



Методи і прилади контролю технологічних параметрів

Прийнято 02.04.2026. Прорецензовано 28.05.2026. Опубліковано 30.05.2026.

УДК 681.518

DOI: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-113-127

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВІБРАЦІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ РУХОМОГО СКЛАДУ

Равлюк В. Г.

Доктор технічних наук, професор
Український державний університет залізничного транспорту
61050, м-н. Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-4818-9482>
e-mail: ravvg@ukr.net

Ловська А. О.

Доктор технічних наук, професор
Український державний університет залізничного транспорту
61050, м-н. Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8604-1764>
e-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com

Бондаренко В. В.

Кандидат технічних наук, доцент
Український державний університет залізничного транспорту
61050, м-н. Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-4019-4017>
e-mail: bonvya@ukr.net

Рибін А. В.

Кандидат технічних наук, доцент
Український державний університет залізничного транспорту
61050, м-н. Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-4430-8018>
e-mail: rybinandrey@kart.edu.ua

Запропоноване посилання: Равлюк, В. Г., Ловська, А. О., Бондаренко, В. В., Рибін, А. В., Скуріхін, Д. І. & Богучький, В. Р. (2026). Інформаційно-вимірювальні технології підвищення точності вібраційної діагностики підшипникових вузлів рухомого складу. *Методи та прилади контролю якості*, 1(56), 113-127. doi: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-113-127

* Відповідальний автор



Скуріхін Д. І.

Кандидат технічних наук, доцент
Український державний університет залізничного транспорту
61050, м-н. Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3746-5157>
e-mail: skurikhin@kart.edu.ua

Богуцький В. Р.

аспірант
Український державний університет залізничного транспорту
61050, м-н. Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0009-0000-3013-8252>
e-mail: metalistvb@gmail.com

Анотація. У статті розглянуто питання підвищення точності вібраційної діагностики підшипникових вузлів рухомого складу на основі удосконалення інформаційно-вимірювальних технологій формування та обробки вимірювальних сигналів. Обґрунтовано актуальність зменшення вимірювальної невизначеності під час оцінювання технічного стану підшипників кочення, що працюють в умовах змінних навантажень та експлуатаційних впливів. Проведено аналіз чинників, які формують структуру діагностичного сигналу та визначають рівень абсолютної і відносної похибок вимірювання, зокрема вплив параметрів вібродатчиків, способів їх кріплення, смуги пропускання, частоти дискретизації та алгоритмів спектральної обробки. Розроблено математичну модель формування вимірювального сигналу, що враховує адитивні та мультиплікативні складові похибки, а також перетворювальні властивості вимірювального каналу. На підставі отриманих аналітичних залежностей визначено умови мінімізації відносної похибки оцінювання інформативних діагностичних параметрів. Запропоновано підхід до підвищення достовірності діагностичних висновків шляхом оптимізації параметрів вимірювального каналу та алгоритмів цифрової обробки. Експериментальні дослідження виконано в умовах вагоноремонтного підприємства на спеціалізованому стендовому обладнанні, що дозволило поєднати результати контрольованих випробувань із реальними режимами експлуатації рухомого складу. Отримані результати підтвердили можливість зниження відносної похибки визначення технічного стану підшипникових вузлів та підвищення інформативності діагностичних ознак. Практичне значення роботи полягає у можливості застосування запропонованих інформаційно-вимірювальних рішень у системах технічної діагностики та моніторингу рухомого складу.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальні технології, діагностика, рухомий склад, підшипниковий вузол, залізничний транспорт, метрологія, вимірювання, інформативність сигналу.

Вступ

Надійність і безпека експлуатації рухомого складу залізничного транспорту значною мірою визначаються технічним станом його відповідальних вузлів, зокрема буксових підшипників, відмови яких можуть призводити до серйозних експлуатаційних наслідків. Сучасні тенденції розвитку залізничної техніки пов'язані зі створенням новітніх конструкцій вагонів, застосуванням легких матеріалів, удосконалених візків, інтелектуальних елементів контролю та цифрових систем моніторингу стану рухомого складу, що підвищує вимоги до точності діагностичних методів [1-6]. У зв'язку з цим актуальним є застосування сучасних методів контролю та діагностування буксових підшипників, здатних забезпечити своєчасне виявлення дефектів на ранніх стадіях їх розвитку [7].

Важливу роль у вирішенні зазначених завдань відіграють інформаційно-вимірювальні технології, що лежать в основі систем вібраційного контролю технічного стану рухомого складу. Такі системи забезпечують отримання вимірювальної інформації про динамічні процеси, що відбуваються в буксових підшипниках, та створюють передумови для обґрунтованого оцінювання їх технічного стану.

Разом з тим ефективність інформаційно-вимірювальних систем вібраційної діагностики визначається не лише алгоритмами обробки сигналів, але й точністю вимірювального каналу, яка формується під впливом характеристик датчиків, умов їх встановлення та способів кріплення. Зміна місця розташування датчика або особливостей його монтажу може істотно впливати на амплітудно-частотні характеристики

вимірювального сигналу, рівень завад та величину похибок вимірювання.

Підшипниковий вузол рухомого складу в цьому випадку доцільно розглядати як джерело вимірювальної інформації зі складною структурою, а сукупність датчика, елементів кріплення та реєструвальної апаратури — як інформаційно-вимірювальний канал. За таких умов вибір точок вимірювання та способів кріплення датчиків набуває принципового значення для забезпечення достовірності результатів діагностування.

Незважаючи на значну кількість публікацій, присвячених питанням вібраційної діагностики буксових підшипників, аспекти оцінювання впливу схем розміщення і кріплення датчиків з позицій інформаційно-вимірювальних технологій та аналізу складових похибок вимірювання залишаються недостатньо узагальненими. Отже, подальші дослідження доцільно спрямувати на уточнення закономірностей формування вимірювального сигналу та оцінювання похибок інформаційно-вимірювального каналу.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Питання розроблення та вдосконалення інформаційно-вимірювальних технологій займають важливе місце у сучасних дослідженнях, присвячених контролю та діагностуванню технічного стану машин і механізмів. Значна кількість наукових праць спрямована на підвищення точності вимірювань, надійності вимірювальних каналів та достовірності результатів обробки вимірювальної інформації.

У роботі [8] запропоновано інформаційно-вимірювальну систему з трьома каналами отримання інформації для визначення параметрів руху виробничого обладнання. Система поєднує дані акселерометрів і цифрової стереокамери, що дозволяє підвищити точність вимірювання за рахунок інформаційної надлишковості. Авторами розроблено алгоритми синхронізації та об'єднання вимірювальних сигналів, а також проведено експериментальну перевірку працездатності системи. Отримані

результати підтвердили можливість зниження похибки вимірювань параметрів руху. Водночас у дослідженні не розглянуто вплив умов експлуатації рухомого складу, зокрема вібраційних і динамічних навантажень, на стабільність метрологічних характеристик вимірювального каналу.

У статті [9] розглянуто підхід до оцінювання метрологічної надійності інформаційно-вимірювальної системи з використанням дисперсійного аналізу результатів вимірювань. Запропоновано методика оцінки розсіювання даних і визначення складових похибок вимірювального каналу. Проведені експериментальні дослідження дозволили кількісно оцінити вплив окремих факторів на точність вимірювань. Разом з тим у роботі відсутній аналіз просторового розміщення датчиків і способів їх кріплення, що є важливими чинниками формування похибок у системах вібраційного контролю.

Дослідження [10] присвячене розробленню інформаційно-вимірювальної системи для контролю осьового зазору в радіальних кулькових підшипниках. У роботі запропоновано структурну схему вимірювального каналу, виконано моделювання процесу вимірювання та оцінено похибки. Отримані результати демонструють можливість підвищення точності вимірювання одного з ключових параметрів підшипникового вузла. Однак дослідження має локальний характер і не враховує вплив умов експлуатації рухомого складу та складної вібраційної обстановки на достовірність вимірювальної інформації.

У праці [11] розглянуто інформаційні технології та вимірювальні засоби діагностування турбоагрегатів із застосуванням систем безперервного вібраційного контролю. Запропоновано підхід до побудови автоматизованих вимірювальних систем і наведено результати аналізу вібраційних сигналів у різних режимах роботи агрегатів. Дослідження демонструє ефективність системного підходу до вібраційної діагностики. Водночас отримані результати орієнтовані переважно на стаціонарні об'єкти та не враховують особливостей вимірюваль-

них каналів у системах контролю рухомого складу.

У роботі [12] представлено інформаційно-вимірювальну систему для визначення геометричних параметрів і параметрів руху промислових виробів на основі обробки відеозображень. Запропоновано алгоритми цифрової обробки зображень та проведено експериментальну оцінку точності вимірювань. Отримані результати підтверджують перспективність безконтактних методів у складі інформаційно-вимірювальних технологій. Разом з тим точність таких систем істотно залежить від умов освітлення та стабільності візуального середовища, що ускладнює їх застосування для діагностування рухомого складу в реальних експлуатаційних умовах.

У дослідженні [13] виконано лабораторну оцінку точності трьохосових вібраційних датчиків у широкому діапазоні температур. Проаналізовано вплив температурних факторів на метрологічні характеристики датчиків та стабільність вимірювальних сигналів. Результати дослідження мають важливе значення для вибору первинних перетворювачів у системах вібраційного контролю. Однак проведені експерименти обмежені лабораторними умовами та не враховують складні динамічні впливи, характерні для рухомого складу.

У роботі [14] розглянуто проблему впливу вібраційних завод на стохастичні похибки вимірювань. Запропоновано математичну модель формування шумів та методи корекції вимірювальних даних. Отримані результати дозволяють глибше зрозуміти природу випадкових складових похибок у вимірювальних системах. Водночас складність практичної реалізації запропонованих методів обмежує їх використання в промислових інформаційно-вимірювальних системах діагностування.

Дослідження [15] присвячене розробці безконтактної радіочастотно-оптичної системи для детектування вібрацій машинних елементів. Запропоновано підхід, що дозволяє здійснювати вимірювання без прямого контакту з об'єктом та зменшити вплив механічних перешкод. Отримані результати підтверджують перспективність

альтернативних вимірювальних технологій. Разом з тим інтеграція таких систем у стандартизовані інформаційно-вимірювальні комплекси технічної діагностики потребує подальших досліджень.

Проведений аналіз свідчить, що, незважаючи на значну кількість наукових робіт у галузі інформаційно-вимірювальних технологій, недостатньо дослідженими залишаються питання формування похибок вимірювальних каналів вібраційної діагностики рухомого складу з урахуванням місць розташування та способів кріплення датчиків. Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на підвищення точності та достовірності вимірювальної інформації в системах контролю технічного стану рухомого складу.

Метою роботи – є підвищення точності вібраційної діагностики підшипникових вузлів рухомого складу на основі удосконалення інформаційно-вимірювальних технологій формування та обробки вимірювальних сигналів.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

- визначити основні чинники, що впливають на точність вібраційних вимірювань під час діагностування підшипникових вузлів рухомого складу;
- обґрунтувати підхід до побудови інформаційно-вимірювальної системи, спрямований на зменшення похибок вимірювання вібраційних параметрів;
- оцінити вплив запропонованих інформаційно-вимірювальних рішень на точність вібраційної діагностики підшипникових вузлів рухомого складу.

Викладення основного матеріалу

Аналіз результатів багаторічних експериментальних досліджень, отриманих із застосуванням сучасних інформаційно-вимірювальних технологій вібродіагностування, свідчить, що швидкість розвитку дефектів підшипників кочення рухомого складу є істотно неоднорідною та визначається типом дефекту, умовами навантаження і режимами експлуатації. При цьому мінімальний час переходу дефектів зносу від стадії зародження до передаварійного

стану, за даними вимірювального моніторингу, становить приблизно чверть середнього ресурсу підшипника. У зв'язку з цим виникає необхідність використання автоматизованих інформаційно-вимірювальних систем безперервного або періодичного контролю параметрів вібрації, які забезпечують ранню реєстрацію діагностичних ознак дефектів та формування достовірної інформаційної бази для прогнозування технічного стану підшипникових вузлів [16].

Оцінку часу розвитку дефекту підшипника за результатами вимірювань, визначено таким чином:

$$T_d = \frac{t_{kp} - t_0}{T_{cp}}, \quad (1)$$

де t_0 – момент первинної реєстрації діагностичної ознаки за даними вимірювань;

t_{kp} – момент досягнення граничного значення діагностичного параметра;

T_{cp} – середній ресурс підшипника.

Таким чином, часові характеристики розвитку дефектів підшипникових вузлів безпосередньо пов'язані з якістю та точністю вимірювальної інформації, що формується в процесі вібраційного контролю. Це зумовлює необхідність детального аналізу чинників, які визначають інформативність і метрологічні властивості вимірювального каналу.

Одним із визначальних чинників, що впливає на точність та інформативність вібраційної діагностики буксових підшипників рухомого складу, є вибір місця встановлення первинного вимірювального перетворювача. З позицій інформаційно-вимірювальних технологій формування вимірювального сигналу відбувається внаслідок поширення механічних коливань від зон контакту елементів підшипника до поверхні корпусу вузла. При цьому максимальні контактні навантаження реалізуються у навантаженій зоні підшипника кочення, що зумовлює підвищену інтенсивність вібраційних збурень у цій області. Оскільки просторове положення навантаженої зони змінюється залежно від режимів роботи та умов експлуатації рухомого складу, вибір точки вимірювання потребує врахування

конструктивних особливостей вузла та напрямків передачі вібраційної енергії.

Кількісна оцінка згасання вібраційного сигналу вздовж вимірювального шляху в точці встановлення датчика визначається виразом

$$A_x = A_0 e^{-\alpha x}, \quad (2)$$

де A_0 – амплітуда вібрацій у зоні джерела коливань;

α – коефіцієнт загасання механічних коливань у матеріалі корпусу;

x – відстань від джерела коливань до точки вимірювання.

З точки зору інформаційно-вимірювальних технологій важливим чинником формування достовірного вібраційного сигналу є мінімізація кількості контактних поверхонь між джерелом механічних коливань і первинним вимірювальним перетворювачем. Кожна додаткова контактна межа в конструкції підшипникового вузла призводить до часткового відбиття та розсіювання вібраційної енергії, що особливо проявляється у високочастотному діапазоні. Саме високочастотні складові сигналу містять найбільш інформативні ознаки зародження дефектів елементів підшипника. Унаслідок цього збільшення кількості контактних поверхонь між зовнішнім кільцем підшипника та корпусом датчика призводить до зниження відношення сигнал/шум і, відповідно, до зменшення чутливості інформаційно-вимірювальної системи. Тому оцінку втрат сигналу на контактних поверхнях визначено так:

$$A_n = A_0 \prod_{i=1}^n k_i, \quad (3)$$

де k_i – коефіцієнт передавання вібрацій через i -ту контактну поверхню ($0 < k_i < 1$).

Важливим аспектом інформаційно-вимірювального забезпечення вібраційної діагностики є правильна орієнтація первинного вимірювального перетворювача відносно напрямку дії механічних коливань. Для забезпечення максимальної інформативності вимірюваного сигналу вісь максимальної чутливості датчика повинна бути зорієнтована вздовж напрямку домінуючих вібрацій, що виникають у підшипниковому вузлі рухомого складу. Вплив

поперечної чутливості датчиків вібрації, як правило, не перевищує 1 % від номінальної чутливості. Тому за умови коректного встановлення датчика, вплив на результати вимірювань є незначним і в більшості практичних випадків як правило можуть бути знехтувані.

Оцінка ефективної чутливості датчика визначається виразом

$$S_{ef} = S_0 \cos \theta, \quad (4)$$

де S_0 – номінальна чутливість датчика;

θ – кут між віссю чутливості датчика та напрямком основних коливань.

Під час формування вимірювального каналу вібраційної діагностики важливе значення має вибір точок встановлення датчиків на корпусі буксового вузла рухомого складу. Розміщення первинних вимірювальних перетворювачів повинно забезпечувати максимальну чутливість до коливань, що генеруються безпосередньо в зоні контакту елементів підшипника, та мінімізувати вплив вібрацій від інших елементів конструкції. Найбільш інформативними є точки, розташовані в безпосередній близькості до підшипника, де вимірювальний сигнал формується переважно під впливом дефектів досліджуваного вузла, що підвищує відношення сигнал/шум і достовірність діагностичних ознак [15-16].

Показник коефіцієнта інформативності вимірювального сигналу визначається співвідношенням

$$I = \frac{A_{nd}}{A_c}, \quad (5)$$

де A_{nd} – амплітуда вібрацій, зумовлена дефектами буксового підшипника;

A_c – амплітуда сторонніх вібрацій від інших елементів конструкції.

Вибір напрямків вимірювання механічних коливань є складовою формування просторової структури інформаційно-вимірювального каналу вібраційної діагностики підшипникових вузлів рухомого складу. У загальному випадку доцільним є виконання вимірювань у радіальному напрямку, який відповідає мінімальній жорсткості системи та характеризується підвищеною чутливістю до дефектів елементів підшипника. Додаткові вимірювання в

осьовому напрямку дозволяють врахувати особливості роботи вузла та підвищити повноту діагностичної інформації. Таким чином, багатокомпонентний вимірювальний сигнал формується як сукупність проєкцій вібраційних коливань у взаємно перпендикулярних напрямках.

Узагальнюючи вплив просторового розміщення датчика, згасання сигналу, втрат на контактних поверхнях та орієнтації осі чутливості, доцільно перейти до формалізованого опису ефективної амплітуди вимірюваного вібраційного сигналу як інтегрального показника інформативності вимірювального каналу. З урахуванням викладеного, наведено математичну модель для визначення ефективної амплітуди вимірювального вібраційного сигналу буксового підшипника:

$$A_{ef} = A_0 e^{-\alpha x} \left(\prod_{i=1}^n k_i \right) \cos \theta. \quad (6)$$

Суттєвий вплив на метрологічні характеристики інформаційно-вимірювального каналу вібраційної діагностики має спосіб кріплення первинного вимірювального перетворювача до корпусу буксового вузла рухомого складу. Метод кріплення визначає жорсткість механічного контакту в системі «об'єкт – датчик» і, відповідно, верхню межу робочого частотного діапазону вимірювань. Найбільш жорстке з'єднання забезпечується при різьбовому кріпленні датчика безпосередньо до обробленої поверхні корпусу, що дозволяє з мінімальними втратами передавати високочастотні складові вібраційного сигналу [16]. Схеми основних способів кріплення датчиків вібрації до корпусу буксового вузла наведено на рис. 1.

Частотні характеристики вимірювального каналу вібраційної діагностики істотно залежать від способу кріплення вібродатчика до корпусу підшипникового вузла рухомого складу. Жорстке різьбове кріплення датчика за допомогою сталевий шпильки забезпечує найширший робочий частотний діапазон та мінімальні втрати амплітуди високочастотних складових вібраційного сигналу. Застосування проміжних пружних або демпфувальних елементів

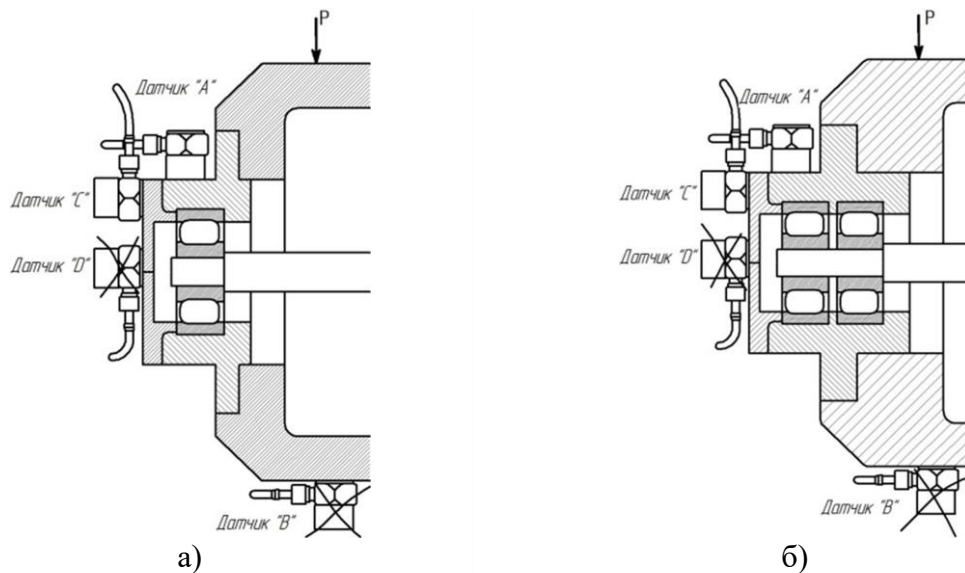


Рисунок 1 – Схеми розміщення місць датчиків на вузлі вагона при діагностуванні одного підшипника (а) та двох підшипників (б)

(воску, клеїв, герметиків, епоксидних смол) призводить до зниження граничної частоти передавання та спотворення амплітудно-частотної характеристики вимірювального каналу. Найбільші втрати високочастотної складової сигналу спостерігаються при використанні магнітних основ і щупів, що обмежує можливості їх застосування для ранньої діагностики дефектів підшипникових вузлів.

Гранична частота передавання вібрацій через контакт вимірювального каналу визначається співвідношенням

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{кр}}{m}}, \quad (7)$$

де $k_{кр}$ – еквівалентна жорсткість кріплення датчика;

m – маса датчика.

Таким чином, спосіб кріплення датчика безпосередньо впливає на величину ефективної амплітуди A_{ef} , визначеної виразом (6), та на інформативність вібраційної діагностики буксових підшипників рухомого складу.

З урахуванням викладеного, спосіб кріплення первинного вимірювального перетворювача слід розглядати як один із визначальних параметрів формування інформаційно-вимірювального каналу вібраційної діагностики. Зменшення еквівалентної жорсткості кріплення призводить до зниження граничної частоти передавання ві-

браційного сигналу, внаслідок чого високочастотні складові, що містять інформацію про зародження дефектів елементів підшипникового вузла, частково або повністю втрачаються. Це безпосередньо впливає на величину ефективної амплітуди вимірюваного сигналу A_{ef} , визначеної виразом (6), та призводить до зменшення коефіцієнта інформативності I .

У такому разі вимірювальний канал фактично виконує функцію низькочастотного фільтра, що обмежує можливості раннього виявлення дефектів буксового підшипника. Тому при побудові інформаційно-вимірювальних систем вібраційної діагностики підшипникових вузлів рухомого складу доцільно забезпечувати максимально жорстке та повторюване кріплення датчиків, особливо у випадках контролю високочастотних діагностичних ознак.

Частотна інформативність вимірювального сигналу визначається виразом

$$I(f) = \begin{cases} \frac{A_{ef}(f)}{A_c}, & f \leq f_{cp}, \\ 0, & f \geq f_{cp}, \end{cases} \quad (8)$$

де f_{cp} – гранична частота, що визначається способом кріплення датчика.

Підвищення точності вібраційної діагностики підшипникових вузлів рухомого складу неможливе без урахування метрологічних характеристик первинних вимі-

рювальних перетворювачів, які визначають достовірність та відтворюваність результатів вимірювань. Основними метрологічними параметрами датчиків вібрації є чутливість, лінійність, частотний діапазон, стабільність параметрів у часі та допустимі значення основної і додаткових похибок. У реальних умовах експлуатації рухомого складу на результати вимірювань додатково впливають температурні, динамічні та вібраційні чинники, що зумовлює необхідність комплексного оцінювання сумарної похибки вимірювального каналу.

Розглянуті особливості формування вимірювального сигналу безпосередньо відображаються на точності результатів вібраційної діагностики. У зв'язку з цим подальший аналіз доцільно виконувати з позицій метрологічного оцінювання похибок інформаційно-вимірювального каналу [15-16].

Сумарну абсолютну похибку вимірювання вібраційного параметра доцільно оцінювати як:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{\delta}^2 + \Delta_{mp}^2 + \Delta_m^2}, \quad (9)$$

де Δ_{δ} – похибка первинного вимірювального перетворювача;

Δ_{mp} – похибка вимірювального каналу (кабель, підсилювач, АЦП);

Δ_m – методична похибка, зумовлена вибором точки вимірювання, орієнтацією та способом кріплення датчика.

З урахуванням виразу (6) для ефективної амплітуди A_{ef} , методична складова похибки Δ_m зростає зі збільшенням відстані до джерела коливальних, кількості контактних поверхонь, відхилення осі чутливості датчика та зменшення жорсткості його кріплення.

У виразі (9) Δ_{Σ} є абсолютною похибкою вимірювання відповідного вібраційного параметра, яка характеризує максимально можливе відхилення вимірюваного значення від істинного в абсолютних одиницях. Такий підхід є доцільним при аналізі метрологічних характеристик інформаційно-вимірювального каналу та оцінюванні впливу окремих складових похибки на достовірність результатів діагностики буксових підшипників.

Разом з тим використання лише абсолютної похибки не завжди дозволяє об'єктивно оцінити якість вимірювань у широкому діапазоні значень вібраційних параметрів. Це пов'язано з тим, що при зміні рівня вимірюваного сигналу одна й та сама абсолютна похибка може мати різний вплив на достовірність діагностичних результатів. У зв'язку з цим доцільним є перехід до оцінювання відносної похибки, яка нормує абсолютну похибку на величину вимірюваного параметра та дозволяє порівнювати точність вимірювань за різних режимів роботи рухомого складу.

Відносну похибку вимірювання вібраційних параметрів підшипникових вузлів рухомого складу доцільно визначати як відношення сумарної абсолютної похибки вимірювального каналу до ефективної амплітуди вібраційного сигналу, сформованого в процесі вимірювань. Такий підхід дозволяє безпосередньо пов'язати точність вимірювань із параметрами інформаційно-вимірювальної системи, зокрема з вибором точки встановлення датчика, способом його кріплення та орієнтацією осі чутливості. Зменшення ефективної амплітуди вимірюваного сигналу внаслідок загасання, втрат на контактних поверхнях або обмеження частотного діапазону призводить до зростання відносної похибки, навіть за незмінної абсолютної складової похибки, яка визначається за формулою

$$\delta_{\Sigma} = \frac{\Delta_{\Sigma}}{A_{ef}} \cdot 100\%. \quad (10)$$

Таким чином, підвищення точності вібраційної діагностики з позицій інформаційно-вимірювальних технологій полягає не лише у зменшенні абсолютної похибки вимірювань, але й у збільшенні ефективної амплітуди інформативної складової вібраційного сигналу.

З метою експериментальної перевірки ефективності запропонованих інформаційно-вимірювальних підходів до підвищення точності вібраційної діагностики підшипникових вузлів рухомого складу було виконано комплекс експериментальних досліджень. Експериментальна частина спрямована на оцінювання інформативності

вимірювальних сигналів, достовірності діагностичних ознак та можливостей зменшення відносної похибки визначення технічного стану підшипникових вузлів.

Експериментальні дослідження проводилися в умовах вантажного вагонного депо «Основа» регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця», а також на спеціалізованому стендовому обладнанні. Поєднання результатів, отриманих у виробничих умовах вагонного депо «Основа», з даними стендових випробувань дозволило забезпечити репрезентативність експерименту та наближення режимів досліджень до реальних умов експлуатації рухомого складу [15].

Для проведення стендових випробувань використовувався спеціалізований випробувальний стенд, який забезпечує обертання підшипникового вузла з регульованою частотою та прикладення радіального навантаження, близького до експлуатаційного (рис. 2). Застосування такого стенда дозволяє відтворювати основні режими роботи підшипників, характерні для рухомого складу в процесі експлуатації та забезпечує можливість контролю параметрів вимірювального процесу.



Рисунок 2 – Загальний вигляд стенда для дослідження підшипникових вузлів

Вимірювання вібраційних параметрів здійснювалося за допомогою діагностичної системи, до складу якої входили вібродатчики, АЦП та програмне забезпечення для реєстрації й аналізу сигналів. Схема розміщення вібродатчиків на корпусі буксового вузла вагона вибиралася з урахуванням забезпечення максимальної інформативності сигналу та мінімізації методичної складової похибки.

Об'єктами експериментальних досліджень були роликові підшипники кочення, що застосовуються у буксових вузлах рухомого складу. Підшипникові вузли відбиралися безпосередньо з ремонтного фонду вагонного депо «Основа» та мали різний технічний стан — від справного до такого, що містив дефекти елементів підшипника [16].

Під час експериментів підшипникові вузли навантажувалися радіальним зусиллям до 2,5 кН та оберталися з частотою до 700 об/хв, що відповідає реальним умовам експлуатації рухомого складу.

На першому етапі експериментальних досліджень виконувалася реєстрація та аналіз часових реалізацій сигналів віброприскорення підшипникових вузлів рухомого складу (рис. 3). Аналіз показав, що для підшипників із дефектами зовнішнього кільця характерною є наявність імпульсних складових ударного характеру з високими піковими значеннями віброприскорення.

Зі зростанням ступеня розвитку дефекту спостерігається зменшення інтервалів між імпульсами та збільшення швидкості зміни віброприскорення, що створює додаткове навантаження на вимірювальний канал і може призводити до зростання абсолютної та відносної похибок вимірювання.

На наступному етапі виконувалася побудова спектрів вібраційних сигналів у широкому частотному діапазоні (рис. 4). Отримані спектри характеризуються значною кількістю роторних гармонік і широкосмуговим підвищенням рівня вібрації, що ускладнює виділення діагностично значущих частот, пов'язаних із дефектами окремих елементів підшипникового вузла.

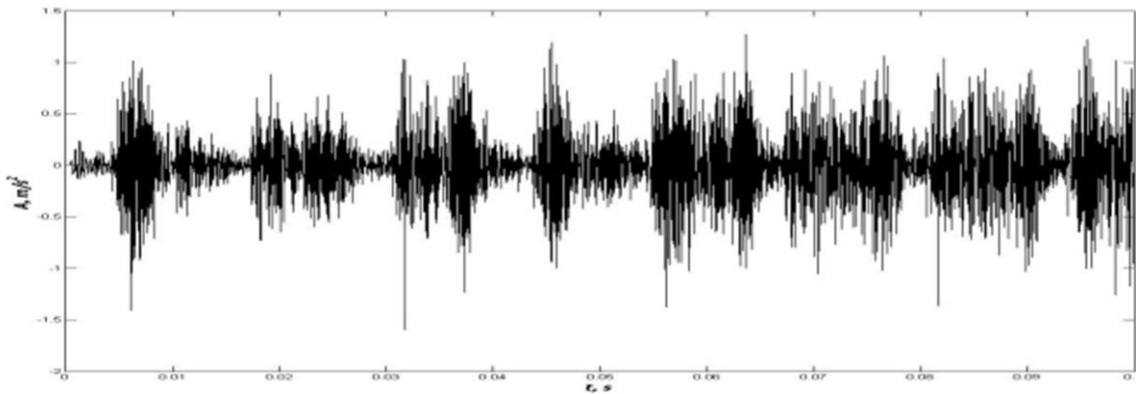


Рисунок 3 – Часова реалізація вібраційного сигналу для підшипника з дефектом

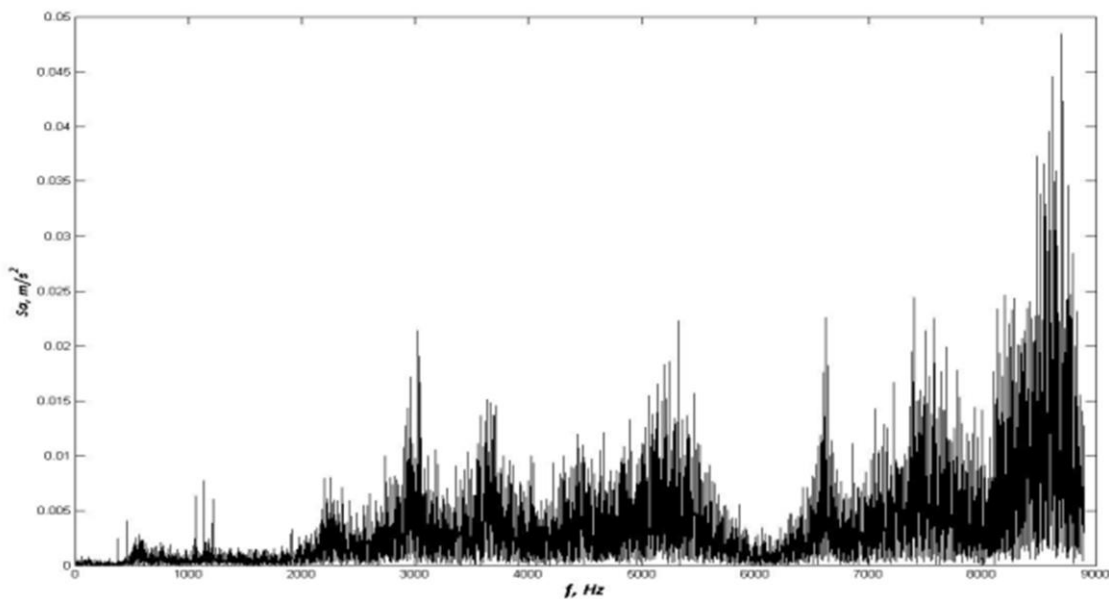


Рисунок 4 – Спектр вібраційного сигналу в широкому частотному діапазоні

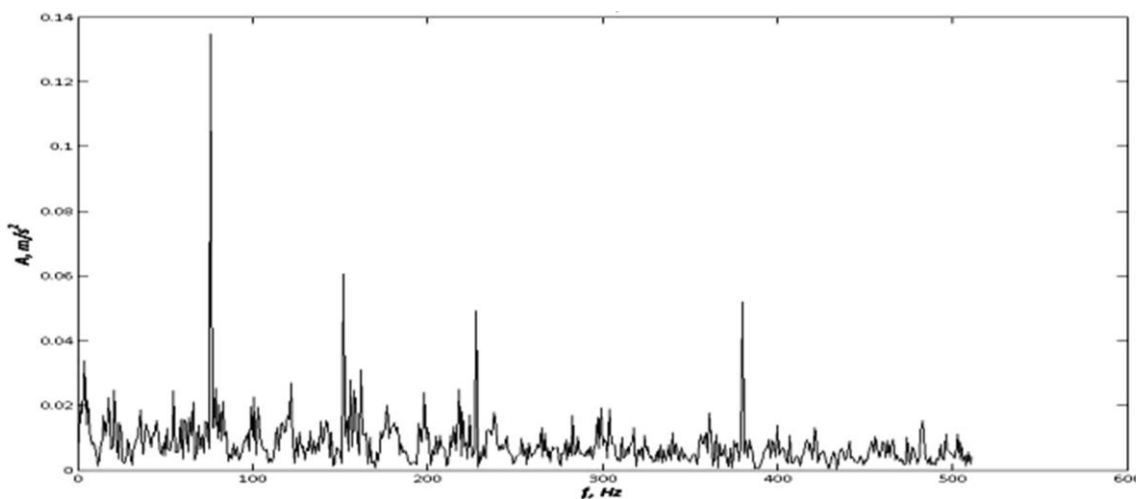


Рисунок 5 – Спектр обвідної вібраційного сигналу

Проведений аналіз показав, що прямий спектральний аналіз не завжди забезпечує достатню достовірність діагностування, особливо на початкових стадіях розвитку дефектів.

З метою підвищення інформативності вимірювальних сигналів у процесі експериментальних досліджень було застосовано метод аналізу спектра обвідної вібрації (рис. 5). Попередня фільтрація сигналів у

вибраних частотних смугах дозволила виділити модуляційні складові, пов'язані з періодичними ударами елементів підшипника.

Отримані спектри обвідної характеризуються чітким проявленням характерних частот дефектів підшипникових вузлів, що суттєво підвищує достовірність ідентифікації їх технічного стану та зменшує відносну похибку діагностування.

Результати експериментальних досліджень, виконаних у вагонному депо «Основа» на стендовому обладнанні, підтвердили ефективність застосування запропонованих інформаційно-вимірювальних технологій для вібраційної діагностики підшипникових вузлів рухомого складу. Застосування аналізу спектра обвідної в поєднанні з оптимальним вибором параметрів вимірювального каналу дозволяє підвищити інформативність сигналів і забезпечити більш надійну оцінку технічного стану підшипникових вузлів у порівнянні з традиційними методами спектрального аналізу.

Отримані результати дозволяють оцінити вплив параметрів вимірювального каналу на достовірність діагностичних ознак та сформулювати рекомендації щодо підвищення точності вібродіагностики.

Висновки

1. У результаті проведеного аналізу встановлено, що інформативність вібраційних сигналів підшипникових вузлів рухомого складу суттєво залежить від параметрів інформаційно-вимірювального каналу, зокрема від просторового розміщення та орієнтації вібродатчика, умов його кріплення та частотних обмежень вимірювального каналу. Встановлено, що ігнорування зазначених чинників призводить до зниження достовірності діагностичних ознак.

2. Запропоновано формалізований опис формування ефективної амплітуди вібраційного сигналу, який дозволяє кількісно врахувати згасання коливань, втрати на контактних поверхнях і вплив параметрів вимірювального каналу. На підставі цієї моделі виконано оцінювання абсолют-

ної та відносної похибок вимірювання вібраційних параметрів, що створює метрологічну основу для підвищення точності вібраційної діагностики підшипникових вузлів рухомого складу.

3. Експериментальні дослідження, виконані в умовах діючого вагоноремонтного підприємства на спеціалізованому стендовому обладнанні, підтвердили коректність та ефективність запропонованих інформаційно-вимірювальних підходів. Застосування аналізу спектра обвідної в поєднанні з урахуванням параметрів вимірювального каналу забезпечує підвищення інформативності вимірювальних сигналів і зменшення відносної похибки визначення технічного стану підшипникових вузлів рухомого складу.

Подяки

Дане дослідження проведено в рамках науково-дослідної роботи «Підвищення безпеки руху залізничного рухомого складу шляхом впровадження інтегрованих технологій підтримки життєвого циклу» (№ДР 0125U001907), яка виконується за рахунок коштів державного бюджету України з 2025 року.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Dizo J., Blatnický M., Harusinec J., Suchanek A. Assessment of dynamics of a rail vehicle in terms of running properties while moving on a real track model. *Symmetry*. 2022. Vol. 14 (3). Art. 536. URL: <https://doi.org/10.3390/sym14030536>
2. Dizo J., Blatnický M. Evaluation of vibrational properties of a three-wheeled vehicle in terms of comfort. *Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 19 (2). P. 197–203. URL: <https://doi.org/10.21062/ujep/269.2019/a/1213-2489/mt/19/2/197>
3. Gerlici J., Lovska A., Kozáková K. Research into the longitudinal loading of an improved load-bearing structure of a flat car for container transportation. *Designs*. 2025. Vol. 9 (1). Art. 12. URL: <https://doi.org/10.3390/designs9010012>
4. Lovska A., Stanovska I., Kyrillova V., Okorokov A., Vernigora R. Determining the vertical load on a container with a floor made of sandwich panels transported by a flat wagon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 6/7 (132). P. 36–44. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/37>
5. Fischer S. Investigation of the settlement behavior of ballasted railway tracks due to dynamic loading. *Spectrum of Mechanical Engineering and Operational Research*. 2025. Vol. 2 (1). P. 24–46. URL: <https://doi.org/10.31181/smeor21202528>
6. Fischer S., Harangozó D., Németh D., Kocsis B., Sysyn M., Kurhan D., Brautigam A. Investigation of heat-affected zones of thermite rail welding. *Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 22 (4). P. 689–710. URL: <https://doi.org/10.22190/FUME221217008F>
7. Равлюк В. Г., Равлюк М. Г. Методологія вібродіагностування буксових вузлів вагонів з підшипниками кочення. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2011. Вип. 123. С. 141–146.
8. Подчашинський Ю. О., Лугових О. О., Чепюк Л. О. Інформаційно-вимірювальна система для визначення параметрів руху виробничого обладнання з трьома каналами отримання інформації. *Технічна інженерія*. 2023. № 2 (92). С. 182–190. URL: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-182-190](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-182-190)
9. Григоренко І. та ін. Розробка інформаційно-вимірювальної системи та перевірка її метрологічної надійності методом дисперсійного аналізу. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2025. № 1 (23). С. 32–39. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2025.01.04>
10. Кирилів Р. М. Інформаційно-вимірювальна система для контролю осьового зазору в радіальних кулькових підшипниках : дипломна робота магістра. Тернопіль : ТНТУ, 2019. 95 с.
11. Шульженко М. Г., Єфремов Ю. Г., Цибулько В. І., Депарма О. В. Інформаційні технології та вимірювальні засоби діагностування турбоагрегатів. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні*. 2011.
12. Подчашинський Ю., Лугових О., Полянська А., Невмержицький В. Інформаційно-вимірювальна система для визначення геометричних параметрів та параметрів руху промислових виробів за їх відеозображеннями. *Технічна інженерія*. 2025. № 1 (95). С. 403–410. URL: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-403-410](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-403-410)
13. Shimoda T., Kokuyama W., Nozato H. Accurate laboratory testing of low-frequency triaxial vibration sensors under various environmental conditions. *arXiv preprint*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2512.10771>
14. Voirol L. et al. Accounting for vibration noise in stochastic measurement errors. *arXiv preprint*. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2303.18167>
15. Roy D. et al. A novel RF-assisted strobe system for unobtrusive vibration detection of machine parts. *arXiv preprint*. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2006.00209>

16. Равлюк В. Г. Підвищення точності діагностування підшипникових вузлів вагонів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2015. № 4 (80). С. 169–175.
17. Равлюк В. Г., Стасів Л. С., Дудник А. О., Сологуб О. Г. Особливості математичного моделювання процесу вібродіагностування буксових вузлів вагонів з підшипниками кочення. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2013. Вип. 141. С. 64–69.

References

1. Dizo, J., Blatnický, M., Harusinec, J., & Suchanek, A. (2022). Assessment of dynamics of a rail vehicle in terms of running properties while moving on a real track model. *Symmetry*, 14(3), Article 536. <https://doi.org/10.3390/sym14030536>
2. Dizo, J., & Blatnický, M. (2019). Evaluation of vibrational properties of a three-wheeled vehicle in terms of comfort. *Manufacturing Technology*, 19(2), 197–203. <https://doi.org/10.21062/ujep/269.2019/a/1213-2489/mt/19/2/197>
3. Gerlici, J., Lovska, A., & Kozáková, K. (2025). Research into the longitudinal loading of an improved load-bearing structure of a flat car for container transportation. *Designs*, 9(1), Article 12. <https://doi.org/10.3390/designs9010012>
4. Lovska, A., Stanovska, I., Kyrýllova, V., Okorokov, A., & Vernigora, R. (2025). Determining the vertical load on a container with a floor made of sandwich panels transported by a flat wagon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/7(132), 36–44. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/37>
5. Fischer, S. (2025). Investigation of the settlement behavior of ballasted railway tracks due to dynamic loading. *Spectrum of Mechanical Engineering and Operational Research*, 2(1), 24–46. <https://doi.org/10.31181/smeor21202528>
6. Fischer, S., Harangozó, D., Németh, D., Kocsis, B., Sysyn, M., Kurhan, D., & Brautigam, A. (2024). Investigation of heat-affected zones of thermite rail welding. *Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering*, 22(4), 689–710. <https://doi.org/10.22190/FUME221217008F>
7. Ravliuk, V. G., & Ravliuk, M. G. (2011). Metodolohiia vibrodiahnostuvannia buksovykh vuzliv vahoniv z pidshypnykamy kochennia [Methodology of vibrodiagnostics of axleboxes of wagons with rolling bearings]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu*, (123), 141–146. (in Ukrainian)
8. Podchashynskyi, Y. O., Luhovykh, O. O., & Chepiuk, L. O. (2023). Informatsiino-vymiriuvalna systema dlia vyznachennia parametriv rukhu vyrobnychoho obladnannia z troma kanalamy otrymannia informatsii [Information and measurement system for determining the parameters of motion of production equipment with three channels of receiving information]. *Technical Engineering*, (2), 182–190. [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-182-190](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-182-190) (in Ukrainian)
9. Hryhorenko, I., & et al. (2025). Rozrobka informatsiino-vymiriuvalnoi systemy ta perevirka yii metrolohichnoi nadiinosti metodom dyspersiinoho analizu [Development of informational-measuring system and check of its metrological reliability by method of dispersion analysis]. *Bulletin of NTU "KhPI"*, (1), 32–39. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2025.01.04> (in Ukrainian)
10. Kyrýliv, R. M. (2019). *Informatsiino-vymiriuvalna systema dlia kontroliu osovoho zazoru v radialnykh kulkovykh pidshypnykakh* [Information and measurement system for axial clearance control in radial ball bearings] (Master's thesis, TNTU). 95. (in Ukrainian)
11. Shulzhenko, M. G., Yefremov, Y. G., Tsybulko, V. I., & Deparma, O. V. (2011). Informatsiini tekhnolohii ta vymiriuvalni zasoby diahnostuvannia turboahrehativ [Information technologies and measuring means of turbo-aggregates diagnostics]. *Avtomatyzatsiia vyrobnychych protsesiv u mashynobuduvanni*. (in Ukrainian)

12. Podchashynskyi, Y., Luhovykh, O., Polianska, A., & Nevmerzhytskyi, V. (2025). Informatsiino-vymiriuvalna systema dlia vyznachennia heometrychnykh parametriv ta parametriv rukhu promyslovykh vyrobiv za yikh videozobrazhenniamy [Information and measurement system for determining geometric parameters and parameters of motion of industrial products by their video images]. *Technical Engineering*, (1), 403–410. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-403-410](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-403-410) (in Ukrainian)
13. Shimoda, T., Kokuyama, W., & Nozato, H. (2025). Accurate laboratory testing of low-frequency triaxial vibration sensors under various environmental conditions. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2512.10771>
14. Voirol, L., & et al. (2023). Accounting for vibration noise in stochastic measurement errors. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2303.18167>
15. Roy, D., & et al. (2020). A novel RF-assisted strobe system for unobtrusive vibration detection of machine parts. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2006.00209>
16. Ravliuk, V. G. (2015). Pidvyshchennia tochnosti diahnostuvannia pidshypnykovykh vuzliv vahoniv [Increasing the diagnostic accuracy of railway bearing units]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, 4(80), 169–175. (in Ukrainian)
17. Ravliuk, V. G., Stasiv, L. S., Dudnyk, A. O., & Solohub, O. G. (2013). Osoblyvosti matematychnoho modeliuvannia protsesu vibrodiahnostuvannia buksovykh vuzliv vahoniv z pidshypnykamy kochennia [Features of mathematical modeling of vibrodiagnostics process of axleboxes of wagons with rolling bearings]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu*, (141), 64–69. (in Ukrainian)

INFORMATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGIES FOR IMPROVING THE ACCURACY OF VIBRATION DIAGNOSTICS OF BEARING UNITS OF ROLLING STOCK

Ravluk V. G.

Doctor of Technical Sciences, Professor
Ukrainian State University of Railway Transport
61050, 7 Feierbakh Square, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4818-9482>
e-mail: ravvg@ukr.net

Lovska A. O.

Doctor of Technical Sciences, Professor
Ukrainian State University of Railway Transport
61050, 7 Feierbakh Square, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8604-1764>
e-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com

Bondarenko V. V.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ukrainian State University of Railway Transport
61050, 7 Feierbakh Square, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4019-4017>
e-mail: bonvya@ukr.net

Rybin A. V.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ukrainian State University of Railway Transport
61050, 7 Feierbakh Square, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4430-8018>
e-mail: rybinandrey@kart.edu.ua

Skurikhin D. I.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ukrainian State University of Railway Transport
61050, 7 Feierbakh Square, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3746-5157>
e-mail: skurikhin@kart.edu.ua

Bohutskiy V. R.

Postgraduate Student
Ukrainian State University of Railway Transport
61050, 7 Feierbakh Square, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0000-3013-8252>
e-mail: metalistvb@gmail.com

Abstract. The paper addresses the problem of improving the accuracy of vibration diagnostics of bearing units in railway rolling stock through the enhancement of information and measurement technologies for signal formation and processing. The relevance of reducing measurement uncertainty in assessing the technical condition of rolling bearings operating under variable loads and service conditions is substantiated. An analysis of the factors influencing the structure of the diagnostic signal and determining the levels of absolute and relative measurement errors is carried out. Particular attention is paid to the influence of vibration sensor parameters, mounting methods, frequency bandwidth, sampling rate, and spectral processing algorithms. A mathematical model of the measurement signal formation is developed, taking into account additive and multiplicative error components as well as the transfer characteristics of the measurement channel. Based on the obtained analytical relationships, the conditions for minimizing the relative error in estimating informative diagnostic parameters are determined. An approach aimed at increasing the reliability of diagnostic conclusions by optimizing the parameters of the measurement channel and digital signal processing algorithms is proposed. Experimental studies were conducted both at an operating railway maintenance depot and using a specialized test bench, which made it possible to combine controlled laboratory conditions with real operating modes of railway rolling stock. The obtained results confirm the possibility of reducing the relative error in assessing the technical condition of bearing units and increasing the informativeness of diagnostic features. The practical significance of the study lies in the applicability of the proposed information and measurement solutions in technical diagnostics and condition monitoring systems for railway rolling stock.

Keywords: information-measuring technologies; diagnostics; rolling stock; bearing unit; railway transport; metrology; measurements; signal informativeness.