

**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ АВТОМОБІЛІВ  
В УМОВАХ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ШЛЯХОМ АНАЛІЗУ  
ЕЛЕКТРИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ  
ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

**Ю.Ф. Холодний<sup>1</sup>, О.В. Головіна<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій,  
Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук, Кременчук, Україна  
ORCID ID: 0000-0009-6695-8258

<sup>2</sup> кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій,  
Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук, Кременчук, Україна  
ORCID ID: 0000-0002-9858-888X

**Анотація**

*Актуальність дослідження* зумовлена зростанням складності сучасних автомобільних систем, насамперед електронного й електричного обладнання, що ускладнює своєчасне виявлення несправностей у процесі технічної експлуатації. За умов інтенсивного використання транспортних засобів підвищуються вимоги до точності, швидкості та інформативності діагностичних процедур, що потребує переходу до комплексного аналізу параметрів різної фізичної природи. **Метою** дослідження є розроблення та наукове обґрунтування комплексних методів діагностики технічного стану автомобілів в умовах експлуатації на основі інтегрованого аналізу електричних і механічних параметрів. **Методи.** У процесі дослідження використано методи системного аналізу, узагальнення, порівняння та структурно-функціонального моделювання, що дало змогу дослідити підходи до діагностики, інформативні параметри та принципи інтеграції різномірних даних. **Результати.** Досліджено сучасні підходи до діагностики автомобілів та встановлено доцільність їх комплексного застосування. Охарактеризовано інформативні діагностичні параметри електричного обладнання та технічного стану деталей машин і виявлено їх взаємозв'язок. Обґрунтовано принципи побудови комплексних методів діагностики на основі інтеграції різномірних даних, зокрема синхронізації, нормалізації та кореляційного аналізу. Виявлено основні наукові та практичні проблеми, що пов'язані з неузгодженістю даних, складністю їх інтерпретації, впливом змінних режимів експлуатації та обмеженою адаптивністю моделей. Доведено, що використання інтегрованого підходу дає змогу підвищити точність і достовірність оцінювання технічного стану. **Висновки.** Обґрунтовано, що впровадження комплексних діагностичних методів, орієнтованих на інтегрований аналіз електричних і механічних параметрів, забезпечує підвищення ефективності технічного обслуговування та створює передумови для переходу до прогностичного обслуговування транспортних засобів. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням інтелектуальних адаптивних

моделей інтеграції різнорідних даних, підвищенням стійкості діагностичних методів до зашумлення сигналів та їх впровадженням у системи моніторингу технічного стану в режимі реального часу.

**Ключові слова:** інтегрована діагностика, сенсорні дані, технічний стан, предиктивно обслуговування, кореляційний аналіз.

## RESEARCH ON METHODS OF VEHICLE DIAGNOSTICS UNDER TECHNICAL OPERATION CONDITIONS BASED ON THE ANALYSIS OF ELECTRICAL EQUIPMENT AND TECHNICAL CONDITION OF MACHINE COMPONENTS

Yu. F. Kholodnyi<sup>1</sup>, O. V. Holovina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Motor Transport and Transport Technologies,  
Branch of the Classical Private University in Kremenchuk, Kremenchuk, Ukraine  
ORCID ID: 0000-0009-6695-8258

<sup>2</sup> Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Motor Transport and Transport Technologies,  
Branch of the Classical Private University in Kremenchuk, Kremenchuk, Ukraine  
ORCID ID: 0000-0002-9858-888X

### Summary

**The relevance** of the study is determined by the increasing complexity of modern vehicle systems, particularly electronic and electrical equipment, which complicates the timely detection of faults during technical operation. Under conditions of intensive use of vehicles, the requirements for accuracy, speed, and informativeness of diagnostic procedures are increasing, which necessitates a transition to the integrated analysis of parameters of different physical nature. **The aim** of the study is to develop and scientifically substantiate comprehensive methods for diagnosing the technical condition of vehicles under operating conditions based on the integrated analysis of electrical and mechanical parameters. **Methods.** The study employs system analysis, generalization, comparison, and structural-functional modeling, which made it possible to investigate diagnostic approaches, informative parameters, and principles of heterogeneous data integration. **Results.** Modern approaches to vehicle diagnostics have been investigated and the feasibility of their integrated application has been established. Informative diagnostic parameters of electrical equipment and the technical condition of machine components have been characterized, and their interrelationships have been identified. The principles of constructing comprehensive diagnostic methods based on the integration of heterogeneous data, including synchronization, normalization, and correlation analysis, have been substantiated. The main scientific and practical problems have been identified, including data inconsistency, complexity of interpretation, the influence of variable operating modes, and limited adaptability of models. It has been proven that the use of an integrated approach improves the accuracy and reliability of technical condition assessment. **Conclusions.** It has been substantiated that the implementation of comprehensive diagnostic methods based on the integrated analysis of electrical and mechanical parameters increases the efficiency of maintenance and creates the basis for the transition to predictive maintenance of vehicles. Prospects for further research are associated with the development of intelligent adaptive models for integrating heterogeneous data, improving the robustness of diagnostic methods to noisy signals, and their implementation in real-time technical condition monitoring systems.

**Key words:** integrated diagnostics, sensor data, condition monitoring, predictive maintenance, correlation analysis.

**Вступ.** Актуальність теми дослідження зумовлена зростанням складності сучасних автомобільних систем, насамперед електронного й електричного обладнання, що визначає функціональну надійність транспортних засобів у процесі технічної експлуатації. Інтеграція бортових електронних систем управління, сенсорних мереж і діагностичних інтерфейсів потребує застосування більш точних та інформативних методів оцінювання технічного стану як окремих елементів, так і систем загалом. В умовах інтенсивної експлуатації транспортних засобів особливої ваги набуває своєчасне виявлення прихованих дефектів електричного обладнання та деградаційних процесів у деталях машин, що безпосередньо впливає на безпеку руху, економічність та екологічні показники. Водночас існуючі підходи до діагностики часто характеризуються фрагментарністю, орієнтацією на окремі вузли або використанням застарілих методів контролю, що не повною мірою враховують комплексний характер функціонування сучасних автомобілів.

**Постановка проблеми.** Проблема полягає у необхідності розроблення та наукового обґрунтування інтегрованих методів діагностики технічного стану автомобілів в умовах реальної експлуатації з урахуванням взаємозв'язку електричних, механічних і теплових процесів. Сучасні транспортні засоби характеризуються високим рівнем електронізації, що ускладнює виявлення відмов через їх латентний характер і взаємний вплив компонентів систем. Існуючі підходи до діагностики залишаються переважно локальними, орієнтованими на окремі вузли, що обмежує можливості комплексного оцінювання технічного стану та своєчасного виявлення деградаційних змін у деталях машин.

Наявна невідповідність між зростаючою складністю електричного обладнання автомобілів і рівнем розвитку діагностичних методів ускладнює формування достовірних критеріїв оцінювання працездатності. Це знижує ефективність технічного обслуговування, призводить до підвищення експлуатаційних витрат і ризиків відмов у процесі руху. У зв'язку із цим актуалізується потреба в удосконаленні методів збору й обробки діагностичної інформації, інтеграції даних різної фізичної природи та впровадженні інтелектуальних підходів до аналізу технічного стану, що має важливе значення для підвищення надійності транспортних засобів і забезпечення безпеки їх експлуатації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Огляд сучасних досліджень у сфері діагностики автомобілів в умовах технічної експлуатації засвідчує системний характер наукових підходів, що поєднують аналіз електричного обладнання та технічного стану механічних компонентів. О. В. Головіна та співавтори доводять, що якість діагностики електронних систем безпосередньо визначає ефективність подальшої технічної експлуатації автомобіля, формуючи передумови для зниження відмов та підвищення надійності [1]. В. В. Кривда та співавтори розширюють ці положення, акцентуючи увагу на необхідності обґрунтованості інженерних рішень у процесі технічного обслуговування, що забезпечує підвищення ефективності експлуатації транспортних засобів [2]. В. Нечипорук та С. Орищенко узагальнюють сучасні методи діагностики машин, підкреслюючи доцільність комплексного використання різнорідних параметрів стану технічних систем [3]. Т. М. Надич та співавтори обґрунтовують упровадження кіберфізичного підходу в систему технічного сервісу, що дає змогу інтегрувати діагностичні дані

й оптимізувати процеси обслуговування вантажних автомобілів [4]. С. Бурлака та співавтори аналізують моделі діагностики транспортних засобів, визначаючи їх здатність відображати технічний стан об'єктів на основі параметричного аналізу [5], обґрунтовують вибір діагностичних методів із урахуванням факторів, що впливають на довговічність деталей та залишковий ресурс [6]. О. Рибіцький та В. Голян акцентують увагу на використанні методів штучного інтелекту для інтелектуальної діагностики автомобілів, що забезпечує підвищення точності виявлення несправностей електричних систем [7].

Інший вектор наукових підходів пов'язаний із впровадженням методів моніторингу технічного стану на основі аналізу фізичних процесів у вузлах машин. І. Курич (I. Kuric) та співавтори досліджують діагностичні методи в енергетичних системах приводів, доводячи ефективність аналізу енергетичних параметрів як інформативних ознак технічного стану [8]. А. Чоудхарі (A. Choudhary) та співавтори узагальнюють сучасні технології діагностики несправностей електромобілів, підкреслюючи роль компонентного підходу до аналізу електричних систем [9]. С. К. Гундевар (S. K. Gundewar) і П. В. Кейн (P. V. Kane) розглядають методи контролю стану електродвигунів, акцентуючи увагу на використанні вібраційних та електричних параметрів для раннього виявлення дефектів [10]. Г. А. Хуссейн (G. A. Hussain) та співавтори досліджують методи діагностики часткових розрядів у високовольтному обладнанні, що має прикладне значення для оцінювання стану електричних систем транспортних засобів [11]. Р. Р. Кумар (R. R. Kumar) та співавтори узагальнюють як традиційні, так і інтелектуальні підходи до діагностики та моніторингу стану індукційних двигунів, підкреслюючи ефективність поєднання класичних методів із алгоритмами штучного інтелекту [12]. М. Х. Мохд Газалі (M. H. Mohd Ghazali) та В. Рахіман (W. Rahiman) доводять доцільність застосування вібраційного аналізу як універсального інструменту діагностики технічного стану машин, що забезпечує підвищення точності ідентифікації дефектів [13].

Попри розвиток сучасних підходів до діагностики автомобілів, залишається невирішеною проблема формування цілісної діагностичної картини технічного стану на основі узгодженого аналізу електричних і механічних параметрів. Існуючі методи здебільшого відображають окремі аспекти функціонування систем і не забезпечують достатньої глибини інтерпретації причин відмов, що зумовлено складністю інтеграції різнорідних даних, їх динамічним характером та впливом експлуатаційних факторів.

Недостатня розробленість цих аспектів обмежує можливості переходу до достовірного прогнозування технічного стану, що визначає необхідність їх подальшого дослідження. У цьому контексті увага зосереджується на обґрунтуванні підходів до інтеграції діагностичних параметрів і формуванні методичної основи для підвищення ефективності діагностики, що безпосередньо спрямовано на досягнення мети дослідження.

**Мета і завдання статті.** Метою статті є розроблення та дослідження комплексних методів діагностики технічного стану автомобілів в умовах експлуатації на основі інтегрованого аналізу електричних і механічних параметрів.

Завдання статті:

1. Проаналізувати сучасні підходи до діагностики автомобілів та узагальнити інформативні електричні й механічні параметри.

2. Обґрунтувати принципи інтеграції різнорідних даних у комплексних методах діагностики та виявити проблеми їх застосування.

3. Розробити рекомендації щодо підвищення ефективності діагностики на основі інтегрованого аналізу параметрів.

**Виклад основного матеріалу.** Сучасні підходи до діагностики автомобілів формуються на основі інтеграції методів контролю електричних і механічних параметрів, що дає змогу забезпечити більш повне й достовірне оцінювання технічного стану транспортних засобів. Традиційні методи, орієнтовані на ізольований аналіз окремих вузлів, поступово заміщуються комплексними підходами, які враховують взаємозв'язок процесів у системах автомобіля. Значна увага приділяється використанню бортових діагностичних систем, сенсорних мереж та цифрових протоколів обміну даними, що забезпечують безперервний моніторинг параметрів функціонування. У цьому контексті доцільно розмежувати вбудоване діагностування, що реалізується за допомогою бортових систем самодіагностики (бортова діагностика, on-board diagnostics, OBD; уніфіковані діагностичні сервіси, Unified Diagnostic Services, UDS) і забезпечує контроль параметрів у режимі реального часу, та зовнішнє діагностування, яке здійснюється із застосуванням спеціалізованих діагностичних пристроїв і стендів у процесі технічного обслуговування та передбачає поглиблений аналіз технічного стану вузлів. У цьому контексті поєднання електричних показників (напруга, струм, сигнали датчиків) із механічними характеристиками (вібрація, знос, температурні режими) створює передумови для раннього виявлення відхилень і прогнозування технічного стану деталей машин (табл. 1).

Таблиця 1

**Сучасні підходи до діагностики автомобілів на основі електричних і механічних параметрів**

Підхід	Сутність	Діагностичні параметри	Практичне значення
Параметричний аналіз	Оцінювання стану за відхиленням контрольних параметрів	Напруга, струм, тиск, температура	Виявлення відхилень режимів роботи
Вібраційна діагностика	Аналіз коливальних процесів вузлів	Частота, амплітуда вібрацій	Виявлення зносу підшипників, передач
Термодіагностика	Контроль теплових режимів	Температура, теплові поля	Ідентифікація перегрівів і перевантажень
Електронна бортова діагностика	Використання вбудованих систем контролю	Коди несправностей, сигнали датчиків	Оперативне виявлення відмов
Акустична діагностика	Аналіз звукових сигналів	Рівень шуму, спектр	Раннє виявлення механічних дефектів
Комплексний підхід	Інтеграція різних методів	Сукупність електричних і механічних параметрів	Підвищення точності діагностики

*Джерело: сформовано автором на основі [1, с. 58; 3, с. 25; 5, с. 40; 7, с. 450; 9, р. 2328; 10, р. 650; 13].*

У практиці технічної експлуатації найбільш ефективним є поєднання наведених підходів. Наприклад, фіксація відхилень напруги в системі живлення сама по

собі не дозволяє встановити причину, однак у поєднанні з підвищеними вібраціями генератора дає підстави діагностувати механічний знос підшипників. Аналогічно локальний перегрів контактних з'єднань, виявлений термодіагностикою, часто корелює зі зростанням електричного опору та підтверджується параметричними вимірюваннями. У сервісній практиці це реалізується як послідовний або паралельний аналіз даних: бортова діагностика сигналізує про відхилення, а фізичні методи уточнюють джерело дефекту [5, с. 40; 7, с. 450]. Такий підхід дає змогу уникати помилкової заміни справних компонентів, скорочує час пошуку несправностей і забезпечує обґрунтоване планування ремонту, що є критичним для інтенсивної експлуатації транспортних засобів.

Інформативні діагностичні параметри електричного обладнання та технічного стану деталей машин формують основу об'єктивного оцінювання працездатності автомобіля в умовах експлуатації. Їх інформативність визначається чутливістю до деградаційних процесів, стабільністю вимірювання та здатністю відображати причинно-наслідкові зв'язки між електричними й механічними явищами. Електричні параметри характеризують функціональний стан систем керування і живлення, тоді як механічні показники відображають фізичний знос і зміну геометричних або динамічних властивостей деталей. Найбільш ефективним є використання параметрів, що змінюються на ранніх стадіях дефектоутворення та мають стійкий зв'язок із конкретними видами несправностей (табл. 2).

Таблиця 2

**Інформативні діагностичні параметри електричного обладнання та технічного стану деталей машин**

Група параметрів	Параметр	Характеристика	Діагностичне значення
Електричні	Напруга	Рівень електричного потенціалу в колах	Відображає стабільність живлення та наявність втрат
	Сила струму	Інтенсивність електричного потоку	Вказує на навантаження та можливі перевантаження
	Опір	Величина електричного опору елементів	Дає змогу виявити контактні дефекти та деградацію ізоляції
	Сигнали датчиків	Вихідні дані сенсорів	Характеризують режим роботи систем
Механічні	Вібрація	Коливальні процеси в деталях	Свідчить про знос, дисбаланс, дефекти підшипників
	Температура	Тепловий стан вузлів	Вказує на перевантаження або підвищене тертя
	Шум	Акустичні характеристики роботи	Дає змогу ідентифікувати початкові дефекти
	Зазори та люфти	Геометричні відхилення	Відображають ступінь зносу та порушення посадок

*Джерело: сформовано автором на основі [1, с. 59; 3, с. 27; 5, с. 41; 6, с. 174; 9, р. 2330; 10, р. 655; 11, р. 51385; 13].*

Практична значущість наведених параметрів визначається їх здатністю відображати фізичну природу деградаційних процесів і формувати стійкі діагностичні ознаки на ранніх стадіях відмов. Відповідно до положень ISO 13374-1:2003 [14], ефективна діагностика передбачає не лише фіксацію первинних сигналів,

а їх послідовну трансформацію у діагностичні індикатори через аналіз трендів, кореляцій і порогових відхилень. Це означає, що інформативність параметра зростає за умови його інтерпретації в системі взаємопов'язаних показників, а не ізольовано.

У реальних умовах експлуатації характерним є поєднання електричних і механічних змін, що формують комплексні ознаки несправностей. Наприклад, для електродвигунів систем допоміжного обладнання (вентилятори, паливні насоси) збільшення споживаного струму на 10–20 % за номінальної напруги, яке супроводжується підвищенням температури корпусу на 15–25 °С та зміщенням піків у спектрі вібрацій, свідчить про зростання механічного опору, найчастіше через знос підшипників або порушення мастильного режиму [15]. Ізольований контроль струму в такому випадку не дає можливості відокремити електричну причину від механічної, тоді як сумісний аналіз параметрів формує однозначну діагностичну інтерпретацію. Подібна закономірність спостерігається під час аналізу контактних з'єднань: локальне збільшення електричного опору навіть на десятки міліом призводить до інтенсивного тепловиділення, що фіксується термографічними методами у вигляді температурних аномалій, які перевищують фон на 10–30 °С. При цьому супутні коливання напруги та нестабільність сигналів датчиків дають змогу ідентифікувати не лише факт дефекту, а і його локалізацію. У практиці технічного обслуговування це використовується для запобігання відмовам електропроводки й електронних блоків керування, де механічні фактори (вібрації, послаблення з'єднань) безпосередньо впливають на електричні характеристики [9, р. 2330]. Важливим є також урахування швидкості зміни параметрів. Плавне зростання вібраційної амплітуди в поєднанні з незначним, але стабільним підвищенням температури свідчить про початкові стадії зносу, тоді як різкі стрибки електричних параметрів частіше вказують на порушення контактів або дефекти ізоляції. Такий підхід дає змогу формувати діагностичні моделі, орієнтовані на виявлення тенденцій, а не лише граничних станів, що відповідає сучасним вимогам до обслуговування за фактичним станом.

Обґрунтування принципів побудови комплексних методів діагностики базується на інтеграції різнорідних даних, що характеризують електричні та механічні процеси, з метою формування узгоджених діагностичних ознак. Ключовим є перехід від ізольованого аналізу параметрів до їх синхронізованої обробки та інтерпретації у межах єдиної діагностичної моделі, що підвищує точність і достовірність оцінювання технічного стану (табл. 3).

Взаємодія наведених принципів формує цілісну діагностичну модель, у якій дані різної природи переходять із рівня розрізнених сигналів у систему узгоджених ознак технічного стану. Отримання електричних параметрів через уніфіковані діагностичні сервіси (англ. Unified Diagnostic Services, UDS) відповідно до ISO 14229-1:2020 [16] забезпечує структурований доступ до інформації електронних блоків керування, однак їх інтерпретація набуває змісту лише в поєднанні з механічними та тепловими характеристиками. Саме інтеграція дає можливість перейти від фіксації відхилення до розуміння механізму його виникнення.

Таблиця 3

**Принципи побудови комплексних методів діагностики  
на основі інтеграції різномірних даних**

Принцип	Сутність	Реалізація	Практичне значення
Інтеграція даних	Об'єднання параметрів різної природи	Комбінування електричних, механічних і теплових сигналів	Підвищення повноти оцінювання стану
Часова синхронізація	Узгодження даних за часовими мітками	Синхронний збір сигналів з різних сенсорів	Забезпечення коректності аналізу процесів
Нормалізація	Приведення параметрів до єдиної шкали	Масштабування та фільтрація сигналів	Порівнюваність різних показників
Кореляційний аналіз	Виявлення взаємозв'язків між параметрами	Аналіз залежностей між струмом, температурою, вібрацією	Встановлення причинно-наслідкових зв'язків
Адаптивність	Урахування змін режимів роботи	Зміна порогових значень залежно від умов експлуатації	Зниження похибок діагностики
Ієрархічність	Багаторівнева структура аналізу	Розподіл на рівні сигналів, ознак і рішень	Підвищення точності інтерпретації

*Джерело: сформовано автором на основі [2, с. 13; 4, с. 318; 5, с. 41; 7, с. 452; 8; 9, р. 2332; 12].*

Показовим є випадок, коли відхилення у тривалості імпульсів керування виконавчими механізмами супроводжується незначними, але стійкими змінами вібраційного фону та температурного режиму. Ізольовано такі зміни можуть залишатися в межах допустимих значень і не трактуватися як несправність, проте їх синхронний прояв формує ознаку початкової стадії механічної деградації. У цьому випадку часове узгодження даних є визначальним, оскільки дає можливість відокремити закономірну реакцію системи від випадкових коливань сигналів. Не менш суттєвим є приведення параметрів до узгодженого вигляду, що робить можливим їх спільний аналіз і виявлення стійких залежностей. Встановлення кореляції між електричним навантаженням, тепловими ефектами та динамічними характеристиками дає змогу формувати діагностичні патерни, які не спостерігаються під час аналізу окремих параметрів [8]. Кількісне оцінювання тісноти та напрямку такого взаємозв'язку доцільно здійснювати за допомогою коефіцієнта кореляції Пірсона, що визначається як:

$$r_{\{xy\}} = \frac{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{((\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2) \cdot (\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2))}}, \quad (1)$$

де  $x$  характеризує електричні параметри (сила струму, напруга), а  $y$  – механічні та теплові показники (вібрації, температура). Використання цього показника дає змогу перейти від простого фіксування відхилень до встановлення причинно-наслідкових зв'язків між процесами різної фізичної природи. Практична реалізація такого підходу може бути проілюстрована на прикладі діагностики електродвигуна допоміжних систем, для якого в процесі експлуатації зафіксовано зростання сили струму з 8,5 А до 10,2 А, підвищення температури корпусу із 45 °С до 62 °С та збільшення амплітуди вібрацій приблизно на 30 %. Розрахунок

коефіцієнта кореляції між струмом і вібрацією дав значення  $r_{xy} = 0,82$ , а між струмом і температурою –  $r_{xy} = 0,76$ , що свідчить про наявність стійкого взаємозв'язку між параметрами та дає змогу інтерпретувати відхилення як наслідок зростання механічного опору в підшипниковому вузлі. Наведений приклад підтверджує практичну доцільність використання кореляційного аналізу як інструменту інтегрованої діагностики.

Зокрема, стійке позитивне значення коефіцієнта кореляції ( $r_{xy} > 0,7$ ) між зростанням струму й амплітудою вібрацій свідчить про підвищення механічного опору в обертових вузлах, що є характерним для зносу підшипників або порушення мастильного режиму. Якщо аналогічна залежність одночасно спостерігається між струмом і температурою, це підтверджує енергетичну природу втрат і дає можливість виключити випадкові коливання навантаження. Натомість слабка або відсутня кореляція за наявності відхилень струму вказує на ймовірну електричну природу несправності (дефекти контактів, ізоляції або електронних компонентів). Практично це означає, що діагностичне рішення формується не за окремими параметрами, а за їх узгодженою динамікою: синхронне зростання електричних і механічних показників інтерпретується як прояв внутрішньої деградації вузла, тоді як асинхронні зміни сигналізують про локальні або випадкові порушення. Таким чином, кореляційний аналіз виступає інструментом інтеграції різнорідних даних, що забезпечує підвищення точності ідентифікації дефектів та створює основу для переходу до прогнозного оцінювання технічного стану. Наприклад, поєднання поступового зростання струму з несиметричними змінами вібраційного спектра вказує на локалізований дефект, що проявляється у вигляді часткової деградації окремих елементів вузла, тоді як рівномірне підвищення всіх параметрів частіше відповідає загальному перевантаженню системи. У термінах кореляційного аналізу це відображається у формуванні різних типів залежностей: для локалізованих дефектів характерна нестабільна або частотно-залежна кореляція між параметрами, тоді як у разі перевантаження спостерігається стійкий високий рівень прямої кореляції між струмом, температурою та вібрацією.

З урахуванням змінних умов експлуатації така модель потребує адаптації до режимів роботи, що дає можливість уникати хибних спрацювань у перехідних процесах і зберігати чутливість до реальних дефектів. Це досягається шляхом аналізу кореляцій у ковзних часових вікнах та врахування динаміки зміни коефіцієнта  $r_{xy}$ , що дає змогу відокремити короточасні флуктуації від стійких деградаційних тенденцій.

Узагальнення результатів на різних рівнях обробки формує обґрунтоване діагностичне рішення, у якому кожен параметр розглядається не ізольовано, а як елемент системи взаємопов'язаних ознак [9, р. 2332]. При цьому саме узгоджені зміни параметрів, підтверджені кореляційними залежностями, набувають статусу діагностичних індикаторів, тоді як одиничні відхилення без підтвердження зв'язків розглядаються як менш інформативні. Це забезпечує підвищення точності ідентифікації несправностей і створює передумови для переходу до прогнозування технічного стану, а не лише фіксації його порушень.

Застосування комплексних методів діагностики в умовах реальної експлуатації ускладнюється низкою взаємопов'язаних проблем, що виникають на етапах

отримання, інтеграції та інтерпретації даних. Однією з ключових є обмежена узгодженість інформації різної природи: електричні параметри, доступні через UDS відповідно до ISO 14229-1:2020 [16], відображають переважно функціональний стан електронних систем, тоді як механічні дефекти проявляються опосередковано, що ускладнює їх однозначну ідентифікацію. У підсумку однакові відхилення сигналів можуть відповідати різним причинам, що знижує достовірність діагностичних висновків.

Суттєвим обмеженням є динамічний характер експлуатаційних режимів, у межах яких параметри змінюються під впливом навантажень, температури та вібрацій, формуючи нестабільні та зашумлені сигнали. Це ускладнює виділення стійких діагностичних ознак і підвищує ризик хибних інтерпретацій [12]. Додатково виникає проблема часової неузгодженості даних із різних джерел, що спотворює причинно-наслідкові зв'язки між параметрами.

Водночас існуючі діагностичні моделі часто недостатньо адаптовані до змінних умов експлуатації, оскільки орієнтовані на стаціонарні режими або обмежені набори параметрів. Практичні труднощі посилюються обмеженим доступом до повної діагностичної інформації та необхідністю обробки великих обсягів даних у реальному часі, що призводить до використання спрощених алгоритмів [11, р. 51385]. Сукупність цих факторів обмежує ефективність комплексної діагностики і стримує впровадження підходів, орієнтованих на прогнозування технічного стану транспортних засобів.

Підвищення ефективності діагностики автомобілів на основі інтегрованого аналізу електричних і механічних параметрів доцільно забезпечувати через упровадження узгоджених підходів до збору, обробки та інтерпретації даних, орієнтованих на виявлення причинних зв'язків між параметрами. Насамперед доцільно забезпечити синхронізований збір електричних сигналів через UDS відповідно до ISO 14229-1:2020 [16] із механічними та тепловими показниками, що дає можливість формувати цілісну картину функціонування вузлів. Це усуває типову проблему роздільного аналізу, коли електричні відхилення не співвідносяться з фізичним станом деталей. Доцільним є застосування кореляційного аналізу параметрів у динаміці, що дає змогу переходити від фіксації відхилень до їх інтерпретації. Наприклад, одночасне зростання струму, температури та вібрацій повинно розглядатися як єдина діагностична ознака, а не як незалежні відхилення, що значно підвищує точність локалізації дефектів. Важливим є також використання трендових моделей, які враховують не лише граничні значення, а й швидкість зміни параметрів, що забезпечує виявлення ранніх стадій зносу.

Ефективність діагностики підвищується за умови адаптації порогових значень до реальних режимів експлуатації. Фіксовані нормативи не враховують варіативності навантажень, тому доцільно застосовувати адаптивні критерії оцінювання, що змінюються залежно від умов роботи системи. Паралельно необхідно забезпечити нормалізацію даних різної фізичної природи, що дає змогу здійснити їх коректне порівняння та використання у єдиній аналітичній моделі. Практично доцільним є впровадження багаторівневого аналізу, за якого первинні сигнали проходять етапи фільтрації, узагальнення й інтерпретації, що зменшує вплив шумів і випадкових відхилень. Це дає можливість формувати стійкі діагностичні

ознаки та знижує ризик помилкових рішень. Додатково необхідно забезпечити розширення доступу до діагностичних параметрів і підвищення їх інформативності шляхом комбінування даних бортових систем із зовнішніми вимірювальними засобами. Загалом підвищення ефективності діагностики досягається через системну інтеграцію різномірних параметрів, орієнтацію на їх взаємозв'язки та використання адаптивних і динамічних моделей аналізу, що забезпечує перехід від реактивного виявлення несправностей до прогнозування технічного стану транспортних засобів.

**Висновки.** За результатами дослідження встановлено, що підвищення ефективності діагностики автомобілів досягається завдяки інтеграції електричних і механічних параметрів та їх аналізу у взаємозв'язку, що дає змогу переходити від фіксації відхилень до виявлення механізмів дефектоутворення. Доведено, що найбільш інформативними є параметри, розглянуті в динаміці та кореляції, що забезпечує ранню ідентифікацію несправностей. Встановлено, що основними проблемами є неузгодженість різномірних даних, складність інтерпретації причинно-наслідкових зв'язків, вплив змінних режимів експлуатації на стабільність сигналів, а також обмежена адаптивність діагностичних моделей і доступ до даних. Це знижує точність діагностики й ускладнює її практичну реалізацію. Обґрунтовано доцільність впровадження синхронізованого збору даних, кореляційного та трендового аналізу, адаптивних критеріїв і багаторівневих моделей обробки, що забезпечує перехід до прогнозного обслуговування. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням інтелектуальних моделей інтеграції даних, підвищенням стійкості до зашумлення й адаптацією алгоритмів до умов реального часу.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. 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. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. Т. 1, № 92, ч. 1. С. 57–62. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.7>.
2. Кривда В.В., Сакно О.П., Корніленко К.І., Чуйко С.П., Шумляківський В.П. Огляд підходів до підвищення надійності та ефективності технічної експлуатації автотранспорту з урахуванням обґрунтованості інженерних рішень. *Технічна інженерія*. 2025. Вип. № 1, № 95. С. 11–18. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-11-18](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-11-18).
3. Нечипорук В., Орищенко С. Сучасні методи діагностики машин. *Техніка будівництва*. 2025. № 43. С. 23–35. <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0603>.
4. Надич Т.М., Аулін В.В., Гриньків А.В., Слонь В.В. Методи і заходи удосконалення системи технічного сервісу вантажних автомобілів на основі кіберфізичного підходу і розробки науково-технічної документації його операцій. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11, № 42, ч. II. С. 313–327. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.313-327](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.313-327).

5. Бурлака С., Митко М., Борисюк Д. Аналіз моделей діагностики для визначення технічного стану транспортних засобів. *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія: Технічні науки. 2024. Т. 343, вип. 6, № 1. С. 39–42. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-5>.
6. Бурлака С.А., Митко М.В. Вибір діагностичних методів та аналіз чинників впливу на довговічність деталей транспортних засобів для забезпечення максимального залишкового ресурсу. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2025. Вип. 5. С. 172–178. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-182-5-172-178>.
7. Рибіцький О., Голян В. Інтелектуальна діагностика автомобілів з використанням штучного інтелекту. *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія: Технічні науки. 2025. Т. 351, № 3.1. С. 448–454. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-56>.
8. Kuric I., Kláčková I., Nikitin Y.R., Zajačko I., Cisar M., Tucki K. Analysis of diagnostic methods and energy of production systems drives. *Processes*. 2021. Vol. 9, № 5. Article 843. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9050843>.
9. Choudhary A., Fatima S., Panigrahi B. K. State-of-the-art technologies in fault diagnosis of electric vehicles: A component-based review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2022. Vol. 9, № 2. P. 2324–2347. <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3209166>.
10. Gundewar S.K., Kane P.V. Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2021. Vol. 9, № 4. P. 643–674. <https://doi.org/10.1007/s42417-020-00253-y>.
11. Hussain G.A., Hassan W., Mahmood F., Shafiq M., Rehman H., Kay J.A. Review on partial discharge diagnostic techniques for high voltage equipment in power systems. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 51382–51394. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3279355>.
12. Kumar R.R., Andriollo M., Cirrincione G., Cirrincione M., Tortella A. A comprehensive review of conventional and intelligence-based approaches for the fault diagnosis and condition monitoring of induction motors. *Energies*. 2022. Vol. 15, № 23. Article 8938. <https://doi.org/10.3390/en15238938>.
13. Mohd Ghazali M.H., Rahiman W. Vibration analysis for machine monitoring and diagnosis: A systematic review. *Shock and Vibration*. 2021. Vol. 2021. Article 9469318. <https://doi.org/10.1155/2021/9469318>.
14. ISO 13374-1:2003 – Condition monitoring and diagnostics of machines. *ISO: вебсайт*. 2026. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/21832.html>.
15. Bosch R. GmbH. Bosch Automotive Handbook. 10th ed. SAE International; Wiley. 2018. 1750 p. URL: <https://xpdf4u.com/reviews/A11RX6/998730/4991876-bosch-automotive-handbook-11th-edition> (дата звернення: 13.04.2026).
16. ISO 14229-1:2020 – Road vehicles – Unified diagnostic services (UDS). *ISO: вебсайт*. 2026. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/72439.html>.

## REFERENCES

1. Holovina, O.V., Kholodnyi, Yu.F., Stokov, O.P., & Zhovtobriukh, V.O. (2025). Doslidzhennia vplyvu yakosti diahnostryky i remontu elektronnykh system na podalshu tekhnichnu ekspluatatsiiu avtomobilia [Study of the influence of the quality of diagnostics and repair of electronic systems on further technical operation of the vehicle]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of Kherson National Technical University*, 1(92, 1), 57–62. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.7>.
2. Krivda, V.V., Sakno, O.P., Kornilenko, K.I., Chuiko, S.P., & Shumliakivskiy, V.P. (2025). Ohliad pidkhodiv do pidvyshchennia nadiinosti ta efektyvnosti tekhnichnoi ekspluatatsii avtotransportu z urakhuvanniam obgruntovanosti inzhenernykh rishen [Review of approaches to improving reliability and efficiency of vehicle operation considering engineering decision justification]. *Tekhnichna inzheneriia – Technical Engineering*, 1(95), 11–18. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-11-18](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-11-18).
3. Nechyporuk, V., & Oryshchenko, S. (2025). Suchasni metody diahnostryky mashyn [Modern methods of machine diagnostics]. *Tekhnika budivnytstva – Construction Engineering*, (43), 23–35. <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0603>.
4. Nadych, T.M., Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V., & Slon, V.V. (2025). Metody i zakhody udoskonalennia systemy tekhnichnoho servisu vantazhnykh avtomobiliv na osnovi kiberfizychnoho pidkhodu i rozrobky naukovotekhnichnoi dokumentatsii yoho operatsii [Methods and measures for improving the technical service system of trucks based on a cyber-physical approach]. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11(42, II), 313–327. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.313-327](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.313-327).
5. Burlaka, S., Mytko, M., & Borysiuk, D. (2024). Analiz modelei diahnostryky dlia vyznachennia tekhnichnoho stanu transportnykh zasobiv [Analysis of diagnostic models for determining the technical condition of vehicles]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences Series*, 343(6, 1), 39–42. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-5>.
6. Burlaka, S.A., & Mytko, M.V. (2025). Vybir diahnostrychnykh metodiv ta analiz chynnykiv vplyvu na dovhovichnist detalei transportnykh zasobiv dlia zabezpechennia maksimalnoho zalyshkovoho resursu [Selection of diagnostic methods and analysis of factors influencing durability of vehicle components]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, (5), 172–178. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-182-5-172-178>.
7. Rybitskyi, O., & Holian, V. (2025). Intelktualna diahnostryka avtomobiliv z vykorystanniam shtuchnoho intelektu [Intelligent vehicle diagnostics using artificial intelligence]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Bulletin of Khmelnytskyi National University*.

- Technical Sciences Series, 351(3.1), 448–454. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-56>.
8. Kuric, I., Klačková, I., Nikitin, Y. R., Zajačko, I., Císar, M., & Tucki, K. (2021). Analysis of diagnostic methods and energy of production systems drives. *Processes*, 9(5), 843. <https://doi.org/10.3390/pr9050843>.
  9. Choudhary, A., Fatima, S., & Panigrahi, B.K. (2022). State-of-the-art technologies in fault diagnosis of electric vehicles: A component-based review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 9(2), 2324–2347. <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3209166>.
  10. Gundewar, S.K., & Kane, P.V. (2021). Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 9(4), 643–674. <https://doi.org/10.1007/s42417-020-00253-y>.
  11. Hussain, G.A., Hassan, W., Mahmood, F., Shafiq, M., Rehman, H., & Kay, J.A. (2023). Review on partial discharge diagnostic techniques for high voltage equipment in power systems. *IEEE Access*, 11, 51382–51394. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3279355>.
  12. Kumar, R.R., Andriollo, M., Cirrincione, G., Cirrincione, M., & Tortella, A. (2022). A comprehensive review of conventional and intelligence-based approaches for the fault diagnosis and condition monitoring of induction motors. *Energies*, 15(23), 8938. <https://doi.org/10.3390/en15238938>.
  13. Mohd Ghazali, M.H., & Rahiman, W. (2021). Vibration analysis for machine monitoring and diagnosis: A systematic review. *Shock and Vibration*, 2021, 9469318. <https://doi.org/10.1155/2021/9469318>.
  14. ISO. (2003). ISO 13374-1: Condition monitoring and diagnostics of machines. ISO website. Retrived from: <https://www.iso.org/ru/standard/21832.html>.
  15. Bosch, R. GmbH. (2018). Bosch Automotive Handbook. 10th ed. SAE International; Wiley. Retrived from: <https://xpdf4u.com/reviews/A11RX6/998730/4991876-bosch-automotive-handbook-11th-edition>.
  16. ISO. (2020). ISO 14229-1: Road vehicles – Unified diagnostic services (UDS). ISO website. Retrived from: <https://www.iso.org/ru/standard/72439.html>.

Дата першого надходження статті до видання: 20.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026