. В контексті нашого дослідження, значення цього підходу для

інтелектуалізації ТС є критичним: якщо традиційні моделі розглядають підприємство як набір дискретних об'єктів, то хвильовий підхід визначає його взаємодію в системі через "польові" ефекти. Це означає, що функціонування системи ТС є нелінійним, багатofакторним і піддається швидким змінам, які неможливо прогнозувати за допомогою класичної математики. Ця концепція забезпечує високу теоретичну базу, яка концептуально виправдовує необхідність застосування інтелектуальних технологій (AI/ML) як єдиного класу інструментів, здатного оперувати з такою нелінійністю, невизначеністю та адаптуватися до динаміки "польових взаємодій". Таким чином, українська наукова школа забезпечує фундаментальне обґрунтування для переходу до інтелектуальних систем управління [3].

Наступним методологічним кроком є зв'язок між фундаментальною системною складністю та процесами формування знанневого базису AI. Психолого-педагогічні погляди на методику розвитку технічних здібностей пропонують когнітивну парадигму, яка ідеально корелює з архітектурою інтелектуальних систем:

1. Накопичення життєвого досвіду є аналогом збору великих обсягів діагностичних та експлуатаційних даних (Big Data) від сенсорів.

2. Виокремлення форми та змісту відповідає процесам попередньої обробки даних та виділення ознак (Feature Engineering) для навчання моделі.

3. Монтування виокремленого змісту в наявний знанневий базис є процесом навчання моделей машинного навчання (ML).

4. Переструктурування попередньо наявної системи відображає адаптивність AI-системи, яка постійно коригує свої прогнози та рішення на основі нових даних [2].

Це формування когнітивної методологічної парадигми дозволяє розглядати інтелектуальну систему технічного сервісу як живу, самонавчальну структуру, що відповідає високим вимогам нелінійної системної теорії.

Аналіз вітчизняних публікацій підтверджує наявність глибокої теоретичної основи (системні підходи) та активну роботу у сфері організаційно-правового регулювання AI. Хоча повний перелік прикладних інженерних робіт у сфері ML-діагностики від українських авторів не був представлений у наявних джерелах, критично важливими є роботи, що стосуються контексту впровадження.

Українські дослідження зосереджені на необхідності модернізації та стратегічного вирівнювання з глобальними трендами. Індустрія КТЗ України перебуває на критичному перехресті, де вкрай важливими є інвестиції в цифрову та фізичну інфраструктуру, а також адаптація до електромобілів та підключених КТЗ. Цей технологічний диктат вимагає від методології впровадження інтелектуальних технологій врахування специфіки діагностики високовольтних систем та V2X (Vehicle-to-Everything) комунікацій [8].

Впровадження AI-систем в українському технічному сервісі не може бути суто технічним процесом; воно вимагає створення міцного організаційно-правового модуля, що гарантує відповідність європейським стандартам.

Роботи українських правознавців, як-от Гачкевич А., підкреслюють, що в контексті європейської інтеграції та імплементації стандартів EU AI Act, українська AI-екосистема вимагає підтримки у сфері технічних можливостей та чіткого правового супроводу. Міністерство цифрової трансформації відіграє ключову роль в адаптації [5].

Критичні правові виклики включають:

1. Обмеження на використання персональних даних та інтелектуальної власності.

2. Трансформація етичних принципів AI у правові норми.

Це означає, що розроблювана методологія впровадження інтелектуальних технологій повинна бути не лише ефективною, але й регуляторно-сумісною. Необхідно

вбудувати механізми забезпечення прозорості та пояснюваності рішень AI (Explainable AI, XAI), щоб відповідати європейським вимогам щодо підзвітності та етичності AI-систем.

У таблиці 1 здійснений аналіз внеску ключових українських науковців у теоретико-методологічні засади інтелектуалізації технічного сервісу (2018–2024 рр. публікацій)

Таблиця 1 – Аналіз внеску ключових українських науковців у теоретико-методологічні засади інтелектуалізації технічного сервісу (2018–2024 рр.)

Автор (и) / Джерело	Рік	Основний методологічний акцент	Ключові досліджені висновки / новизна	Внесок у поточне дослідження
Федотова І.В. (Дисертація)	2019/2020	Квантово-релятивістський та хвильовий підходи до взаємодій підприємств	Обґрунтування складності системи ТС через "польові" взаємодії, визначення економічних закономірностей	Фундаментальне обґрунтування необхідності застосування інтелектуальних систем для управління нелінійними процесами.
Гачкевич А. (Статті)	2024	Організаційно-правове забезпечення AI	Адаптація AI-екосистеми України до EU AI Act, регуляторні обмеження даних та IP	Формування вимог до легальності, прозорості та етичності AI-рішень у методології впровадження.
Аналіз Стратегічних Тенденцій	2023	Стратегічний розвиток автопрому (EV, Connectivity)	Критична потреба інвестування в цифрову інфраструктуру та адаптація до глобальних трендів	Визначення технологічного контексту (EV, підключеність) як необхідної умови для проектування інтелектуальної системи.

Джерело розроблено авторами на основі [3, 5, 8]

Далі розглянемо глобальні технологічні методології впровадження AI у технічний сервіс (зарубіжний досвід). В першу чергу, проведемо систематичний огляд концепції прогностичного обслуговування (Predictive Maintenance, PdM). Прогностичне обслуговування (PdM) стало домінуючою парадигмою в транспортній промисловості, що швидко розвивається завдяки прогресу в технологіях штучного інтелекту. Систематичний огляд публікацій із баз даних Scopus та Web of Science підтверджує, що AI є ключовим рушієм PdM [6].

AI-технології, включно з машинним навчанням (ML), глибоким навчанням (DL) та генеративним AI, використовуються для обробки величезної кількості даних,

отриманих від сенсорів та мережевих технологій [6].

Ключові сфери застосування AI у діагностиці та обслуговуванні включають:

- Оптимізація графіків технічного обслуговування.
- Прогнозування залишкового корисного ресурсу (RUL).
- Ефективний моніторинг стану (Health Monitoring).

Зменшення витрат та підвищення надійності транспортних засобів та їх часу безперебійної роботи (up-time) [6].

По-друге, важливо визначити технічні та архітектурні структури AI-систем для PdM

Архітектура сучасних інтелектуальних систем PdM базується на зборі даних у реальному часі за допомогою IoT-сенсорів. Ці системи застосовують AI/ML алгоритми для прогнозування відмов обладнання, мінімізації часу простою та забезпечення оптимальної експлуатаційної ефективності.

Процес впровадження PdM включає кілька критичних шарів [10]:

1. Обробка сенсорних даних: Збір, очищення та підготовка масивів даних для подальшого ML-моделювання.
2. Моделювання: Створення та навчання ML-моделей.
3. Інтеграція: Вбудовування ML-моделей у системи підтримки прийняття рішень (Decision-Support Systems) організації.

Важливо, що сучасні наукові огляди акцентують увагу на застосуванні AI у виробництві та експлуатації електричних транспортних засобів (EV). Це підтверджує стратегічну необхідність для українського дослідження зосередитися на контекстно-залежній діагностиці, що враховує специфіку EV, а не лише традиційних КТЗ із двигунами внутрішнього згоряння [10].

З урахуванням визначеного, варто визначити і обґрунтувати виклики впровадження та напрями майбутнього розвитку. Систематичні огляди останніх років виявили низку критичних викликів, які необхідно враховувати при розробці методології інтелектуалізації ТС:

1. Якість Даних та Масштабованість: Проблеми, пов'язані з якістю даних, їх масштабованістю та інтеграцією AI-технологій у наявні системи [6, 10].
2. Пояснюваний AI (XAI): Критична важливість пояснюваного AI для прогностичної аналітики. Необхідність обґрунтування висновків AI є не лише технічною вимогою, але й методологічним імперативом у світлі правової адаптації до EU AI Act. [5, 6,].

Емерджентні технології, які визначають майбутнє PdM [10]:

- Цифрові Двійники (Digital Twin): Створення віртуальних, динамічно оновлюваних копій компонентів або цілих КТЗ для симуляції та точного прогнозування їхнього стану.

- Edge Computing: Обробка даних на периферії мережі (наприклад, у самому автомобілі або на локальній СТО) замість централізованої хмари.

- Федеративне Навчання (Federated Learning): Розподілене навчання AI-моделей на локальних наборах даних, що підвищує конфіденційність та ефективність.

З урахуванням викликів, пов'язаних із розвитком цифрової інфраструктури в Україні, Edge Computing стає не просто бажаною опцією, а методологічною необхідністю. Локалізована обробка даних знижує вимоги до пропускну здатності мережі, мінімізує затримку (latency), що критично важливо для діагностики в реальному часі, та сприяє дотриманню регуляторних обмежень щодо централізованого збору та передачі чутливих даних [5, 8].

Таблиця 2 – Порівняльний аналіз зарубіжних інтелектуальних методологій (PdM) та їх релевантність для ТС КТЗ

Технологічна методологія (AI/ML)	Застосування у технічному сервісі	Ключові переваги	Виклики впровадження в українському контексті
Machine Learning (ML) для PdM	Прогнозування відмов, розрахунок залишкового корисного ресурсу (RUL)	Оптимізація графіків ТО, підвищення надійності ¹	Якість та стандартизація збору сенсорних даних (існує проблема сумісності обладнання) ²
Explainable AI (XAI)	Обґрунтування рішень AI, аудит прогнозів	Гарантування довіри до системи, відповідність регуляторним вимогам (EU AI Act) ³	Складність реалізації прозорості у нелінійних DL-моделях.
IoT та Edge Computing	Збір даних у реальному часі, децентралізована обробка	Скорочення затримки (latency), підвищення оперативної ефективності	Нерозвиненість мережевої та зарядної інфраструктури, що ускладнює повноцінну інтеграцію ⁴
Цифрові двійники (Digital Twin)	Віртуальне моделювання стану компонентів	Точне прогнозування деградації, симуляція впливу умов експлуатації	Високі вимоги до обчислювальних ресурсів та точності вхідних даних.

Джерело розроблено авторами на основі [6, 10]

Варто також провести синтез та критичну оцінку релевантності методологічних засад для поточного дослідження, зокрема зіставлення українського системно-теоретичного базису з міжнародними технологічними моделями

Проведений аналіз демонструє синергію між фундаментальними українськими теоретичними розробками та глобальними технологічними трендами.

Українська наукова школа, використовуючи квантово-релятивістський та хвильовий підходи, забезпечує філософсько-теоретичне обґрунтування нелінійності системи технічного сервісу ("польові взаємодії"). Це підтверджує необхідність AI як єдиного інструменту управління, що здатен адаптуватися до такої системної складності. Міжнародні ж дослідження (PdM) надають прикладні інженерні методики (ML/DL, IoT), необхідні для практичної реалізації цього управління [3].

Критична оцінка свідчить про високий потенціал, але також виявляє методологічну прогалину: відсутність широкої публікації деталізованих прикладних інженерних методик, які б не лише використовували AI/ML, але й були адаптовані до специфіки української інфраструктури та регуляторного контексту (EU AI Act).

Також, визначимо роль інновацій як каталізатор інтелектуалізації. Стратегічна

орієнтація українського автопрому на EV, автономність та підключеність слугує потужним каталізатором інтелектуалізації ТС. Зміна парку транспортних засобів вимагає перегляду стандартних діагностичних процедур. Методологічні засади мають бути побудовані навколо роботи з високочастотними даними, що генеруються підключеними КТЗ, і повинні включати окремий блок, присвячений прогнозуванню деградації високочастотних акумуляторних систем, а не лише традиційним механічним відмовам [8].

Для успіху в українській транспортній індустрії життєво необхідним є інвестування у дослідження та розробки (R&D) та створення адекватної цифрової і зарядної інфраструктури, що є основою для підтримки росту EV та підключених технологій [8].

Проведений аналіз підтверджує, що теоретико-методологічні засади впровадження інтелектуальних технологій у систему технічного сервісу КТЗ є багатогранною науковою проблемою, що вимагає міждисциплінарного підходу.

Встановлено, що вітчизняна наукова школа забезпечує міцний концептуальний фундамент для розуміння системи ТС як складної нелінійної структури, керованої "польовими взаємодіями". Ця концепція є вагомим науковим обґрунтуванням для використання інтелектуальних технологій.

Глобальні дослідження демонструють технологічну готовність до впровадження PdM на базі AI/ML/ІoT. Водночас, стратегічні тренди (перехід на EV та підключені КТЗ) та регуляторні імперативи (адаптація до EU AI Act) створюють унікальні виклики для України.

Заключні рекомендації для подальшого дослідження полягають у необхідності переходу від теоретичного обґрунтування до розробки інфраструктурно-адаптованої, гібридної та регуляторно-комплаєнтної методології. Основний фокус має бути зміщений на прикладну розробку та валідацію Edge Computing архітектур для мінімізації залежності від централізованої інфраструктури та впровадження ХAI-фреймворків, що забезпечать довіру до інтелектуальних рішень та їх правову легітимність. Лише такий комплексний підхід дозволить створити науково обґрунтовану та практично реалізовану систему інтелектуального технічного сервісу в Україні.

На основі проведеного дослідження, можна стверджувати, що наразі вже сформована сучасна концепція інтелектуальних технологій у технічному сервісі. Інтелектуальні технології у сфері технічного сервісу ґрунтуються на синтезі сенсорних систем, штучного інтелекту, машинного навчання та цифрових двійників. Під цифровим двійником розуміють віртуальну модель фізичного об'єкта, що відображає його стан у реальному часі та дозволяє прогнозувати поведінку під впливом різних факторів. За дослідженням Nagy J. і Lakatos I., масове використання цифрових двійників у легкових КТЗ буде можливим лише після удосконалення сенсорних і комунікаційних систем; нині ця технологія розвинена у преміальному сегменті [7].

Дані для побудови цифрових двійників надходять із вбудованих датчиків (температури, вібрації, тиску, струму), контролерів (ECU) та бортових систем телеметрії (OBD, CAN, LIN). Сенсорні дані передаються у хмару або локальний дата-центр, де проходять очищення, аналіз, класифікацію та використання для побудови моделей прогнозування.

Машинне навчання (ML) та глибинне навчання (DL) є ключовими інструментами для аналізу складних патернів і прогнозування відмов. У статті Mahale Y. та ін. відзначається, що предиктивне обслуговування використовує методи машинного навчання для оцінки стану вузлів, прогнозування залишкового ресурсу та оптимізації графіків ремонту; особливу увагу приділяють використанню explainable AI для забезпечення прозорості моделей та довіри користувачів [6]. Найпоширеніші

алгоритми включають: дерева рішень, випадковий ліс (Random Forest), бустинг-моделі (Gradient Boosting, LightGBM), метод опорних векторів (SVM), нейронні мережі (LSTM, CNN) та ансамблеві підходи, що комбінують їх. Вибір алгоритму залежить від типу даних (часові ряди, сигнали вібрації, зображення), вимог до точності та швидкості, а також від необхідності інтерпретації результатів.

Інтернет речей забезпечує безперервний потік даних від КТЗ до сервісних центрів. Вбудовані телематичні модулі збирають інформацію про пробіг, температуру двигуна, тиск у шинах, напругу акумулятора тощо і передають її через стільникові мережі або V2X-канали. Такі дані дозволяють створювати індивідуальні профілі експлуатації, що є основою для персоналізованих сервісних пропозицій. У статті Krivda V. et al. зазначається, що системний підхід до технічної експлуатації поєднує моделювання процесів та використання техніко-економічного аналізу; при цьому інтелектуальні мережеві рішення розглядаються як основа для прогнозування відмов і оптимізації ресурсів [1].

Практичне застосування інтелектуальних технологій у сервісі КТЗ демонструють провідні виробники. BMW Group використовує AI-платформу для предиктивного обслуговування конвеєрного обладнання, яка базується на аналізі даних, що вже існують у системі керування; таким чином, система визначає потенційні дефекти за змінами у споживанні електроенергії, рухах конвеєрів чи читанні штрих-кодів, попереджаючи про несправності та зменшуючи час простою [9]. У прес-релізі наголошується, що впровадження AI-підтриманої стандартизованої системи дозволяє масштабувати рішення на інші заводи без додаткових датчиків, витрачаючи кошти лише на зберігання й обробку даних. Розроблені теплові карти дають змогу візуалізувати аномалії та оперативно реагувати на них; команда постійно вдосконалює алгоритми, підключаючи нові об'єкти та інтегруючи рекомендації до повідомлень про відмови.

Tesla, Volvo, Nissan та інші компанії використовують віддалену діагностику та оновлення «over-the-air». Tesla збирає дані з КТЗ і завдяки машинному навчанню прогнозує, коли потрібен сервіс; клієнти отримують повідомлення про необхідність відвідування сервісу через мобільний додаток. Volvo використовує систему Volvo On Call, яка передає в сервісні центри дані про технічний стан та пропонує індивідуальні пропозиції з ремонту. Nissan впроваджує штучний інтелект для аналізу акумуляторів електромобілів Leaf, прогнозуючи їх деградацію та оптимізуючи заміну.

В авіаційній галузі концепція Integrated Vehicle Health Management (IVHM) вже давно використовується для визначення технічного стану компонентів і планування ремонту [4]. Досвід IVHM може бути адаптований до систем КТЗ, особливо в умовах зростання електромобілів і автономних транспортних засобів. Одним із перспективних напрямів є поєднання предиктивного обслуговування з системами попередження споживачів та управління ланцюгами поставок запчастин. Використання цифрових двійників дозволяє моделювати роботу силових агрегатів під різними сценаріями та прогнозувати ефект від зміни режимів експлуатації, що важливо для електромобілів із різними режимами зарядки та температурними умовами.

В Україні система технічного сервісу переважно функціонує за планово-попереджувальним принципом; впровадження інтелектуальних технологій обмежується окремими експериментами великих автопідприємств. Серед бар'єрів можна виділити: (1) недостатню сенсорну інфраструктуру – більшість автопарків оснащені лише базовими OBD-інтерфейсами; (2) дефіцит кваліфікованих кадрів у сфері Data Science та штучного інтелекту; (3) правові та стандартизаційні бар'єри – відсутність єдиних вимог до обміну даними, кібербезпеки та зберігання інформації; (4) низький рівень інвестицій у R&D; (5) нестабільність енергопостачання та мережевої інфраструктури. Водночас урядова стратегія цифрової трансформації передбачає розвиток

інтелектуальних транспортних систем, що створює нормативну основу для запровадження інновацій. Вітчизняні дослідження зазначають, що удосконалення сервісу можливе лише за умови використання кіберфізичного підходу, який передбачає використання розподілених інтелектуальних мереж для моніторингу технічного стану [1].

Концептуальна модель впровадження інтелектуальних технологій

На основі аналізу літератури та практичних кейсів запропоновано концептуальну модель інтеграції інтелектуальних технологій у систему технічного сервісу КТЗ (рис. 1). Модель складається з таких підсистем:

- Підсистема збору даних. Інтегрує сенсорні пристрої (вбудовані датчики, телематичні модулі), бортові комп'ютери та мобільні додатки. Дані передаються через захищені канали до хмарної платформи. Важливо забезпечити уніфіковані протоколи обміну (e.g., MQTT, OPC UA) та стандартизовані формати даних. За відсутності власних сенсорів можна використовувати доступні дані з елементів управління, як це зробив BMW [11].

- Підсистема обробки та аналітики. Включає сховище даних, модулі попередньої обробки (очищення, фільтрація, нормалізація), аналітичні платформи для машинного навчання та візуалізації. На цьому етапі відбувається побудова моделей прогнозування за допомогою алгоритмів ML/DL, оцінка їх точності, налаштування гіперпараметрів та впровадження explainable AI для підвищення довіри користувачів [6].

- Підсистема прийняття рішень. Формує рекомендації щодо часу та обсягу технічного обслуговування. Використовуючи моделі залишкового ресурсу, система визначає момент, коли вузол перейде з нормального стану в передаварійний, і планує сервісні заходи. Можливе застосування оптимізаційних алгоритмів (лінійне, динамічне програмування) для формування графіків, що враховують доступність ресурсів та пріоритетність замовлень.

Підсистема інтеграції з сервісним процесом. Забезпечує передачу рекомендацій до систем управління сервісними центрами (ERP, CRM). Впровадження мобільних додатків для клієнтів дозволяє завчасно інформувати власників про необхідність сервісу, погоджувати зручний час і обирати центр обслуговування. Платформа має забезпечувати інтеграцію з постачальниками запчастин, щоб здійснювати автоматичне замовлення необхідних деталей.

Підсистема зворотного зв'язку та навчання. Результати виконаних ремонтів, відгуки клієнтів та нові дані про відмови повертаються у аналітичну систему для уточнення моделей. Запроваджується безперервне навчання (continuous learning), що дозволяє адаптувати моделі до змін у умовах експлуатації, конструктивних оновлень та сезонних факторів.

Впровадження такої моделі потребує скоординованих дій виробників КТЗ, сервісних центрів, страховиків, постачальників телекомунікаційних послуг та державних регуляторів. Необхідно забезпечити кібербезпеку, захист персональних даних, сертифікацію алгоритмів ШІ та відповідність національним стандартам.

Наукова новизна статті полягає у визначенні методологічних принципів розробки інтелектуальних систем технічного сервісу, що базуються на інтеграції даних, цифрових двійниках та машинному навчанні; у пропозиції концептуальної моделі впровадження, яка враховує специфіку українського ринку; та у поєднанні зарубіжних та вітчизняних досліджень із практичними кейсами. На відміну від наявних робіт, де питання інтелектуального сервісу розглядається фрагментарно, дана стаття пропонує цілісний підхід до побудови та розвитку системи предиктивного обслуговування.

Практична значущість полягає у можливості використання запропонованих рекомендацій для трансформації сервісних центрів: цифровізація процесів, впровадження IoT-сенсорів та аналітичних платформ, підготовка персоналу, перегляд

регламентів ТО, розробка нових сервісних продуктів (передплатне обслуговування, мобільні сервісні бригади). Очікуваний ефект – скорочення непродуктивних простоїв, зниження вартості ремонту за рахунок раннього виявлення відмов, підвищення безпеки руху та задоволення клієнтів. З макроекономічної точки зору впровадження інтелектуальних сервісних технологій сприятиме продовженню життєвого циклу транспортних засобів, зменшенню екологічного навантаження та розвитку ринку високотехнологічних послуг.

Висновки. Сучасна система технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) КТЗ не може ефективно функціонувати на основі традиційних реактивних або планово-регламентних стратегій. Стрімке ускладнення конструкцій транспортних засобів, поширення електромобілів і підключених КТЗ, вимоги до безпеки руху та екологічної відповідальності висувають потребу в радикальному переосмисленні сервісних підходів. У роботі обґрунтовано необхідність переходу до прогностично-орієнтованих стратегій обслуговування (PdM), які поєднують сенсорний моніторинг, аналіз великих обсягів даних та алгоритми штучного інтелекту.

Доведено, що нелінійний, стохастичний та відкритий характер сучасних транспортних систем вимагає використання концепцій польових і хвильових взаємодій, запропонованих українською науковою школою. Ці підходи створюють наукову базу для застосування квантово-релятивістських і хвильових моделей у дослідженні взаємодій між підприємствами, партнерами та споживачами. Саме на цьому фундаменті ґрунтується обґрунтування використання інтелектуальних технологій (AI/ML) як єдиного інструменту, здатного оперувати з нелінійністю та адаптуватися до динамічних «польових» процесів у системі технічного сервісу.

Аналіз зарубіжних досліджень показав, що передові автовиробники (BMW, Tesla, Volvo, Nissan тощо) та сервісні компанії активно впроваджують системи предиктивного обслуговування й цифрових двійників. Вони використовують ML/DL-моделі, Explainable AI та Edge Computing для моніторингу стану обладнання й планування ремонту, що забезпечує скорочення простоїв та підвищення надійності. Національні наукові напрацювання акцентують увагу на підвищенні надійності технічної експлуатації, але лише фрагментарно застосовують інтелектуальні технології. Визначено, що головними бар'єрами для України є обмежена сенсорна та цифрова інфраструктура, недостатня підготовка кадрів у сфері Data Science, відсутність єдиних стандартів даних і нормативно-правових вимог щодо кібербезпеки та захисту персональних даних.

Запропонована модель впровадження інтелектуальних технологій охоплює п'ять взаємопов'язаних підсистем: (i) збір даних (сенсори, телематика, мобільні додатки); (ii) обробка та ML/DL-аналітика (очищення, нормалізація, навчання моделей, Explainable AI); (iii) прийняття рішень (оцінка залишкового ресурсу, оптимізація графіків ТО); (iv) інтеграція з сервісними процесами (ERP/CRM, мобільні сервіси для клієнтів, ланцюги поставок запчастин); (v) зворотний зв'язок та безперервне навчання (адаптація моделей до нових даних). Така модель забезпечує повну цифрову трансформацію сервісних процесів і дозволяє персоналізувати обслуговування в реальному часі.

Впровадження концепції PdM та запропонованої моделі здатне суттєво знизити час простоїв обладнання, витрати на ремонт і позапланові заміни, продовжити життєвий цикл транспортних засобів, підвищити їхню надійність та безпеку руху. Для виробників та сервісних центрів це відкриває можливості оптимізувати складські запаси, впроваджувати нові бізнес-моделі (сервісні абонементи, мобільні бригади) й отримувати конкурентні переваги на ринку.

Українська сервісна інфраструктура має адаптуватися до вимог EU AI Act та інших міжнародних стандартів. Обов'язковою є розробка механізмів забезпечення кібербезпеки, захисту даних та етичності використання AI, а також впровадження

explainable AI для прозорості й підзвітності прийнятих рішень. Спільна участь державних регуляторів, виробників, сервісних компаній та академічної спільноти є критичною для законодавчого та інституційного забезпечення впровадження інтелектуального сервісу.

Стаття поєднує фундаментальні системні теорії з сучасними інженерними технологіями, пропонуючи методологію, адаптовану до українських реалій. Внесок полягає в розробці цілісної моделі, що враховує технічні, організаційні, правові й кадрові аспекти, а також у формуванні рекомендацій щодо інтеграції AI/ML, цифрових двійників та IoT у сервісні процеси. Практична реалізація отриманих результатів сприятиме розвитку високотехнологічних сервісних послуг, підвищенню конкурентоспроможності автопрому України та безпеки транспортної системи.

Подальше дослідження має бути спрямоване на вдосконалення моделей прогнозування, розробку адаптивних ML/DL-алгоритмів із урахуванням українських умов експлуатації, розвиток цифрових двійників для електромобілів та підключених КТЗ, інтеграцію Edge Computing для обробки даних у реальному часі та розробку нормативно-правових рамок, що забезпечать легітимність і етичність інтелектуальних сервісних систем.

Список літератури

1. Кривда В.В., Сакно О.П., Корніленко К.І. Огляд підходів до підвищення надійності та ефективності технічної експлуатації автотранспорту з урахуванням обґрунтованості інженерних рішень. *Технічна інженерія*. 2025. 1(95). DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-11-18](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-11-18)
2. Науково-методичні засади реалізації змісту середньої спеціалізованого спрямування: методичний посібник / І.С. Волощук, Л.О. Калмикова, В.В. Мелешко, Н.М. Мирончук, П.О. Тадеєв, М.І. Тадеєва, О.С. Шуленок. Київ : Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2024. 353 с.
3. Федотова І.В. Теоретико-методологічні засади управління життєздатністю підприємств автомобільного транспорту : дис. ... д-ра екон. наук : 08.00.04 «Економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності)» / Федотова І.В.; Український державний університет залізничного транспорту. Харків, 2020. 576 с.
4. A Comprehensive Review of Predictive Maintenance Technologies for Vehicle Reliability. 2025. DOI:10.1007/978-3-031-94937-1_5
5. Hachkevych A. Tools for adapting Ukraine's artificial intelligence ecosystem to meet European Union standards. *Економічний часопис Східноєвропейського національного університету*. 2024. № 1(22). DOI: 10.37772/2309-9275-2024-1(22)-2
6. Mahale Y., Kolhar Sh., More A.S. A comprehensive review on artificial intelligence driven predictive maintenance in vehicles: technologies, challenges and future research directions. *SN Applied Sciences*. 2025. Vol. 7, No. 4. P. 1–25. DOI: 10.1007/s42452-025-06681-3
7. Nagy J., Lakatos I. Predictive Maintenance and Predictive Repair of Road Vehicles-Opportunities, Limitations and Practical Applications. *Engineering Proceedings*. 2024. 79(1). Pp. 27–34. DOI: 10.3390/engproc2024079027
8. Poyda-Nosyk, N.; Bacho, R. Strategic Development Trends in the Automotive Industry of Ukraine. *Eng. Proc.* 2024, 79, 71. <https://doi.org/10.3390/engproc2024079071>
9. Press release: Smart maintenance using artificial intelligence. *BMW Group Plant Regensburg*. 2023. 27 URL: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0438145EN/smart-maintenance-using-artificial-intelligence>
10. Rao N.S. AI-Driven Predictive Maintenance Using IoT in Automotive Manufacturing. *International Journal of Science and Research Archive*. 2025. Vol. 16, No. 2. DOI: 10.30574/ijrsra.2025.16.2.2380 Smart maintenance using artificial intelligence : Press release. BMW Group. 27. Nov 2023. URL: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0438145EN/smart-maintenance-using-artificial-intelligence?language=en>

References

1. Kryvda, V.V., Sakno, O.P., & Kornilenko, K.I. (2025). Review of approaches to increasing the reliability and efficiency of motor vehicle technical operation considering the substantiation of engineering solutions. *Technical Engineering*, 1(95). [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-11-18](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-11-18) [in Ukrainian].
2. Voloshchuk, I.S., Kalmykova, L.O., Meleshko, V.V., Myronchuk, N.M., Tadeiev, P.O., Tadeieva, M.I., & Shulenok, O.S. (2024). *Scientific and methodological foundations for implementing the content of*

- specialized secondary education of scientific orientation: A methodological guide*. Kyiv: Institute of Gifted Child of the National Academy of Pedagogical Sciences of Ukraine. 353 p. [in Ukrainian].
3. Fedotova, I.V. (2020). *Theoretical and methodological foundations of managing the viability of motor transport enterprises* (Doctoral dissertation). Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv. 576 p. [in Ukrainian].
 4. *A Comprehensive Review of Predictive Maintenance Technologies for Vehicle Reliability*. (2025). https://doi.org/10.1007/978-3-031-94937-1_5
 5. Hachkevych, A. (2024). Tools for adapting Ukraine's artificial intelligence ecosystem to meet European Union standards. *Economic Journal of the Eastern European National University*, 1(22). [https://doi.org/10.37772/2309-9275-2024-1\(22\)-2](https://doi.org/10.37772/2309-9275-2024-1(22)-2)
 6. Mahale, Y., Kolhar, Sh., & More, A.S. (2025). A comprehensive review on artificial intelligence driven predictive maintenance in vehicles: technologies, challenges and future research directions. *SN Applied Sciences*, 7(4), 1–25. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06681-3>
 7. Nagy, J., & Lakatos, I. (2024). Predictive maintenance and predictive repair of road vehicles: Opportunities, limitations and practical applications. *Engineering Proceedings*, 79(1), 27–34. <https://doi.org/10.3390/engproc2024079027>
 8. Poyda-Nosyk, N., & Bacho, R. (2024). Strategic development trends in the automotive industry of Ukraine. *Engineering Proceedings*, 79, 71. <https://doi.org/10.3390/engproc2024079071>
 9. BMW Group Plant Regensburg. (2023). *Smart maintenance using artificial intelligence* [Press release]. <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0438145EN/smart-maintenance-using-artificial-intelligence>
 10. Rao, N.S. (2025). AI-driven predictive maintenance using IoT in automotive manufacturing. *International Journal of Science and Research Archive*, 16(2). <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2025.16.2.2380>
 11. BMW Group. (2023, November 27). *Smart maintenance using artificial intelligence* [Press release]. <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0438145EN/smart-maintenance-using-artificial-intelligence?language=en>

Eduard Ladyzhenskyi, Volodymyr Petlenko, Viktor Baitsan, Serhii Kovalov, PhD ped. sci

¹ *Azov State Technical University, Dnipro, Ukraine*

² *Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

Theoretical and Methodological Principles of Implementing Intelligent Technologies Into the Technical Service System of Wheeled vehicles

The article presents a comprehensive study of the theoretical and methodological foundations of the implementation of intelligent technologies in the technical service system of wheeled vehicles in the context of the transformation of the industry and the growth of the role of transport as a critical infrastructure. The evolution of approaches to technical maintenance is shown - from reactive repairs and planned and warned regulations to condition-based maintenance and predictive service (Predictive Maintenance, PdM), which is based on the analysis of large data sets, sensor monitoring and artificial intelligence algorithms. It is substantiated that the complexity of the design of modern vehicles, the spread of electric vehicles and connected wheeled vehicles require a rethinking of traditional MOT models based on a nonlinear system methodology developed by the domestic scientific school. Modern foreign and Ukrainian research in the field of predictive maintenance, digital twins, IoT architectures, Explainable AI and legal regulation of artificial intelligence is analyzed. It is shown that fundamental developments in field and wave approaches to the interactions of transport enterprises create a conceptual basis for the intellectualization of technical service, while international engineering developments form a set of technological tools (ML/DL models, digital twins, edge computing). A scientific gap is identified between theoretical models and applied solutions for Ukrainian service infrastructure, taking into account the challenges of martial law, the limitations of sensor and digital infrastructure, as well as the implementation of the requirements of the EU AI Act. A conceptual model of integrating intelligent technologies into the technical service system is proposed, which includes subsystems of data collection and processing, analytics based on ML/DL, decision-making, integration with service processes and feedback with continuous model training. Methodological principles for building intelligent service systems are formulated, taking into account the requirements of cybersecurity, transparency and explainability of AI solutions. It has been proven that the implementation of the proposed model can reduce downtime and repair costs, increase traffic safety, extend the life cycle of vehicles, and develop the high-tech service market in Ukraine.

intelligent technologies, technical service, wheeled vehicles, predictive maintenance, digital twins, machine learning, Internet of Things

Одержано (Received) 28.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 09.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026