ВІДГУК
ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА
на дисертаційну роботу
Бульби Владислава Ігоровича
«Удосконалення технології вібродіагностування тягових редукторів електропоїздів»
яку представлено на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Загальна характеристика дисертації

Дисертацію виконано на кафедрі експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України. Вона складається з анотацій, вступу, п'ятьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 146 найменувань, та 3 додатків. Повний обсяг роботи складає 186 сторінок, з яких основного тексту – 130 сторінок, які містять 33 рисунки та 10 таблиць.

Дисертація та автореферат дисертації написані українською мовою. Зміст автореферату ідентичний основним положенням і висновкам дисертації.

Структура дисертаційної роботи є логічною з коректним застосуванням технічної мови. Стиль викладення дисертації є чітким та послідовним. Обсяг основного тексту, оформлення дисертації та автореферату відповідають «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету міністрів України №567 від 24 липня 2013 р. (зі змінами), та наказу Міністерства освіти і науки України «Вимоги до оформлення дисертацій» від 12.01.2917 р. № 40.

Актуальність теми дисертаційної роботи, зв'язок її з науковими програмами, планами, темами

Приміські перевезення належать до категорії пасажирських сполучень, що обслуговуються залізничним транспортом. Підвищення якості приміських пасажирських перевезень неможливо без забезпечення високої надійності та експлуатаційної готовності моторвагонного рухомого складу.

На зубчасті передачі та підшипники кочення тягових редукторів МВРС припадає до 42 % відмов від загального числа відмов за механічним обладнанням, що пов'язано з впливом високих знакозмінних навантажень, які призводять до появи пошкоджень підшипників кочення та зубчастого

зачеплення. Установлено, що найчастіше в тягових редукторах електропоїздів різних серій трапляється збільшений осьовий розбіг, який спричиняється руйнуванням підшипника кочення передньої кришки тягового редуктора.

Натепер розробка й удосконалення методів вібродіагностування механічної частини тягового, моторвагонного рухомого складу посідає чільне місце в провідних країнах світу на залізничному транспорті в сфері якості ремонту, підвищення надійності й безпеки експлуатації. Привабливість вібродіагностування полягає в здатності виявляти пошкодження з вищою достовірністю, ніж це робить ремонтний персонал, спираючись на давно сформовані об'єктивні технології й підходи.

Для підтримки технічного стану, експлуатаційної надійності, запобіганню простою МВРС унаслідок псувань та дотримання встановлених міжремонтних пробігів слід широко впроваджувати в технологію ТО й ПР сучасні технологічні процеси, спеціалізоване нестандартне ремонтне обладнання та вдосконалені вібродіагностичні методи й засоби.

Дисертаційна робота виконувалась 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).

Отже, дисертаційне дослідження Бульби Владислава Ігоровича з теми «Удосконалення технології вібродіагностування тягових редукторів електропоїздів» є актуальним.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність

Обґрунтованість і достовірність отриманих у дисертації наукових результатів обумовлено логічною та послідовною структурою наукового дослідження з подальшим експериментальним підтвердженням одержаних теоретичних даних. Відповідно до сформульованого наукового завдання в дисертаційній роботі Бульби В. І. обирався засіб вібродіагностування, в основу теоретичного дослідження якого лягла полігармонічна модель вібрації для опису вібрації зубчастого зачеплення та модель випадкового процесу з періодичною автокореляційною функцією для обліку вібраційних складових підшипників кочення. Завдяки алгоритмові реалізації моделі

вібрації та методам цифрової обробки сигналів удалося отримати на широкосмуговому спектрі вібрації високочастотну смугу вібраційного збудження підшипників кочення, які перебувають у різних технічних станах. Залучення математичного апарату дикретного вейвлет-перетворення та розкладання за емпіричними модами дозволило отримати ідентифіковані вузькосмугові частотні смуги вібрації зубчастого зачеплення та підшипників кочення. Упроваджені нові діагностичні ознаки, що поєднують властивості загальновживаних ознак, покликані усунути недоліки останніх, які проявляються в слабкій чи занадто сильній чутливості до імпульсного наповнення в зареєстрованій вібрації. Упровадження обчислення фрактальних розмірностей покриття дозволило обліковувати короткотривалі особливості часових форм вібрації тягових редукторів із подальшим прогнозуванням технічного стану ARIMA моделями, для формування яких реалізовувалось три етапи із залученням інформаційного критерію Акайкі та Байєсового інформаційного критерію. Здійснене прогнозування шести станів тягових редукторів електропоїздів володіло прийнятною точністю.

Отже, результати, що одержані за допомогою використання згаданих методів та моделей і наведені в дисертації Бульби В. І. для розв'язання сформульованого наукового завдання, достатньо підтверджені теоретично та експериментально, а також є достовірними та обґрунтованими.

Наукова новизна результатів роботи

Наукова новизна дисертаційного дослідження Бульби Владислава Ігоровича полягає у розв'язанні наукового 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. При цьому:

— 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;

— уперше 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 прийнятного діапазону вібрації підшипників;

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

— доопрацьований 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 основних результатів дисертаційної роботи

Удосконалена в дисертаційній роботі Бульби В. І. технологія вібродіагностування впроваджує для ремонтного персоналу нові заходи з вчасного виявлення пошкоджень зубчастого зачеплення та підшипників кочення колісно-редукторних блоків електропоїздів для запобігання катастрофічних наслідків. Запропоновану технологію можна реалізовувати впродовж виконання ТО й ПР на оглядових стійлах або на випробувальному стенді. Безконтактним датчиком визначалась та обиралась прийнятна частота обертання колісно-редукторного блока для побудови й накопичення широкосмугових спектрів вібрації із наявними гармоніками, появу й зростання яких можна використовувати як діагностичні ознаки несправностей зубчастого зачеплення. Накопичені вібраційні сигнали, які використовувались для визначення порогових значень наявних поширених пошкоджень зубчастого зачеплення й підшипників кочення класичними й запровадженими новими скалярними індикаторами. Обраний найкращий спосіб кріплення віброакселерометра завдяки шпильці до поверхні корпусу тягового редуктора для реєстрації вібраційних реалізацій упродовж діагностування з найвищою точністю.

Практичне значення одержаних результатів підтверджено відповідними актами впровадження у виробничий процес залізниці та у навчальний процес Українського державного університету залізничного транспорту, що наведені у додатках дисертації.

Завершеність роботи та повнота викладу матеріалів дисертації в опублікованих працях

Сукупність результатів наукового та практичного значення дозволяє зробити висновок про завершеність роботи та достатній особистий внесок здобувача.

Основні результати роботи повною мірою викладено у 12 наукових працях, з яких 6 статей у фахових виданнях, затверджених МОН України. Усі видання індексуються міжнародною наукометричною базою Index Copernicus, а одне видання входить до бази Scopus. Апробація підтверджена 6 тезами доповідей та матеріалах конференції.

Аналіз змісту дисертації

У вступі наведено загальну характеристику роботи, зазначена актуальність роботи, визначені об'єкт, предмет та завдання дослідження, що відповідають меті дисертаційної роботи.

У першому розділі проаналізовані властивості систем ТО й ПР локомотивів і моторвагонного рухомого складу. Наголошено, що чинна ППР орієнтована на середньостатистичний рівень технічного стану МВРС, ТРС. У порядку її вдосконалення внаслідок старіння локомотивного парку регулярно корегується перелік видів ремонту й норми міжремонтних періодів для кожної серії й типу РС. Зазначено, що впровадження систем діагностування в технологію ТО й ПР дозволить сформувати достовірний прогноз безаварійної експлуатації відповідальних вузлів і агрегатів та скорегувати терміни міжремонтних пробігів і об'єми відповідних ремонтів МВРС, ТРС, а в перспективі — перейти від ППР до ремонту МВРС, ТРС за технічним станом із індивідуальним обсягом ремонту кожної одиниці. Наголошено, що тяговий привод ІІ класу є найбільш складним і відповідальним вузлом екіпажної частини МВРС і разом із допоміжними машинами найчастіше виходить із ладу в електропоїздах ЕР2, ЕР2Р,Т унаслідок низької якості обслуговування й ремонту, впливу динамічних навантажень, які діють як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах і браком використання ефективних способів відновлення працездатності деталей при їх ремонті. Установлено поширену відмову, що трапляється в тягових редукторах електропоїздів — збільшення осьового розбігу внаслідок руйнування підшипника кочення передньої кришки тягового редуктора. Наведене визначення технічного діагностування та перелічені його завдання, види та рівні структури. Перелічені вимоги, які

мають задовольняти діагностичні ко мплекси. Наведені недоліки визначення температури та продуктів зносу для встановлення технічного стану обладнання й запропоновано як найбільш ефективний засіб здійснювати вимірювання та аналіз вібрації. Проаналізовані методи віброакустичного діагностування в часовому й частотному просторах і наведені відповідні переваги й недоліки. Перелічені поширені діагностичні комплекси останнього покоління й зазначений їх спільний недолік.

У другому розділі визначаються види дефектів і наводяться факти, що спричиняють відмови тягових редукторів. Установлюється відповідність між параметрами технічного стану та діагностичними ознаками. Для опису вібрації зубчастого зачеплення наведена полігармонічна модель коливань, яка подає коливальний процес на фізично обумовлених частотах. Однак вплив низки несприятливих факторів призводить до розмивання дискретних ліній і появи шумового компонента, а поява пошкоджень призводить до амплітудної та фазової модуляції. Здійснюється опис недоліків моделей вібрації підшипників кочення та пропонується досконала циклостаціонарна модель вібрації, якій під силу окрім обліку повністю обертального характеру елементів підшипників кочення додатково вести облік проковзування, що трапляється впродовж перекочувань елементів підшипників кочення. Для числової реалізації циклостаціонраної моделі вібрації запропонований алгоритм, який бере до уваги розлогий діапазон частот обертання внутрішнього кільця та після додаткових обчислень здійснює симуляцію вібраційної реалізації. Зафіксоване вібраційне збудження за результатами симуляції в діапазоні 6500 — 9000 Гц обране як властива ознака пошкоджень зовнішнього й внутрішнього кільця підшипника. Установлено, що додана складова шуму не заповнила характерне збудження, а тільки зазнала рівномірного поширення вздовж частотного діапазону на вібраційному спектрі.

У третьому розділі обираються методи для розділення частотних смуг вібрації зубчастого зачеплення й підшипників кочення. Наводяться недоліки класичного перетворення Фур'є та пропонується метод дискретного вейвлет-перетворення для їх уникнення. Завдяки реалізації кратномасштабного аналізу та реалізації схеми пірамідального дискретного вейвлет-перетворення обчислені частотні смуги в яких відновлюватимуться сигнали за отриманими апроксимованими й деталізованими вейвлет-коефіцієнтами. Для обрання прийнятного материнського вейвлету з-поміж розлогої вейвлетної родини як критерій обиралася ентропія Шеннона, найменше значення якої відповідає найкращому материнському вейвлету Добеші 4-го порядку. Іншим методом,

який обирався для визначення прийнятного вузькосмугового частотного діапазону було адаптивне розкладання за емпіричними модами, яке ліквідує недолік кратномасштабного вейлвет-аналізу, а саме потребу в попередньому виборі оптимального вейвлет-базису, який володіє обмеженнями при обробці вібраційних сигналів. Наводяться умови реалізації методу розкладання за емпіричними модами і описаний алгоритм отримання вбудованих функцій мод, які є результатами успішної реалізації згаданого методу. Наведені властивості фрактальних характеристик, як нової діагностичної ознаки технічного стану тягових редукторів електропоїздів і формалізована фрактальна розмірність покриття.

У четвертому розділі наводяться особливості реалізації ТО й ПР електропоїздів, а також розкривається смисл удосконалення технології діагностування КРБ завдяки додатковому впровадженню до наявних технологічних процесів методу вібродіагностування, який дозволить уникати надмірного бракування, що може з'явитись при розбиранні КРБ упродовж проведення ПР-1. Описані експериментальні дослідження, які провадились у моторвагонних депо на випробувальному стенді для тягових редукторів, які перебували в шести станах. Установлено, що реалізація дискретного вейвлет-перетворення надає незадовільні результати з виділення вузькосмугового частотного діапазону підшипникової вібрації, натомість пасує для отримання низькочастотної смуги, де проявляється перша й друга гармоніки частоти зубозачеплення. Для отримання частотної смуги підшипникової вібрації обиралася перша вбудована функція моди. Продемонстровані переваги використання нових скалярних індикаторів технічного стану та обчислений діапазон значень фрактальної розмірності покриття, які лягли в основу для застосування дискретних стохастичних ARIMA моделей для прогнозування технічного стану тягових редукторів. Точність прогнозування шести станів тягових редукторів виявилась прийнятною.

У п'ятому розділі обчислена достовірність вібродіагностування тягових редукторів електропоїздів удосконаленими заходами, а також достовірність діагностування з використанням у технології ТО й ПР штатного фонендоскопа. Розраховані діагностичні ваги для 6 ознак станів набули лише одного від'ємного значення для протилежних діагнозів, що демонструє діагностичну цінність унаслідок появи інформації, яка вноситься ознакою до системи станів. Обчислений економічний ефект за розрахунковий період становив 19227738 грн.

Основні недоліки і зауваження до роботи

1. Наприкінці підрозділу 1.4 слід зазначити потрібну кількість віброакселерометрів для діагностування відповідного механічного обладнання ТРС, МВРС.
2. В описі моделі (2.12) потрібно додатково акцентувати увагу на детерміновану й стохастичну складові.
3. Не зазначено для якої частоти обертання і для якого технічного стану тягового редуктора розраховувалась в табл. 3.1 ентропія після використання різних материнських вейвлетів.
4. До рис. 3.4 необхідно додати частотне подання отриманих вбудованих функцій мод для можливості відстеження динаміки зміни відповідних спектральних наповнень.
5. У табл. 4.3 здійснюється визначення параметрів ARIMA моделі лише для шостого виду несправності, для решти п'яти видів подібний підбір порядків AR і MA складових відсутній.
6. В тексті дисертації мають місце окремі помилки стилістики викладення, комп'ютерного редагування та орфографічного характеру, на які здобувачу вказано особисто.

Незважаючи на вказані недоліки дисертація має достатні науковий рівень та практичне значення й демонструє високу наукову кваліфікацію Бульби Владислава Ігоровича.

Загальний висновок щодо дисертаційної роботи

Аналіз тексту дисертації, автореферату, а також публікацій здобувача за темою роботи дозволяє зробити наступні загальні висновки.

Дисертація Бульби Владислава Ігоровича є завершеною кваліфікаційною науковою працею, в якій самостійно отримані нові науково обґрунтовані результати, які дозволяють вирішити актуальне наукове завдання з підвищенні ефективності діагностування тягових редукторів електропоїздів завдяки удосконаленню методів виділення інформативної частотної смуги підшипникової вібрації, залученню дієвих діагностичних ознак технічного стану підшипників кочення з подальшим прогнозуванням технічного стану, що має істотне значення і відноситься до пріоритетного напрямку розвитку вітчизняної науки і техніки в галузі залізничного транспорту.

Зміст дисертації та автореферату в повній мірі відповідають паспорту спеціальності 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів, а саме напряму досліджень: «Надійність, діагностика та неруйнівний контроль рухомого складу та його частин».

Актуальність, високий науковий рівень, практична цінність та впровадження результатів виконаних автором досліджень свідчать про те, що представлена до захисту дисертація «Удосконалення технології вібродіагностування тягових редукторів електропоїздів» відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р. (зі змінами), а її автор Бульба Владислав Ігорович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів.

Офіційний опонент:

професор кафедри вагонів та вагонного господарства Державного університету інфраструктури та технологій, доктор технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів, професор О.В. Фомін

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ
ВІДДІЛ КАДРІВ
Підпис: О.В. Фомін
Засвідчує: ст. інсп. ВК [illegible] Н.О. Конєва

Відгук надійшов до спец. вченої ради Д 64.820.04 19 квітня 2021 р.
В.о. вченого секретаря спец. вченої ради Д 64.820.04