

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет залізничного транспорту

БУЛЬБА ВЛАДИСЛАВ ІГОРОВИЧ



УДК 629.423.2:681.518.54

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВІБРОДІАГНОСТУВАННЯ  
ТЯГОВИХ РЕДУКТОРІВ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ**

05.22.07 — рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків — 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
**Михалків Сергій Васильович**,  
Український державний університет залізничного транспорту, кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу, доцент кафедри.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Фомін Олексій Вікторович**,  
Державний університет інфраструктури та технологій, кафедра вагонів та вагонного господарства, професор кафедри;

кандидат технічних наук  
**Гончаров Олександр Михайлович**,  
АТ «Укрзалізниця», філія «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту», відділ тягового рухомого складу та МВРС, головний фахівець відділу.

Захист відбудеться «5» травня 2021 р. о 13<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.820.04 Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050.

Автореферат розісланий «20» березня 2021 р.

В. о. вченого секретаря  
спеціалізованої вченої ради



О. М. Огар

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Натепер технічний ресурс залізниць практично вичерпано, що ставить під загрозу їх подальше ефективне та безпечне функціонування. Зволікання з реалізацією кардинальних заходів, які спрямовані на заміну застарілих технічних засобів, найближчим часом може спричинити унеможливлення забезпечення потреби у перевезеннях пасажирів і вантажів та виникнення кризових явищ не тільки в залізничній галузі, але й в інших стратегічно важливих і пов'язаних з нею галузях економіки України.

Одним із головних завдань системи потокових ремонтів (ПР) моторвагонного рухомого складу (МВРС) є забезпечення надійності експлуатації тягових редукторів, оскільки їх відмови можуть спричинити сходження складу, що призведе до аварії або катастрофи. Відомо, що тривалість справної роботи тягового редуктора зрідка перевищує 1,5 млн. км пробігу замість установлених 2,5 млн. км. Останніми роками на зубчасті передачі та підшипники кочення тягових редукторів МВРС припадає до 41,2 % відмов від загального числа відмов за механічним обладнанням. Незважаючи на вжиті заходи щодо підвищення експлуатаційної надійності як нових, так і відремонтованих електропоїздів їх експлуатація супроводжується, з одного боку, великими простоями через несправності тягових зубчастих передач, а з іншого боку — передчасним ремонтом з повним розбиранням значної кількості тягових редукторів.

Отже, зважаючи на незадовільний технічний стан МВРС, актуальним є розробка заходів із підвищення ефективності технічного діагностування як нинішнього МВРС, який був побудований за технічними вимогами 60-их років минулого століття й на сьогодні досяг 84 % зносу, так і для нового МВРС зі значно досконалішими характеристиками.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано згідно зі Стратегією розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року (схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України №1555-р 16 грудня 2009 р), Державною програмою оновлення рухомого складу на 2017-2021 роки (затверджена на засіданні АТ «Укрзалізниця» 29 листопада 2016 р) і науково-дослідною роботою «Попереднє незалежне обстеження обставин, характеру та причин руйнування дизеля ПД1М тепловоза ТЕМ2 № 2685» (ДР0119U102154), в якій здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета і завдання дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає в підвищенні ефективності діагностування тягових редукторів електропоїздів завдяки досконалим методам виділення інформативної частотної смуги підшипникової вібрації, залученню дієвих діагностичних ознак технічного стану підшипників кочення з подальшим прогнозуванням технічного стану. Сформульована мета потребувала розв'язання таких завдань дослідження:

— здійснити аналіз відмов тягових редукторів електропоїздів і обрати засіб отримання діагностичної інформації про їх технічний стан;

— обрати прийнятну модель вібрації підшипника кочення, яка описує більшість процесів, що протікають протягом перекочування елементів підшипників;

— розробити технологію вібродіагностування тягових редукторів електропоїздів із залученням дієвих методів отримання частотних смуг із інформативними складовими;

— отримати нові діагностичні ознаки технічного стану тягових редукторів електропоїздів;

— удосконалити метод визначення технічного стану тягових редукторів новими індикаторами часової форми вібрації;

— здійснити прогнозування технічного стану тягових редукторів електропоїздів та визначити ефективність упроваджених заходів.

*Об'єкт дослідження* — процес вібродіагностування тягових редукторів електропоїздів.

*Предмет дослідження* — технологія вібродіагностування тягових редукторів електропоїздів.

**Методи дослідження.** У роботі використано методи цифрової обробки сигналів, зокрема спектрального аналізу для побудови широкосмугових спектрів вібрації, математичної статистики, математичного апарату дискретного вейвлет-перетворення для відокремлення складових вібрацій підшипників та зубчастого зачеплення, процедури розкладання за емпіричними модами для виділення шуканого частотного діапазону підшипникової вібрації, фрактального аналізу для дослідження інваріантності й розрахунків фрактальної розмірності, дискретні стохастичні моделі для прогнозування технічного стану видів несправностей елементів тягових редукторів.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У дисертаційній роботі розв'язане наукове завдання удосконалення технології вібродіагностування тягових редукторів електропоїздів, що базується на застосуванні методів вейвлет-аналізу, розкладання за емпіричними модами та фрактального аналізу, які підвищують достовірність діагнозу.

*Уперше:*

— визначений характер зміни спектрального складу пошкодженого підшипника кочення тягового редуктора електропоїзда впродовж реалізації циклостаціонарної моделі, яка обліковує випадкові компоненти й моделює ефект проковзування роликів відносно інших елементів;

— розроблена технологія вібродіагностування тягових редукторів, особливістю якої є одночасне залучення процедури дискретного вейвлет-перетворення для отримання гармонік зубозачеплення та самоадаптивної процедури розкладання за емпіричними модами. Запропонована процедура позбавлена потреби попереднього вибору материнської функції, що призводить до усунення перекриття високочастотних діапазонів на різних рівнях розкладання з можливістю подальшого обрання прийняттого діапазону вібрації підшипників;

— обчислені діапазони значень фрактальної розмірності покриття, яка обліковує масштабну інваріантність та оцінює вібраційні складові різної природи тягових редукторів електропоїздів, які перебувають у різних технічних станах.

*Доопрацьовано:*

— метод визначення технічного стану тягових редукторів завдяки залученню нових індикаторів часової форми вібрації, що використовують комбінації ексцесу і середньоквадратичного значення (TALAF і ТНІКАТ);

— метод прогнозування технічного стану тягових редукторів електропоїздів із використанням інтегрованої дискретної стохастичної моделі авторегресії і ковзного середнього, успішна реалізація якої потребує лише наявності послідовності розрахованих фрактальних розмірностей, які накопичуються впродовж відповідних експериментів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результатом удосконалення технології вібродіагностування тягових редукторів електропоїздів стало збільшення достовірності виявлення пошкоджень підшипника кочення передньої кришки тягового редуктора електропоїзда на 25,7 % порівняно зі штатним фонендоскопом, ефективність якого залежить від досвіду та органолептики діагноста.

Завдяки використанню програмно-апаратного комплексу та безконтактного датчика обертів, сформована база з накопичених вібраційних сигналів, частотних смуг, номерів гармонік, які відповідають справним і пошкодженим підшипникам, і які реєструвались для різних частот обертання колісно-редукторних блоків на випробувальному стенді моторвагонного депо. Численні експериментальні дослідження дозволили обрати найкращий спосіб та місце кріплення віброакселерометра до поверхні тягового редуктора електропоїзда для використання паспортного частотного діапазону віброакселерометра й досягнення високої достовірності діагностування.

Практичне впровадження результатів роботи підтверджується відповідними актами використання впродовж здійснення позапланових ремонтів КМБ електропоїздів серії EP2P у моторвагонному депо «Харків» та електропоїздів EP2 у моторвагонному депо «Люботин» Регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця» та в навчальному процесі Українського державного університету залізничного транспорту при вивченні дисциплін «Системи діагностування рухомого складу», «Технологія ремонту локомотивів». Відповідні акти наведені в додатках дисертаційного дослідження.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові результати роботи отримані автором особисто й здійснювались в Українському державному університеті залізничного транспорту. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: [1] — здійснення порогової фільтрації вейвлет-розкладанням; [2] — спосіб кріплення віброакселерометра та обрання режиму роботи випробувального стенда колісно-редукторних блоків; [3] — обчислення частоти найбільшого збудження підшипникової вібрації; [4] — розрахунок ентропії Шеннона для отримання найкращого материнського

вейвлета; [5] — вибір прийняттого частотного діапазону за результатами моделювання зосередженого пошкодження підшипника кочення; [6] — обчислення коефіцієнтів ARIMA моделей; [7] — спосіб реєстрації віброакустичного сигналу тягового редуктора електропоїзда на оглядовому стійлі; [8] — порівняння ефективності використання нових індикаторів часової форми вібрації TALAF і ТНІКАТ; [9] — дослідження періодичних складових у сигналі за допомогою автокореляційних функцій; [10] — розрахунок частот перекочування елементів роликового підшипника кочення тягового редуктора електропоїзда; [11] — класифікація видів несправностей тягових редукторів електропоїздів; [12] — розрахунок середньоквадратичної помилки прогнозування.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та були схвалені на таких міжнародних науково-технічних конференціях (МНТК): 78-ій МНТК УкрДУЗТ «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 26 — 28 квітня 2016 р.); XIX-ій МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», (м. Київ, 19 — 22 червня 2018 р.); 79-ій МНТК «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпро, 16 — 17 травня 2019 р.); XX-ій МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», (м. Херсон, 10 — 13 вересня 2019 р.); XV-ій МНТК «Проблеми механіки залізничного транспорту», (м. Дніпро, 22 — 23 жовтня 2020 р.); XXI-ій МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», (м. Київ, 06 — 09 жовтня 2020 р.).

Повністю результати дисертаційної роботи заслухано й схвалено на розширеному засіданні кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту за участю членів спеціалізованої ученої ради (м. Харків).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 12 наукових праць, з яких 6 статей опубліковано у фахових виданнях, затверджених МОН України, які також включені до міжнародних наукометричних баз (зокрема 1 стаття опублікована в журналі, що індексується у міжнародній наукометричній базі Scopus) і 6 праць апробаційного характеру.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація містить анотацію, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел та додатки.

Повний обсяг тексту дисертації становить 186 сторінок, обсяг основного тексту становить 130 сторінок. Робота містить 33 рисунки, 10 таблиць, список використаних джерел містить 146 найменувань, 3 додатки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання дослідження, зазначений зв'язок роботи з науковими темами, програмами, планами, наукова новизна та практична цінність

дисертаційної роботи, число публікацій за темою та вказаний особистий внесок здобувача в публікаціях, наведена загальна характеристика роботи.

**У першому розділі** здійснено аналіз технічного стану тягових редукторів МВРС серії EP, яким притаманна недостатня експлуатаційна надійність. Установлено, що найчастіше в тягових редукторах електропоїздів трапляється збільшений осьовий розбіг (86,8 % для електропоїздів серії EP2 і 92,3 % для електропоїздів серії EP2P, T), який спричиняється руйнуванням підшипника кочення передньої кришки тягового редуктора. Зазначено, що проведення позапланових ремонтів пов'язано з неспроможністю системи планово-попереджувальних ремонтів забезпечувати повну безвідмовність унаслідок їх низької якості, браком використання ефективних способів визначення технічного стану та відновлення працездатності вузлів.

Внесок у підвищення ефективності ТО й ПР ТРС, МВРС та визначення його технічного стану здійснювали вітчизняні вчені Бабанін О. Б., Бутько Т. В., Жалкін Д. С., Калабухін Ю. Є., Крашенінін О. С., Мороз В. І., Пузир В. Г., Тартаковський Е. Д., Устенко О. В. та закордонні вчені Аміні А., Барков О. В., Ванг Д., Гіюєв З. Г., Головаш А. Н., Ентезамі М., Наговіцин В. С., Осяєв А. Т., Теттер В. Ю.

Наголошено на потребі впровадження діагностичних заходів, які дозволять визначати технічний стан без розбирання вузлів та здійснювати точне прогнозування безаварійної експлуатації відповідальних вузлів із подальшим корегуванням термінів міжремонтних пробігів і об'ємів відповідних ремонтів МВРС. Установлено, що найбільш ефективним є комплексне діагностування, яке передбачає контроль технічного стану об'єкта на різних стадіях ТО й ПР (діагностування підшипників, зубчастого зачеплення КМБ, КРБ на випробувальній станції, під МВРС, ТРС).

Згадано три способи діагностування, які виявляють погіршення технічного стану підшипника кочення та зубчастого зачеплення: вимірювання температури, аналіз продуктів зносу, вимірювання вібрації. Спільними недоліками перших двох способів є висока тривалість визначення технічного стану та потреба в кваліфікованому персоналі, натомість вимірювання та аналіз вібрації на поверхні корпусу вузлів вважається найбільш ефективним.

Методи вібродіагностування механічних вузлів промислового обладнання, МВРС, ТРС розроблялись Антоні Дж., Брауном С., Вангом Д., Гельманом Л., Макфадденом П. Д., Ренделлом Р. Б., Рубіні Р., Логаном Д., Тендоном Н., Тсе П., Хеммондом Д. К., Шином Ю. Т., Тартаковським Е. Д., Юзефовичем Р. М., Яворським І. М.

Досліджено, що у вібродіагностуванні останніми десятиріччями набули поширення методи з використанням скалярних індикаторів, які слідкують за розвитком параметру, що прив'язаний до амплітуди вібраційного сигналу в часовому просторі, та методів пильнування за розвитком пошкодження за амплітудними складовими в частотному просторі, в якому здебільшого не вдається запровадити чіткі відмінності між справним і несправним редуктором (рис. 1). Зазначено, що недостатня достовірність методів аналізу

вібрації в обох просторах із визначення ранньої стадії розвитку підшипників кочення потребує розв'язання першочергово завдання з удосконалення та розробки нових методів, які здатні впроваджувати нові діагностичні ознаки й посилювати корисні складові вібраційних сигналів у відповідних частотних смугах.

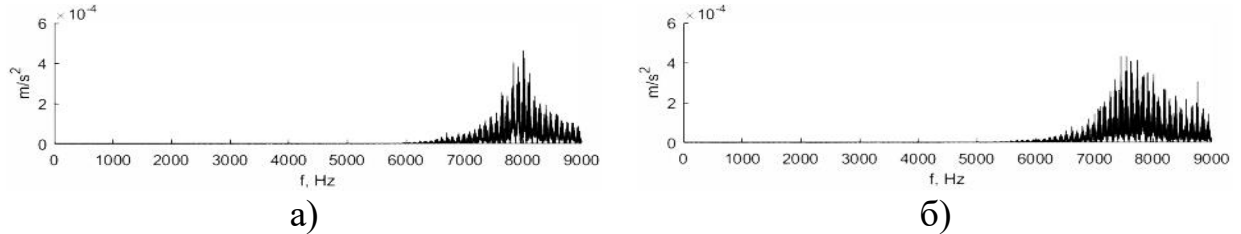


Рис. 1. Спектри вібрації тягових редукторів електропоїздів:  
а) — справний редуктор; б) — несправний редуктор;

Натепер вібродіагностування підшипникових і редукторних вузлів МВРС, РС, ТРС і колійних машин уже стало нормою на закордонному залізничному транспорті й використання вібродіагностичних засобів регламентовано низкою нормативних документів, однак у вітчизняній технології ТО й ПР МВРС для прослуховування роботи зубчастої передачі досі використовується морально застарілий фонендоскоп. Умови експлуатації та наявне покоління МВРС, ТРС на залізницях України також унеможливають упровадження безперервного моніторингу механічних вузлів КРБ, КМБ, що працюють у важких умовах і впливають на безпеку руху. Лише на ТО або позапланових чи потокових ремонтах можливо здійснювати вібродіагностування підшипникових вузлів тягових редукторів.

У другому розділі наведені моделі вібрації зубчастого зачеплення, результати моделювання вібрації підшипників кочення та особливості алгоритмів розпізнавання технічного стану.

Зазначено, що вібрація справного зубозачеплення, яке позбавлене ексцентриситету, має стале обертання, навантаження й фундаментальну частоту, яка дорівнює частоті зубозачеплення  $f_m$

$$x(t) = \sum_{m=0}^M X_m \cos(2\pi m f_m t + \chi_m) \quad (1)$$

де  $X_m$  — амплітуда  $k$ -ої гармоніки зубозачеплення;

$f_m = N_1 f_1 = N_2 f_2 = 269$  Гц — частота зубозачеплення, яка залучає частоту обертання шестерні  $f_1$  із числом зубів шестерні  $N_1$  і частоту обертання зубчастого колеса  $f_2$  із числом зубів зубчастого колеса  $N_2$ ;

$\chi_m$  — початкова фаза.

Установлено, що індикатором пошкодження зубчастого зачеплення на спектрах вібрації є поява бічних смуг. У разі пошкодження вібраційний сигнал за повний оберт зазнає модифікації унаслідок ефекту, який створює удар короткої тривалості з порівняно низькою енергією. Зважаючи на коротку тривалість удару, бічні смуги ширитимуться уздовж частотного



діапазону й виникатимуть бічні смуги вищого порядку з низькими амплітудами. Спроба точного виявлення бічних смуг потребує пошуку досконалих методів із обробки сигналу вібрації.

Досліджено, що завдання з визначення складових вібрації підшипників кочення є значно важчим завданням, зважаючи на різну природу вібрації та потребує здійснення моделювання за відповідними моделями та програмним забезпеченням, що позбавляє потреби в спеціальних стендах для вимірювань вібрації на натурних зразках. Недоліком сучасних моделей є спрощене уявлення про повністю обертальний характер контакту тіл кочень із кільцями підшипника, що ігнорує наявні ефекти проковзування, які спричинені сепаратором. Виявлено, що циклостаціонарний сигнал, який є випадковим процесом із періодичною автокореляційною функцією, краще описує ефект ковзання в таких складних вібраційних системах як тягові редуктори електропоїздів, які сприймають високі динамічні зусилля й можуть спричинити заклинювання колісної пари та ймовірне сходження рухомого складу з рейок.

Модель вібраційного сигналу роликового підшипника кочення містить повторення ударних сил, які викликаються контактом пошкоджень одних поверхонь з іншими, що збуджує резонанс у підшипнику та наявність незначних випадкових флуктуацій у проміжку між появою ударних імпульсів. Частота повторення згаданих ударів залежить від розташування пошкодження (внутрішнє, зовнішнє кільце або тіла кочення),  $\text{м/с}^2$

$$x(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} h(t - iT - \tau_i)q(iT) + n(t) \quad (2)$$

де  $h(t)$  — імпульсний відгук одиничного удару, що реєструється віброакселерометром;

$q(t)$  — обліковує періодичні модуляції спричинені розподілом навантаження;

$T$  — проміжок часу між двома послідовними ударами;

$\tau_i$  — урахує неточності проміжку часу між  $i$ -ми ударами внаслідок випадкового ковзання роликів;

$n(t)$  — шум.

Результати моделювання наведені на рис. 2, 3.

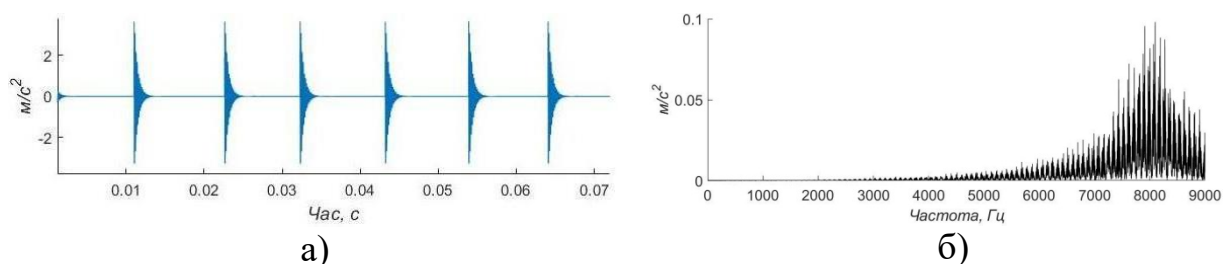


Рис. 2. Моделювання вібрації підшипника кочення з пошкодженим зовнішнім кільцем:

а) — часова форма вібрації; б) — широкосмуговий спектр вібрації

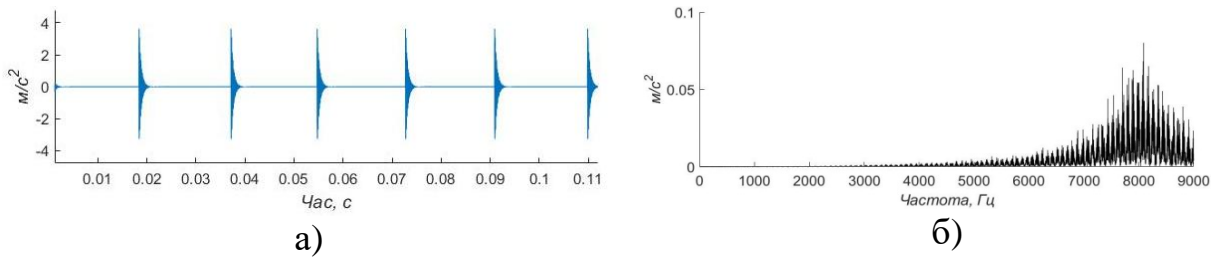


Рис. 3. Моделювання вібрації підшипника кочення з пошкодженим роликком:  
а) — часова форма вібрації; б) — широкосмуговий спектр вібрації

Двом видам пошкоджень за результатами моделювання притаманний імпульсний характер збурень навколо власної частоти підшипника кочення 6,5 — 9 кГц. Усі часові форми вібрації обліковують проковзування протягом перекочування роликів у вигляді послідовності імпульсного збудження з різною періодичністю.

У третьому розділі для виділення інформативних частотних смуг із зареєстрованих вібраційних реалізацій із короткотривалими нестационарними складовими обиралися пірамідальне дискретне вейвлет-розкладання (ДВП), яке ділить сигнал на апроксимовану (низькочастотну) та деталізовану (високочастотну) складову. На вищих рівнях зазнають розкладання лише апроксимовані складові. Вейвлет-функція й масштабна функція розкладають сигнал на різні частотно-часові масштаби. Вейвлет-функція продукує деталізовану складову, а масштабна функція генерує апроксимовану складову розкладеного сигналу. З-поміж великої вейвлетної родини обирався потрібний материнський вейвлет Добеші 4-го порядку за критерієм мінімізації ентропії Шеннона обчислених вейвлет-коефіцієнтів. Максимальна частота на початку розкладання ДВП дорівнює частоті Найквіста  $f_{\max} = 23$  кГц. Частотна смуга  $f_b$  кожного наступного рівня  $n$  розкладання для апроксимованої версії  $(0; f_{\max}/2^{n-1})$  і для деталізованої версії  $(f_{\max}/2^n; f_{\max}/2^{n-1})$  із відповідними центральними частотами  $f_c$  (рис. 4).

Одночасно для виділення інформативних частотних смуг залучався адаптивний метод розкладання сигналів за емпіричними модами (РЕМ), який зважає на власні характеристики осциляцій сигналу та позбавлений потреби в попередньому обранні материнської вейвлет-функції. РЕМ розкладає сигнал на кінцеві компоненти — вбудовані функції мод (ВФМ)  $c_i(t)$  та залишок  $r_n(t)$ . ВФМ є природніми осциляційними модами, які вбудовані в сигнал і визначаються саме сигналом, а не попередньо обраними ядрами. Сигнал на певному етапі розкладання може вважатись ВФМ, якщо задовольняються відповідні умови.

Наприкінці РЕМ оригінальний сигнал набуває вигляду

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (3)$$

Наступним етапом після обрання методів виділення інформативних вібраційних частотних смуг є обрання ефективного інструментарію оцінювання вібраційного збудження в згаданих смугах. Вібраційні сплески

випадкової та імпульсної природи внаслідок наявних пошкоджень підшипників кочення підвищують складність сигналу для оцінки якої доцільно залучати теорію фракталів. Фрактальні структури характеризуються фрактальною розмірністю, яка забезпечує визначення статистичного індексу для оцінки складності та виявляти ефективні властивості сигналів.

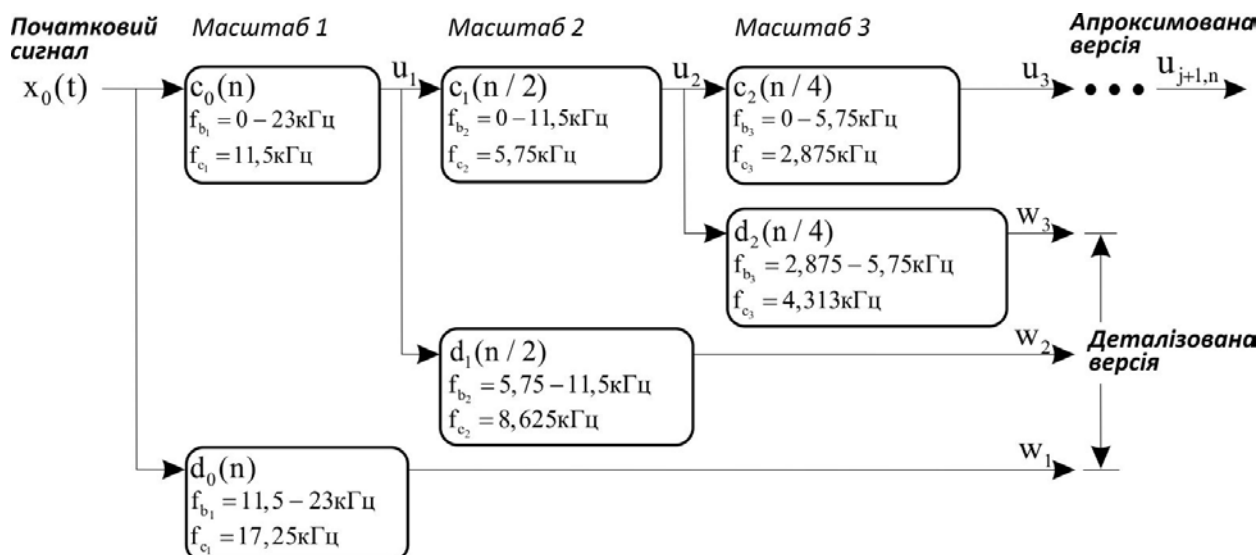


Рис. 4. Схема пірамідального ДВП

Алгоритм обраної фрактальної розмірності покриття припускає належність часової форми сигналу  $s(j)$  до  $s(j) \in S$ , де  $S \in \mathbb{R}^n$  у  $n$  розмірному Евклідовому просторі. Розбиваючи  $\mathbb{R}^n$  на кінцеву сітку, отримують вираз для фрактальної розмірності покриття

$$d_B = \lim_{r \rightarrow 0} \left( -\frac{\ln(N_r)}{\ln(r)} \right), \quad (4)$$

де  $N_r$  — кількість клітинок сітки шириною  $r$ .

Протягом обчислень застосовується алгоритм збільшення ширини  $r$  до значення  $k_r$ ,

$$P(k_r) = \sum_{j=1}^{N_0/K} \left| \max \left\{ S_{k(j-1)+1}, S_{k(j-1)+2}, \dots \right\} - \min \left\{ S_{k(j-1)+1}, S_{k(j-1)+2}, \dots \right\} \right| \quad (5)$$

де  $j = 1, 2, \dots, N_0/k$ ;

$k = 1, 2, \dots, K, K < N_0$

$N_r$  обчислюється

$$N_r = P(k_r)/k_r + 1, N_r > 1 \quad (6)$$

Кількість клітинок сітки  $N_r$  шириною  $k_r$  можна оцінити логарифмічною кривою  $(\ln(N_r) - \ln(k_r))$ . Далі на цій кривій слід здійснити пошук масштабно-інваріантної зони. Загалом феномен фрактальності не завжди наявний, однак можлива демонстрація фрактальних характеристик на

певному масштабі. Позначаючи  $k_1$  і  $k_2$ , як початок і кінець масштабно-інваріантної зони, крива  $(\ln(N_r) - \ln(k_r))$  у зазначених межах має підпорядковуватись лінійно регресійній моделі. Обрання фрактальної розмірності покриття як діагностичної ознаки технічного стану тягових редукторів електропоїздів за результатами оцінки їх вібрації забезпечуватиме вищу ефективність, порівняно із класичними скалярними індикаторами.

У четвертому розділі здійснене вдосконалення технології вібродіагностування КРБ електропоїздів упродовж виконання ТО-3 й ПР-1. Зазначається, що згідно з правилами ТО й ПР електропоїздів і електросекцій ЦТ-0046 на ПР-1 за екіпажною частиною електропоїзда вибірково за задалегідь сформованим графіком слід прослухати фонендоскопом від 4 до 6 КРБ в електропоїзді. Зокрема прослуховуються тяговий редуктор, моторно-якірні й буксові підшипники. Осьовий розбіг валу шестерні не повинен перевищувати 1,2 мм, якщо відбулося перевищення, тоді здійснюють ревізію КРБ у колісно-редукторному відділенні. Зауважено, що неодноразово траплялись випадки, коли візуальний огляд або прослуховування КРБ на оглядовому стійлі визнавало тяговий редуктор непридатним до експлуатації та ухвалювалося рішення відправки на ремонт, однак після розбирання жодної несправності виявлено не було, що призводило до втрати багато часу (викочування КМБ з-під вагону з подальшим транспортуванням та розбиранням КРБ триває біля 4 годин при відведеній нормі часу на весь ПР-1 — 12 год).

Отже, вдосконалення технології діагностування КРБ пропонується досягати додатковим упровадженням до наявних технологічних процесів вібродіагностичних заходів, які дозволять уникати надмірного бракування, а в разі підтвердження несправності запровадженням вібродіагностуванням є можливість здійснити глибше діагностування несправного редуктора та виявити можливі приховані несправності, що сприятиме якісному виконанню ремонту КРБ.

Експериментальні дослідження здійснювались у моторвагонних депо на випробувальному стенді. Досліджувались вібраційні реалізації тягових редукторів КРБ електропоїздів EP2, EP2P, T, які перебували в таких станах:

- 1) справний;
- 2) недостатня кількість мастила в редукторі;
- 3) знос ролика підшипника передньої кришки редуктора;
- 4) тріщина кільця підшипника передньої кришки редуктора;
- 5) відкол зуба шестерні тягового редуктора;
- 6) руйнування підшипника редуктора й тріщина зуба шестерні.

Колісна пара КРБ розкручувалась до частоти обертання  $219 \text{ хв}^{-1}$ . Вібрація реєструвалася у широкому частотному діапазоні  $0 - 9 \text{ кГц}$  віброакселерометром, що кріпився до поверхні підшипникової кришки тягового редуктора й відбувалося перетворення вібраційної реалізації в дискретну форму з частотою дискретизації  $f_s = 46 \text{ кГц}$ .

Пошуки вузькосмугових частотних діапазонів із вібрацією підшипника кочення передньої кришки тягового редуктора методом ДВП і адаптивним

методом РЕМ спиралися на результати моделювання вібрації підшипників, отримані у 2 розділі. Критерієм обрання прийнятного методу обирався ексцес ( $K_u$ ), який демонструє високу чутливість до імпульсного наповнення, що асоціюється з наявними пошкодженнями.

На широкосмуговому спектрі вібрації відновленого сигналу з деталізованих коефіцієнтів на другому масштабі розкладання ДВП із  $K_u = 6,25$  (рис. 5 а) помічений резонансний сплеск, що охоплює центральну частоту  $f_{c2} = 8,625$  кГц у частотній смузі  $f = 2,5 — 9$  кГц, нижня межа якої є ширшою за розраховану на рис. 4. Відповідно до умов пірамідального ДВП (рис. 5 в) на апроксимованій версії розкладання до частотної смуги потрапляє сильно виражена низькочастотна складова вібрації із першою  $f_{z1} = 269$  Гц та другою  $f_{z2} = 539$  Гц гармоніками зубозачеплення та  $K_u = 2,87$ .

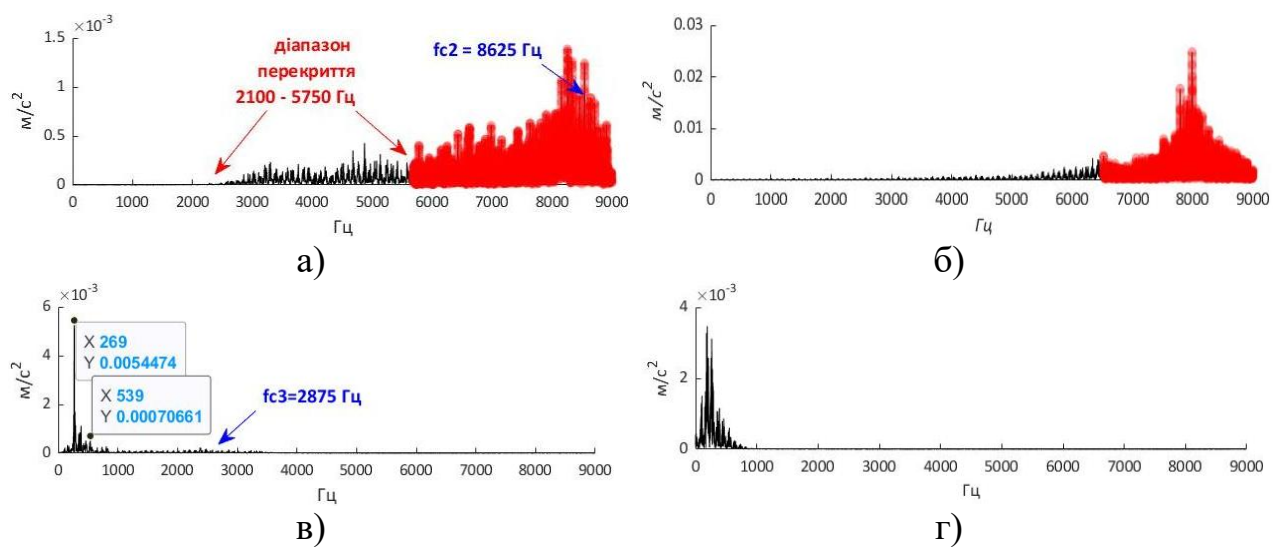


Рис. 5. Широкосмугові спектри вібрації за результатами ДВП та РЕМ:  
 а) — широкосмуговий спектр вібрації відновленого сигналу з деталізованих вейвлет-коефіцієнтів на другому масштабі розкладання;  
 б) — широкосмуговий спектр вібрації із отриманої першої ВМФ;  
 в) — широкосмуговий спектр вібрації відновленого сигналу з апроксимованих вейвлет-коефіцієнтів на другому масштабі розкладання;  
 г) — широкосмуговий спектр вібрації із отриманої шостої ВМФ

Побудовано широкосмуговий спектр вібрації першої ВФМ, яка отримана за результатами обчислення методом РЕМ містить сильно виражений енергетичний сплеск у межах частотного діапазону  $6,5 — 9$  кГц із  $K_u = 8,37$  (рис. 5 б). Отже, результати РЕМ вібраційних сигналів упродовж експериментальних досліджень найбільше відповідають результатам моделювання, оскільки позбавлені потреби в конструюванні незалежно від вібраційного сигналу певного базису, який призводить до неминучого витoku енергії. Обмежена довжина базисної вейвлет-функції упродовж реалізації ДВП спричиняє появу сильного перекриття спільних частотних смуг ( $2500 — 5750$  Гц на 2 масштабі розкладання) на різних рівнях відновлення за деталізованими вейвлет-коефіцієнтами. Виділення низькочастотного

діапазону вібрації зубчастого зачеплення розрахованою шостою ВФМ у межах РЕМ не виявило на спектрі вібрації очевидних гармонік зубозачеплення, а обчислений ексцес виявився нижчим —  $Ku = 2,11$  (рис. 5 г), що є гіршим результатом ніж при реалізації ДВП (рис. 5 в).

Отже, в подальшому для виділення вібрації зубчастого зачеплення використовувалось ДВП із відновленням сигналу із апроксимованих вейвлет-коефіцієнтів, а для отримання підшипникової вібрації залучався метод РЕМ і обиралася перша ВФМ.

Далі розраховувались величини СКЗ, хрест фактору, ексцесу та двох нових індикаторів із назвами TALAF, ТНІКАТ (рис. 6), які є комбінаціями перших трьох індикаторів

$$TALAF = \log\left[Ku + \frac{RMS}{RMS_0}\right] \quad (7)$$

де  $Ku$  — ексцес;

$RMS$  — поточне значення СКЗ,  $m/s^2$ ;

$RMS_0 = 0,037 m/s^2$  — значення СКЗ для справного редуктора;

$$ТНІКАТ = \log\left[(Ku)^{CF} + \left(\frac{RMS}{RMS_0}\right)^{Peak}\right] \quad (8)$$

де  $CF = \frac{a_{peak}}{a_{RMS}}$  — хрест фактор;

$a_{peak}$  — пікове значення вібрації,  $m/s^2$ .

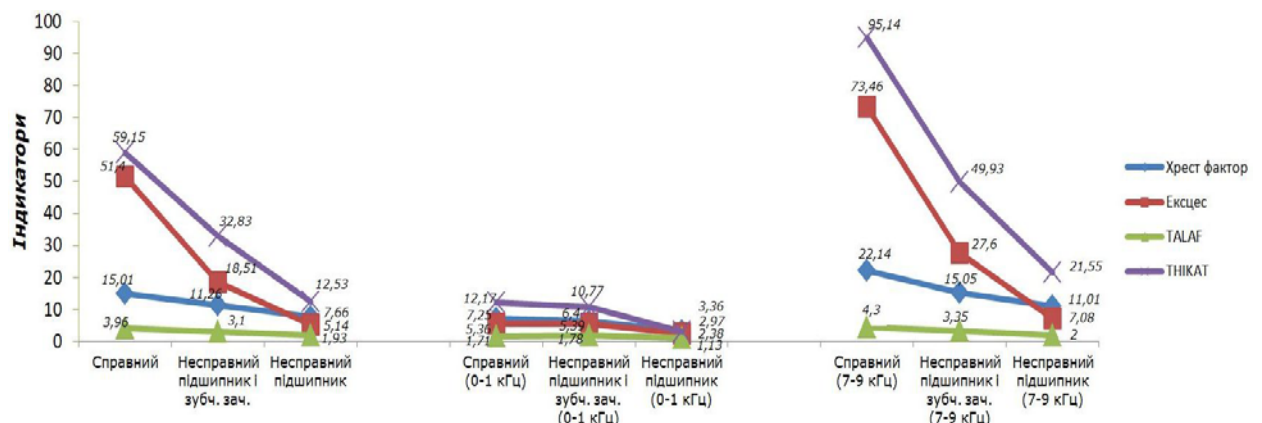


Рис. 6. Розраховані величини хрест-фактору, ексцесу, TALAF, ТНІКАТ у різних частотних діапазонах

У широкому частотному діапазоні та в діапазонах 0 — 1 кГц, 7 — 9 кГц найвищі значення індикаторів у справного редуктора без мастила, а найнижчі — у редуктора із несправним підшипником. Установлено, що TALAF демонструє повільне зниження відповідно до появи несправності, а ТНІКАТ упроваджує характерний пік, який на відміну від ексцесу означає справний стан, а поява негативного схилу сигналізує про пошкодження й потребу в ухваленні діагностом відповідного рішення.



На наступному етапі отримані вібраційні реалізації досліджувались на наявність ознак фрактальності — лінійних ділянок в масштабно-інваріантних зонах та обчислювались фрактальні розмірності покриття (табл. 1).

Таблиця 1

Середні значення фрактальної розмірності покриття для різних станів тягових редукторів

<i>Величини фрактальної розмірності покриття</i>					
<i>Стан 1</i>	<i>Стан 2</i>	<i>Стан 3</i>	<i>Стан 4</i>	<i>Стан 5</i>	<i>Стан 6</i>
1,45	1,57	1,65	1,76	1,82	1,93

На завершальному етапі дисертаційної роботи здійснювалось прогнозування технічного стану тягових редукторів. Вимірювання відбувалось у інтервалі між двома ПР-2 із прогнозуванням на решту дев'ять ТО-3 аж до другого ПР-2 із подальшим порівнянням фактичного технічного стану після розбирання редуктора на ПР-2 із прогнозованим значенням фрактальної розмірності покриття.

Обиралася методологія Бокса-Дженкінса (інтегрована дискретна стохастична ARIMA модель авторегресії і ковзного середнього), яка здатна описувати часові ряди з ознаками нестационарності

$$\left(1 - \sum_{i=1}^p \varphi_i L^i\right) (1-L)^d Y_t = \left(1 + \sum_{i=1}^q \theta_i L^i\right) \varepsilon_t + c \quad (9)$$

де  $L=Y_{t-1}/Y_t$  — оператор зсуву (лаг);

$d$  — порядок диференціювання;

$p$  — порядок AR-складової;

$q$  — порядок MA-складової.

Складовими алгоритму побудови ARIMA моделі є її ідентифікація, оцінювання, перевірка на адекватність, практичне застосування для прогнозування.

Для вибору оптимальних моделей (табл. 2) обирались інформаційний критерій Акаїкі (AIC) та Байесовий інформаційний критерій (BIC).

На рис. 7 наведені результати прогнозування сконструйованими оптимальними ARIMA моделями.

Підрахунок точності прогнозування здійснюється за виразом (табл. 3),

$$\text{Точність} = \left(1 - \frac{|t_a - t_p|}{t_a}\right) \cdot 100, \% \quad (10)$$

де  $t_a = 81$  — фактичне значення кількості ТО-3 (або ПР-2, на якому відбулося розбирання тягових редукторів);

$t_p$  — прогнозоване значення кількості ТО-3, на якому підтвердиться справний стан, або відбудеться відмова (рис. 7).

Оптимальні ARIMA моделі для прогнозування технічного стану тягових редукторів

Технічний стан	Розраховані коефіцієнти ARIMA моделей
1) стан	$(1 - 0,727 \cdot L + 0,008 \cdot L^2 - 0,028 \cdot L^3 - 0,176 \cdot L^4 + 0,225 \cdot L^5) \cdot (1 - L)Y_t = \varepsilon_t + 0,00026$
2) стан	$(1 - 0,397 \cdot L - 0,374 \cdot L^2)(1 - L)Y_t = \varepsilon_t + 0,00019$
3) стан	$(1 - 0,329 \cdot L - 0,2 \cdot L^2 - 0,2 \cdot L^3)(1 - L)Y_t = \varepsilon_t + 0,00035$
4) стан	$(1 - 0,264 \cdot L + 0,014 \cdot L^2 + 0,143 \cdot L^3 - 0,32 \cdot L^4)(1 - L)Y_t = \varepsilon_t + 0,00041$
5) стан	$(1 - 0,627 \cdot L + 0,228 \cdot L^2)(1 - L)Y_t = \varepsilon_t + 0,00089$
6) стан	$(1 - 0,565 \cdot L)(1 - L)Y_t = \varepsilon_t + 0,00038$

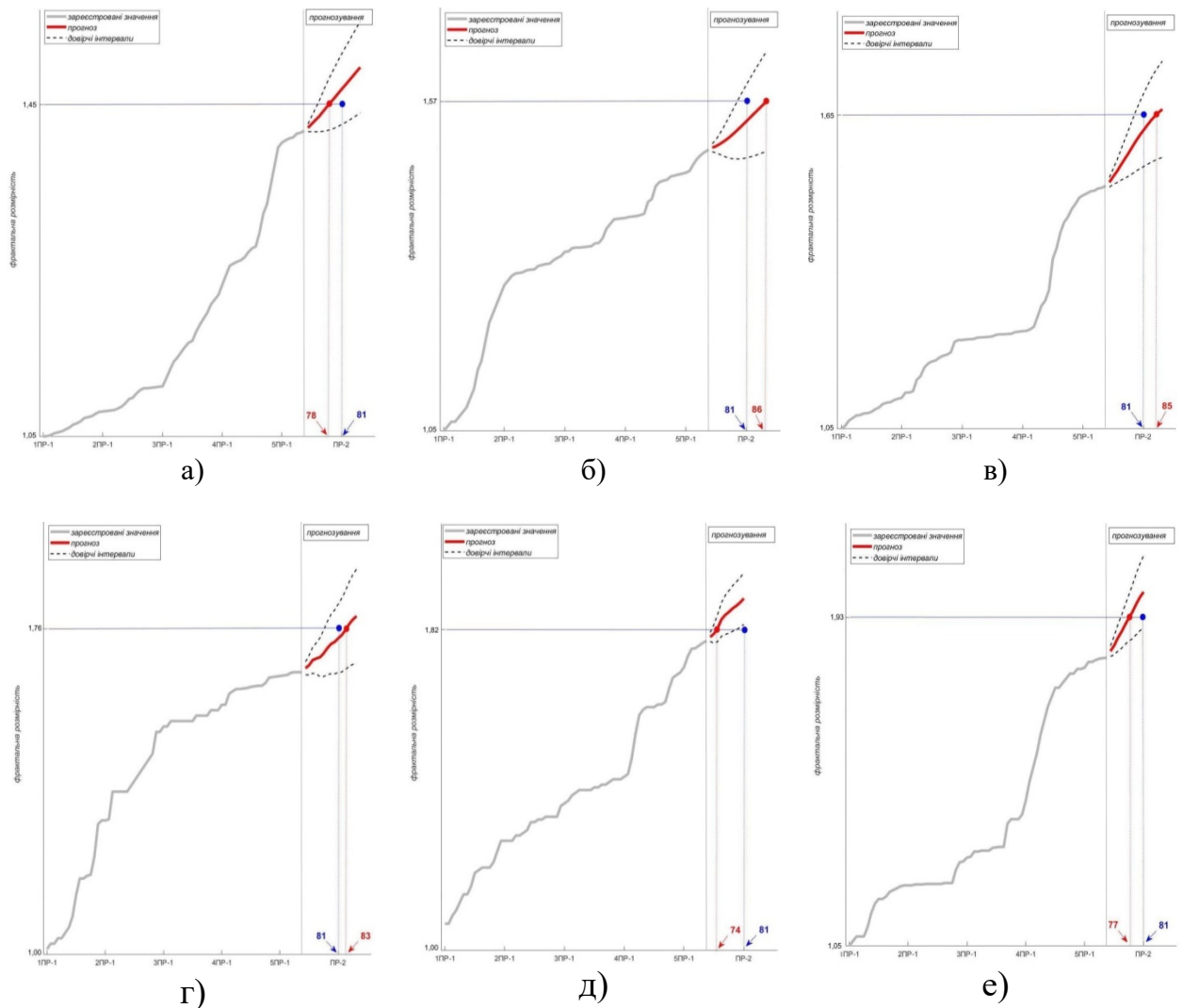


Рис. 7. Прогнозування ARIMA моделями технічного стану тягових редукторів до ПР-2:

а) — 1) стан; б) — 2) стан; в) — 3) стан; г) — 4) стан; д) — 5) стан; е) — 6) стан



Точність прогнозування ARIMA моделями

	Технічні стани тягових редукторів КРБ					
	1) стан	2) стан	3) стан	4) стан	5) стан	6) стан
Точність, %	96,3	93,8	95,1	97,5	91,4	95,1

Установлено, що гнучкість методології Бокса-Дженкінса дозволяє обирати найбільш прийнятний підклас моделей з-поміж AR- та MA-складових. Для всіх 6 видів технічного стану досліджуваних тягових редукторів найкраще припасування продемонструвала лише AR-складова, тимчасом MA-складова як наодинці так і в поєднанні з AR-складовою реалізовувала вищі значення критеріїв AIC та BIC.

У п'ятому розділі здійснювався розрахунок достовірності, економічної ефективності удосконаленої технології вібродіагностування та для 6 ознак станів розраховувались діагностичні ваги, які набули лише одного від'ємного значення для протилежних діагнозів, що демонструє діагностичну цінність унаслідок появи інформації, яка вноситься ознакою до системи станів.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язане наукове завдання з удосконалення технології вібродіагностування тягових редукторів електропоїздів, яке дозволяє впроваджувати нові підходи до ефективного виділення частотних смуг із зареєстрованих вібраційних сигналів з ознаками пошкоджень та здійснювати їх точний облік із подальшим прогнозуванням різних видів пошкоджень зубчастого зачеплення та підшипників кочення тягових редукторів.

Отримані результати дозволяють зробити такі висновки:

1. Установлено, що відмови тягових редукторів електропоїздів серії EP2, EP2P, T здебільшого спричинені руйнуваннями підшипника кочення передньої кришки. Попередити пошкодження, які призводять до руйнування дозволяє впровадження чутливих засобів вібродіагностування, однак специфіка конструкції застарілого МВРС не є «дружною» до діагностичних комплексів, де не передбачено розміщення елементів убудованого контролю. Отже, в нинішніх реаліях переваги вібродіагностування можна отримати впродовж реалізації технології ТО й ПР МВРС на оглядовому стійлі або на випробувальному стенді.

2. Зважаючи на складні коливальні характеристики елементів тягових редукторів електропоїздів, здійснювати моделювання вібраційного сигналу підшипника кочення передньої кришки тягового редуктора запропоновано циклостаціонарною моделлю, яка бере до уваги проковзування тіл кочень відносно елементів підшипника й визначає імпульсний характер збурень на широкосмугових спектрах вібрації в околиці вузькосмугового частотного діапазону 6,5 — 9 кГц.

3. Удосконалення технології вібродіагностування відбулося завдяки поєднанню переваг процедур дискретного вейвлет-перетворення та розкладання за емпіричними модами, що дозволило виділяти відповідні частотні смуги з вібраційним наповненням різної природи від зубчастого зачеплення та підшипників кочення. Критерієм прийнятного вибору відповідної процедури для шуканих частотних смуг обирався ексцес та відсутність перекриття частотних діапазонів на різних рівнях розкладання у високочастотному діапазоні.

4. Як нову діагностичну ознаку технічного стану елементів тягових редукторів електропоїздів запропоновано використовувати фрактальну розмірність покриття, яка здійснює обчислення у виділених вузькосмугових вібраційних частотних діапазонах із нестаціонарними й нелінійними характеристиками та забезпечує кращий облік корисних вібраційних складових порівняно із поширеними індикаторами технічного стану. Розраховане найнижче значення фрактальної розмірності 1,45 відповідає справному редуктору, а найвище 1,93 — комбінованому пошкодженню зубчастого зачеплення й підшипника кочення тягового редуктора.

5. Удосконалення методу визначення технічного стану тягового редуктора досягається завдяки обчисленню нових скалярних індикаторів, що поєднують ексцес і середньоквадратичне значення вібрації (ТНІКАТ і ТАЛАФ). Зафіксований незначний спад величини ТАЛАФ у міру розвитку пошкодження та впевнене зростання величини ТНІКАТ при нормальному стані тягового редуктора, аж до появи негативного схилу, що сигналізує діагностові про наявні розвинуті пошкодження.

6. Брак чітких правил із вибору найкращої моделі для прогнозування технічного стану тягових редукторів електропоїздів визначає доцільність обрання тієї моделі, яка володіє найменшими помилками за результатами моделювання. Здійснена структурна ідентифікація ARIMA моделей для відповідних технічних станів і обчислена точність прогнозування перебувала в межах від 91,4 % до 97,5 %.

7. Удосконалення технології вібродіагностування забезпечує скорочення часу на розбирання та післяремонтне випробування КРБ електропоїздів, підвищує достовірність діагностування на 25,7 %, та призводить до економічного ефекту за розрахунковий період 19227738 грн.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Основні наукові праці.

Публікації у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Babanin O., Bulba V. Designing the technology of express diagnostics of electric train's traction drive by means of fractal analysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 4, 9(82). P. 45 — 54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.76520> (видання індексується у базі Scopus)

2. Михалків С. В., Бульба В. І., Ходаківський А. М. Виділення бічних смуг на спектрах потужності вібрації тягових редукторів електропоїздів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. № 179. С. 26 — 39. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.179.2018.147711> (видання індексується у базі *Index Copernicus*)

3. Михалків С. В., Фалендиш А. П., Бульба В. І., Ходаківський А. М. Застосування спектрального ексцесу для вібродіагностування тягового редуктора електропоїзда. *Технічні науки та технології*. 2019. № 1(15). С. 73 — 79. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-1\(15\)-73-79](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-1(15)-73-79) (видання індексується у базі *Index Copernicus*)

4. Пузир В. Г., Михалків С. В., Ходаківський А. М., Бульба В. І. Обчислення частотних смуг вібрації підшипників тягового редуктора електропоїзда кратномасштабним аналізом. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2019. № 185. С. 32 — 44. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.185.2019.180784> (видання індексується у базі *Index Copernicus*)

5. Бульба В. І., Михалків С. В. Моделювання пошкоджень елементів підшипників кочення тягового редуктора електропоїздів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки»*. 2019. № 5(277). С. 295 — 301. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2019-277-5-295-301> (видання індексується у базі *Index Copernicus*)

6. Михалків С. В., Бульба В. І. Прогнозування технічного стану тягових редукторів електропоїздів дискретними стохастичними моделями. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2019. № 188. С. 23 — 35. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.188.2019.206182> (видання індексується у базі *Index Copernicus*)

### **Праці апробаційного характеру:**

7. Бабанін О. Б., Бульба В. І. Отримання віброакустичного сигналу для експрес-віброакустичного моніторингу тягових редукторів електропоїздів. Тези доповідей 78-ої міжнародної науково-технічної конференції УкрДУЗТ «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 26 — 28 квітня 2016 р.). *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. № 160. С. 32 — 33.

8. Михалків С. В., Бульба В. І., Ходаківський А. М. Визначення індикаторів технічного стану колісно-редукторних блоків електропоїздів. Матеріали XIX-МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», (м. Київ, 19 — 22 червня 2018 р. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»). С. 70 — 73.

9. Михалків С. В., Ходаківський А. М., Бульба В. І. Визначення інформативного частотного діапазону для вібраційного діагностування тягового редуктора електропоїзда. Матеріали 79 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпро, 16 — 17 травня 2019 р. Дніпровський національний

університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна). С. 36 — 37.

10. Михалків С. В., Бульба В. І., Ходаківський А. М. Діагностування тягового редуктора електропоїзда квадратичним спектром обвідної вібрації. Матеріали *XX-МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта»*, (м. Херсон, 10 — 13 вересня 2019 р. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»). С. 350 — 353.

11. Бульба В. І., Михалків С. В., Ходаківський А. М. Обчислення точності прогнозування несправностей тягових редукторів електропоїздів. Матеріали *XV МНТК «Проблеми механіки залізничного транспорту»*, (м. Дніпро, 22 — 23 жовтня 2020 р. Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна). С. 21 — 25.

12. Пузир В. Г., Михалків С. В., Ходаківський А. М., Бульба В. І. Прогнозування технічного стану тягових редукторів електропоїздів нейромережею довгої короткострокової пам'яті. Матеріали *XXI-МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта»*, (м. Київ, 06 — 09 жовтня 2020 р. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»). С. 129 — 132.

## АНОТАЦІЯ

Бульба В. І. Удосконалення технології вібродіагностування тягових редукторів електропоїздів. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 — рухомий склад залізниць та тяга поїздів. — Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2021.

Дисертація присвячена вдосконаленню технології вібродіагностування тягових редукторів електропоїздів завдяки розробленій технології діагностування, яка здійснює поділ зареєстрованої вібрації на підшипникову складову та складову зубчастого зачеплення з подальшим аналізом отриманих смуг фрактальною розмірністю покриття та можливістю прогнозування отриманих нових ознак різних пошкоджень елементів тягових редукторів дискретними стохастичними моделями.

Моделювання проковзування тіл кочень відносно інших елементів підшипників здійснювалось циклостационарною моделлю, яка відобразила характер вібрації у вигляді специфічних імпульсних збурень на широкосмугових спектрах вібрації в околицях відповідних частотних діапазонів. Для відокремлення вібрації зубчастого зачеплення та підшипникової вібрації застосовувалось дискретне вейвлет-перетворення та розкладання за емпіричними модами. Оцінювання вібрації у виділених частотних смугах здійснювалось підрахунком фрактальної розмірності покриття, яка краще за загальноживані ознаки обліковує корисні складові. Для прогнозування технічного стану тягових редукторів електропоїздів

залучались дискретні стохастичні ARIMA моделі, які потребують лише наявності дискретних величин, що накопичуються впродовж відповідних вимірювань. Найнижча точність за результатами досліджень сягала 91,4 %.

Удосконалена технологія вібродіагностування підвищує достовірність діагностування на 25,7 %, та призводить до економічного ефекту за розрахунковий період в розмірі 19227738 грн.

*Ключові слова:* дискретне вейвлет-перетворення, дискретні стохастичні моделі, розкладання за емпіричними модами, тяговий редуктор електропоїзда, фрактальна розмірність покриття, ширококутовий спектр вібрації.

## АННОТАЦІЯ

Бульба В. И. Усовершенствование технологии вибродиагностирования тяговых редукторов электропоездов. — Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.07 — подвижной состав железных дорог и тяга поездов. — Украинский государственный университет железнодорожного транспорта МОН Украины, Харьков, 2021.

Диссертация посвящена усовершенствованию технологии вибродиагностирования тяговых редукторов электропоездов благодаря разработанной технологии диагностирования, которая осуществляет разделение зарегистрированной вибрации на подшипниковую составляющую и составляющую зубозацепления с дальнейшим анализом полученных полос фрактальной размерностью покрытия и возможностью прогнозирования полученных новых признаков повреждений элементов тяговых редукторов дискретными стохастическими моделями.

Для усовершенствования планово-предупредительной системы ремонта установлена необходимость внедрения современных систем вибродиагностирования тяговых редукторов электропоездов, что в дальнейшем приведет к отказу от устаревших диагностических средств, достоверность которых зависит от опыта мастеров и слесарей.

Для моделирования распространенных повреждений элементов подшипников качения предложена циклоstationарная модель вибрации, которая описывает вибрационный сигнал с учетом эффекта скольжения тел качения относительно колец и отражает характер вибрации в виде резонансных возмущений на широкополосных спектрах вибрации в определенных высокочастотных диапазонах.

Критерием применимости соответствующих методов обработки сигналов был выбран коэффициент эксцесса, который обладает чувствительностью к импульсному наполнению вибрации и ассоциируется с наличием повреждений подшипника. Учитывая нестационарность сигналов вибрации тягового редуктора электропоезда и необходимость в сохранении многочисленных информативных составляющих для получения частотной полосы вибрации зубчатого зацепления, использовалось дискретное вейвлет-

преобразование с материнским вейвлетом Добеши 4-го порядка. Выделение частотной полосы с подшипниковой вибрацией осуществлялось процедурой разложения по эмпирическим модам и выбиралась первая встроена функция моды.

Учитывая низкую эффективность классических скалярных индикаторов, доработан метод определения технического состояния тяговых редукторов благодаря применению новых индикаторов временной формы вибрации, которые используют комбинации эксцесса и среднеквадратического значения. Установлена применимость теории фракталов осуществлять анализ вибрационных реализаций. Предложено внедрять в технологию вибродиагностирования новый диагностический признак фрактальную размерность покрытия, которая обеспечит лучший учет полезных составляющих вибрационных реализаций сравнительно с общеизвестными признаками. Расчитанный диапазон значений размерности находится в пределах от 1,45 до 1,93 для различных шести состояний тяговых редукторов.

Для прогнозирования технического состояния тяговых редукторов электропоездов использовались дискретные стохастические ARIMA модели, которые требуют только наличия значений временного ряда, которые накапливаются в течение вибрационных изменений. Наименьшая точность по результатам исследований достигала 91,4 %.

Усовершенствованная технология вибродиагностирования повышает достоверность диагностирования на 25,7 % по сравнению с использованием штатного фонендоскопа, а расчитанный экономический эффект за расчетный период составляет 19227738 грн.

*Ключевые слова:* дискретное вейвлет-преобразование, дискретные стохастические модели, разложение по эмпирическим модам, тяговый редуктор электропоезда, фрактальная размерность покрытия, широкополосный спектр вибрации.

## ABSTRACT

Bulba V. I. Improvement of the technology for the vibration-based diagnostics of electric train traction gearboxes. — Manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences on specialty 05.22.07 – Rolling Stock and Traction of Trains. — Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The thesis deals with improvement of the technology for the vibration-based diagnostics of electric train traction gearboxes by means of the developed diagnostic technology which provides decomposition of the acquired vibration on the bearing component and gear mesh component by the means of wavelet analysis and empirical mode decomposition with further analysis of the obtained bands with the box counting method and the possibility of prediction of the obtained new features of various faults of traction gearboxes elements with discrete stochastic models.

It was proposed to introduce a new diagnostic feature of the box counting method into the vibration-based technology of electric train traction gearboxes, which will provide a better account of the useful components of vibration signals compared to commonly used features.

For prediction of the technical state of electric train traction gearboxes, it was proposed to use discrete stochastic ARIMA models, which require only the presence of discrete values that accumulate during the relevant measurements. The lowest accuracy according to the research results reached 91.4 %.

The calculation of the confidence of the improved technology of the vibration-based diagnostics turned out to be higher by 25.7 % compared to the use of a standard phonendoscope, the diagnostic influence for 6 features of the states was calculated, and the economic effect for the reference period was 1,922,773 UAH.

*Key words:* box counting method, broadband vibration spectrum, discrete stochastic models, discrete wavelet transform, electric train traction gearbox, empirical mode decomposition.

БУЛЬБА ВЛАДИСЛАВ ІГОРОВИЧ

УДК 629.423.2:681.518.54

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВІБРОДІАГНОСТУВАННЯ  
ТЯГОВИХ РЕДУКТОРІВ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ**

05.22.07 — рухомий склад залізниць та тяга поїздів

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск



асист. М. В. Максимов

---

Підписано до друку 17.03.2021 р.  
Формат 60\*90/16 Умов. друк. арк. 0,9. Наклад 120 прим. Зам. № 227421  
Друкарня «Аладдин-Принт»  
61023, м. Харків, вул. Донець-Захаржевського, 6/8  
Тел.: (057) 7170999 <http://aladdin-print.ua>  
Свідоцтво про державну реєстрацію В00 № 966600 від 28.03.2003 р.