

## ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТА ПРОГНОСТИЧНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ АВТОПАРКУ

*Андрусенко С.І.*, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, sergeandrusenko@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9914-0200

*Білецький В.О.*, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, volodymyrbiletsky56@gmail.com, orcid.org/0000-0001-7235-6442

*Бугайчук О.С.*, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, bug\_os@ukr.net, orcid.org/0000-0001-8646-6263

*Подписнов В.С.*, Національний транспортний університет, Київ, Україна, vpodpisnov@ukr.net, orcid.org/0000-0002-8583-1502

## COST-EFFECTIVENESS OF REMOTE MONITORING AND PREDICTIVE FLEET MAINTENANCE

*Andrusenko S.I.*, Ph.D. in Technical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, sergeandrusenko@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9914-0200

*Biletskyi V.O.*, Ph.D. in Technical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, volodymyrbiletsky56@gmail.com, orcid.org/0000-0001-7235-6442

*Buhaichuk O.S.*, Ph.D. in Technical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, bug\_os@ukr.net, orcid.org/0000-0001-8646-6263

*Podpisnov V.S.*, National Transport University, Kyiv, Ukraine, vpodpisnov@ukr.net, orcid.org/0000-0002-8583-1502

### Постановка проблеми.

Автомобільна промисловість переживає період швидкого розвитку, оскільки виробники транспортних засобів та оригінального обладнання для них (Original Equipment Manufacturer – **ОЕМ**) активно працюють над створенням наступного покоління електричних, автономних та підключених транспортних засобів, а також засобів і програмного забезпечення для дистанційного діагностування і постійного моніторингу діагностичних параметрів у режимі реального часу 24 години на добу, 7 діб на тиждень через мережу Інтернет.

Разом із тим, незалежні виробники контрольно-діагностичного обладнання і телематичних пристроїв для автомобілів також розробляють обладнання і програми, що дозволяють, хоча і обмежено, реалізувати функції дистанційного моніторингу діагностичних параметрів. Це відкриває можливість доступу до значних обсягів діагностичної інформації та застосування методів технічної прогностики в галузі автомобільного транспорту.

Унаслідок цього багато виробників та компаній, що працюють у галузі технічного обслуговування (ТО) і ремонту транспортних засобів, розпочинають інвестувати у технології прогнозування, які значно просунулися протягом останніх десятиліть, переважно в аерокосмічній галузі.

Для менеджерів автопарків, які мають та експлуатують велику кількість транспортних засобів, технології прогнозування та раннього виявлення несправностей відкривають можливості застосування стратегій прогностичного обслуговування, що дозволяє досягти значної економії коштів порівняно з коригувальними або превентивними стратегіями технічного обслуговування.

Проте розробка технологій, необхідних для прогностичного обслуговування, може бути дорогою справою, що вимагає великої кількості компонентів, місяців збору даних і, можливо, років інженерних зусиль. У зв'язку з цим критично важливо розуміти очікувану віддачу від інвестицій (Return On Investment – **ROI**) у розробку такого проєкту.

**Аналіз відомих нам публікацій [1-10]** у галузі розроблення і застосування прогностичних стратегій ТО показав, що існує велика кількість робіт, присвячених розгляду ефективності окремих видів діяльності різних сфер господарства. Але моделей, достатньо адаптованих до оцінки економічної ефективності впровадження дистанційного моніторингу та прогностичного технічного обслуговування автомобільних транспортних засобів, недостатньо для оцінки діяльності в конкретних умовах, і вони не охоплюють усіх суттєвих сторін такої діяльності.

**Метою досліджень** є аналіз складових діяльності дистанційного моніторингу і прогностичного обслуговування автотранспортних засобів та визначення підходів до максимізації ефективності такої стратегії ТО для оцінки перспективності стартапів у цій галузі й напрямів розвитку бізнесу, які дозволяють спрогнозувати майбутні фінансові результати діяльності компанії, такі як виручка, прибуток, грошовий потік, що необхідно для розробки бізнес-планів, бюджетів і стратегічного планування.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Економічну ефективність систем прогностичного технічного обслуговування (Predictive Maintenance – PdM) аналізують за допомогою поєднання математичних моделей, фінансових метрик та прикладних досліджень. З наукової точки зору використовують стохастичні імітаційні моделі (наприклад, **Марковські ланцюги** та **Моделювання методом Монте-Карло**), які враховують розподіли часу до відмови і ймовірності несправностей. Так, Гарнер та ін. описують загальну схему, в якій моделюються процеси деградації, алгоритми діагностування і вартість дій, а моделювання методами Монте-Карло дає розподіл витрат на ремонт за різних стратегій обслуговування [11, 12].

Прикладні підходи включають **cost-benefit analysis** та оцінку **ROI/TCO**.

**ROI** (Return on Investment) зазвичай обчислюють як відношення чистого прибутку (витрат) до вкладених інвестицій.

**TCO** (Total Cost of Ownership) – всі витрати на володіння.

Наприклад, **ROI** можна формулювати як

$$ROI = \frac{\text{Чистий прибуток (вигода) від інвестиції}}{\text{Сума інвестицій}}, \quad (1)$$

де чистий прибуток – це різниця між вигодами і витратами.

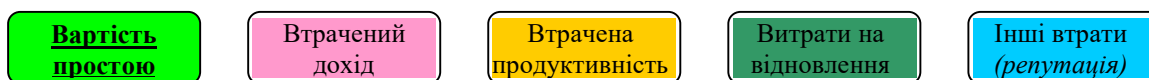
**HanAra** зазначає, що в контексті **PdM** часто спрощено розраховують **ROI** за формулою, запропонованою в [12].

Водночас метод **TCO** (Total Cost of Ownership) підсумовує всі витрати на володіння автотранспортом – починаючи з купівлі й амортизації, закінчуючи експлуатаційними витратами (паливо, обслуговування, страхівка тощо) [13]. Наприклад, підприємство «А» оцінює річні витрати на утримання пікапу приблизно в \$10 000 [13]. У моделюванні порівнюють поточні витрати автопарку з довгостроковими витратами після впровадження **PdM**, включаючи оцінку чистої приведеної вартості або внутрішньої норми рентабельності.

#### **Вигоди від впровадження PdM.**

Прогностичне технічне обслуговування (**PdM**) приносить низку економічних переваг, що включають: **скорочення простоїв, зниження аварійних ремонтів, оптимізацію витрат на ТО, зменшення запасів запчастин та підвищення безпеки.**

• **Зменшення простоїв.** Несподівані поломки зупиняють автотранспорт, призводячи до великих фінансових втрат. Вартість простою можна оцінити як суму втрат доходу та інших витрат (наприклад, виплату штрафів, затримки доставок, витрати на допомогу тощо). За прикладною формулою:



де кожний доданок охоплює відповідні збитки [14].

Дослідження показують, що простої можуть сягати величезних сум. Наприклад, у транспортній галузі один день простою вантажівки часто оцінюють у сотні доларів США [13], а в масштабі промислового підприємства втрати доходу від простою можуть сягати сотень тисяч доларів за годину. Використання PdM дозволяє планувати ТО безпосередньо перед можливим виходом з ладу, тим самим суттєво скорочуючи непланові зупинки і витрати на них [13]. Так, за даними Sensorfy, впровадження PdM у середньому дає 35-45 % зниження непланового простою техніки [15].

• **Уникнення аварійних ремонтів.** Регулярний контроль стану двигуна, гальм та інших систем дає змогу виявити дрібні проблеми до їхнього переростання у серйозні відмови. Завдяки цьому знижуються витрати на дорогі аварійні ремонти із застосуванням додаткових ресурсів і термінових поставок запчастин. Згідно з дослідженнями Aberdeen, PdM здатен зменшити кількість аварійних поломок до ~ 70 % порівняно з традиційним обслуговуванням [16]. Іншими словами, 70 %

несподіваних поломок можна попередити завдяки своєчасним прогнозам. Дохідні розрахунки таких втрат враховують різницю між витратами на аварійний ремонт і плановий (з урахуванням переоплати за терміновість).

- **Оптимізація витрат на ТО.** PdM дозволяє виконувати роботи тільки за потреби – коли система справді вимагає втручання. Це уникає непотрібних регулярних операцій, характерних для календарного обслуговування. Згідно з аналітикою, при переході на PdM витрати на планове обслуговування машин скорочуються приблизно на 25-30 % [15]. Менеджмент підприємств може порівняти теперішні витрати (без PdM) з очікуваними витратами після впровадження PdM, використовуючи формалізовані методики (розрахунок чистої теперішньої вартості, CVA, ROI).

- **Зниження запасів запчастин.** За традиційної моделі для надійності автопарку часто підтримують великий склад аварійних запчастин. Впровадження PdM дозволяє відкладати заміну компонентів до реальної потреби, що зменшує потребу в об'ємних складах. Як наслідок, скорочується капітал, зв'язаний у запасі, та супутні витрати на зберігання. Наприклад, Sensorfy підкреслює, що PdM «позбавляє необхідності накопичувати великий запас запчастин», звільняючи фінансові ресурси і оптимізуючи запаси [15].

- **Підвищення безпеки.** Постійний моніторинг і кореляція даних дозволяють передбачати потенційно небезпечні відмови (наприклад, вихід з ладу гальм чи підвіски). Це сприяє зниженню аварійності і, як наслідок, економії від непрямих втрат. Оглядові джерела відзначають, що поліпшення технічного обслуговування збільшує безпеку: підвищення дисципліни водіїв і підтримка техніки в належному стані зменшують ризик дорожньо-транспортних пригод [13]. Наприклад, Questar звертає увагу, що «кращі звички водіїв призводять до меншого зносу і кращого показника безпеки автопарку, що зрештою знижує витрати на страхування» [13]. Отже, вкладення в PdM частково відшкодовуються за рахунок зниження страхових внесків та уникнення штрафів і репутаційних втрат.

#### **Порівняння з традиційними моделями ТО.**

У традиційних моделях технічного обслуговування (календарного або на основі пробігу) роботи виконуються за заздалегідь встановленими інтервалами, незалежно від фактичного стану автомобіля [17]. Це дає прогнозованість графіків, але часто призводить до двох проблем:

- 1) **зайві роботи** – машини обслуговуються навіть без явної потреби;

- 2) **несподівані відмови** – деталі можуть вийти з ладу поза запланованими вікнами обслуговування.

Натомість PdM ґрунтується на безперервному моніторингу параметрів (температура, вібрації, електричні сигнали тощо) і дозволяє планувати інтервенцію **лише за фактичною потребою** [17].

Коротко: стратегія **превентивного ТО** (preventive) вимагає менших початкових витрат на технології, але часто призводить до необґрунтовано частих профілактичних процедур і все ще залишає імовірність поломок у проміжках графіка [17].

Натомість PdM вимагає інвестицій у сенсори, зв'язок і аналітику на початку, але дозволяє уникнути зайвого обслуговування та значно знизити загальні витрати у перспективі [17].

Наприклад, вартісний аналіз показує: **відмови обладнання** при традиційному ТО зберігаються на рівні 100 %, а за PdM – знижуються на 70-75 % [15]. **Незаплановані простої** – за даними Deloitte, превентивне ТО може знизити простої до 45 %, а впровадження PdM дає додаткове скорочення простоїв на 35-45 % [16]. Загальні **витрати на обслуговування** зменшуються на ~ 25-30 % [15] з переходом на прогностичну модель.

Нижче наводимо порівняльну таблицю основних параметрів.

Як видно з таблиці, інвестиції у прогностичні технології компенсуються зменшенням аварійності, простоїв і непотрібних витрат. Більш детальні моделі враховують також амортизацію обладнання, інвестиції у навчання персоналу та супутні витрати.

#### **Далі наводимо приклади практичних кейсів:**

- **United Road (важкі перевезення):** після пілотного впровадження рішення Uptake Radar компанія досягла ~ 4-кратного ROI. Кожне передбачуване технічне рішення одразу економило в середньому по \$400 на вантажівці завдяки уникненню простою та ремонтів [18]. Отже, щорічна вигода на одну машину оцінюється приблизно в \$3 387 [18].

- **Місто Лонг-Біч (муніципальний автопарк):** використання AI-платформи Pitstop Connect для прогностичного обслуговування більш ніж 600 автомобілів дозволило місту скоротити річні витрати на ТО та ремонти приблизно на \$809 500 [19]. Це результат поліпшеної діагностики та розумнішого планування обслуговування, що мінімізувало непланові зупинки та оптимізувало ресурси сервісних бригад.

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця  
Table 1 – Comparison table

Параметр	Календарне/превентивне ТО	Прогностичне ТО (PdM)
Планування ТО	<b>Жорстко</b> за часом чи пробігом [17]	<b>Зіставлено</b> зі станом систем (датчики ІОТ) [17]
Непланові поломки	<b>Частіші</b> (вища ймовірність несподіваних відмов)	<b>Рідші</b> (– 70-75 % поломок) [15]
Незаплановані простої	<b>Вищі</b> (відмови поза графіками)	<b>Нижчі</b> (– 35-45 % часу простою) [15]
Витрати на ТО	<b>Вищі</b> (багато профілактичних робіт)	<b>Нижчі</b> (оптимізація робіт – 25-30 %) [17]
Запас запчастин	<b>Більший</b> (страховий запас)	<b>Менший</b> (точково необхідні деталі) [15]
Рівень безпеки	<b>Нижчий</b> (вищий ризик аварій)	<b>Вищий</b> (менше відмов та аварій) [13]

- **Глобальна логістична компанія:** за даними Deloitte, впровадження PdM-систем у мережі сортувальних центрів дало вигоду понад **\$100 млн на рік**. Це було досягнуто за рахунок поліпшення аналітики сенсорних даних і оптимізації інтервалів ТО на сотнях об'єктів, що розблокувало близько + 4 % продуктивності мережі [20].

- **Інші приклади.** За різними оцінками, промислові підприємства, що використовують PdM, показують типовий ROI у  $\approx 10 \times$  від початкових інвестицій [15]. Також відомі кейси встановлення прогностичного моніторингу в автобусних парках (наприклад, Go-Ahead Ireland), де організації декларують мету «нуль поломок» і нараховують суттєве скорочення аварійних ремонтів (точні цифри часто не розкриваються).

#### **Висновки.**

Отже, сучасні аналітичні й прикладні підходи дозволяють кількісно оцінити вигоди від PdM й порівняти їх із витратами на впровадження систем дистанційного моніторингу [12]. Наприклад, чисельні моделі показують, що завдяки PdM сумарні витрати на технічне обслуговування можуть знизитись на десятки відсотків, а окупність інвестицій досягається за декілька місяців/років залежно від масштабу автопарку.

#### **Перспективи подальшого дослідження.**

1. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення фінансової моделі, розробку методик оцінки ризиків та розрахунок різних варіантів проєкту для розуміння впливу суттєвих параметрів на економічну ефективність та ефективність діяльності підприємства.

2. Наступним напрямом для досліджень є вдосконалення методів та засобів збирання, накопичення, оброблення і аналізування масивів даних із діагностичними та супутніми параметрами, створення математичних моделей, що описують їх змінювання у різноманітних умовах експлуатації транспортних засобів у функції часу та застосування їх для прогнозування і оцінювання можливостей виникнення несправностей та потреби у виконанні конкретних видів робіт ТО, а саме моделей:

- змінювання діагностичних параметрів для інтерполяції та екстраполяції;
- «цифрових двійників» (Digital Twins), тобто створення віртуальної копії, у даному випадку, автомобіля для прогнозування його технічного стану, аналізу поведінки, потреби в обслуговуванні та ремонті;
- «цифрових портретів несправностей» для можливості застосування їх у технологіях автоматичного чи автоматизованого розпізнавання несправностей, що вже сталися, чи для прогнозування можливості їхнього виникнення спеціалізованим програмним забезпеченням;
- розрахунків кількісних «показників здоров'я» для деталей, вузлів, агрегатів та систем транспортних засобів в реальному часі для того, щоб своєчасно планувати профілактичне обслуговування і зменшувати витрати на непередбачувані ремонти та втрати від незапланованих простоїв.

#### **ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Волков В.П., Матейчик В.П., Грицук П.Б., Грицук І.В. Моніторинг технічного стану автомобіля в життєвому циклі: Підручник / за заг. ред. проф. В.П. Волкова. – Харків: ХНАДУ, 2017. – 300 с.

2. Волков В.П., Онищук В.П., Волкова Т.В., Левчук М.А. Інтеграція інформаційно-програмного комплексу в віртуальне підприємство автомобільного транспорту [Електронний ресурс]. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті: Науковий журнал*. 2025. № 1 (24). С. 157-169. Режим доступу: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1720>.
3. Волков В.П., Грицук І.В., Онищук В.П., Волкова Т.В., Стельмашук В.В., Збицький Д.Д. Удосконалення інформаційно-програмного комплексу для контролю технічного стану автомобілів в підприємстві автомобільного транспорту [Електронний ресурс]. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті: Науковий журнал*. 2024. № 1 (22). С. 116-129. Режим доступу: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1352>.
4. Вовчак О., Верес З. Метод побудови та дизайн системи відстеження телеметричних даних на базі ІОТ для моніторингу роботи транспортного засобу [Електронний ресурс]. *MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES: International Scientific-technical journal, «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»: Міжнародний науково-технічний журнал*. 2023. № 4. С. 27-33. Режим доступу: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-3>.
5. Гончарук І.П., Головань А.І. Інноваційна система машинного навчання для моніторингу судового обладнання в реальному часі [Електронний ресурс]. *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. 2025. Випуск 2 (43). С. 104-116. Режим доступу: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.09>.
6. Федосова І.В., Осадчий М.С. Система прогнозування стану автомобіля на основі статистичних даних діагностичного роз'єму OBD-II [Електронний ресурс]. *Наука та виробництво*. 2020. №23. С. 346-353. Режим доступу: <https://doi.org/10.31498/2522-9990232020241201>.
7. Головіна О.В., Холодний Ю.Ф., Строков О.П., Жовтобрюх В.О. Дослідження впливу якості діагностики і ремонту електронних систем на подальшу технічну експлуатацію автомобіля [Електронний ресурс]. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. Том 1. № 1 (92). С. 57-62. Режим доступу: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.7>.
8. Іваськів Р., Доскочинський Д. Інноваційні методи діагностики гальмівних систем у транспортних засобах [Електронний ресурс]. *MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES: International Scientific-technical journal, «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»: Міжнародний науково-технічний журнал*. 2024. № 4. С. 137-142. Режим доступу: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-17>.
9. Савін Ю.Х., Соколенко О.В. Контроль технічного стану транспортних засобів шляхом аналізу інформації з бортової діагностики в процесі експлуатації [Електронний ресурс]. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті: Науковий журнал*. 2025. № 1 (24). С. 367-374. Режим доступу: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1743>.
10. Білецький В.О., Іванушко О.М., Лобода А.В., Бугайчук О.С., Ловга Р.М. Огляд інформаційних та комунікаційних технологій і систем моніторингу на транспорті та аналіз їхніх можливостей для формування і впровадження інноваційних технологій технічного обслуговування і ремонту транспортних засобів [Електронний ресурс]. *Автошляховик України: Науково-виробничий журнал*. 2023. № 1. С. 8-13. Режим доступу: <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2022-1-273-8-16>.
11. Graeme Garner, Paola Santanna, and Hossein Sadjadi. Modeling the Business Value of a Predictive Maintenance System using Monte Carlo Simulation. General Motors Company, Canadian Technical Center, Markham, Ontario, L3R 4H8, Canada, General Motors Global Technical Center, Warren, Michigan, 48093, USA. *ANNUAL CONFERENCE OF THE PROGNOSTICS AND HEALTH MANAGEMENT SOCIETY*, Vol. 13. № 1. 2021. Режим доступу: <https://papers.phmsociety.org/index.php/phmconf/article/view/2985>. DOI: <https://doi.org/10.36001/phmconf.2021.v13i1.2985>.
12. PdM ROI: Evaluating the Value, Context, Role. Режим доступу: <https://www.hanarasoft.com/pdm-roi/>.
13. How Predictive Vehicle Health Management helps reduce Total Cost of Ownership - Questar. Режим доступу: <https://questarauto.com/how-predictive-vehicle-health-management-helps-reduce-tco/>.
14. How to calculate the cost of downtime | ConnectWise. Режим доступу: <https://www.connectwise.com/blog/how-to-calculate-the-cost-of-downtime>.

15. How to calculate your predictive maintenance ROI? | Sensorfy. Режим доступу: <https://www.sensorfy.ai/blog/how-to-calculate-the-roi-of-a-predictive-maintenance-strategy/>.
16. Preventive & Predictive Maintenance: Reducing Downtime & Costs. Режим доступу: <https://www.team-group.com/insights/25-Feb-PredictiveMaintenance.pdf>.
17. Predictive maintenance vs. preventive maintenance | TXI. Режим доступу: <https://txidigital.com/insights/predictive-maintenance-vs-preventive-maintenance>.
18. United road capitalizes on predictive maintenance with 4x ROI. Режим доступу: [https://s3.us-east-2.amazonaws.com/uptake-production/images/Resources/Uptake\\_Case-Studies-United-Road.pdf](https://s3.us-east-2.amazonaws.com/uptake-production/images/Resources/Uptake_Case-Studies-United-Road.pdf).
19. City of Long Beach Improves Operational Efficiency with Innovative AI-Driven Fleet Maintenance - Pitstop. Режим доступу: <https://pitstopconnect.com/project/city-of-long-beach-improves-operational-efficiency-with-innovative-ai-driven-fleet-maintenance>.
20. Predictive maintenance Deloitte's approach. Predictive Maintenance Solutions | Deloitte US. Режим доступу: <https://www.deloitte.com/us/en/services/consulting/services/predictive-maintenance-and-the-smart-factory.html>.

## REFERENCES

1. Volkov, V.P., Mateichyk, V.P., Grytsuk, P.B., & Grytsuk, I.V. (2017). *Monitorynh tehnicnoho stanu avtomobiliv v zhyttievomu tsykli: Pidruchnyk; za red. prof. V.P. Volkova* [Monitoring the technical condition of a car in its life cycle: Textbook]. Prof. V.P. Volkov (Ed.). Kharkiv: KHNADU. 300 p. [in Ukrainian].
2. Volkov, V.P., Onyshchuk, V.P., Volkova, T.V., & Levchuk, M.A. (2025). *Intehratsiia informatsiyno-programnoho kompleksu v virtualne pidpruiemstvo avtomobilnoho transportu* [Integration of the information and software system into the virtual enterprise of automotive transport]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti: Naukovyi zhurnal – Modern technologies in mechanical engineering and transport: Scientific journal*, 1 (24), 157-169. Retrieved from: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1720> [in Ukrainian].
3. Volkov, V.P., Grytsuk, I.V., Onyshchuk, V.P., Volkova, T.V., Stelmashchuk, V.V., & Zbytskyi, D.D. (2024). *Udoskonalennia informatsiyno-programnoho kompleksu dlia kontroliu tekhnichnoho stanu avtomobiliv v pidpruiemstvi avtomobilnoho transportu* [Enhancement of information and software systems for vehicle technical condition monitoring in automotive transport enterprises]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti: Naukovyi zhurnal – Modern technologies in mechanical engineering and transport: Scientific journal*, 1 (22), 116-129. Retrieved from: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1352> [in Ukrainian].
4. Vovchak, O., & Veres, Z. (2023). *Metod pobudovy ta dyzayn systemy vidstezhennia telemetrychnykh danykh na bazi IOT dlia monitorynhu roboty transportnoho zasobu* [Design method for an IOT-based telemetry tracking system for vehicle operation monitoring]. *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh procesakh: Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal – MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES: International Scientific-technical journal*, 4, 27-33. Retrieved from: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-3> [in Ukrainian].
5. Goncharuk, I.P., & Golovan, A.I. (2025). *Innovatsiyna systema mashynnoho navchannia dlia monitorynhu sudnovoho obladnannia v realnomu chasi* [Innovative machine learning system for real-time monitoring of shipboard equipment]. *Vodnyi transport: Zbirnyk naukovykh prats - Water transport: Collection of scientific papers*, 2 (43), 104-116. Retrieved from: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.09> [in Ukrainian].
6. Fedosova, I.V., & Osadchy, M.S. (2020). *Systema prohnozuvannia stanu avtomobilia na osnovi statystychnykh danykh diahnostychnoho roziemu OBD-II* [Vehicle condition prediction system based on statistical data from the OBD-II diagnostic port]. *Nauka ta vyrobnytstvo – Science and production*, 23, 346-353. Retrieved from: <https://doi.org/10.31498/2522-9990232020241201> [in Ukrainian].
7. Golovina, O.V., Kholodnyi, Y.F., Stokov, O.P., & Zhovtobriukh V.O. (2025). *Doslidzhennia vplyvu yakosti diahnostyky i remontu elektronnykh system na podalshu tekhnichnu ekspluatatsiiu avtomobilia* [Impact of electronic system diagnostics and repair quality on the subsequent technical operation of vehicles]. *Visnyk Khersonskogo natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of the Kherson*

- National Technical University, 1, 1 (92), 57-62. Retrieved from: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.7> [in Ukrainian].
8. Ivaskiv, R., & Doskochynskiy, D. (2024). *Innovatsiyni metody diagnistyky galmivnykh system u transportnykh zasobakh* [Innovative methods for vehicle brake systems diagnostics]. *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh procesakh: Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal – MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES: International Scientific-technical journal*, 4, 137-142. Retrieved from: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-17> [in Ukrainian].
  9. Savin, Yu.Kh., & Sokolenko, O.V. (2025). *Kontrol tekhnichnoho stanu transportnykh zasobiv shliakhom analizu informatsiyi z bortovoyi diahnostryky v protsesi ekspluatatsiyi* [Control of the technical condition of vehicles through analysis of on-board diagnostic data during operation]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti: Naukovi zhurnal – Modern technologies in mechanical engineering and transport: Scientific journal*, 1 (24), 367-374. Retrieved from: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1743> [in Ukrainian].
  10. Biletskyi, V.O., Ivanushko, O.M., Loboda, A.V., Buhaichuk, O.S., & Lovha, R.M. (2023). *Ohliad informatsiynykh ta komunikatsiynykh tekhnolohiy i system monitorynhu na transporti ta analiz yikhnikh mozhlyvostey dlia formuvannia i vprovadzhennia innovatsiynykh tekhnolohiy tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu transportnykh zasobiv* [Overview of information and communication technologies and vehicle monitoring systems and analysis of their possibilities for the formation and implementation of innovative technologies for maintenance and repair of vehicles]. *Avtoshliakhovyk Ukrainy: Naukovo-vyrobnychy zhurnal – Road Transporter and Road Constructor of Ukraine: Scientific and Production Journal*, 1, 8-13. Retrieved from: <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2022-1-273-8-16> [in Ukrainian].
  11. Graeme Garner, Paola Santanna, & Hossein Sadjadi. (2021). Modeling the Business Value of a Predictive Maintenance System using Monte Carlo Simulation. General Motors Company, Canadian Technical Center, Markham, Ontario, L3R 4H8, Canada, General Motors Global Technical Center, Warren, Michigan, 48093, USA. ANNUAL CONFERENCE OF THE PROGNOSTICS AND HEALTH MANAGEMENT SOCIETY, 13, 1. Retrieved from: <https://papers.phmsociety.org/index.php/phmconf/article/view/2985>. DOI: <https://doi.org/10.36001/phmconf.2021.v13i1.2985> [in English].
  12. PdM ROI: Evaluating the Value, Context, Role. Retrieved from: <https://www.hanarasoft.com/pdm-roi/> [in English].
  13. How Predictive Vehicle Health Management helps reduce Total Cost of Ownership - Questar. Retrieved from: <https://questarauto.com/how-predictive-vehicle-health-management-helps-reduce-tco/> [in English].
  14. How to calculate the cost of downtime | ConnectWise. Retrieved from: <https://www.connectwise.com/blog/how-to-calculate-the-cost-of-downtime> [in English].
  15. How to calculate your predictive maintenance ROI? | Sensorfy. Retrieved from: <https://www.sensorfy.ai/blog/how-to-calculate-the-roi-of-a-predictive-maintenance-strategy/> [in English].
  16. Preventive & Predictive Maintenance: Reducing Downtime & Costs. Retrieved from: <https://www.team-group.com/insights/25-Feb-PredictiveMaintenance.pdf> [in English].
  17. Predictive maintenance vs. preventive maintenance | TXI. Retrieved from: <https://txidigital.com/insights/predictive-maintenance-vs-preventive-maintenance> [in English].
  18. United road capitalizes on predictive maintenance with 4x ROI. Retrieved from: [https://s3.us-east-2.amazonaws.com/uptake-production/images/Resources/Uptake\\_Case-Studies-United-Road.pdf](https://s3.us-east-2.amazonaws.com/uptake-production/images/Resources/Uptake_Case-Studies-United-Road.pdf) [in English].
  19. City of Long Beach Improves Operational Efficiency with Innovative AI-Driven Fleet Maintenance - Pitstop. Retrieved from: <https://pitstopconnect.com/project/city-of-long-beach-improves-operational-efficiency-with-innovative-ai-driven-fleet-maintenance/> [in English].
  20. Predictive maintenance Deloitte's approach . Predictive Maintenance Solutions | Deloitte US. Retrieved from: <https://www.deloitte.com/us/en/services/consulting/services/predictive-maintenance-and-the-smart-factory.html> [in English].

## РЕФЕРАТ

Андрусенко С.І. Економічна ефективність дистанційного моніторингу та прогностичного технічного обслуговування автопарку / С.І. Андрусенко, В.О. Білецький, О.С. Бугайчук, В.С. Подпіснєв // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

У статті розглянуто економічні передумови та потенційні переваги впровадження системи дистанційного моніторингу комерційного автотранспорту з погляду підвищення ефективності експлуатації та оптимізації витрат на технічне обслуговування. Проаналізовано сучасні підходи до обслуговування транспортних засобів, зокрема обмеження традиційних методів планово-попереджувального та регламентного обслуговування. Акцент зроблено на можливостях цифрових технологій моніторингу, які забезпечують оперативну діагностику, підтримку прийняття рішень і впровадження стратегій прогностичного технічного обслуговування, що дозволяє суттєво скоротити простій і витрати на ремонт.

Наведено порівняльний аналіз традиційних моделей обслуговування і підходів, заснованих на використанні телеметричних даних та аналітики. Запропоновано узагальнену модель аналізу витрат та вигод (cost-benefit analysis), що включає ключові показники ефективності, такі як рівень використання обладнання, інтервали між обслуговуванням та показник рентабельності інвестицій (ROI). Окремо розглянуто проблеми впровадження, зокрема пов'язані з початковими інвестиціями, інфраструктурним забезпеченням і підготовкою персоналу.

Зроблено висновок, що інтеграція систем дистанційного моніторингу сприяє не лише підвищенню технічної надійності та безпеки автопарку, а й покращенню загальних економічних показників діяльності транспортних підприємств. Запропонований методичний підхід може бути використаний як у малих, так і у великих автогосподарствах і слугувати основою для стратегічного планування та цифрової трансформації у сфері транспорту.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ, ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ, ПРОГНОСТИЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ, ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ, ОПТИМІЗАЦІЯ ВИТРАТ, РЕНТАБЕЛЬНІСТЬ ІНВЕСТИЦІЙ.

## ABSTRACT

Andrusenko S.I., Biletskyi V.O., Buhaichuk O.S., Podpisnov V.S. Cost-effectiveness of Remote Monitoring and Predictive Fleet Maintenance. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The article examines the economic rationale and potential advantages of introducing a remote monitoring system for commercial vehicles in the context of operational efficiency and maintenance cost optimization. The authors analyze current trends in vehicle maintenance, emphasizing the limitations of traditional preventive and scheduled maintenance approaches. The study highlights how digital monitoring technologies allow for real-time diagnostics, improved decision-making, and predictive maintenance strategies that significantly reduce downtime and repair expenses.

A comparative assessment is provided between conventional maintenance models and those based on digital telemetry and analytics. The authors present a generalized cost-benefit analysis model, outlining key performance indicators (KPIs) that include equipment utilization, maintenance intervals, and return on investment (ROI). Particular attention is paid to implementation challenges such as initial investment, infrastructure requirements, and personnel training.

The paper concludes that the integration of remote monitoring systems contributes not only to enhanced technical reliability and safety of fleet operations but also to the overall economic performance of transport enterprises. The proposed methodological approach can be applied in both small and large-scale fleet operations, serving as a basis for strategic planning and digital transformation in the transport sector.

**KEYWORDS:** ROAD TRANSPORT, REMOTE MONITORING, PREDICTIVE MAINTENANCE, OPERATIONAL EFFICIENCY, COST OPTIMIZATION, ROI.



**АВТОРИ:**

Андрусенко Сергій Іванович, кандидат технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, e-mail: sergeandrusenko@gmail.com, тел. +380634720587, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 410А, orcid.org/0000-0002-9914-0200.

Білецький Володимир Олександрович, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, доцент кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, Київ, Україна, e-mail: volodymyrbiletsky56@gmail.com, тел. +380984649945, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 410, <https://orcid.org/0000-0001-7235-6442>

Бугайчук Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, e-mail: bug\_os@ukr.net, тел. +380679955818, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 410, <https://orcid.org/0000-0001-8646-6263>.

Подпіснєв Владислав Сергійович, Національний транспортний університет, старший викладач кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, e-mail: vpodpisnov@ukr.net, тел. +380989623871, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 410, orcid.org/0000-0002-8583-1502.

**AUTHORS:**

Andrusenko Serhii I., Ph.D. in Technical Science, Professor, National Transport University, Head of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service, e-mail: sergeandrusenko@gmail.com, tel. +380634720587, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, of. 410A, orcid.org/0000-0002-9914-0200.

Biletskyi Volodymyr O., Ph.D. in Technical Science, National Transport University, Associate Professor of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service, e-mail: volodymyrbiletsky56@gmail.com, tel. +380984649945, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, of. 410, orcid.org/0000-0001-7235-6442.

Buhaichuk Oleksandr S., Ph.D. in Technical Science, Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service, e-mail: bug\_os@ukr.net, tel. +380679955818, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, of. 410, orcid.org/0000-0001-8646-6263.

Podpisnov Vladyslav S., National Transport University, Senior Lecturer of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service, e-mail: vpodpisnov@ukr.net, tel. +380989623871, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, of. 410, orcid.org/0000-0002-8583-1502.

**РЕЦЕНЗЕНТИ:**

Клименко О.А., доктор технічних наук, доцент, Державне підприємство «Державний автотранспортний науково-дослідний і проектний інститут», заступник директора з наукової роботи, Київ, Україна.

Сахно В.П., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри автомобілів, Київ, Україна.

**REVIEWERS:**

Klymenko O.A., Doctor of Technical Science, Associate Professor, State Enterprise «State Road Transport Research Institute», Deputy Director for Research, Kyiv, Ukraine.

Sakhno V.P., Doctor of Technical Science, Professor, National Transport University, Head of the Department of Automobiles, Kyiv, Ukraine.