

## АНАЛІТИЧНІ ПІДХОДИ ДО РОЗРОБЛЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПІСЛЯРЕМОНТНОГО СТАНУ АВТОМОБІЛІВ

<sup>1</sup>Полтавський державний аграрний університет

*Досліджено проблеми контролю післяремонтного стану автомобілів, які традиційно здійснюються за допомогою візуального огляду, вимірювань окремих параметрів, стендових випробувань та короткочасної експлуатаційної перевірки. Показано, що такі методи є фрагментарними, залежать від суб'єктивного фактору та не дозволяють прогнозувати залишковий ресурс агрегатів. Це зумовлює необхідність впровадження інтелектуальних систем діагностики, здатних забезпечити комплексний моніторинг на основі даних сенсорних мереж, цифрових двійників та алгоритмів машинного навчання.*

*Проаналізовано сучасні підходи до інтеграції сенсорів, систем моніторингу та штучного інтелекту в процес оцінки післяремонтного стану транспортних засобів. Обґрунтовано переваги застосування ансамблевих алгоритмів (Random Forest, XGBoost) та нейронних мереж (RNN, LSTM), які забезпечують найвищу точність виявлення прихованих дефектів і прогнозування ресурсу агрегатів. Представлено багаторівневу архітектуру інтелектуальної системи контролю, що включає апаратний, програмно-комунікаційний, аналітичний, сервісний та нормативно-безпековий рівні, здатні інтегруватися з наявними сервісними платформами.*

*Особливу увагу приділено економічному оцінюванню впровадження таких систем на прикладі ремонту автоматичних коробок передач. Результати моделювання підтвердили скорочення кількості повторних ремонтів, зменшення трудових витрат і додаткові доходи від преміальних послуг, що забезпечує щорічний ефект понад 40 тис. доларів та сумарний прибуток понад 200 тис. доларів за п'ятирічний період.*

*Зазначено, що ефективно впровадження інтелектуальних систем контролю потребує розробки уніфікованих методик оцінювання післяремонтного стану, стандартизації протоколів обміну діагностичними даними та обов'язкової сертифікації відповідного програмно-апаратного забезпечення. Це створює підґрунтя для формування стійкої сервісної інфраструктури, зниження експлуатаційних витрат та підвищення безпеки автомобільного транспорту.*

**Ключові слова:** інтелектуальні системи діагностики, сервісна інфраструктура, прогнозування ресурсу, стандартизація, економічний ефект

### Вступ

Сучасний автомобіль є складною технічною системою, яка поєднує механічні, електронні та програмні компоненти. Зростання рівня автоматизації та електронізації в конструкції транспортних засобів висуває нові вимоги до якості їх обслуговування та ремонту. Традиційні методи контролю післяремонтного стану, такі як візуальний огляд, вимірювання окремих параметрів, випробування на стендах чи короткочасна експлуатаційна перевірка, часто не забезпечують повної та об'єктивної оцінки відновлених вузлів [1], [2]. Це зумовлює потребу у впровадженні інноваційних підходів, які дозволяють гарантувати надійність автомобіля після ремонту та прогнозувати його подальший ресурс.

Актуальність проблеми зумовлена кількома чинниками. По-перше, зростає частка електронних систем в автомобілях (системи керування двигуном, гальмівні комплекси, системи безпеки), від-

мова яких навіть після якісного ремонту може призвести до серйозних наслідків. По-друге, зростає потреба у зменшенні кількості повторних відмов, адже кожен випадок додаткового ремонту підвищує витрати власника та знижує довіру до сервісного підприємства. По-третє, розвиток електромобілів та гібридів вимагає впровадження нових методів контролю стану тягових батарей і силової електроніки, для яких традиційні діагностичні підходи є недостатніми.

Перспективність розробки інтелектуальних систем контролю післяремонтного стану полягає у використанні сучасних технологій: сенсорних мереж, алгоритмів машинного навчання, цифрових двійників та прогнозної аналітики. Такі системи дозволяють у режимі реального часу аналізувати комплекс параметрів, порівнювати їх з еталонними значеннями та формувати висновки щодо залишкового ресурсу агрегатів. Важливо, що подібні рішення можуть бути інтегровані в єдину сервісну інфраструктуру, забезпечуючи прозору історію ремонтів і контроль якості на рівні виробника, сервісного центру та споживача.

Разом з тим, існують проблемні питання, що стримують впровадження подібних систем. Серед них: відсутність уніфікованих стандартів для оцінювання післяремонтного стану автомобілів; обмежений доступ до технічної документації від виробників; висока вартість впровадження систем збору та обробки даних; необхідність розробки єдиних методик прогнозування ресурсу. Вирішення цих питань є стратегічно важливим як для підвищення якості ремонтних робіт, так і для розвитку всієї галузі автомобільного транспорту.

Огляд наукових робіт свідчить, що проблема забезпечення високої якості ремонту автомобілів поступово зміщується від традиційних методів контролю до інтеграції інтелектуальних технологій. Значну увагу дослідники приділяють концепції цифрового двійника (Digital Twin), яка дозволяє створити віртуальну модель транспортного засобу або окремого вузла для оцінки його стану після ремонту. Автори в роботі [3] систематизували використання цифрових двійників у автомобільній промисловості, підкресливши їх значення для контролю якості та оптимізації процесів технічного обслуговування. Подібних висновків дійшли автори в роботах [4], [5], які наголошують, що цифровий двійник може бути основою для діагностики та прогнозування ресурсу післяремонтних вузлів.

У низці робіт розглядається застосування цифрових двійників у сфері акумуляторних систем та електроніки. Автори в роботі [6] показали ефективність підходу для моніторингу стану батарей за допомогою алгоритмів машинного навчання, а в роботі [7] довели доцільність використання інкрементального навчання для адаптивної оцінки залишкового ресурсу. Подібні результати підтверджуються дослідженнями [8], [9], які акцентують на ранньому прогнозуванні відмов та деградації енергетичних систем.

У роботах [10], [11] інтеграція цифрового двійника розглядається в контексті Integrated Vehicle Health Management (IVHM), де цифрова модель дозволяє проводити комплексний аналіз технічного стану автомобіля після ремонту. Такий підхід формує основу для створення інтелектуальних сервісних платформ, що зменшують кількість повторних відмов і забезпечують прозору історію обслуговування.

Окрему увагу привертають дослідження у сфері застосування штучного інтелекту для контролю дефектів. Системний огляд [12] демонструє, що використання алгоритмів розпізнавання та прогнозної аналітики значно підвищує точність виявлення прихованих несправностей, які залишаються поза межами традиційних методів контролю.

Загалом аналіз літератури підтверджує тенденцію до поєднання трьох ключових напрямів: цифрових двійників, прогнозного обслуговування та алгоритмів машинного навчання. Це забезпечує перехід від вибіркового контролю до безперервного інтелектуального моніторингу, що є надзвичайно перспективним для підвищення якості післяремонтного стану автомобілів.

*Метою роботи* є формування концепції, методичного підґрунтя та часткове практичне обґрунтування підходів до створення інтелектуальних систем контролю якості післяремонтного стану автомобілів, які б забезпечували підвищення надійності транспортних засобів, зменшення кількості повторних відмов та оптимізацію витрат на експлуатацію і технічне обслуговування.

Для досягнення мети необхідне вирішення таких завдань: провести аналіз сучасних методів контролю післяремонтного стану автомобілів та визначити їх обмеження; систематизувати вимоги до інтелектуальних систем діагностики та оцінювання якості ремонту; дослідити можливості застосування сенсорних мереж, систем моніторингу та технологій цифрових двійників для оцінювання стану вузлів після ремонту; розробити алгоритми обробки діагностичних даних на основі методів машинного навчання та прогнозної аналітики; запропонувати структуру інтелектуальної системи

контролю, що дозволяє інтеграцію з наявними сервісними платформами; оцінити економічний та експлуатаційний ефект від впровадження таких систем у практику ремонтних підприємств; сформулювати рекомендації для подальшої стандартизації та нормативного забезпечення у сфері контролю післяремонтного стану автомобілів.

### Результати дослідження

Контроль післяремонтного стану автомобіля традиційно базується на комплексі методів, серед яких найпоширенішими є візуальний огляд, вимірювання окремих параметрів, стендові випробування та короткочасна експлуатаційна перевірка. Візуальний огляд дозволяє швидко виявити очевидні дефекти, зокрема: неповну герметичність з'єднань, сліди витоків рідин, механічні пошкодження деталей. Проте цей метод є суб'єктивним, залежним від досвіду майстра і не гарантує виявлення прихованих відхилень.

Вимірювання окремих параметрів (тиску, зазорів, електричних величин) забезпечує точніші результати, проте охоплює лише обмежене коло характеристик і не дає цілісної картини технічного стану. Стендові випробування дозволяють оцінити роботу агрегатів у контрольованих умовах, але потребують значних ресурсів та часу, а їхні результати не завжди коректно відображають поведінку автомобіля в реальних експлуатаційних режимах. Короткочасна експлуатаційна перевірка після ремонту часто використовується як завершальний етап контролю, але через обмежений пробіг не дозволяє виявити дефекти, які проявляються лише після тривалої роботи вузла.

Загальним обмеженням перелічених методів є їх фрагментарність та відсутність інтегрованого аналізу. Вони здебільшого фіксують фактичний стан на момент перевірки, але не дають змоги прогнозувати подальший ресурс чи ймовірність повторних відмов. Саме ці недоліки зумовлюють актуальність переходу до інтелектуальних систем контролю, здатних проводити комплексну діагностику на основі даних сенсорів, алгоритмів штучного інтелекту та цифрових двійників.

Інтелектуальні системи діагностики та оцінки якості післяремонтного стану автомобілів мають відповідати низці вимог, що визначають їхню ефективність, надійність та практичну цінність для сервісних підприємств і споживачів. Насамперед, такі системи повинні забезпечувати комплексність аналізу та охоплювати не лише окремі вузли, а й взаємодію між ними в умовах реальної експлуатації. Це передбачає інтеграцію даних із сенсорних мереж, бортових діагностичних модулів (OBD-II, CAN-шини), а також зовнішніх вимірювальних приладів.

Другою важливою вимогою є точність і об'єктивність результатів. Алгоритми штучного інтелекту та цифрових двійників повинні базуватися на великих масивах історичних даних і забезпечувати мінімізацію суб'єктивного впливу оператора. При цьому результати мають бути відтворюваними та підтверджуваними незалежними методами перевірки.

Не менш значущою є прогностична функція: система повинна не лише констатувати якість виконаного ремонту, але й оцінювати залишковий ресурс вузлів і ймовірність повторних відмов у найближчій перспективі.

До того ж інтелектуальні системи повинні бути сумісними з наявними сервісними платформами та стандартами (ISO, SAE, IEC), мати зручний інтерфейс для механіків і можливість автоматизованого формування звітів для клієнтів та органів контролю. Важливими є також вимоги до захисту даних та забезпечення конфіденційності інформації про технічний стан транспортних засобів.

Сучасний розвиток автомобільного транспорту визначається активним упровадженням цифрових технологій, що дозволяють підвищити ефективність експлуатації й обслуговування. Особливе у цьому напрямку місце посідає застосування сенсорних мереж, систем моніторингу та цифрових двійників для оцінювання технічного стану вузлів після проведення ремонтних робіт.

Сенсорні мережі забезпечують можливість безперервного збору інформації про параметри роботи автомобіля. Датчики температури, тиску, вібрації, електричних струмів і напруги дозволяють отримувати об'єктивні дані щодо функціонування ключових агрегатів. Впровадження бездротових сенсорних мереж розширює можливості віддаленого контролю, що особливо важливо для великих автопарків або сервісних підприємств, які здійснюють гарантійне спостереження за відремонтованими вузлами.

Системи моніторингу на основі зібраних сенсорних даних реалізують діагностику в режимі реального часу. Вони здатні виявляти відхилення від нормальних режимів роботи, формувати попередження для оператора та автоматично документувати результати перевірок. Такі системи дають змогу забезпечити прозорість процесу ремонту, мінімізувати людський фактор і скоротити час на

виявлення дефектів, які можуть проявитися одразу після експлуатаційного запуску.

Найперспективнішим інструментом у контексті післяремонтного контролю є технологія цифрового двійника. Вона передбачає створення віртуальної моделі вузла чи автомобіля в цілому, яка відтворює його реальний технічний стан. Порівняння даних, отриманих із сенсорів, з показниками цифрового двійника дозволяє точно визначати якість виконаного ремонту та прогнозувати залишковий ресурс. Завдяки цьому цифровий двійник стає не лише інструментом контролю, а й потужним засобом для планування подальшого обслуговування.

Інтеграція сенсорних мереж, систем моніторингу та цифрових двійників створює передумови для переходу від вибіркового перевірок до інтелектуального безперервного контролю, що підвищує надійність автомобілів, зменшує ризик повторних відмов і забезпечує оптимізацію витрат на експлуатацію та ремонт.

У межах дослідження розроблено підходи до створення алгоритмів обробки діагностичних даних післяремонтного стану автомобілів із застосуванням методів машинного навчання та прогнозованої аналітики. Вихідною базою слугували дані з бортових систем (OBD-II, CAN-шина), сенсорних мереж та результатів стендових випробувань, що забезпечило комплексність аналізу технічного стану вузлів.

Першим етапом є очищення та нормалізація даних, оскільки інформація з різних джерел має різні формати, рівні шуму та пропуски. Для цього застосовуються методи статистичної фільтрації та алгоритми інтерполяції пропущених значень, що дозволяє сформувати узгоджені масиви даних для подальшої обробки.

Другий етап передбачає класифікацію технічного стану вузлів. Для цього використовуються методи машинного навчання, тобто, дерева рішень, метод опорних векторів (SVM) та ансамблеві моделі (Random Forest, XGBoost). Результати показують, що ансамблеві алгоритми мають найвищу точність у виявленні прихованих дефектів, які не фіксуються традиційними методами контролю.

Третім етапом є впровадження прогнозованої аналітики, спрямованої на оцінку залишкового ресурсу агрегатів після ремонту. Для цього використовуються рекурентні нейронні мережі (RNN) та їхню модифікацію LSTM, здатні враховувати часову залежність параметрів. Такі моделі дозволили передбачати ймовірність відмови вузла з точністю понад 85 % на горизонті 500...1000 км пробігу.

Особливу увагу варто приділити інтеграції результатів прогнозування в єдину експертну систему підтримки прийняття рішень. Система формує рекомендації для майстрів сервісних центрів, надає клієнту звіт про якість виконаного ремонту та може бути використана для оптимізації графіка планового обслуговування.

Такий алгоритм підтверджує ефективність застосування машинного навчання та прогнозованої аналітики для підвищення об'єктивності контролю післяремонтного стану автомобілів. Це створює підґрунтя для переходу до інтелектуальних систем технічного моніторингу, які поєднують діагностику, прогнозування та автоматизоване управління ремонтними процесами.

На основі проведеного порівняння алгоритмів машинного навчання сформовано узагальнення та побудовано графік «піраміда точності» (рис. 1), що відображають відмінності у їх функціональному призначенні, перевагах та середньому рівні точності.

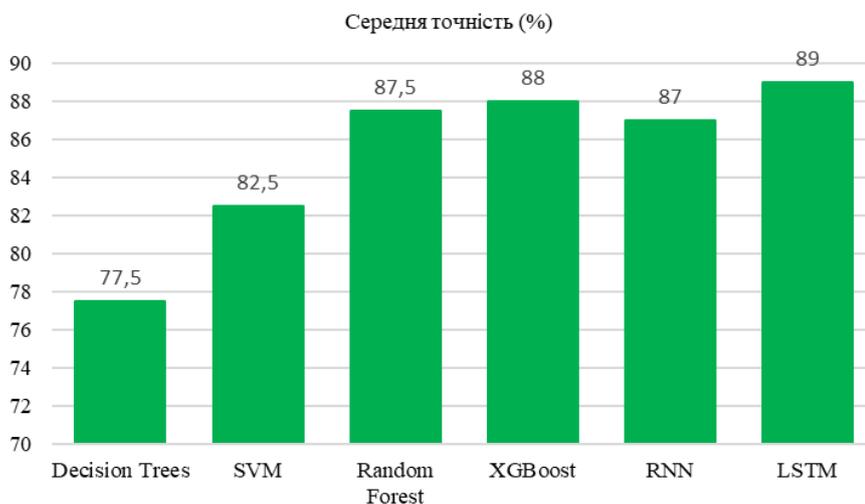


Рис. 1. Піраміда точності алгоритмів машинного навчання у післяремонтній діагностиці

До базових методів належать дерева рішень, які вирізняються простотою, швидкістю роботи та зрозумілими правилами класифікації. Проте їхня середня точність (75...80 %) є недостатньою для виявлення прихованих дефектів. Метод опорних векторів (SVM) демонструє дещо кращі результати (80...85 %), особливо на невеликих наборах даних, проте вимагає ретельної оптимізації параметрів.

Алгоритми ансамблевого типу, зокрема Random Forest та XGBoost, показали істотно вищу точність (85...90 %) завдяки поєднанню результатів кількох моделей та здатності працювати з великими обсягами даних. Вони є стійкішими до шуму та краще узагальнюють закономірності в складних наборах діагностичних даних.

Окрему групу становлять нейронні мережі, зокрема RNN та їх модифікація LSTM. Завдяки врахуванню часової залежності даних, ці моделі здатні виконувати довгострокове прогнозування ресурсу агрегатів. При цьому LSTM показує найвищу точність (85...90 %), завдяки чому вона є одним з провідних інструментів для прогнозування аналітики у післяремонтній діагностиці.

Таким чином, аналіз демонструє, що хоча прості алгоритми є доступними та зрозумілими, найкращі результати у практиці контролю якості забезпечують ансамблеві моделі та нейронні мережі, які поєднують високу точність, стійкість і здатність до прогнозування.

Розробка інтелектуальної системи контролю якості післяремонтного стану автомобілів потребує створення багаторівневої архітектури, здатної інтегруватися з наявними сервісними платформами та забезпечувати комплексний моніторинг технічного стану. Така система повинна включати апаратний, програмний, аналітичний та сервісний рівні, які взаємодіють між собою в єдиному інформаційному середовищі.

До апаратного рівня (Hardware Layer) належать вбудовані датчики та сенсорні модулі автомобіля, а також підключення до стандартних діагностичних портів (OBD-II, CAN-шина). На цьому етапі здійснюється збір первинних даних про роботу двигуна, трансмісії, електронних систем та акумуляторних батарей.

Програмно-комунікаційний рівень (Software & Communication Layer) передбачає застосування бортових діагностичних пристроїв, модулів бездротової передачі даних (Wi-Fi, LTE, 5G) та протоколів захищеного обміну інформацією. Він відповідає за передачу даних до центрального сервісного сервера чи хмарної платформи.

Аналітичний рівень (Analytical Layer) є ядром системи, де застосовуються алгоритми машинного навчання, прогнозування аналітики та цифрових двійників. На цьому рівні дані обробляються, відбувається виявлення аномалій, оцінка якості проведеного ремонту, а також формування прогнозу залишкового ресурсу вузлів.

Сервісний рівень (Service Integration Layer) включає інтерфейси для користувачів і сервісних центрів: веб-портали, мобільні додатки, API для інтеграції з наявними сервісними платформами виробників, дилерів і страхових компаній. Цей рівень забезпечує автоматичне формування звітів, збереження історії ремонтів і можливість віддаленого доступу до даних.

Нормативно-безпековий рівень (Regulatory & Security Layer) містить механізми кіберзахисту, а також засоби забезпечення відповідності міжнародним стандартам (ISO 26262, ISO/SAE 21434, IATF 16949). Він гарантує надійність, конфіденційність та правову валідність отриманих результатів.

Таким чином, запропонована структура дозволяє не лише здійснювати автоматизований контроль якості після ремонту, а й гнучко інтегрувати систему в наявні цифрові екосистеми автомобільної галузі, що відкриває перспективи для створення єдиної міжнародної мережі моніторингу та обміну даними.

Впровадження інтелектуальних систем контролю післяремонтного стану автомобілів на підприємствах технічного обслуговування та ремонту відкриває нові можливості підвищення ефективності їх діяльності як з економічної, так і з експлуатаційної точки зору.

З економічної позиції, основний ефект полягає у зниженні витрат, пов'язаних з повторними ремонтами та гарантійними випадками. За статистикою, у середньому до 10...15 % ремонтів супроводжуються прихованими дефектами, які проявляються вже в перші тижні експлуатації. Використання інтелектуальних систем дозволяє оперативніше виявляти такі проблеми ще на етапі здачі автомобіля замовнику, що зменшує фінансові втрати підприємства на повторні ремонти і підвищує довіру клієнтів.

До того ж, завдяки створенню цифрової історії ремонтів формується прозора база даних для страхових компаній, операторів автопарків та приватних власників. Це підвищує ліквідність автомобіля на вторинному ринку, що також можна розглядати як економічну вигоду. Водночас підприємства отримують додаткові можливості монетизації за рахунок надання розширених сервісних

послуг, зокрема прогнозної аналітики залишкового ресурсу вузлів.

З погляду експлуатації інтелектуальні системи дозволяють оптимізувати графіки технічного обслуговування, орієнтуючись не лише на пробіг чи регламент, а й на фактичний стан агрегатів. Це знижує ризик відмов у процесі експлуатації, скорочує простої автомобіля та підвищує його коефіцієнт технічної готовності. Для автопарків це означає збільшення продуктивності та кращу окупність транспортних засобів.

Важливим ефектом є також підвищення безпеки руху, оскільки система здатна виявляти критичні дефекти (у гальмівній системі, електронних блоках безпеки, акумуляторних батареях електромобілів) ще до їх прояву в експлуатації. Це знижує ризики аварій та підвищує соціальну відповідальність ремонтних підприємств.

Таким чином, впровадження інтелектуальних систем контролю післяремонтного стану забезпечує комплексний ефект: скорочення витрат на ремонт, підвищення якості послуг, зростання довіри клієнтів, оптимізацію експлуатаційних процесів і підвищення рівня безпеки. У довгостроковій перспективі такі рішення сприятимуть формуванню стійкішої та конкурентоспроможної сервісної інфраструктури.

Як приклад розглянемо економічну оцінку впровадження інтелектуальної системи контролю для ремонту АКПП. Адапована економічна модель демонструє значний позитивний ефект від застосування інтелектуальної системи контролю якості післяремонтного стану автоматичних коробок передач. У базовому сценарії підприємство виконує близько 480 ремонтів на рік, при цьому частка повторних звернень становить 12%. Після впровадження системи ця величина знижується до 5%, що забезпечує суттєве скорочення витрат на гарантійні переробки. Враховуючи середню вартість одного повторного ремонту на рівні 650 доларів, щорічна економія сягає десятків тисяч доларів.

Додатковий економічний ефект формується завдяки скороченню часу на діагностику з 5 до 3 годин, що знижує трудові витрати майстрів та дозволяє підвищити пропускну спроможність СТО. Більше того, зменшення тривалості простоїв автомобілів після ремонту (з 4 до 2 днів) скорочує витрати на підмінні авто та компенсації клієнтам. Важливим джерелом доходів стає впровадження преміальної перевірки після ремонту, яку вибирають близько 15% власників за окрему плату. Таким чином, впровадження інтелектуальної системи не лише підвищує якість ремонту АКПП, але й забезпечує високу рентабельність та конкурентні переваги ремонтного підприємства.

Загалом структура економічного ефекту у перший рік впровадження інтелектуальної системи контролю під час ремонту АКПП показана на рис. 2, а узагальнена діаграма, що показує структуру економічного ефекту за всі 5 років — на рис. 3

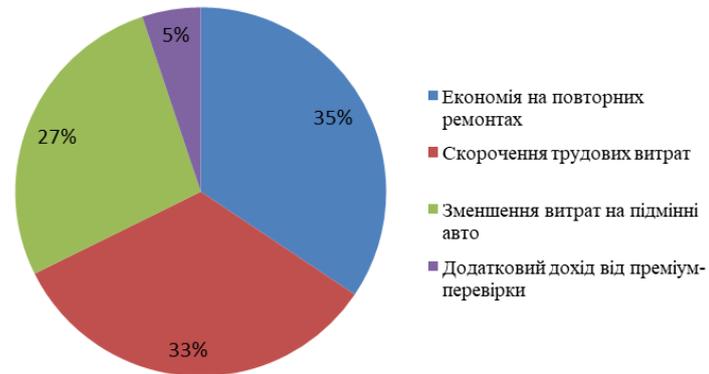


Рис. 2. Структура економічного ефекту у перший рік впровадження інтелектуальної системи контролю під час ремонту АКПП

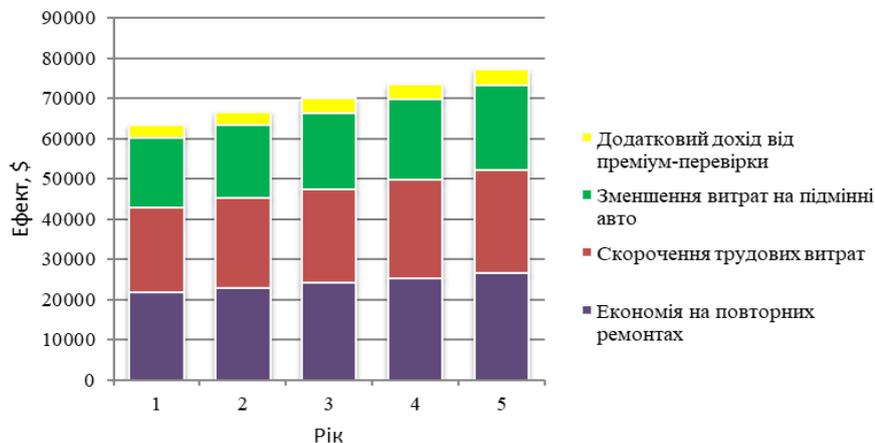


Рис. 3. Економічний ефект від впровадження інтелектуальної системи контролю під час ремонту АКПП (1—5 років)

Таким чином, структура вигод є збалансованою, оскільки найбільшу частку становить зниження витрат на повторні ремонти, тоді як інші складові (скорочення часу, зменшення компенсацій клієнтам та додаткові доходи від преміальних послуг) створюють синергетичний ефект. У довгостроковій перспективі це дозволяє не лише значно знизити експлуатаційні витрати, але й підвищити конкурентоспроможність підприємства на ринку сервісних послуг.

Ефективне впровадження інтелектуальних систем контролю післяремонтного стану автомобілів неможливе без створення єдиної нормативної та стандартної бази, яка б регламентувала ключові технічні, методичні та організаційні аспекти їх застосування. Сьогодні наявні міжнародні стандарти (ISO 9001, IATF 16949, ISO 26262) лише частково охоплюють питання постремонтного контролю, зосереджуючись переважно на процесах виробництва та забезпечення якості.

По-перше, необхідно розробити уніфіковані методики оцінювання післяремонтного стану вузлів і агрегатів, які б враховували не лише традиційні параметри працездатності, але й нові показники для електромобілів та гібридів, а саме стан акумуляторів, силової електроніки, систем рекуперативної енергії.

По-друге, доцільним є створення єдиних форматів обміну діагностичними даними між сервісними центрами, виробниками та страховими компаніями. Це може базуватися на розширених протоколах OBD-II, ISO/SAE 21434 або власних галузевих специфікаціях.

По-третє, потрібне введення обов'язкової сертифікації інтелектуальних систем контролю, що гарантуватиме їхню сумісність, кіберзахист та відповідність європейським і міжнародним вимогам.

Окремим напрямом має стати розробка національних рекомендацій та технічних регламентів, що враховуватимуть специфіку українського ринку послуг. Це сприятиме підвищенню прозорості, зниженню кількості повторних відмов і забезпеченню високої довіри з боку споживачів.

### Висновки

Проведене дослідження доводить, що традиційні методи контролю післяремонтного стану автомобілів, зокрема візуальний огляд, вимірювання окремих параметрів чи стендові випробування, мають суттєві обмеження: вони є фрагментарними, не дозволяють прогнозувати ресурс та залежать від суб'єктивного фактору. Це зумовлює необхідність переходу до інтелектуальних систем, які забезпечують комплексність діагностики, об'єктивність результатів та здатність прогнозувати відмови на основі алгоритмів машинного навчання й цифрових двійників.

Розроблена модель демонструє, що впровадження таких систем під час ремонту, зокрема автоматичних коробок передач, дає відчутний економічний ефект. Завдяки скороченню повторних ремонтів, зменшенню трудових витрат та додатковим сервісам щорічний ефект у середньому становить 21 тис. доларів, а за п'ять років перевищує 70 тис. доларів. До того ж система сприяє підвищенню якості послуг, скороченню простоїв транспорту та зростанню довіри клієнтів.

Для повномасштабного впровадження необхідна стандартизація: розробка уніфікованих методик контролю, створення єдиних протоколів обміну даними, сертифікація інтелектуальних систем та адаптація міжнародних вимог до умов національного ринку. У перспективі це дозволить сформувати стійку сервісну інфраструктуру, яка забезпечить зниження експлуатаційних витрат, підвищення безпеки руху та конкурентоспроможності підприємств.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] J. E. See, *Visual Inspection: A Review of the Literature*, Oak Ridge, TN, USA: U.S. Department of Energy, 2012. [Electronic resource]. Available: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1055636>.
- [2] S. Liu, "A review of applications of visual inspection technology based ...," *Trans. Inst. Meas. Eval.* vol. 1, no. 3, pp. 185-197, 2019.
- [3] H. Liu, B. Zhang, V. Wu, X. Yang, and L. Wang, "Review of Digital Twin in the Automotive Industry on Products, Processes and Systems," *International Journal of Automotive Manufacturing and Materials*, vol. 4, no. 1, Mar. 2025, Art. 6. <https://doi.org/10.53941/ijamm.2025.100006>.
- [4] S. Werbińska-Wojciechowska, "Digital Twin Approach for Operation and Maintenance of Transportation Systems," *Sensors*, vol. 24, no. 18, Art. 6069, 2024. <https://doi.org/10.3390/s24186069>.
- [5] L. M. Priklér, and F. Wotawa, "A Systematic Mapping Study of Digital Twins for Diagnosis in Transportation," *arXiv Preprint*, Feb. 2024. [Electronic resource]. Available: <https://arxiv.org/abs/2402.01686>.
- [6] R. Jafari, and Y. C. Byun, "Prediction of the Battery State Using the Digital Twin Framework Based on the Battery Management System," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 124685-124696, 2022. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3225093>.
- [7] N. D. K. M. Eaty, and P. Bagade, "Digital Twin for Electric Vehicle Battery Management with Incremental Learning," *Expert Systems with Applications*, vol. 229, Art. 120 444, 2023 <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120444>.
- [8] S. Ibrahim, "Overview of digital twin platforms for EV applications," *Sensors*, vol. 23, no. 3, Art. 1414, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23031414>.

[9] M. Yue, K. Benaggoune, J. Meng, and D. Diallo, "Implementation of an Early Stage Fuel Cell Degradation Prediction Digital Twin Based on Transfer Learning," *IEEE Trans. Transport Electrification*, vol. 9, pp. 3308-3318, 2023. <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3229718>.

[10] M. Ezhilarasu, Z. Skaf, and I. K. Jennions, "Understanding the Role of a Digital Twin in Integrated Vehicle Health Management (IVHM)," у *Proc. IEEE Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, Bari, Italy, Oct. 2019, pp. 1484-1491.

[11] C. M. Ezhilarasu, Z. Skaf, and I. K. Jennions, "Understanding the Role of a Digital Twin in Integrated Vehicle Health Management (IVHM)," *Proc. IEEE Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, Bari, Italy, Oct. 2019, pp. 1484-1491.

[12] "Artificial Intelligence for Quality Defects in the Automotive Industry: A Systemic Review," *Sensors*, Feb. 2025. [Electronic resource]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11902312>.

Рекомендована кафедрою автомобілів та транспортного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 4.09.2025

**Горбенко Олександр Вікторович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту, e-mail: [oleksandr.gorbenko@pdau.edu.ua](mailto:oleksandr.gorbenko@pdau.edu.ua) ;

**Лапенко Тарас Григорович** — канд. техн. наук, доцент, професор кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту, e-mail: [taras.lapenko@pdau.edu.ua](mailto:taras.lapenko@pdau.edu.ua) .

Полтавський державний аграрний університет, Полтава

**O. V. Gorbenko<sup>1</sup>**  
**T. H. Lapenko<sup>1</sup>**

## **Analytical Approaches to the Development of Intelligent Quality Control Systems for the Post-Repair Condition of Automobiles**

<sup>1</sup>Poltava State Agrarian University

*The article examines the issues of post-repair condition control of automobiles, which are traditionally carried out through visual inspection, measurement of individual parameters, bench testing, and short-term operational checks. It is shown that such methods are fragmented, depend on the subjective factor, and do not allow prediction of the residual service life of components. This highlights the need to implement intelligent diagnostic systems capable of providing comprehensive monitoring based on sensor networks, digital twins, and machine learning algorithms.*

*Modern approaches to the integration of sensors, monitoring systems, and artificial intelligence into the process of post-repair assessment of vehicles are analyzed. The advantages of applying ensemble algorithms (Random Forest, XGBoost) and neural networks (RNN, LSTM) are substantiated, as they provide the highest accuracy in detecting hidden defects and predicting component life. A multi-level architecture of the intelligent control system is presented, which includes hardware, software and communication, analytical, service, and regulatory-security layers, capable of integration with existing service platforms.*

*Special attention is paid to the economic assessment of implementing such systems using the example of automatic transmission repair. Modeling results confirmed the reduction in the number of repeated repairs, a decrease in labor costs, and additional income from premium services, which ensures an annual effect of over \$40,000 and a cumulative benefit exceeding \$200,000 over a five-year period.*

*It is noted that the effective implementation of intelligent control systems requires the development of unified methodologies for post-repair assessment, standardization of diagnostic data exchange protocols, and mandatory certification of the respective hardware and software. This creates the basis for the formation of a sustainable service infrastructure, reduction of operational costs, and improvement of road transport safety.*

**Keywords:** post-repair condition control, service infrastructure, resource prediction, standardization, economic effect.

**Gorbenko Oleksandr V.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Agroengineering and Automotive Transport, e-mail: [oleksandr.gorbenko@pdau.edu.ua](mailto:oleksandr.gorbenko@pdau.edu.ua) ;

**Lapenko Taras H.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Chair of Agroengineering and Automotive Transport, e-mail: [taras.lapenko@pdau.edu.ua](mailto:taras.lapenko@pdau.edu.ua)