

УДК 629.423.3:681.518.54

Діагностування тягового редуктора електропоїзда квадратичним спектром обвідної вібрації

Михалків¹ С. В., Бульба² В. І., Ходаківський¹ А. М.

1 — Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна

2 — Регіональна філія «Південна залізниця» ПАТ «Укрзалізниця», м. Харків, Україна

Анотація. Для отримання достатнього числа діагностичних ознак технічного стану підшипників кочення тягового редуктора електропоїзда запропоновано використовувати спектральні методи, зокрема спектр обвідної і квадратичний спектр обвідної вібрації. Зазначається негативний вплив детермінованих складових, які генеруються зубозачепленням і ускладнюють вибір потрібної частотної смуги для демодуляції, а випадкові складові здійснюють додаткове послаблення імпульсивних компонент, які несуть інформацію про пошкодження підшипників. Описана специфіка отримання обвідної сигналу і варіанти побудови квадратичного спектру обвідної вібрації. Завдяки обчисленню спектрального ексцесу була знайдена несуча підшипникової вібрації і в її околицях визначена частотна смуга для розрахунку квадратичного спектра обвідної вібрації. Установлена й підтверджена висока інформативність квадратичного спектру обвідної вібрації за результатами експериментальних досліджень.

Ключові слова: вібрація, електропоїзд, квадратична обвідна сигналу, спектр, тяговий редуктор

Широкопasmовий спектр вібраційного сигналу зазвичай містить обмаль корисної інформації із наявних пошкоджень підшипників і поступається досконалішому методові спектру обвідної вібрації, який упродовж декількох десятиліть лишається ефективним для діагностування пошкоджень елементів підшипників кочення. Отримання обвідної розпочинається з етапу вузькопasmової фільтрації у тій смугі частот, де наявний резонансний сплеск із подальшою процедурою демодуляції, що посилює імпульси, пов'язані з виникненням пошкоджень. Спектр обвідної виявляє шукану діагностичну інформацію про частоту перекочування роликів відносно власної осі, відносно внутрішніх, зовнішніх кілець [1, 2].

Здійснення амплітудної демодуляції перетворенням Гільберта повертає односторонній спектр із лише додатними частотами до часової форми, де формується аналітичний сигнал, уявна частина якого є перетворенням Гільберта його дійсної частини. Цим забезпечується усунення з виділеного фрагменту сусідніх компонент, що можуть мати значно вищу енергію, зокрема генеруватись зубозачепленням. Отримати раніше подібний зиск аналоговими фільтрами вдавалося зрідка. Математично обвідна сигналу отримується з квадратного кореня квадратичної обвідної і аналогічно спрямлений сигнал береться з квадратного кореня квадратичного сигналу. Процес взяття квадратного кореню поширює наявність сторонніх компонент у вібраційному сигналі, які сприяють приховуванню діагностичних ознак, натомість квадратичний сигнал позбавлений цих компонентів. Спектр спрямленого сигналу наповнений гармоніками, що прямують у нескінченність і маскують діагностичні ознаки технічного стану підшипника кочення, які не можна прибрати низькочастотною фільтрацією. Отже, недоліки спектра обвідної вібрації у вигляді наявних випадкових компонент можна усунути, використовуючи квадратичний спектр обвідної вібрації, який нещодавно обрали стандартом вібраційного діагностування [1]. Квадратичний спектр обвідної SES_x доцільно отримувати зі спектру потужності квадратичної обвідної $x(n)$, ніж із амплітуд результату швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Піднесення до квадрату часової форми вібрації посилює ефекти модуляції і відповідні бічні смуги на спектрі [3]

$$SES_x = |\text{ШПФ}(x(n)^2)|. \quad (1)$$

Натомість квадрат спектральних амплітуд послаблює й без того слабкі бічні смуги й вищі гармоніки частот пошкоджень елементів підшипника і є менш бажаним ніж перший підхід побудови квадратичного спектра обвідної вібрації.

Неабияких зусиль потрібно докласти для обрання найбільш підходящої частотної смуги для здійснення демодуляції, оскільки на практиці ознаки пошкодження приховуються численними складовими різної природи. Зокрема детерміновані складові генеруються зубозачепленням і ускладнюють вибір потрібної частотної смуги для демодуляції. Навіть після їх усунення корисні складові підшипникової вібрації приховуватимуться випадковими складовими, які додатково послаблюють імпульсивність корисних складових. Спочатку для визначення частотної смуги використовувались ударні молотки в тестовому діагностуванні для дослідження власних частотних характеристик підшипників, згодом здійснювався моніторинг за зміною спектра вібрації підшипника, елементи якого оберталися під навантаженням відносно опорного спектра справного підшипника. Найефективнішим способом, що позбавлений трудомісткості та потреби в опорному сигналі справного підшипника є обчислення спектрального ексцесу, що найбільш точно визначає шуканий частотний діапазон для здійснення демодуляції [1, 2].

Реєстрація вібраційного сигналу несправного тягового редуктора електропоїзда ЕР2Т відбувалася протягом експериментальних досліджень у моторвагонному депо на випробувальному стенді цифровим самописцем із частотою дискретизації $f_s = 46$ кГц, де колісна пара розкручувалася до частоти обертання 219 об/хв. Незважаючи на наявність певних періодичних складових у часовій формі сигналу (рис. 1, а) і домінування сильних низькочастотних гармонік зубчастого зачеплення $f_{z_1} = 268$ Гц, $f_{z_2} = 536$ Гц на побудованому ширококутовому спектрі вібрації (рис. 1, б), він має вигляд безперервного й виявлення ознак пошкодження підшипників кочення ускладнено [4]. Це є прямим результатом впливу випадкових складових унаслідок проковзувань у проміжках між контактами пошкодженої зони елемента підшипника. Хоча згадане проковзування становить декілька відсотків періоду пошкодження, цього достатньо для зміни статистичної структури сигналу [1]. Після обрання прийнятної ширини вікна віконного перетворення Фур'є на побудованій кривій спектрального ексцесу з'явився найвищий пік на частоті 7637 Гц (рис. 1 г), що визначає оптимальну несучу частоту й демонструє високу чутливість спектрального ексцесу до сигналів з численним імпульсним наповненням. На рис. 1 в наведений відновлений сигнал фільтром Вінера, який максимізує подібність відфільтрованого компонента до дійсного сигналу з пошкодженням і позбавленого завад [4].

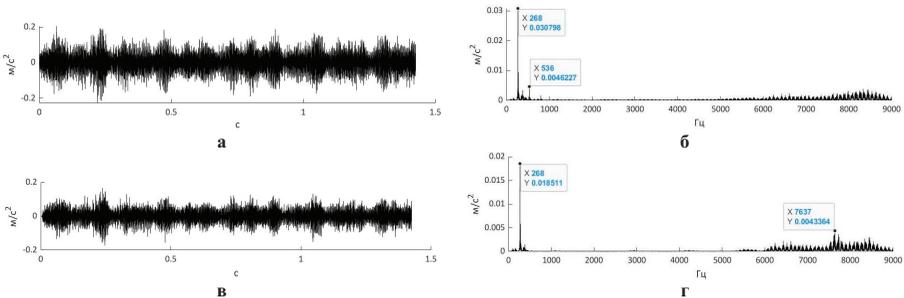


Рис. 1 — Зарезстрована вібраційна реалізація тягового редуктора електропоїзда ЕР2Т
а — часова форма вібрації; б — ширококутовий спектр вібрації; в — часова форма вібрації після фільтра Вінера; г — ширококутовий спектр вібрації після фільтра Вінера

Побудований спектр обвідної вібрації з відрізка, який попередньо виділяється на широкосмуговому спектрі (рис. 1 б) 1/3-октавним фільтром у частотному діапазоні $B = 6,3 — 8$ кГц наведений на рис. 2 а. Установлена єдина сильно виражена частота обертання внутрішнього кільця $f_{об}$ (табл. 1), що може свідчити про перекошування валу.

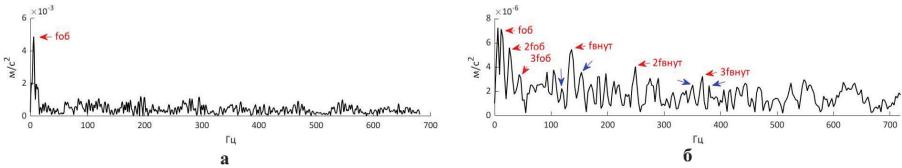


Рис. 2 — Спектри обвідної вібрації тягового редуктора електропоїзда ER2T
а — спектр обвідної вібрації; б — квадратичний спектр обвідної вібрації

Таблиця 1

Частоти перекошування елементів роликового підшипника кочення типу 42520M

Частота обертання внутрішнього кільця $f_{об}$, Гц	Частота перекошування роликів відносно власної осі $f_{г.к.}$, Гц	Частота перекошування роликів відносно зовнішнього кільця $f_{зовн.}$, Гц	Частота перекошування роликів відносно внутрішнього кільця $f_{внут.}$, Гц	Частота обертання сепаратора f_c , Гц
12,35	43,92	90,5	122,6	5,32

Для виділення квадратичного спектра обвідної вібрації за допомогою алгоритму швидкого обчислення куртограми слід визначити ширину частотної смуги за виразом, Гц

$$B_w = f_s/2^n, \quad (2)$$

де $n = 5$ — рівень розкладання [5].

Отже, $B_w = 46000/2^5 = 1438$ Гц, а частотний діапазон $B = 6918 — 8356$ Гц. На квадратичному спектрі обвідної вібрації з'явилася низка гармонік $f_{об}$ і гармоніки перекошування роликів відносно внутрішнього кільця (рис. 2 б). Додатково спостерігається наявність бічних смуг $kf_{внут} \pm kf_{об}$. Згадані риси можуть свідчити про складні пошкодження, які підтвердилися після розбирання й обстеження підшипника передньої кришки тягового редуктора, який мав зруйноване внутрішнє кільце і сильний знос декількох роликів.

Відповідно до отриманих результатів підтверджена здатність квадратичного спектру обвідної вібрації набувати рис часткової дискретності, посилюючи гармоніки й бічні смуги в їх околицях, які є діагностичними ознаками технічного стану елементів підшипників кочення.

Diagnostics of the traction gearboxes of electric trains by the squared envelope spectrum

Myhalkiv S., Bulba V., Hodakivsky A.

Abstract. The spectral methods such as envelope spectrum and squared envelope spectrum techniques were offered for obtaining the sufficient quantity of diagnostic features for the technical state of the traction gearbox bearings of electric trains. The negative impact of the deterministic components produced by the gearmesh was shown, and the deterministic components complicate the selection of proper frequency band for demodulation, and random components cause additional weakening of the impulsiveness that store information about bearing faults. The technique of the extraction of the signal's envelope was described as well as the variants of squared envelope spectrum extraction. Due to the calculation of spectral kurtosis, the carrier of bearing vibration was identified, and the frequency band for the calculation of the squared envelope spectrum was determined in the vicinity of the carrier. A high informative nature of the squared envelope spectrum was established and confirmed by the results of the experimental research.

Keywords: electric trains, spectrum, squared envelope signal, traction gearboxes, vibration

Диагностирование тягового редуктора электропоезда квадратичным спектром огибающей вибрации

Михалків С. В., Бульба В. І., Ходаківський А. М.

Аннотация. Для получения достаточного количества диагностических признаков технического состояния подшипников качения тягового редуктора электропоезда предложено использовать спектральные методы, в частности спектр огибающей и квадратичный спектр огибающей вибрации. Обозначено негативное влияние детерминированных составляющих, которые генерируются зубозацеплением и усложняют выбор нужной частотной полосы для демодуляции, а случайные составляющие осуществляют дополнительное ослабление импульсных составляющих, которые несут информацию о повреждениях подшипников. Описана специфика получения огибающей сигнала и варианты построения квадратичного спектра огибающей вибрации. С помощью расчета спектрального эксцесса была найдена несущая подшипниковой вибрации и определена частотная полоса вокруг нее для расчета квадратичного спектра огибающей вибрации. Установлена и подтверждена высокая информативность квадратичного спектра огибающей вибрации по результатам экспериментальных исследований.

Ключевые слова: вибрация, квадратичная огибающая сигнала, спектр, тяговый редуктор, электропоезд

Список літератури:

- 1 *Abboud D., Elbadaoui M., Smith W. A., Randall R. B. Advanced bearing diagnostics: A comparative study of two powerful approaches.* Mechanical Systems and Signal Processing. 2019;114:604—627. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.05.011>
- 2 *Randall R. B., Antoni J. Rolling element bearing diagnostics — A tutorial.* Mechanical Systems and Signal Processing. 2011;25(2):485—520. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.07.017>
- 3 *Li H., Zhang X., Xu F. Experimental investigation on centrifugal compressor blade crack classification using the squared envelope spectrum.* Sensors. 2013;13(9):12548—12563. <https://doi.org/10.3390/s130912548>
- 4 *Михалків С. В., Фалендиш А. П., Бульба В. І., Ходаківський А. М. Застосування спектрального эксцесу для вібродіагностування тягового редуктора електропоезда.* Технічні науки та технології. 2019;1(15):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)
- 5 *Antoni J. Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults.* Mechanical Systems and Signal Processing. 2007;21(1):108—124. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2005.12.002>