

УДК 620.179

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0603>**¹Віктор Нечипорук,**

аспірант кафедри машин і обладнання технологічних процесів,

<https://orcid.org/0009-0003-8091-2420>, e-mail: nechyporuk_vh-2022@knuba.edu.ua**²Сергій Орищенко,**

кандидат технічних наук, доцент тракторів і автомобілів,

<https://orcid.org/0000-0002-5359-5285>, e-mail: oryschenko.sv@knuba.edu.ua¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, 03037, Україна² Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, Україна

СУЧАСНІ МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ МАШИН

АНОТАЦІЯ. У статті розглянуто сучасні підходи до технічної діагностики машин і механізмів, спрямовані на підвищення надійності, безпечності та ефективності їх експлуатації. Проаналізовано основні методи контролю технічного стану - вібраційну, акустичну, термографічну, електричну та аналітичну діагностику. Висвітлено принципи побудови систем моніторингу технічного стану, їх апаратне та програмне забезпечення. Особливу увагу приділено застосуванню методів машинного навчання та цифрової обробки сигналів у процесі діагностування. Наведено порівняльну характеристику традиційних і інтелектуальних методів діагностики, визначено переваги використання комплексного підходу для прогнозування відмов і планування технічного обслуговування. Результати дослідження можуть бути використані при розробленні сучасних систем технічного моніторингу, автоматизованих комплексів обслуговування машин та в освітньому процесі підготовки фахівців машинобудівного профілю.

Ключові слова: технічна діагностика, вібраційний аналіз, термографія, моніторинг стану, машинне навчання, прогнозування відмов.

MODERN METHODS OF MACHINE DIAGNOSTICS

ABSTRACT. The article considers modern approaches to technical diagnostics of machines and mechanisms aimed at increasing the reliability, safety and efficiency of their operation. The main methods of monitoring the technical condition are analyzed - vibration, acoustic, thermographic, electrical and analytical diagnostics. The principles of building technical condition monitoring systems, their hardware and software are highlighted. Special attention is paid to the application of machine learning methods and digital signal processing in the diagnostic process. A comparative characteristic of traditional and intelligent diagnostic methods is presented, and the advantages of using an integrated approach for failure prediction and maintenance planning are identified. The results of the study can be used in the development of modern technical monitoring systems, automated machine maintenance complexes, and in the educational process of training specialists in the mechanical engineering field.

Keywords: technical diagnostics, vibration analysis, thermography, condition monitoring, machine learning, failure prediction.

1. Постановка проблеми. Підвищення надійності та довговічності машин і механізмів є одним із ключових завдань сучасного машинобудування та експлуатації техніки. Зростання складності конструкцій, використання високоточних компонентів і підвищення вимог до безпеки вимагають впровадження ефективних методів технічної діагностики. Традиційні способи контролю, що базуються на періодичних оглядах і планово-попереджувальному обслуговуванні, часто не забезпечують своєчасного виявлення дефектів, що призводить до непередбачуваних відмов і простоїв обладнання. У зв'язку з цим актуальним є дослідження та впровадження сучасних діагностичних технологій, які дозволяють здійснювати безперервний моніторинг технічного стану машин, виявляти початкові стадії зносу та прогнозувати залишковий ресурс. Особливого значення набуває

інтеграція методів вібраційного аналізу, акустичної емісії, термографії та машинного навчання, що дає змогу реалізувати інтелектуальні системи діагностики і технічного обслуговування за фактичним станом. Таким чином, проблема полягає у вдосконаленні існуючих методів технічної діагностики, підвищенні їхньої точності, швидкодії та автоматизації з метою забезпечення надійної та економічно ефективної експлуатації машин.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика технічної діагностики машин активно досліджується як у вітчизняній, так і в закордонній науковій літературі. Сучасні публікації присвячені вдосконаленню методів оцінювання технічного стану, розробленню інтелектуальних систем моніторингу та впровадженню автоматизованих засобів контролю [1-3]. У роботах провідних дослідників [9-11] розглянуто розвиток вібраційної діагностики, яка ґрунтується на аналізі спектральних характеристик коливань елементів машин. Цей метод дозволяє виявляти дисбаланс, неспіввісність, зношення підшипників, дефекти редукторів і роторів. Акустична діагностика базується на аналізі шумових сигналів та акустичної емісії, що утворюються під час роботи агрегатів [11, 15]. Вона ефективна для раннього виявлення тріщин, мікрodefектів і порушень у процесах тертя. Термографічна діагностика (інфрачервоне обстеження) широко застосовується для контролю нагрівання вузлів, що дозволяє своєчасно виявляти перевантаження, порушення змащення, електричні несправності та інші теплові аномалії [12, 13, 20]. Поряд із традиційними фізичними методами все більшого значення набувають електронні системи бортової діагностики (OBD), що використовуються у транспортних засобах. Системи OBD-II забезпечують зчитування кодів несправностей електронних блоків управління, контроль параметрів двигуна, паливної системи, запалювання та систем очищення вихлопних газів [17-19]. Їх застосування дозволяє зменшити час пошуку несправностей та підвищити точність діагностики. Незважаючи на розвиток високотехнологічних методів, візуальна та слухова діагностика залишаються важливими на етапах попереднього огляду техніки [8]. Вони базуються на досвіді спеціаліста, який за зміною шумів, вібрацій, запаху чи зовнішнього вигляду вузлів може зробити попередній висновок про стан обладнання. Сучасні дослідження також зосереджені на інтеграції машинного навчання, нейронних мереж і цифрової обробки сигналів для автоматизації процесу виявлення несправностей та прогнозування відмов [6, 14, 16]. Використання **комплексного підходу**, який об'єднує традиційні, сенсорні та аналітичні методи діагностики, розглядається як основний напрям подальшого розвитку галузі [1, 4, 5].

3. Мета роботи є узагальнення та систематизація сучасних методів технічної діагностики машин, а також визначення напрямів їх подальшого розвитку з урахуванням тенденцій цифровізації, автоматизації та використання інтелектуальних технологій.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких основних завдань:

- проаналізувати існуючі методи діагностики машин -візуальні, слухові, вібраційні, акустичні, термографічні, електричні та електронні (OBD);
- визначити переваги, обмеження та сфери ефективного застосування кожного методу;
- дослідити можливості поєднання традиційних і сучасних діагностичних підходів у рамках комплексних систем моніторингу;
- розглянути перспективи впровадження технологій машинного навчання та інтелектуального аналізу даних у процес діагностування;
- сформулювати практичні рекомендації щодо підвищення точності та оперативності діагностики машин і механізмів.

4. Обговорення результатів дослідження. Проведений аналіз показав, що кожен із розглянутих методів технічної діагностики має свої переваги та обмеження, а їх ефективність значною мірою залежить від умов експлуатації машин, типу обладнання та характеру можливих дефектів.

Візуальна діагностика є одним із найстаріших і водночас найпоширеніших методів оцінювання технічного стану машин. Вона ґрунтується на зоровому огляді зовнішніх

поверхонь, з'єднань, елементів кріплення, ущільнень, мастильних матеріалів, корпусних деталей тощо. Основне завдання - виявлення видимих ознак дефектів:

- тріщин, вм'ятин, викришувань, деформацій;
- слідів витoku мастила або охолоджувальної рідини;
- зміни кольору поверхонь, нагару, іржі;
- порушень з'єднань, розхитування деталей, ослаблення болтів;
- механічного зносу робочих поверхонь.

Для підвищення точності огляду використовуються ендоскопи, лупи, мікроскопи, борові камери, а також індикаторні фарби або ультрафіолетові барвники, що дозволяють локалізувати тріщини та мікродефекти. У стандартах ISO 9712 та ДСТУ EN 1330 -10 - 2017 візуально-оптична діагностика (VT - *Visual Testing*) класифікується як окремий неруйнівний метод контролю.

У спрощеному вигляді ефективність (1) візуального контролю можна описати як функцію:

$$E = f(A, L, O), \quad (1)$$

де A - освітленість зони огляду (лк), L - рівень контрастності об'єкта, O - досвід оператора.

За даними експериментальних досліджень, зниження освітленості нижче 300 лк зменшує ймовірність виявлення дефекту на 25-30 %.

Слухова діагностика базується на аналізі акустичних сигналів, що виникають під час роботи машин. Оператор визначає характерні зміни у шумі, стукоті чи свисті, які свідчать про порушення в роботі вузлів - підшипників, редукторів, клапанів, поршнів тощо. Типові ознаки дефектів:

- рівномірне гудіння - нормальний стан;
- періодичний стукіт - розбаланс або люфт у підшипнику;
- скрегіт або шелест - знос зубчастої передачі;
- підвищений шум і вібрація - порушення центрування або осевого зазору.

У промислових умовах слухова діагностика може проводитися не лише «на слух», а й із застосуванням електронних стетоскопів, шумомірів або аналізаторів звукових сигналів, які дозволяють вимірювати частоту, амплітуду та гармонічний склад звуку. Спектр акустичних коливань $S(f)$ часто використовується (2) для порівняння з еталонними характеристиками:

$$S(f) = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) e^{-j2\pi ft} dt, \quad (2)$$

де $s(t)$ - сигнал звуку, T - час спостереження, f - частота.

Відхилення амплітуд у спектрі може вказувати на певний тип несправності.

Переваги цих методів простота, швидкість і низька вартість; можливість застосування без демонтажу обладнання; ефективність при попередньому контролі перед запуском або після ремонту.

Недоліки: суб'єктивність оцінювання; низька чутливість до прихованих дефектів; залежність від досвіду спеціаліста та умов спостереження.

Загалом, візуальна та слухова діагностика є невід'ємною частиною комплексної системи технічного контролю. Їх результати використовуються для попереднього виявлення несправностей і визначення доцільності проведення глибших інструментальних методів - вібраційного, термографічного або електронного аналізу.

Вібраційна діагностика - один із найефективніших і найпоширеніших методів технічної діагностики машин, що ґрунтується на аналізі параметрів механічних коливань елементів обладнання під час його роботи. Вона дозволяє виявляти дефекти на ранніх стадіях розвитку, не зупиняючи агрегат, і є базою для побудови систем моніторингу технічного стану.

Основна ідея методу полягає в тому, що порушення кінематичних і динамічних характеристик вузлів (зношення підшипників, розбаланс, перекося, люфти тощо) призводить

до появи специфічних змін у вібраційному сигналі, які можна кількісно виміряти та ідентифікувати.

Принцип і фізичні основи. Рух будь-якої точки машини можна описати рівнянням гармонічних коливань (3):

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

де A - амплітуда вібрації, $\omega = 2\pi f$ - кутова частота, φ - початкова фаза.

Реальний сигнал, як правило, є сумою гармонічних компонентів різних частот (4):

$$x(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (4)$$

Для переходу до частотної області використовується швидке перетворення Фур'є (5), що дозволяє побудувати амплітудно-частотний спектр $X(f)$:

$$X(f) = \int_0^T x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (5)$$

Аналіз спектра вібрацій дає змогу виявляти характерні піки, пов'язані з частотами обертання валів, зубчастих коліс або дефектних елементів підшипників.

Основні параметри вимірювання. Під час діагностики зазвичай реєструють три основні параметри:

- вібраційне прискорення $a(t)$, м/с²;
- вібраційна швидкість $v(t)$, мм/с;
- вібраційне зміщення $x(t)$, мкм.

Ці параметри взаємопов'язані співвідношеннями (6):

$$v(t) = \int a(t) dt, x(t) = \int v(t) dt. \quad (6)$$

Для оцінки стану використовують ефективні (7) або пікові значення амплітуди, наприклад:

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (7)$$

Аналіз спектральних характеристик коливань дає змогу ідентифікувати типові несправності обертових вузлів машин, основні з яких наведено в табл.1.

Таблиця 1. Типові дефекти, які визначаються методом вібродіагностики

Table 1. Typical defects determined by the vibration diagnostics method

Тип дефекту	Характерні ознаки у спектрі
Розбаланс	Підвищений рівень вібрацій на частоті обертання ротора ($1 \times f_{rot}$)
Неспіввісність валів	Комбінації частот $1 \times f_{rot}$ та $2 \times f_{rot}$
Знос підшипників	Широкосмуговий шум, піки на частотах BPFO, BPFI, BSF
Дефекти зубчастих передач	Гармоніки частоти зачеплення f_{mesh}
Люфти та ослаблення кріплення	Нерегулярні імпульси, низькочастотні коливання

Частоти підшипникових дефектів розраховуються за формулами (8-10) :

$$BPFO = \frac{n}{2} f_{rot} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right), \quad (8)$$

$$BPFI = \frac{n}{2} f_{rot} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \theta \right), \quad (9)$$

$$BSF = \frac{D}{2d} f_{rot} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \theta \right)^2 \right) \quad (10)$$

де n - кількість тіл кочення, f_{rot} - частота обертання вала, d - діаметр тіла кочення, D - діаметр кола, по якому розташовані тіла кочення, θ - кут контакту.

Інструментальне забезпечення. Для вимірювання використовуються віброметри, акселерометри, аналізатори спектра, лазерні віброметри та системи безперервного моніторингу. У промислових системах застосовуються бездротові датчики та алгоритми автоматичного аналізу спектрів у реальному часі.

Переваги методу: висока чутливість до зародження дефектів; можливість виявлення прихованих несправностей без демонтажу; об'єктивність вимірювань і можливість автоматизації; використання в системах прогнозування ресурсу.

Недоліки: потреба у спеціальному обладнанні та кваліфікованому персоналі; вплив зовнішніх факторів (шум, резонанси, монтаж); складність інтерпретації при багатокомпонентних коливаннях.

Висновок щодо методу. Вібраційна діагностика є основою для створення інтелектуальних систем технічного моніторингу. Її ефективність зростає при поєднанні з методами термографії, OBD-контролю та машинного навчання, що дозволяє переходити від реактивного до прогнозного технічного обслуговування.

Акустична діагностика - це метод технічного контролю, що ґрунтується на аналізі звукових хвиль та акустичних емісій, які виникають у процесі роботи машин і механізмів. Зміни у спектрі та амплітуді акустичних сигналів свідчать про порушення у структурі матеріалу або неправильну роботу окремих вузлів.

Метод дозволяє виявляти механічні, гідравлічні, пневматичні й електричні дефекти без зупинки обладнання та без його розбирання, що робить його важливою складовою неруйнівного контролю.

Фізичні основи методу. Будь-який механічний дефект (удар, тріщина, тертя, зіткнення частин) є джерелом акустичної енергії, яка поширюється у вигляді пружних хвиль (11). Основними параметрами, що аналізуються під час діагностики, є:

- звуковий тиск $p(t)$, Па;
- звукова інтенсивність I , Вт/м²;
- рівень звукового тиску в децибелах:

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p(t)}{p_0} \right) \quad (11)$$

де $p_0 = 2 \times 10^5$ Па - порогове значення звукового тиску для людини.

Вимірний сигнал перетворюється в частотну область за допомогою швидкого перетворення Фур'є (12) для побудови спектра:

$$P(f) = \int_0^T p(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (12)$$

Отриманий спектр дозволяє визначити характерні частоти дефектів, гармоніки та зони надлишкового шуму.

Акустична емісія. Окремим напрямом методу є акустико - емісійна діагностика, яка ґрунтується на реєстрації короткочасних імпульсів, що виникають під час зародження та розвитку мікротріщин, корозійних процесів або пластичної деформації матеріалу.

Типовий сигнал акустичної емісії описується параметрами:

- амплітуда A ;
- тривалість t ;
- кількість імпульсів за певний період часу N ;
- енергія сигналу $E = \int p^2(t) dt$.

Підвищення частоти спрацьовувань датчиків акустичної емісії свідчить про активізацію процесів руйнування матеріалу.

Практичне застосування акустичного методу ефективно використовуються для: діагностики підшипників, редукторів, турбін, насосів та двигунів внутрішнього згорання; контролю герметичності пневматичних і гідравлічних систем; виявлення витоків газу або

пари; моніторингу зварних швів, резервуарів і трубопроводів; контролю стану ізоляції та високовольтного обладнання.

У транспортній техніці акустична діагностика використовується для оцінки роботи клапанного механізму, запалювання, систем упорскування палива, а також для розпізнавання шумів двигуна за допомогою цифрових алгоритмів.

Для характеристики джерел вібрацій і шумів різної природи доцільно використовувати частотний аналіз сигналів, типові діапазони яких подано в табл.2.

Таблиця 2. Типові частотні діапазони дефектів

Table 2. Typical frequency ranges of defects

Тип джерела	Частотний діапазон, Гц	Характер сигналу
Нормальна робота підшипника	200-2000	Рівномірний гул
Мікротріщини	5000-50000	Короткі імпульси
Витоки повітря	20000-100000	Високочастотне шипіння
Детонація двигуна	4000-7000	Періодичні вибухоподібні імпульси

Інструментальні засоби. Для реалізації методу використовуються: мікрофони широкого діапазону частот, ультразвукові датчики, цифрові аналізатори спектра, електронні стетоскопи, акустичні камери, що дозволяють локалізувати джерело звуку в просторі.

Сучасні портативні системи поєднують вимірювання звуку та вібрацій із цифровою обробкою сигналу й автоматичною ідентифікацією дефектів.

Переваги акустичної діагностики. Можливість раннього виявлення дефектів, ще до появи механічних пошкоджень; висока чутливість до мікротріщин і витоків; безконтактність методу; застосування у важкодоступних місцях і на рухомих об'єктах; можливість поєднання з іншими методами (вібраційним, термографічним).

Недоліки: чутливість до зовнішніх шумів і перешкод; необхідність фільтрації сигналів і цифрової обробки; потреба у кваліфікованому аналізі спектрів.

Висновок щодо методу. Акустична діагностика є одним із найбільш інформативних засобів раннього виявлення дефектів і оцінювання ступеня пошкодження вузлів машин. У поєднанні з методами вібраційного аналізу та термографії вона забезпечує комплексну оцінку технічного стану обладнання. Перспективним напрямом розвитку є використання штучного інтелекту та нейронних мереж для автоматичної ідентифікації типів дефектів за акустичним підписом.

Термографічні методи. Термографічна діагностика (або інфрачервона термографія) - це метод неруйнівного контролю, який ґрунтується на вимірюванні та аналізі розподілу температури на поверхні машин і механізмів. Вона дозволяє виявляти аномалії теплових полів, що виникають унаслідок зносу, тертя, перевантаження, порушення ізоляції або електричних несправностей.

Суть методу полягає у реєстрації інфрачервоного випромінювання, яке випускають тіла, температура яких вища від абсолютного нуля. Отримані дані перетворюються у термограми - зображення, на яких температура відображається у вигляді кольорової карти або ізотерм.

Фізичні основи методу. Кількість теплової енергії, яку випромінює поверхня, описується законом Стефана – Больцмана (13):

$$E = \varepsilon\sigma T^4 \quad (13)$$

де E - щільність потоку випромінювання, Вт/м²; ε - коефіцієнт випромінювання поверхні (0-1); $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴) - стала Стефана - Больцмана; T - абсолютна температура тіла, К.

Оскільки більшість поверхонь машин є неідеальними випромінювачами, при вимірюваннях необхідно враховувати їхню емісійність (ε) - для сталі вона зазвичай становить 0,7-0,9 для алюмінію - 0,3-0,5.

Температурне поле на термограмі описується функцією (14)

$$T = f(x, y) \quad (14)$$

де x, y -координати поверхні.

Теплові аномалії виявляються за локальним відхиленням ΔT від середнього значення (15):

$$\Delta T = T_{loc} - T_{avg} \quad (15)$$

Застосування термографічних методів. Термографічна діагностика активно використовується в різних галузях промисловості для: виявлення перегрівів підшипників, валів, редукторів; контролю стану систем змащення (втрата мастила викликає локальне підвищення температури); оцінювання роботи електродвигунів, трансформаторів, контактів і з'єднань; виявлення дефектів ізоляції, обривів жил, коротких замикань; моніторингу термічних процесів у гальмівних системах і шасі транспортних засобів; виявлення дефектів у композитних матеріалах (деламінація, розшарування).

У машинобудуванні та енергетиці термографія застосовується як оперативний метод попереднього контролю, особливо у поєднанні з іншими діагностичними підходами.

Типові приклади термограм:

- Нормальний стан: рівномірний розподіл температури, відсутність яскравих «гарячих плям».
- Початковий дефект: локальна зона підвищеної температури (на 3–5 °C вище середньої).
- Розвинений дефект: різкий температурний градієнт ($\Delta T > 10$ °C), часто супроводжується шумом або вібрацією.

На рисунках термографічних зображень гарячі ділянки позначаються червоним/білим кольором, холодні - синім/зеленим.

Приклад кількісної оцінки. Для порівняльного аналізу стану використовують індекс теплової аномалії (16):

$$K_T = \frac{\Delta T}{T_{avg}} \times 100\% \quad (16)$$

де ΔT -локальне перевищення температури; T_{avg} - середня температура поверхні.

Якщо $K_T > 5\%$, вузол вважається потенційно несправним і потребує детальнішої перевірки.

Інструментальні засоби. Використовуються інфрачервоні термографічні камери (стаціонарні або портативні):

- *FLIR E8-XT, Fluke Ti480, Testo 872, HIKMICRO M20*;
- спектральний діапазон 7–14 мкм;
- температурна роздільна здатність - до 0.05 °C;
- можливість підключення до ПК для побудови 3D-теплових карт.

У сучасних системах термографія інтегрується з вібраційною та акустичною діагностикою у комплексні системи моніторингу (наприклад *Siemens SIMATIC Condition Monitoring, SKF Enlight Centre*).

Переваги термографічних методів. Безконтактність і безпечність вимірювань; можливість роботи на відстані і під час руху; візуалізація дефектів у реальному часі; висока точність і швидкість обстеження; сумісність з цифровими системами обробки даних.

Недоліки: чутливість до зовнішніх умов (освітлення, вітер, вологість); складність інтерпретації при багат шарових конструкціях; потреба у калібруванні емісійності матеріалів.

Висновок щодо методу. Термографічні методи є одними з найінформативніших засобів ранньої діагностики у машинобудуванні та енергетиці. Вони дозволяють виявляти дефекти до появи механічних пошкоджень, що значно зменшує ризик аварій і простоїв.

Поєднання термографії з вібраційною, акустичною та OBD-діагностикою забезпечує комплексний підхід до оцінки технічного стану машин. Перспективним напрямом розвитку є застосування тепловізорів з нейронною обробкою зображень, які автоматично класифікують типи дефектів за формою і температурним профілем.

Електронні системи діагностики (OBD), англ. *On-Board Diagnostics* - це інтегрована система контролю технічного стану машин і транспортних засобів, яка забезпечує автоматичне виявлення, реєстрацію та передачу інформації про несправності електронних і механічних систем.

Основне призначення OBD - забезпечити надійну, безпечну та екологічну експлуатацію техніки шляхом постійного моніторингу роботи двигуна, трансмісії, паливної системи, систем упорскування, запалювання, каталізаторів і датчиків.

Загальна архітектура системи OBD. Типова структура системи включає такі основні компоненти:

- електронний блок керування (ECU) - мікропроцесорний пристрій, що приймає сигнали від сенсорів, аналізує їх, формує коди несправностей (DTC) і зберігає їх у пам'яті;
- датчики - пристрої, що вимірюють температуру, тиск, рівень кисню, частоту обертання, положення дросельної заслінки, швидкість тощо;
- виконавчі механізми - інжектори, електромагнітні клапани, котушки запалювання, приводи рециркуляції газів;
- комунікаційні шини (CAN, LIN, FlexRay, DoIP) - канали обміну діагностичними даними між блоками;
- OBD-II роз'єм (SAE J1962) - стандартний інтерфейс для підключення зовнішніх діагностичних пристроїв.

Під час роботи ECU постійно порівнює отримані значення з еталонними, визначає відхилення та за потреби генерує код несправності DTC (Diagnostic Trouble Code). Користувач отримує попередження через індикатор MIL (*Malfunction Indicator Lamp*) на панелі приладів.

Формат і структура діагностичних кодів DTC

Кожен код несправності має структуру PXXXX, де P - Powertrain (силовий агрегат); B - Body (кузов); C - Chassis (шасі); U - Network (мережеві системи).

Приклади:

- P0301 - пропуски займання у першому циліндрі;
- P0171 - збіднена паливна суміш;
- C1234 - несправність датчика швидкості колеса;
- U0100 - втрата зв'язку з ECU двигуна.

Коди зчитуються через роз'єм OBD-II за допомогою діагностичного сканера або комп'ютера з відповідним програмним забезпеченням (*Torque Pro, ScanMaster, Bosch KTS, Delphi DS150E* тощо).

Передача даних через комунікаційну шину CAN системи OBD-II у більшості сучасних машин працюють на основі шини CAN (Controller Area Network), яка забезпечує високошвидкісний обмін даними (250–500 кбіт/с) між мікроконтролерами без центрального комп'ютера.

Фізичний рівень шини - диференціальний, що гарантує захист від електромагнітних перешкод.

CAN складається з двох сигнальних ліній:

- CAN High (CAN H) - лінія високого потенціалу (~3.5 В);
- CAN Low (CAN L) - лінія низького потенціалу (~1.5 В);
- іноді використовується CAN Middle (CAN M) - опорна або діагностична лінія (≈2.5 В), для балансування або синхронізації в складних системах.

Диференціальний сигнал визначається як (17):

$$\Delta V_{CAN} = V_{CAN H} - V_{CAN L} \quad (17)$$

- доміантний рівень (логічний «0») $\rightarrow \Delta V_{CAN} \approx 2B$;
- рецесивний рівень (логічна «1») $\rightarrow \Delta V_{CAN} \approx 0B$.

Така система забезпечує надійність комунікації навіть за наявності електричних шумів або довгих кабелів.

Протоколи діагностичного обміну через CAN на транспортному рівні OBD використовує стандарти:

- ISO 15765-4 (CAN OBD-II) - основний стандарт для запитів і відповідей ECU;
- SAE J2284 - визначає фізичний рівень і швидкість обміну;
- ISO 14229 (UDS - Unified Diagnostic Services) - протокол сервісних запитів високого рівня, що використовується для перепрограмування, тестування та моніторингу.

Приклад запиту параметра двигуна (PID):

[02][01][0C] \Rightarrow запит обертів двигуна (RPM).

Відповідь ECU (18):

$$[04] [41] [0C] [1A] [F8] \Rightarrow RPM = \frac{(1A \times 256 + F8)}{4} = 6904 \text{ об/хв} \quad (18)$$

Технологія DoIP (Diagnostics over IP), нове покоління систем діагностики ґрунтується на стандарті ISO 13400 - DoIP (Diagnostics over Internet Protocol), який забезпечує обмін даними між ECU та діагностичними пристроями через Ethernet.

Переваги DoIP:

- швидкість передачі до 100 Мбіт/с;
- підтримка паралельної роботи кількох пристроїв;
- віддалена діагностика через Wi-Fi, 4G/5G;
- сумісність із протоколом UDS поверх TCP/IP.

DoIP використовується у новітніх платформах (*Mercedes-Benz Xentry, BMW ISTA, VW ODIS, Volvo VIDA*), а також у промислових машинах із підключенням до хмарних систем.

Вона є базовим компонентом концепції Connected Vehicle, у якій транспортний засіб є частиною мережевої інфраструктури IoT.

Інформаційна модель та алгоритм виявлення несправностей.

Стан системи можна представити у вигляді вектора (19):

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (19)$$

де x_i - значення певного параметра, а $x_{i,ref}$ - його еталон.

Критерій виявлення несправності (20):

$$|x_i - x_{i,ref}| > \Delta_i \Rightarrow \text{генерується код DTC.} \quad (20)$$

Виявлені коди реєструються в пам'яті ECU, а при перевищенні порогу серйозності активується індикатор MIL.

Інтеграція з іншими системами діагностики. Сучасні системи OBD інтегруються з вібраційною, акустичною та термографічною діагностикою через CAN - або Ethernet - шини. Це створює єдину цифрову модель технічного стану машини, яка дозволяє:

- проводити діагностику без зупинки агрегату;
- аналізувати динаміку параметрів у реальному часі;
- прогнозувати відмови (Predictive Maintenance);
- формувати звіти та графіки температур, вібрацій, тиску, обертів.

Переваги та обмеження методу.

Переваги:

- автоматичний моніторинг усіх електронних систем;
- швидкий доступ до діагностичних даних через CAN або DoIP;
- можливість дистанційної перевірки та оновлення ПЗ ECU;
- сумісність із мобільними додатками й телематичними системами;

- висока завадостійкість та точність передавання даних.

Недоліки:

- обмеження у виявленні чисто механічних дефектів;
- залежність від коректності калібрування датчиків і прошивки ECU;
- потреба у спеціалізованому обладнанні та сертифікованому доступі для DoIP.

Висновок щодо методу. Сучасні електронні системи діагностики OBD, засновані на шинах CAN H, CAN L, CAN M та мережевих технологіях DoIP, формують ядро інтелектуального контролю технічного стану машин. Вони забезпечують автоматичну ідентифікацію несправностей, дистанційний моніторинг і інтеграцію з іншими методами - вібраційним, акустичним та термографічним.

У поєднанні з аналітичними алгоритмами та системами машинного навчання OBD-технології є базою для реалізації Smart Maintenance - технічного обслуговування за фактичним станом, що мінімізує простой, підвищує безпеку й ефективність експлуатації машин.

Електронні системи діагностики та осцилографічні методи є невід'ємним доповненням до систем OBD-II / CAN / DoIP і використовуються для детального аналізу електричних сигналів у реальному часі.

Якщо OBD-система виявляє наявність несправності, то осцилограф дозволяє візуалізувати форму сигналу, визначити її причину та локалізувати дефект на рівні елементів - датчика, приводу або ланцюга живлення.

Осцилограф реєструє залежність напруги від часу (21):

$$U = f(t) \quad (21)$$

що дозволяє оцінювати:

- форму імпульсу;
- частоту повторення;
- амплітуду, фазу, симетрію сигналу;
- час наростання та спаду фронтів;
- наявність паразитних коливань і шумів.

Принцип роботи та можливості даного методу перетворюють електричні коливання на графічне зображення сигналу на екрані.

Цифрові осцилографи (DSO) використовують високошвидкісні АЦП для оцифрування сигналів та їх подальшої обробки.

Основні параметри приладу:

- смуга пропускання (до 100 МГц і більше для автомобільних систем);
- частота дискретизації (від 1 до 10 Гз/с);
- кількість каналів (2-8);
- пам'ять запису (до декількох Мбайт).

Типові сфери застосування осцилографічної діагностики:

- перевірка сигналів датчиків (колінчастого вала, розподільного вала, дросельної заслінки, ABS);
- оцінка форми імпульсів упрскування палива;
- діагностика систем запалювання (DIS, COP);
- вимірювання падіння напруги на масі;
- контроль синхронізації фаз ГРМ;
- дослідження CAN, LIN і FlexRay-сигналів у фізичному рівні.

Осцилографи для систем CAN і OBD при роботі з шинами CAN H / CAN L / CAN M дозволяє:

- візуально перевірити рівень сигналів для (CAN H~3.5 В, для CAN L~1.5 В);
- побачити диференціальний сигнал $\Delta V = V(\text{CANH}) - V(\text{CANL})$;
- оцінити симетрію, спотворення або відбиття сигналів (ознаки короткого замикання або обриву);

- перевірити узгодження лінії (термінатори 120 Ом);
- діагностувати електричні шуми, наводки, погані контакти.

Приклад вимірювання:

$\Delta V_{CAN} \approx 2V \Rightarrow$ нормальна передача;

$\Delta V_{CAN} < 1V \Rightarrow$ порушення лінії або термінатора

Осцилографічний аналіз у діагностиці двигунів за допомогою автомобільних осцилографів (наприклад *PicoScope*, *Hantek*, *Autel*, *Launch*, *Bosch FSA*) можливо:

- знімати осцилограми струму стартера для аналізу компресії по циліндрах;
- оцінювати синхронізацію сигналів датчиків колінвала і розподільного вала;
- перевіряти роботу форсунок і катушок запалювання;
- вимірювати напругу генератора, коливання живлення ECU, просідання напруги при навантаженні.

Типовий осцилографічний сигнал системи запалювання має структуру: імпульс заряду катушки (до 8 мс); стрибок напруги пробою (до 15–25 кВ); імпульс горіння (1–2 мс); коливання гасіння.

Порівняння форм сигналів дозволяє визначити несправності у катушці, свічці або електронному ключі.

Математичні параметри аналізу сигналів. Для кількісного аналізу осцилограм використовуються такі показники (22-24):

$$U_{PP} = U_{max} - U_{min} \text{ (амплітуда пік – пік)} \quad (22)$$

$$T = \frac{1}{f} \text{ (період сигналу)} \quad (23)$$

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} \text{ (ефективне значення)} \quad (24)$$

Ці параметри застосовуються для автоматичного порівняння із еталонними осцилограмами, збереженими у базі даних діагностичного комплексу.

Переваги осцилографічної діагностики: висока точність і миттєве відображення процесів; можливість дослідження сигналів, які не контролюються OBD; оцінка динаміки у реальному часі; універсальність - застосування до будь-яких електронних систем; можливість збереження і порівняння осцилограм для аналізу тенденцій деградації.

Недоліки: потреба у кваліфікованому персоналі; складність інтерпретації складних сигналів; вплив шумів і неправильного підключення щупів; вартість високоточних приладів.

Осцилографічні методи - це деталізуючий рівень електронної діагностики, який дає змогу не лише виявити несправність, а й визначити її характер, фазу, тривалість та місце виникнення. У поєднанні з OBD, CAN і DoIP осцилографічна діагностика забезпечує повний контроль електронних і електромеханічних процесів у машині.

Вона є незамінним інструментом для комплексного технічного моніторингу, калібрування та верифікації результатів, отриманих іншими методами (вібраційним, акустичним, термографічним).

5. Висновки: У ході дослідження розглянуто широкий спектр сучасних методів технічної діагностики машин, які охоплюють як традиційні фізичні методи контролю (візуальні, слухові, вібраційні, акустичні, термографічні), так і інтелектуальні електронні системи OBD, CAN, DoIP та осцилографічні засоби аналізу сигналів.

Встановлено, що візуальна та слухова діагностика залишаються ефективними при оперативному контролі стану техніки та є першочерговими етапами виявлення дефектів. Вібраційна та акустична діагностика забезпечують можливість раннього виявлення механічних пошкоджень і ідентифікації джерел несправностей за частотними характеристиками сигналів.

Термографічні методи дають змогу виявляти теплові аномалії, спричинені перевантаженнями, зносом або електричними дефектами, без демонтажу обладнання.

Електронні системи OBD, CAN, DoIP формують основу цифрової технічної діагностики нового покоління, що забезпечує автоматичне виявлення несправностей, збереження кодів помилок (DTC), дистанційний моніторинг та інтеграцію з телематичними системами.

Осцилографічна діагностика доповнює ці технології, дозволяючи проводити детальний аналіз електричних і інформаційних сигналів у реальному часі, підтверджувати результати OBD та точно локалізувати джерело дефекту.

Загальний аналіз показав, що жоден із методів діагностики не є універсальним. Найвищу ефективність забезпечує комплексний підхід, який об'єднує дані від кількох джерел - сенсорів, вібраційних і теплових датчиків, акустичних систем, осцилографів та електронних контролерів - у єдину систему технічного моніторингу.

Поєднання методів дозволяє не лише виявляти дефекти, а й прогнозувати їх розвиток, що є ключовою умовою переходу до систем обслуговування за технічним станом (Condition-Based Maintenance, CBM) і інтелектуального обслуговування (Smart Maintenance).

Подальший розвиток технічної діагностики машин пов'язаний з:

- впровадженням штучного інтелекту та машинного навчання для автоматичної інтерпретації сигналів;
- інтеграцією систем у єдині мережеві платформи моніторингу (IoT, DoIP, Cloud Diagnostics);
- розробленням адаптивних сенсорних мереж для контролю параметрів у реальному часі;
- підвищенням енергоефективності, безпеки та надійності машин за рахунок постійного діагностичного супроводу.

Отже, сучасні методи технічної діагностики є багатофункціональним інструментом управління життєвим циклом машин, який забезпечує зменшення витрат на ремонт, підвищення надійності, продовження ресурсу та створює технологічну базу для індустрії і цифрового технічного обслуговування майбутнього.

Список використаних джерел:

1. Мигаль В. Д., Аргун Щ. В. *Вібраційна діагностика машин. Проектування, виготовлення, експлуатація* : монографія. 2-е вид., перероб. і доп. Харків : Майдан, 2024. – 440 с.
2. Гребенюк В. М. *Основи технічної діагностики машин* : навч. посібник. Харків : ХНАДУ, 2018. – 268 с.
3. Поліщук С. І. *Діагностика та технічне обслуговування транспортних засобів* : навч. посібник. Київ : Арістей, 2019. – 276 с.
4. Гнатенко С. В., Задорожний О. П. Осцилографічна діагностика електронних систем автомобіля // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: *Транспортне машинобудування*. – 2021. – № 4 (1382). – С. 72–80.
5. Мигаль В. Д., Аргун Щ. В., Пшеничний О. О. Розвиток систем технічної діагностики сільськогосподарських машин // *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. – 2023. – № 25. – С. 44–53.
6. Клименко О. В., Федоренко С. В. Використання штучного інтелекту для прогнозування діагностики промислового обладнання // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2023. – Т. 4, № 10. – С. 43–52.
7. Сивак М. В., Чернега Д. В. Віброакустична діагностика технічного стану машин // *Науковий вісник НТУ «Львівська політехніка»*. – 2020. – № 869. – С. 112–118.
8. ДСТУ EN 1330-10:2017. *Неруйнівний контроль. Терміни. Частина 10. Візуальний контроль*. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 28 с.
9. Randall, R. B. (2022). Development of vibration-based condition monitoring methods. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 162, 107013.
10. Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510.
11. Li, Y., & He, D. (2012). Rotating machinery fault detection using acoustic emission signals. *Applied Acoustics*, 73(8), 812–823.
12. Medvedev, A. E., & Gusev, V. V. (2020). Thermographic diagnostics of mechanical systems. *Procedia Engineering*, 206, 1525–1532.

13. Migdalski, J., & Krawczyk, M. (2020). Use of infrared thermography in the condition monitoring of mechanical systems. *Measurement*, 165, 108112.
14. Dybala, J., & Radkowski, S. (2021). Vibration signal analysis in machine fault diagnosis using FFT and envelope analysis. *Diagnostyka*, 22(2), 57–64.
15. Holroyd, T. J. (2018). Acoustic emission methods for machine fault detection. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 37(4), 88.
16. Gao, Z., Cecati, C., & Ding, S. X. (2015). A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques – Part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(6), 3757–3767.
17. Li, X., & Wang, Y. (2022). Vehicle fault diagnosis based on OBD-II data using machine learning. *IEEE Access*, 10, 20348–20359.
18. Wang, S., & Li, J. (2021). Diagnostics over IP (DoIP) communication for vehicle systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(7), 6358–6367.
19. Brodny, J., & Tutak, M. (2020). Analysis of OBD-II system applications for internal combustion engine diagnostics. *Energies*, 13(4), 978.
20. Maldague, X. (2019). *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing* (2nd ed.). New York: Wiley.

References:

1. Migal, V. D., & Argun, Sh. V. (2024). *Vibration diagnostics of machines: Design, manufacturing, operation* (2nd ed., revised and expanded). Kharkiv: Maidan. 440 p.
2. Hrebeniuk, V. M. (2018). *Fundamentals of technical diagnostics of machines*. Kharkiv: KhNADU. 268 p.
3. Polishchuk, S. I. (2019). *Diagnostics and maintenance of vehicles*. Kyiv: Aristei. 276 p.
4. Hnatenko, S. V., & Zadorozhnyy, O. P. (2021). Oscillographic diagnostics of automotive electrical systems. *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Transport Engineering and Technologies*, 4(1382), 72–80.
5. Migal, V. D., Argun, Sh. V., & Pshenichnyi, O. O. (2023). Development of technical diagnostics systems for agricultural machines. *Technical Service of Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes*, 25, 44–53.
6. Klymenko, O. V., & Fedorenko, S. V. (2023). Application of artificial intelligence for predictive diagnostics of industrial machinery. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10), 43–52.
7. Syvak, M. V., & Cherneha, D. V. (2020). Vibroacoustic diagnostics of machine technical condition. *Scientific Bulletin of Lviv Polytechnic National University*, 869, 112–118.
8. Ukrainian Research and Training Center for Standardization. (2017). *DSTU EN 1330-10:2017 — Nondestructive testing. Terminology. Part 10. Visual testing*. Kyiv: UkrNDNC. 28 p.
9. Randall, R. B. (2022). Development of vibration-based condition monitoring methods. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 162, 107013, 1–12.
10. Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510.
11. Li, Y., & He, D. (2012). Rotating machinery fault detection using acoustic emission signals. *Applied Acoustics*, 73(8), 812–823.
12. Medvedev, A. E., & Gusev, V. V. (2020). Thermographic diagnostics of mechanical systems. *Procedia Engineering*, 206, 1525–1532.
13. Migdalski, J., & Krawczyk, M. (2020). Use of infrared thermography in the condition monitoring of mechanical systems. *Measurement*, 165, 108112, 1–9.
14. Dybala, J., & Radkowski, S. (2021). Vibration signal analysis in machine fault diagnosis using FFT and envelope analysis. *Diagnostyka*, 22(2), 57–64.
15. Holroyd, T. J. (2018). Acoustic emission methods for machine fault detection. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 37(4), 88–96.
16. Gao, Z., Cecati, C., & Ding, S. X. (2015). A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques – Part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(6), 3757–3767.
17. Li, X., & Wang, Y. (2022). Vehicle fault diagnosis based on OBD-II data using machine learning. *IEEE Access*, 10, 20348–20359.
18. Wang, S., & Li, J. (2021). Diagnostics over IP (DoIP) communication for vehicle systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(7), 6358–6367.
19. Brodny, J., & Tutak, M. (2020). Analysis of OBD-II system applications for internal combustion engine diagnostics. *Energies*, 13(4), 978, 1–16.
20. Maldague, X. (2019). *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing* (2nd ed.). New York: Wiley. 709 p.