

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерство освіти і науки України

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БУЛЬБА ВЛАДИСЛАВ ІГОРОВИЧ

УДК 629.423.2:681.518.54

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВІБРОДІАГНОСТУВАННЯ
ТЯГОВИХ РЕДУКТОРІВ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ**

05.22.07 — рухомий склад залізниць та тяга поїздів

27 — Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



В. І. Бульба

Науковий керівник:

МИХАЛКІВ Сергій Васильович,
кандидат технічних наук, доцент

Харків — 2021

АНОТАЦІЯ

Бульба В. І. Удосконалення технології вібродіагностування тягових редукторів електропоїздів. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 — «Рухомий склад залізниць та тяга поїздів» (273 — Залізничний транспорт). — 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.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в 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.

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. Розкладання за

емпіричними модами позбавлене потреби попереднього вибору материнської функції, що призводить до усунення перекриття високочастотних діапазонів на різних рівнях розкладання з можливістю подальшого обрання прийнятного 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.

Практичні результати полягають у сформованій базі 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 стендах моторвагонних депо. Обраний найкращий спосіб та місце кріплення віброакселерометра до поверхні тягового редуктора електропоїзда для використання паспортного частотного діапазону віброакселерометра й досягнення високої достовірності діагностування.

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 12 наукових праць, з яких 6 наукових статей — у фахових виданнях, затверджених МОН України (одне з них індексується базою Scopus); 6 праць апробаційного характеру.

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету й завдання, об'єкт і предмет дослідження, зазначений зв'язок роботи з

науковими темами та програмами, розкрито наукову новизну та практичну цінність дисертаційної роботи, наведена її загальна характеристика.

У першому розділі зазначається, що основною системою ремонту на українських залізницях дотепер лишається планово-попереджувальна система ремонту, яка характеризується великою кількістю позапланових ремонтів електропоїздів. Удосконалити цю систему можна, впровадивши сучасні системи для діагностування вузлів і агрегатів після їх демонтажу або часткового розбирання, що в подальшому призведе до відмови від використання застарілих діагностичних пристроїв (фонендоскопів, тощо) достовірність яких залежить від досвіду майстрів і слюсарів. Установлено, що на відмови тягових редукторів електропоїздів із причин руйнування підшипника кочення передньої кришки припадає більше 85 % відмов. Тому потреба у вчасному виявленні пошкоджень підшипникових вузлів лишається одним із головних завдань, яке можна розв'язати впровадженням функціонального діагностування за аналізом вібрації.

Установлено, що різновиди діагностичних комплексів останнього покоління, які присутні на ринку й використовуються в технології технічного обслуговування та поточного ремонту локомотивів залізниць закордонних країн, характеризуються застарілими методами, які були розроблені більше 30 років тому. Отже, дотримання підвищених вимог до якості ремонту й безпеки руху актуалізує потребу в теоретичних наукових дослідженнях нових методів обробки й аналізу вібраційних сигналів та отримання нових діагностичних ознак технічного стану.

У другому розділі запропоновано описувати вібраційний сигнал підшипника кочення тягового редуктора електропоїзда циклостаціонарним випадковим процесом із періодичною автокореляційною функцією, який дозволив розширити уяву про повністю обертальний характер елементів підшипників завдяки обліку ефекту ковзання тіл кочень відносно кілець, що дотепер не вдавалося поширеній моделі опису вібрацій, яка бере до уваги лише частоти наявних пошкоджень та ефекти модуляції унаслідок

циклічного перекочування тіл кочення через навантажену зону. Зважаючи на складність теоретичного аналізу коливальних характеристик підшипників кочення тягових редукторів електропоїздів, запропонована модель здійснює симуляцію поширених пошкоджень елементів підшипників кочення (пошкодження ролика, зовнішнього й внутрішнього кільця без та з додаванням шуму) у вигляді специфічних резонансних збурень на широкосмугових спектрах вібрації в околицях відповідних частотних діапазонів.

У третьому розділі визначається придатність відповідних методів обробки сигналів для використання в технології вібродіагностування. Зокрема зазначається важливість використання коефіцієнту ексцесу як критерію імпульсного наповнення вібрації, яке асоціюється з наявними пошкодженнями підшипників і за величиною цього коефіцієнту запропоновано порівнювати ефективність виділення шуканого частотного діапазону різними методами. Зважаючи на нестационарність сигналів вібрації тягового редуктора електропоїзда й потребу в збереженні наявних численних інформативних короткотривалих складових, для реалізації дискретного вейвлет-перетворення обирався материнський вейвлет Добеші 4-го порядку, а критерієм обрання прийнятного вейвлету з-поміж великої вейвлетної родини є мінімальне значення розрахованої ентропії Шеннона.

Установлена прийнятність теорії фракталів здійснювати аналіз часових вібраційних послідовностей. Запропоновано впроваджувати в технологію вібраційного діагностування тягових редукторів електропоїздів нову діагностичну ознаку фрактальної розмірності покриття, яка забезпечить кращий облік корисних складових вібраційних реалізацій порівняно із загальноновживаними ознаками.

У четвертому розділі розробляється технологія вібродіагностування тягових редукторів електропоїздів упродовж проведення ТО-3 й ПР-1. Для вузькосмугового поділу зареєстрованих вібраційних частотних компонентів обирається дискретне вейвлет-перетворення та метод розкладання за

емпіричними модами, який усуває перекриття частотних діапазонів на різних рівнях розкладання у високочастотному діапазоні, натомість дискретне вейвлет-перетворення краще пасує до виділення низькочастотного діапазону з вібрацією зубчастого зачеплення.

Зважаючи на низьку ефективність класичних скалярних індикаторів, доопрацьований метод визначення технічного стану тягових редукторів завдяки впровадженню обчислення нових індикаторів THIKAT і TALAF.

Досліджено, що обчислення фрактальної розмірності покриття найкраще обліковує інформативні складові вібраційних сигналів у виділених вузькосмугових частотних діапазонах. Обчислене найменше значення розмірності відповідає справному редуктору, а найвище — комбінованим пошкодженням тягових редукторів електропоїздів.

Для прогнозування технічного стану тягових редукторів електропоїздів запропоновано залучати дискретні стохастичні ARIMA моделі, які потребують лише наявності дискретних величин, що накопичуються впродовж відповідних вимірювань. Найнижча точність за результатами досліджень сягала 91,4 %.

У п'ятому розділі розрахунок достовірності вдосконаленої технології вібродіагностування виявився вищим на 25,7 % порівняно з використанням штатного фонендоскопа, розраховані діагностичні ваги для 6 ознак станів, а економічний ефект за розрахунковий період становить 19227738 грн. Розроблена технологія вібродіагностування дозволяє скорочувати час на розбирання та післяремонтне випробування колісно-редукторних блоків електропоїздів завдяки зниженню числа надмірного бракування, а також знижує пропуск пошкодження підшипника кочення.

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

ABSTRACT

Bulba V. I. Improvement of the technology for the vibration-based diagnostics of electric train traction gearboxes. — Qualification scientific work — manuscript copyright.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences (Ph.D. – Doctor of Philosophy) in specialty 05.22.07 — Rolling Stock and Traction of Trains (273 — Railway Transport). — 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 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.

The scientific novelty of the thesis involves solving the scientific task of improvement of the vibration-based diagnostics of electric train traction gearboxes based on the use of the wavelet analysis, empirical mode decomposition and fractal analysis methods, which increase the confidence of the diagnostics.

For the first time there was:

— defined the nature of the change in the spectral composition of a damaged rolling bearing of the electric train traction gearbox during the implementation of the cyclostationary model, which takes into account random components and simulates the effect of rollers slip relatively to other elements;

— developed the technology for the vibration-based diagnostics of traction gearboxes, the feature of which is the simultaneous involvement of the discrete wavelet transform procedure to obtain gear mesh harmonics and self-adaptive procedure of the empirical mode decomposition. The empirical mode decomposition doesn't need to pre-select the mother function, which eliminates the

overlap of high-frequency band at different levels of decomposition with the possibility of further selection of the acceptable band of bearing vibration;

— calculated the bands of the box counting method values, which takes into account the scale invariance and evaluates the vibrational components of different nature of the electric train traction gearboxes being in different technical states.

There was refined:

— an assessment method for the technical state of traction gearboxes by applying new time-domain indicators of vibration which use a combination of the kurtosis and root mean square (TALAF and THIKAT);

— a method of technical state prediction of electric train traction gearboxes using an integrated discrete stochastic model of autoregression and moving average, the successful implementation of which requires only the availability of a sequence of calculated fractal dimensions that accumulate during the relevant experiments.

The practical results consist in the formed base of accumulated vibration signals, frequency bands, harmonic numbers, which correspond to nonfault and faulty bearings and which were registered for different rotation frequencies of wheel-gearbox units on the test rigs in electric train depots. The best method and place of mounting of the vibroaccelerometer to the housing of the electric train gearbox was selected for the application of the passport frequency band of the vibroaccelerometer and achievement of the high diagnostic confidence.

The introduction substantiated the relevance of the selected topic, formulated the goal and objectives, object and subject of the research, emphasized the connection of the thesis with scientific topics and programmes, developed the scientific novelty and practical value of the thesis, gave its general characteristics.

The first chapter noted that the main repair system on Ukrainian railways is still a scheduled preventative repair system, which is characterized by a large number of unscheduled repairs of electric trains. This system can be improved by introducing modern systems for the diagnostics of components and assemblies after their dismantling or partial dismantling, which in turn will lead to the refuse

to use obsolete diagnostic devices (phonendoscopes, etc.) whose confidence depends on the qualification of technical workers. It was established that the failures of electric train traction gearboxes caused by the destruction of a bearing of the front cover account for more than 85% of failures. Therefore, the need for timely detection of bearing faults remains one of the main tasks that can be solved by introducing functional diagnostics by vibration analysis.

It was established that the different last-generation diagnostic complexes, which are available on the market and are used in the technology of repair and maintenance of foreign railway locomotives, are characterized by outdated methods that were developed more than 30 years ago. Thus, compliance with the increased requirements for the quality of repair and traffic safety requires theoretical research of new methods for vibration signal analysis and processing, and new diagnostic features of the technical state.

The second chapter proposed to describe the vibration signal of a rolling bearing of the electric train traction gearbox with a cyclostationary random process with periodic autocorrelation function, which allowed to expand the idea of fully rotational nature of bearing elements due to taking into account the sliding effect of rollers relatively to races, which so far the common model for describing vibrations failed to do because it took into account only the frequency of existing faults and the effects of modulation due to the cyclic rolling of rollers through the loaded area. Given the complexity of the theoretical analysis of the oscillatory characteristics of rolling bearings of electric train traction gearboxes, the proposed model simulates common faults of rolling bear elements (faults of rollers, outer and inner rings without and with noise) in the form of specific resonant excitations on the broadband vibration spectra in the vicinity of the corresponding frequency bands.

The third chapter determined the suitability of appropriate signal processing methods for use in the vibration-based diagnostics technology. In particular, the importance of using the kurtosis as a criterion for impulse filling of vibration, which is associated with existing bearing faults, and according to the value of the

kurtosis, it was proposed to compare the efficiency of the extraction of a searched frequency band with different methods. Due to the nonstationarity of vibration signals of the electric train traction gearbox and the need to preserve the available numerous informative short-term components, for the implementation of the discrete wavelet transform the fourth-order Daubechies mother wavelet was selected, and the criterion for selecting an acceptable wavelet from a large wavelet family is the minimum value of the calculated Shannon entropy.

The acceptability of fractal theory to analyze temporal vibration sequences was established. 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.

The fourth chapter introduced a new technology of vibration-based diagnostics of electric train traction gearboxes during the 3rd level maintenance and the 1st level current repair. For narrowband separation of registered vibration frequency components, there were selected the discrete wavelet transform and empirical mode decomposition, which eliminates the overlap of frequency bands at different levels of decomposition in the high frequency band, while the discrete wavelet transform is better suited for the extraction of a low-frequency band with gear mesh vibration.

Taking into account the low efficiency of classical scalar indicators, the method of determining the technical state of traction gearboxes was refined due to the introduction of the calculation of new THIKAT and TALAF indicators.

It was proved that the calculation of the box counting method best takes into account the informative components of vibration signals in extracted narrowband frequency bands. The calculated minimum dimension value corresponds to a nonfault gearbox, and the maximum one - to the combined faults of electric train traction gearboxes.

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%.

In the fifth chapter 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. The developed technology of the vibration-based diagnostics reduces time for dismantling and post-repair testing of wheel-gearbox units of electric trains due to the reduction of the quantity of excessive faults, and reduces omissions of rolling bearing faults as well.

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

Список публікацій здобувача

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 інформа-тивного 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.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ..... | 17 |
| ВСТУП..... | 18 |
| РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ВІБРОАКУСТИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ТЯГОВИХ РЕДУКТОРІВ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ..... | 24 |
| 1.1. Властивості систем ТО й ПР локомотивів і моторвагонного рухомого складу..... | 24 |
| 1.2. Особливості конструкції та аналіз відмов ТЗП електропоїздів в експлуатації..... | 27 |
| 1.3. Вибір виду та аналіз методів технічного діагностування вузлів із підшипниками кочення та зубчастим зачепленням..... | 32 |
| 1.3.1. Аналіз методів віброакустичного діагностування в часовому просторі..... | 38 |
| 1.3.2. Аналіз методів віброакустичного діагностування в частотному просторі..... | 41 |
| 1.3.3. Аналіз методів прогнозування часових рядів..... | 43 |
| 1.4 Аналіз комплексів для віброакустичного діагностування вузлів МВРС, ТРС..... | 45 |
| 1.5. Висновки до 1 розділу..... | 49 |
| РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРАЦІЇ ЗУБЧАСТОГО ЗАЧЕПЛЕННЯ Й ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ ТЯГОВИХ РЕДУКТОРІВ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ..... | 51 |
| 2.1. Визначення видів дефектів і факторів, що спричиняють відмови тягових редукторів..... | 51 |
| 2.2. Установлення відповідності між параметрами технічного стану та діагностичними ознаками..... | 55 |
| 2.3. Моделювання пошкоджень зубчастого зачеплення тягового редуктора електропоїзда..... | 58 |

| | |
|--|------------|
| 2.4. Моделювання пошкоджень підшипника кочення передньої кришки тягового редуктора електропоїзда..... | 61 |
| 2.5. Засади алгоритмів розпізнавання технічного стану..... | 69 |
| 2.6. Висновки до 2 розділу..... | 74 |
| РОЗДІЛ 3 ВИДІЛЕННЯ ІНФОРМАТИВНИХ ЧАСТОТНИХ СМУГ ТА ОБРАННЯ ДІАГНОСТИЧНИХ ОЗНАК ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЯГОВИХ РЕДУКТОРІВ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ..... | 75 |
| 3.1. Особливості здійснення порогової фільтрації вейвлет-перетворенням..... | 75 |
| 3.2. Розділення вібраційних складових тягових редукторів методом кратномасштабного аналізу..... | 87 |
| 3.3. Властивості фрактальних характеристик, як нової діагностичної ознаки технічного стану тягових редукторів електропоїздів..... | 94 |
| 3.3.1. Принципи загальної фрактальної розмірності..... | 95 |
| 3.3.2. Формалізація фрактальної розмірності покриття..... | 97 |
| 3.4. Переваги методу розкладання вібраційних реалізацій за емпіричними модами..... | 99 |
| 3.5. Висновки до 3 розділу..... | 102 |
| РОЗДІЛ 4 УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВІБРОДІАГНОСТУВАННЯ КОЛІСНО-РЕДУКТОРНИХ БЛОКІВ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ НА ТО-3 Й ПР-1..... | 103 |
| 4.1. Виявлення несправностей КРБ електропоїздів упродовж ПР-1 стандартними та вдосконаленими заходами..... | 103 |
| 4.2. Виділення вібраційних частотних смуг тягових редукторів методами дискретного вейвлет-перетворення та розкладання за емпіричними модами..... | 106 |
| 4.3. Застосування скалярних індикаторів TALAF, THIKAT для визначення пошкоджень елементів тягових редукторів..... | 117 |
| 4.4. Обчислення фрактальної розмірності покриття для різних технічних станів тягових редукторів електропоїздів..... | 121 |

| | |
|---|------------|
| 4.5. Прогнозування технічного стану тягових редукторів електропоїздів дискретними стохастичними моделями..... | 123 |
| 4.6. Висновки до 4 розділу..... | 134 |
| РОЗДІЛ 5 ВИЗНАЧЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВДОСКОНАЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВІБРОДІАГНОСТУВАННЯ..... | |
| 5.1. Розрахунок достовірності функціонування засобів вібродіагностування тягових редукторів електропоїздів..... | 136 |
| 5.2. Обчислення діагностичної цінності ознак..... | 138 |
| 5.3. Визначення економічної ефективності впровадження удосконаленої технології вібродіагностування в ТО й ПР електропоїздів..... | 141 |
| 5.3.1. Методика розрахунку економічного ефекту..... | 141 |
| 5.3.2. Вихідні дані, що необхідні для розрахунку економічного ефекту... | 144 |
| 5.4. Висновки до 5 розділу..... | 150 |
| ВИСНОВКИ..... | 151 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 154 |
| Додаток А Реалізація коду для моделювання несправностей підшипника кочення передньої кришки тягового редуктора електропоїзда в програмному забезпеченні GNU Octave..... | 172 |
| Додаток Б Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації..... | 180 |
| Додаток В Акти впровадження результатів дисертації..... | 184 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

| | |
|-------|---|
| АЦП | Аналого-цифровий перетворювач |
| ВАД | Віброакустичне діагностування |
| ВФМ | Вбудована функція моди |
| ДВП | Дискретне вейвлет-перетворення |
| КМБ | Колісно-моторний блок |
| КРБ | Колісно-редукторний блок |
| МВРС | Моторвагонний рухомий склад |
| МСУ | Мікропроцесорні системи управління |
| ОД | Об'єкт діагностування |
| ПЗ | Програмне забезпечення |
| ПК | Персональний комп'ютер |
| ПР | Потоковий ремонт |
| ППР | Планово-попереджувальна система ремонту |
| РЕМ | Розкладання за емпіричними модами |
| РС | Рухомий склад |
| СД | Системи технічного діагностування |
| СКЗ | Середньоквадратичне значення вібрації |
| СОСВ | Системи з одним ступенем вільності |
| ТЕД | Тяговий електричний двигун |
| ТЗП | Тягова зубчаста передача |
| ТО | Технічне обслуговування |
| ТРС | Тяговий рухомий склад |
| ШПФ | Алгоритм швидкого перетворення Фур'є |
| ARIMA | Інтегрована дискретна стохастична модель авторегресії і ковзного середнього |
| SNR | Відношення сигнал/шум |

ВСТУП

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, видається актуальним 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. Розкладання за емпіричними модами позбавлене 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 датчику 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 THIKAT; [9] — дослідження періодичних складових у сигналі за допомогою автокореляційних функцій; [10] — розрахунок частот перекочування елементів роликowego 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-й МНТК УкрДУЗТ «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 26 — 28 квітня 2016 р.);

— XIX-й МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», (м. Київ, 19 — 22 червня 2018 р.);

— 79-й МНТК «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпро, 16 — 17 травня 2019 р.);

— XX-й МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», (м. Херсон, 10 — 13 вересня 2019 р.);

— XV-й МНТК «Проблеми механіки залізничного транспорту», (м. Дніпро, 22 — 23 жовтня 2020 р.);

— XXI-й 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Балицкий Ф. Я., Генкин М. Д., Иванова М. А., Соколова А. Г., Хомяков Е. И. Современные средства и методы вибрационной диагностики машин и конструкций. Москва: МЦНТИ, 1990. С. 114.
2. Бервинов В. И., Доронин Е. Ю., Зенин И. П. Техническое диагностирование и неразрушающий контроль деталей и узлов локомотивов. Учебное пособие. Москва: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. 332 с.
3. Биргер И. А. Техническая диагностика. Москва: Машиностроение, 1978. 240 с.
4. Блохин Е. П., Панасенко В. Я., Клименко И. В. О конструкции тягового привода класса II локомотива. *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2007. Вып. 16. С. 81 — 84.
5. Бондарев О. М., Ягода Д. О., Бондарев О. О., Скобленко В. М. Теоретико-експериментальна оцінка показників міцності корпусів тягових редукторів зварної конструкції КЕВРЗ для електропоїздів серій EP2, EP9. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2013. Вып. 4 (46). С. 99 — 110.
6. 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/10.31891/2307-5732-2019-277-5-296-302>
7. 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.

8. Быстров В. Ф., Фадеев С. В. Техническое обслуживание систем диагностики типа ОМСД и СБД. Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: материалы первой международной научно-практической конференции (Москва, 10 окт. 2014). Москва, 2014. С. 91 — 93.
9. Виброметр СМ-21Х. Руководство по эксплуатации ВАРБ.411711.120 РЭ-изм.4. СПб: ВАСТ, 2018. С. 45.
10. Виброанализатор СД-23. Руководство по эксплуатации ВАРБ.411711.103 РЭ-изм.5. СПб: ВАСТ, 2018. С. 86.
11. Генкин М. Д., Соколова А. Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. Москва: Машиностроение, 1987. 288 с.
12. Гиоев З. Г. Основы виброакустической диагностики электромеханических систем локомотивов: монография. Москва: Учебно-методический центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2008. 307 с.
13. Гриненко А. В. Обоснование экономической эффективности мониторинга технического состояния локомотивов по данным МСУ. Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: материалы первой международной научно-практической конференции (Москва, 10 окт. 2014). Москва, 2014. С. 131 — 133.
14. ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. [Чинний від 01.01.1995]. К.: Держстандарт України, 1995. 26 с.
15. Звіт із непланових ремонтів МВРС, дизель-поїздів, автотрис Ф. ТО-15 т (надається щомісячно). Затверджений наказом Укрзалізниці від 14.05.93 р. № 99-Ц.
16. Зубенко Д. Ю. Повышение надежности тяговых передач рельсового электротранспорта: монография. Харьков: ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2015. 122 с.
17. Казиахмедов Т. Б., Фрактальный анализ и решение задач для выявления особенностей временных рядов при диагностике систем. *Вестник НВГУ*. 2015. № 3. С. 20 — 26.

18. Кривной А. М., Осяев А. Т. О комплексной оценке средств вибродиагностики. *Локомотив*. 2005. № 01. С. 28 — 31.

19. Лукьянов А. В., Портной А. Ю., Гарифулин В. Ю., Романовский А. И. Разработка комплекса входного виброконтроля вспомогательных машин электровозов при текущем ремонте. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2010. № 2(26). С. 45 — 50.

20. Макаров В. В., Коноваленко Д. В., Лыткина Е. М., Иванов П. Ю., Гарев Н. Н. Вспомогательные машины ЭПС. Учебное пособие. Иркутск: ИрГУПС, 2013. 140 с.

21. Мацько І. Й., Яворський І. М., Юзефович Р. М., Закжевські З. Стохастична динамічна модель сигналів вібрації підшипника кочення та їх аналіз. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2013. № 4(49). С. 119 — 128.

22. 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>

23. 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>

24. Михалків С. В., Бульба В. І., Ходаківський А. М. Визначення індикаторів технічного стану колісно-редукторних блоків електропоїздів. *Матеріали ХІХ-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.

25. 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.

26. 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)

27. 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.

28. Наговицын В. С. Совершенствование системы ремонта тягового подвижного состава железных дорог с учетом фактического технического состояния: дис. ... докт. техн. наук. Москва, 2006. 250 с.

29. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. Москва: Техносфера, 2006. 856 с.

30. Положення з атестації підприємств з обслуговування та ремонту тягового рухомого складу ЦТ-0162. Київ, 2002. — 89 с.

31. Правила технічного обслуговування і поточного ремонту електропоїздів ремонту КР-1, КР-2 електропоїздів і електросекцій ЦТ-0046. Київ, 2000. — 275 с.

32. 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>

33. 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.

34. Рыбников Е. К., Володин С. В. Механическая часть электроподвижного состава: консп. лек. Москва: МИИТ, 2014. 120 с.

35. Самсонов Е. А., Ермишин В. А. Техническая диагностика: пора ломать стереотипы. *Локомотив*. 2009. № 10. С. 2 — 5.

36. Система диагностики механизмов ОМСД-01: пат. 56611 РФ: МПК G01M 17/08. № 2006112151/22; заявл. 13.04.2006; опубл. 10.09.2006.

37. Тартаковський Е. Д., Михалків С. В., Ходаківський А. М., Сапон Р. Діагностування підшипників кочення допоміжних машин електровоза з використанням параметричної моделі та спектра обвідної вібрації. *Вісник НТУУ «КПІ»*. Серія машинобудування. 2016. №3(78). С. 12 — 18. <http://dx.doi.org/10.20535/2305-9001.2016.78.79374>

38. Тартаковский Э. Д., Пузырь В. Г., Дацун Ю. Н. Формализация экспертных оценок при аттестации локомотиворемонтных производств. Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: *материалы первой международной научно-практической конференции* (Москва, 10 окт. 2014). Москва, 2014. С. 282 — 287.

39. Трофимович В. В. Механическая часть электроподвижного состава: консп. лек. Ч.2. Хабаровск: ДВГУПС, 2006. 100 с.

40. Тэттер В. Ю. Разработка технологий и оборудования для вибро-диагностирования колесно-моторных блоков локомотивов: дис. ...канд. техн. наук. Омск, 2005. 192 с.

41. Тэттер В. Ю., Тэттер А. Ю. Диагностирование подвижного состава и его связь с направлением цифровизации железных дорог. *Омский научный вестник*. 2018. № 3(30). С. 87 — 93.

42. Тэттэр В. Ю., Тэттэр А. Ю. Использование переходных режимов при диагностировании ответственных узлов подвижного состава. *Известия Транссиба*. 2018. № 1(33). С. 62 — 68.

43. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. Москва: Техносфера, 2005. 592 с.

44. Шахов И. Г. Техническое диагностирование локомотивов: проблемы и решения. *Локомотив*. 2009. № 11. С. 36 — 37.

45. Aggoune L., Chetouani Y. Neyman-Pearson Test for Fault Detection in the Process Dynamics. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2016. Vol. 16. P. 999 — 1005. <https://doi.org/10.1007/s11668-016-0186-y>

46. Amarnath M., Praveen Krishna I. R. Detection and diagnosis of surface wear failure in a spur geared system using EEMD based vibration signal analysis. *Tribology International*. 2013. Vol. 61. P. 224 — 234. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.01.001>

47. Antoni J. Cyclic spectral analysis of rolling-element bearing signals: Facts and fictions. *Journal of Sound and Vibration*. 2007. Vol. 304(3 — 5). P. 497 — 529. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.02.029>

48. Antoni J., Randall R. B. A Stochastic Model for Simulation and Diagnostics of Rolling Element Bearings with localized faults. *Journal of Vibration and Acoustics*. 2003. Vol. 125(3). P. 282 — 289. <https://doi.org/10.1115/1.1569940>

49. Antoni J., Randall R. B. The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20(2). P. 308 — 331. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.09.002>

50. 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>

51. Bacchelli S., Papi S. Filtered wavelet thresholding methods. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2004. Vol. 164 — 165. P. 39 — 52. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2003.09.005>
52. Bendat J. S. *The Hilbert Transform and Applications to Correlation Measurements*. Naerum: Brüel&Kjær, 1985. BT0008
53. Blatter C. *Wavelets. A primer*. Natick: A K Peters Ltd, 2002. P. 199.
54. Bolaers F., Cousinard O., Estocq P., Chimentin X., Dron J-P. Comparison of denoising methods for the early detection of fatigue bearing defects by vibratory analysis. *Journal of Vibration and Control*. 2011. Vol. 17(13). P. 1983 — 1993. <https://doi.org/10.1177/1077546309348853>
55. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. C., Ljung G. M. *Time series analysis. Forecasting and control*. 5th edition. New Jersey: Wiley & Sons, 2016. P. 712.
56. Caesarendra W., Kosasih B., Tieu A. K., Moodie C. A. S. Application of the largest Lyapunov exponent algorithm for feature extraction in low speed slew bearing condition monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. Vol. 50-51. P. 116 — 138. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2014.05.021>
57. Caso E., Fernandez-del-Rincon A., Garcia P., Iglesias M., Viadero F. Monitoring of misalignment in low speed geared shafts with acoustic emission sensors. *Applied Acoustics*. 2020. Vol. 159. 107092. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107092>
58. Charfi F., Lesecq S., Sellami F. Fault diagnosis using SWT and Neyman Pearson detection tests. *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*. (Cargese, France, 31 Aug. — 03 Sept.). 2009. 10976527. <https://doi.org/10.1109/DEMPED.2009.5292788>
59. Chavez S. G., Bernat J. X., Coalla H. L. Forecasting of energy production and consumption in Asturias (northern Spain). *Energy*. 1999. Vol. 24(3). P. 183 — 198. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(98\)00099-1](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(98)00099-1)
60. Chen B., Shen B., Chen F., Tian H., Xiao W., Zhang F., Zhao C. Fault diagnosis method based on integration of RSSD and wavelet transform to rolling

bearing. *Measurement*. 2019. Vol. 131. P. 400 — 411. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.043>

61. Chen C-H., Shyu R-J., Ma C-K. Rotating machinery diagnosis using wavelet packets-fractal technology and neural networks. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2007. Vol. 21(7). P. 1058 — 1065. <https://doi.org/10.1007/BF03027655>

62. Chen Z., Zhai W., Wang K. Vibration feature evolution of locomotive with tooth root crack propagation of gear transmission system. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol. 115. P. 29 — 44. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.038>

63. Cheng J., Yu D., Tang J., Yang Y. Application of frequency family separation method based upon EMD and local Hilbert energy spectrum method to gear fault diagnosis. *Mechanism and Machine Theory*. 2008. Vol. 43(6). P. 712 — 723. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2007.05.007>

64. Coats M. D., Sawalhi N., Randall R. B. Extraction of tacho information from a vibration signal for improved synchronous averaging. Proceedings of Acoustics (Adelaide, 23 — 25 Nov. 2009). Adelaide, 2009. P. 1 — 8.

65. Combet F., Gelman L. Optimal filtering of gear signals for early damage detection based on the spectral kurtosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009. Vol. 23(3). P. 652 — 668. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2008.08.002>

66. Crownover R. M. Introduction to fractals and chaos. Boston: Jones and Bartlett Publishers, 1995. P. 299.

67. Dalpiaz G., Rivola A., Rubini R. Effectiveness and sensitivity of vibration processing techniques for local fault detection in gears. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2000. Vol. 14(3). P. 387 — 412. <https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1294>

68. D'Elia G., Cocconcelli M., Mucchi E. An algorithm for the simulation of faulted bearings in non-stationary conditions. *Meccanica*. 2018. Vol. 53(4). P. 1147 — 1166. <https://doi.org/10.1007/s11012-017-0767-1>

69. Ding J., Zhao W., Miao B., Lin J. Adaptive sparse representation based on circular-structure dictionary learning and its application in wheelset-bearing fault detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 111. P. 399 — 422. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.04.012>

70. Dron J.-P., Bolaers F., Rasolofondraibe I. Improvement of the sensitivity of the scalar indicators (crest factor, kurtosis) using a de-noising method by spectral subtraction: application to the detection of defects in ball bearings. *Journal of Sound and Vibration*. 2004. Vol. 270(1-2). P. 61 — 73. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00483-8](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00483-8)

71. Du Q., Yang S. Application of the EMD method in the vibration analysis of ball bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2007. Vol. 21(6). P. 2634 — 2644. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2007.01.006>

72. Dubovikov M. M., Starchenko N. V., Dubovikov M. S. Dimension of the minimal cover and fractal analysis of time series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Vol. 339(3-4). P. 591 — 608. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2004.03.025>

73. Dybała J., Gałęzia A. A novel method of gearbox health vibration monitoring using empirical mode decomposition. Proceedings of the third International Conference on Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations CMMNO. Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations (Ferrara, Italy, 2013). Berlin, 2014. P. 225 — 234. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39348-8_19

74. Dyer D., Stewart R. M. Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis. *Journal of Mechanical Design*. 1978. Vol. 100(2). P. 229 — 235. <https://doi.org/10.1115/1.3453905>

75. Fan R. Y. C., Ng S. T., Wong J. M. W. Reliability of the Box-Jenkins model for forecasting construction demand covering times of economic austerity. *Construction Management and Economics*. 2010. Vol. 28(3). P. 241 — 254. <https://doi.org/10.1080/01446190903369899>

76. Feldman M. Hilbert transform in vibration analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2011. Vol. 25(3). P. 735 — 802. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.07.018>
77. Fraden J. Handbook of modern sensors. Physics, designs and applications. 5th edition. Springer International Publishing Switzerland, 2016. P. 758 <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19303-8>
78. Gaing Z.-L. Wavelet-based neural network for power disturbance recognition and classification. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2004. Vol. 19(4). P. 1560 — 1568. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.835281>
79. Galar D., Sandborn P., Kumar U., Johansson CA. SMART: Integrating Human Safety Risk Assessment with Asset Integrity. Proceedings of the 3rd International Conference on Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations CMMNO 2013 (Ferrara, 2013). Ferrara, 2014. P. 37 — 59. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39348-8_3
80. Goel P. K., Sreenivas Iyengar N. Bayesian Analysis in Statistics and Econometrics. New York: Springer-Verlag, 1992. P. 411
81. Graps A. An introduction to wavelets. *IEEE Computational Science and Engineering*. 1995. Vol. 2(2). P. 50 — 61. <https://doi.org/10.1109/99.388960>
82. Hand-held Analyzer Types 2250-W and 2270-W for Vibration Measurements. Naerum: Bruel & Kjaer, 2020. P. 16.
83. He C., Niu P., Yang R., Wang C., Li Z., Li H. Incipient rolling element bearing weak fault feature extraction based on adaptive second-order stochastic resonance incorporated by mode decomposition. *Measurement*. 2019. Vol. 145. P. 687 — 701. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.052>
84. Ho D., Randall R. B. Optimisation of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearing fault signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2000. Vol. 14(5). P. 763 — 788. <https://doi.org/10.1006/mssp.2000.1304>

85. Honarvar F., Martin H. R. New statistical moments for diagnostics of rolling element bearings. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1997. Vol. 119(3). P. 425 — 432. <https://doi.org/10.1115/1.2831123>
86. Hongxing L., Hongfu Z., Chengyu J., Liangsheng Q. An improved algorithm for direct time-domain averaging. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2000. Vol. 14(2). P. 279 — 285. <https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1250>
87. Huang N. E., Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shih H. H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1998. Vol. 454(1971). P. 903 — 995. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>
88. Hyndman R. J., Athanasopoulos G. *Forecasting: Principles and Practice*. 2nd edition: OTexts, 2018. P. 382.
89. Junsheng C., Dejie Y., Yu Y., The application of energy operator demodulation approach based on EMD in machinery fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2007. Vol. 21(2). P. 668 — 677. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2005.10.005>
90. Kandananond K. Forecasting electricity demand in Thailand with an Artificial Neural Network approach. *Energies*. 2011. Vol. 4(8). P. 1246 — 1257. <https://doi.org/10.3390/en4081246>
91. Kankar P. K., Sharma S. C., Harsha S. P. Rolling element bearing fault diagnosis using wavelet transform. *Neurocomputing*. 2011. Vol. 74(10). P. 1638 — 1645. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2011.01.021>
92. Kosasih B. Y., Caesarendra W., Tieu K., Widodo A., Moodie C. A. S., Tieu A. K. Degradation trend estimation and prognosis of large low speed slewing bearing lifetime. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 493. P. 343 — 348. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.493.343>
93. Lei Y., Lin J., He Z., Zuo M. J. A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery. *Mechanical Systems and*

Signal Processing. 2013. Vol. 35 (1 — 2). P. 108 — 126. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2012.09.015>

94. Leite G. N. P., Araújo A. M., Rosas P. A. C., Stosic T., Stosic B. Entropy measures for early detection of bearing faults // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2019. Vol. 514. P. 458 — 472. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.09.052>

95. Li J., Li M., Zhang J., Jiang G. Frequency-shift Multiscale Noise Tuning Stochastic Resonance Method for Fault Diagnosis of Generator Bearing in Wind Turbine. *Measurement*. 2019. Vol. 133. P. 421 — 432. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.054>

96. Li J., Zhang J. Adaptive multiscale noise control enhanced stochastic resonance method based on modified EEMD with its application in bearing fault diagnosis. *Shock and Vibration*. 2016. Vol. 2016. ID 1485412. <https://doi.org/10.1155/2016/1485412>

97. Li Z., Jiang Y., Hu C., Peng Z. Difference equation based empirical mode decomposition with application to separation enhancement of multi-fault vibration signals. *Journal of Difference Equations and Applications*. 2016. Vol. 23(1-2). P. 457 — 467. <http://dx.doi.org/10.1080/10236198.2016.1254206>

98. Liu T, Luo Z., Huang J., Yan S. A Comparative Study of Four Kinds of Adaptive Decomposition Algorithms and Their Applications. *Sensors*. 2018. Vol. 18(7). 2120. <https://doi.org/10.3390/s18072120>

99. Liu Z., Zhang L., Carrasco J. Vibration analysis for large-scale wind turbine blade bearing fault detection with an empirical wavelet thresholding method. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 146. P. 99 — 110. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.094>

100. Lu Y., AbouRizk S. M. Automated Box-Jenkins forecasting modelling *Automation in Construction*. 2009. Vol. 18(5). P. 547 — 558. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.11.007>

101. Mallat S. A wavelet tour of signal processing. 3rd edition. Amsterdam: Elsevier, 2009. P. 832. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374370-1.X0001-8>

102. Markovic D., Brodersen R. W. DSP architecture design essentials. New York: Springer, 2012. P. 351. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9660-2>
103. Martinez-Alvarez F., Troncoso A., Asencio-Cortes G., Riquelme J. C. A survey on data mining techniques applied to electricity-related time series forecasting. *Energies*. 2015. Vol. 8(11). P. 13162 — 13193. <https://doi.org/10.3390/en81112361>
104. Matyjaszek M., Fernandez P. R., Krzemien A., Wodarski K., Valverfe G. F. Forecasting coking coal prices by means of ARIMA models and neural networks, considering the transgenic time series theory. *Resources Policy*. 2019. Vol. 61. P. 283 — 292. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.02.017>
105. McFadden P. D. Detecting fatigue cracks in gears by amplitude and phase demodulation of the meshing vibration. *Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*. 1986. Vol. 108(2). P. 165 — 170. <https://doi.org/10.1115/1.3269317>
106. McFadden P. D. Examination of a technique for the early detection of failure in gears by signal processing of the time domain average of the meshing vibration. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 1987. Vol. 1(2). P. 173 — 183. [https://doi.org/10.1016/0888-3270\(87\)90069-0](https://doi.org/10.1016/0888-3270(87)90069-0)
107. McFadden P. D., Smith J. D. Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique — a review. *Tribology International*. 1984. Vol. 17(1). P. 3 — 10. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(84\)90076-8](https://doi.org/10.1016/0301-679X(84)90076-8)
108. Meer D. W., Shepero M., Svensson A., Widen J., Munkhammar J. Probabilistic forecasting of electricity consumption, photovoltaic power generation and net demand of an individual building using Gaussian Processes. *Applied Energy*. 2018. Vol. 213. P. 195 — 207. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.104>
109. Mills T. C., Markellos R. N. The economic modelling of financial time series. 3rd edition. New York: Cambridge University Press, 2008. P. 456.

110. Ming A. B., Qin Z. Y., Zhang W., Chu F. L. Spectrum auto-correlation analysis and its application to fault diagnosis of rolling element bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013. Vol. 41 (1 — 2). P. 141 — 154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.08.004>
111. Ming A. B., Zhang W., Qin Z. Y., Chu F. L. Envelope calculation of the multi-component signal and its application to the deterministic component cancellation in bearing fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. Vol. 50 — 51. P. 70 — 100. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.05.033>
112. Mohanty S., Gupta K. K., Raju K. S. Hurst based vibro-acoustic feature extraction of bearing using EMD and VMD. *Measurement*. 2018. Vol. 117. P. 200 — 220. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.12.012>
113. Montgomery D. C., Peck E. A., Vining G. G. Introduction to linear regression analysis. 5th edition. New Jersey: Wiley & Sons, 2012. P. 672.
114. Moumene I., Ouelaa N. Gears and Bearings Combined Faults Detection Using Hilbert Transform and Wavelet Multiresolution Analysis. Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations Proceedings of the Second International Conference “Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations” CMMNO’2012. (Hammamet, 2012). P. 319 — 328. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28768-8_34
115. Nembhard A. D., Sinha J. K., Pinkerton A. J., Elbhah K. Condition monitoring of rotating machines using vibration and bearing temperature measurements. Proceedings of the 3rd International Conference on Condition Monitoring Of Machinery in Non-Stationary Operations CMMNO 2013 (Ferrara, 2013). Ferrara, 2014. P. 159 — 169. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39348-8_13
116. Patel S. P., Upadhyay S. H. Euclidean distance based feature ranking and subset selection for bearing fault diagnosis. *Expert Systems with Applications*. 2020. Vol. 154. 113400. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113400>
117. Photon+ dynamic signal analyzer. Naerum: Bruel & Kjaer, 2016. P. 8.
118. Poddar S., Tandon N. Detection of particle contamination in journal bearing using acoustic emission and vibration monitoring techniques. *Tribology*

International. 2019. Vol. 134. P. 154 — 164. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.050>

119. Prema V., Rao K. U. Time series decomposition model for accurate wind speed forecast. *Renewables: Wind, Water, and Solar*. 2015. Vol. 2(1). P. 18. <https://doi.org/10.1186/s40807-015-0018-9>

120. Pulse analyzers and solutions. Naerum: Bruel & Kjaer, 2017. P. 84.

121. Qin Y., Jia L. Active safety methodologies of rail transportation. *Advances in high-speed rail technology*. Singapore: Springer, 2019. P. 210. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2260-0>

122. Qiu H., Lee J., Lin J., Yu G. Wavelet filter-based weak signature detection method and its application on rolling element bearing prognostics. *Journal of Sound and Vibration*. 2006. Vol. 289(4 — 5). P. 1066 — 1090. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.03.007>

123. Rafiee J. M., Rafiee A., Tse P. W. Application of mother wavelet functions for automatic gear and bearing fault diagnosis. *Expert Systems with Applications*. 2010. Vol. 37(6). P. 4568 — 4579. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.12.051>

124. Rafiee J. M., Tse P. W. Use of autocorrelation of wavelet coefficients for fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009. Vol. 23(5). P. 1554 — 1572. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2009.02.008>

125. Randall R. B., Antoni J. Rolling element bearing diagnostics — A tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2011. Vol. 25(2). P. 485 — 520. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.07.017>

126. Sassi S., Badri B., Thomas M. Tracking surface degradation of ball bearings by means of new time domain scalar indicators. *International Journal of COMADEM*. 2008. Vol. 11(3). P. 36 — 45.

127. Scheffer C. Girdhar P. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance. 1st edition. Oxford: Elsevier, 2004. P. 272.

128. Shakya P., Darpe A. K., Kulkarni M. S. Bearing diagnosis using proximity probe and accelerometer. *Measurement*. 2016. Vol. 80. P. 190 — 200. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.11.029>
129. Sharma V., Parey A. A review of gear fault diagnosis using various condition indicators. 12th International Conference on Vibration Problems, ICOVP 2015. *Procedia Engineering*. (Guwahati, 2015). Elsevier, 2016. Vol. 144. P. 253 — 263. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.05.131>
130. Shin K., Hammond J. K. Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers. New Jersey: Wiley & Sons, 2008. P. 403.
131. Si W., Qin B., Li Q., Liu H. A novel adaptive wavelet threshold estimation based on hybrid particle swarm optimization for partial discharge signal denoising. *Optik*. 2019. Vol. 181. P. 175 — 184. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.12.030>
132. Smith W. A., Randall R. B. Rolling element bearing diagnostics using the Case Western Reserve University data: a benchmark study. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. Vol. 64-65. P. 100 — 131. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.04.021>
133. Strömbergsson D., Marklund P., Berglund K., Larsson P.-E. Bearing monitoring in the wind turbine drivetrain: A comparative study of the FFT and wavelet transforms. *Wind Energy*. 2020. Vol. 23(6). P. 1381 — 1393. <https://doi.org/10.1002/we.2491>
134. Tang Y. Y., Tao Y., Lam E. C. M. New method for feature extraction based on fractal behavior. *Pattern Recognition*. 2002. Vol. 35(5). P. 1071 — 1081. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(01\)00095-4](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(01)00095-4)
135. Tartakovsky E., Ustenko O., Puzyr V., Datsun Y. Systems Approach to the Organization of Locomotive Maintenance on Ukraine Railways. *Rail Transport-Systems Approach. Studies in Systems, Decision and Control*. 2017. Vol. 87. P. 217 — 236. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51502-1_5

136. Tse P. W., Yang W-X., Tam H. Y. Machine fault diagnosis through an effective exact wavelet analysis // *Journal of Sound and Vibration*. 2004. Vol. 277(4 — 5). P. 1005 — 1024. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.09.031>
137. Vachtsevanos G., Lewis F. L., Roemer M., Hess A., Wu B. *Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems*. New Jersey: Wiley & Sons, 2006. P. 434.
138. Wang L., Gao R. X. *Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing*. London: Springer-Verlag, 2006. P. 400. <https://doi.org/10.1007/1-84628-269-1>
139. Wang W. Early detection of gear tooth cracking using the resonance demodulation technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2001. Vol. 15(5). P. 887 — 903. <https://doi.org/10.1006/mssp.2001.1416>
140. Wang Y-Z., Qin Y., Zhao X-J., Zhang S-J, Cheng X-Q. Bearing fault diagnosis with impulsive noise based on EMD and cyclic correntropy. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2020. Vol. 617. P. 1477 — 1495. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0644-4_112
141. Wen W., Fan Z., Karg D., Cheng W. Rolling Element Bearing Fault Diagnosis Based on Multiscale General Fractal Features. *Shock and Vibration*. 2015. Vol. 2015. P. 1 — 9. <https://doi.org/10.1155/2015/167902>
142. Zhang H., Chen X., Du Z., Yan R. Kurtosis based weighted sparse model with convex optimization technique for bearing fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. Vol. 80. P. 349 — 376. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.04.033>
143. Zhang P-L., Li B., Mi S-S., Zhang Y-T., Liu D-S. Bearing fault detection using multi-scale fractal dimensions based on morphological covers. *Shock and Vibration*. 2012. Vol. 19(6). P. 1373 — 1383.
144. Zhang S., Tang J. Gearbox fault diagnosis based on time-frequency domain synchronous averaging and feature extraction technique. *Proceedings SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health*

Monitoring (Las Vegas 08 Apr. 2016). Las Vegas, 2009. 98040K. <https://doi.org/10.1117/12.2219460>

145. Zhao J., Xu L., Liu L. Equipment fault forecasting based on ARMA model. International Conference on Mechatronics and Automation (Harbin, 05 — 08 Aug. 2007). Harbin, 2007. P. 3514 — 3518. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2007.4304129>

146. Zheng K., Li T., Zhang B., Zhang Y., Luo J., Zhou X. Incipient fault feature extraction of rolling bearings using autocorrelation function impulse harmonic to noise ratio index based SVD and Teager energy operator // *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7(11). P. 1117 — 1135. <https://doi.org/10.3390/app7111117>

