

УДК 629.423.3:681.518.54

ВИЗНАЧЕННЯ ІНДИКАТОРІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КОЛІСНО-РЕДУКТОРНИХ БЛОКІВ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ

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 проведення вібромоніторингу механічних вузлів колісно-редукторних блоків електропоїздів запропоновано визначити скалярні індикатори СКЗ, крест-фактор, ексцес часової форми вібрації сигналів у широкочастотному діапазоні 0 — 9 кГц, а також у низько-, середньо-, високочастотному діапазоні 0 — 1 кГц і 7 — 9 кГц, які попередньо виділяються за допомогою дискретного вейвлет-розкладання вейвлетом Добеші 4-го порядку з відновленням апроксимуючих коефіцієнтів на 5 рівні розкладання і деталізованих коефіцієнтів на 1 рівні розкладання. Виявлена висока чутливість індикаторів до імпульсного характеру вібраційних реалізацій, що у певних випадках сприяє викривленню результатів моніторингу. Додатково запропоновано обчислювати нові індикатори TALAFA, THIKAT для визначення порогу, що сигналізує про заборону подальшої експлуатації.*

***Ключові слова:** вібрація, колісно-редукторний блок, індикатор, вейвлет-розклад, електропоїзд*

Звичний вібраційний моніторинг обертального обладнання у промисловості може провадитись безперервно й потребує залучення навчених спеціалістів для ухвалення експертних рішень щодо поточного технічного стану. Моніторинг складних обертальних машин з багатьма підшипниками може здійснюватись великим числом вібраційних датчиків і супроводжується значними об'ємами інформації, що є вкрай обтяжливим. Це спонукало поширенню простішого підходу до вібраційного моніторингу зі значно меншим числом вібраційних датчиків із додатковим упровадженням температурного моніторингу, що компенсує прибрані датчики, простіший в оцінюванні результатів і є менш точним [1]. Були запропоновані певні індикатори для здійснення «швидкої» діагностики з абсолютним порогом, яка не потребує результатів попередніх замірів для побудови трендів. Також стверджується, що ексцес може виявляти пошкоджений підшипник за допомогою будь-якого значення, вищого за 3. Є очевидним, що подібні величини є занадто спрощеними для того, щоб запропонувати «швидку» діагностику з багатьох причин. Поріг має обиратись для кожного конкретного випадку й може встановлюватись для максимального рівня еталонного сигналу також число порогів може бути більше одного для різноманітних цілей [2].

Умови експлуатації та наявне покоління моторвагонного рухомого складу (МВРС) на залізницях України унеможливають упровадження безперервного моніторингу механічних вузлів колісно-редукторних блоків (КРБ), що працюють у важких умовах і впливають на безпеку руху. Лише на технічних обслуговуваннях (ТО) або непланових чи потокових ремонтах (ПР) можливо здійснювати вібраційні виміри згаданих вузлів.

У вібраційному моніторингу останніми десятиріччями для спостереження набуло поширення використання індикаторів, які класифікуються за двома головними категоріями [3]:

— скалярні індикатори, які слідкують за розвитком параметру, що прив'язаний до амплітуди вібраційного сигналу у часовому просторі;

— спектральні індикатори, що автоматично слідкують за розвитком пошкодження за амплітудними й частотними складовими.

Скалярний індикатор, що виділяється з часової форми надає скалярні числа, що не завжди є суттєвими, проте зміна у часі цих значень виявляє рівень посилення пошкодження. Зміна у часі скалярного індикатора важливіша за його значення. Скалярні індикатори, які визначені завдяки сигналам у часовій формі є фізичними параметрами спеціально адаптовані до розпізнавання походження вібрації для ідентифікації її природи та рівня небезпеки

пошкодження володіють здатністю визначати зону пошкодження, допомагають ухвалювати стратегічні рішення, пов'язані з миттєвими замінами підшипника. Визначення скалярного індикатора у часовому просторі потребує вибору:

- кінематичного параметра, що презентує вібраційний рух (прискорення, швидкість, переміщення) відповідно до частотного вмісту вібраційного сигналу;
- параметра, що визначає амплітуду сигналу (середньоквадратичне значення (СКЗ), крест-фактор, ексцес);
- частотної смуги в якій фіксований параметр зазнаватиме оцінювання.

Протягом експериментальних досліджень у моторвагонному депо на ПР-1 відбувалося розкручування КРБ електропоїзда на оглядовому стійлі до частоти обертання 100 об/хв і здійснювалося прослуховування шумів редукторів стетоскопом. КРБ з-під електропоїзда викочувались на підставі підозр у наявності пошкоджень в редукторі, які ґрунтуються на особистому досвіді діагноста. Далі реєстрація вібрації цифровим самописцем тривала на випробувальному стенді, куди встановлювались згадані КРБ і розкручувались до 218 об/хв. Після розбирання двох КРБ було виявлено брак мастила в обох редукторах, відкол зуба шестірні і бочкоподібний знос роликів підшипника передньої кришки в першому редукторі й повне руйнування внутрішнього кільця підшипника передньої кришки другого редуктора. Додатково для підрахунку скалярних індикаторів на стенд здійснювався монтаж справного редуктора без мастила, який обирався як еталонний.

Зареєстровані вібраційні сигнали (рис. 1) є суперпозицією резонансної вібрації, що збуджується внаслідок ударів, спричинених наявними пошкодженнями і частотою зубозачеплення [4].

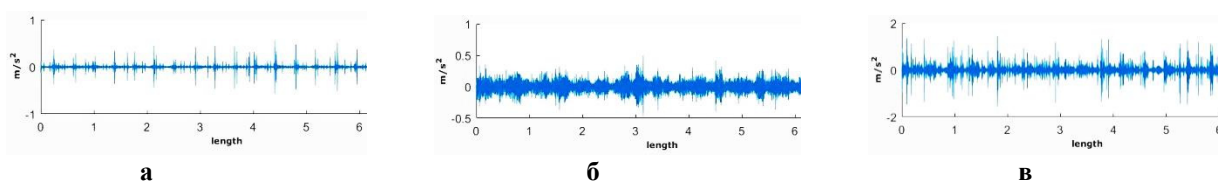


Рис. 1. Зареєстровані вібраційні сигнали редукторів

а — сигнал справного редуктора без мастила; б — сигнал редуктора з несправним підшипником без мастила; в — сигнал несправного редуктора й підшипника без мастила

Для розділення редукторної і підшипникової вібрації аналізувалися широкосмугові спектри (рис. 2 а, г, е) де визначалися ширини спектральних сплесків. Застосовувалось дискретне вейвлет-розкладання вейвлетом Добеші 4-го порядку. Відновлювались апроксимуючі коефіцієнти на 5 рівні розкладання і деталізовані коефіцієнти на 1 рівні розкладання з подальшою побудовою спектрів вібрації у діапазонах 0 — 1 кГц (рис. 2 б, г, е) і 7 — 9 кГц (рис. 2 в, д, ж). Зростання енергетичного рівня у низько- та середньочастотному діапазонах свідчить про наявність складових зубозачеплення, модуляційних бічних смуг, ударів короткої тривалості тощо. Високочастотний діапазон наповнений переважаючими випадковими складовими, що прийнято ототожнювати з вібрацією підшипників.

На рис. 3 наведені розраховані величини найпоширенішого індикатора СКЗ, який не дозволяє виявляти пошкодження на ранній стадії оскільки це значення суттєво не змінюється доти поки рівень не досягне передаварійного стану. Найнижчий рівень СКЗ має справний редуктор часова форма сигналу якого наповнена численними імпульсами внаслідок браку мастила (рис. 1 а). У широкочастотному діапазоні найвище значення СКЗ у несправного підшипника й редуктора, у вузькосмугових частотах однозначної переваги СКЗ у цієї несправності нема.

Далі визначались величини крест-фактору, ексцесу та двох нових індикаторів із назвами TALAF, ТНІКАТ (рис. 4), які вперше були запропоновані в роботі [3], базуючись на результатах моделювання

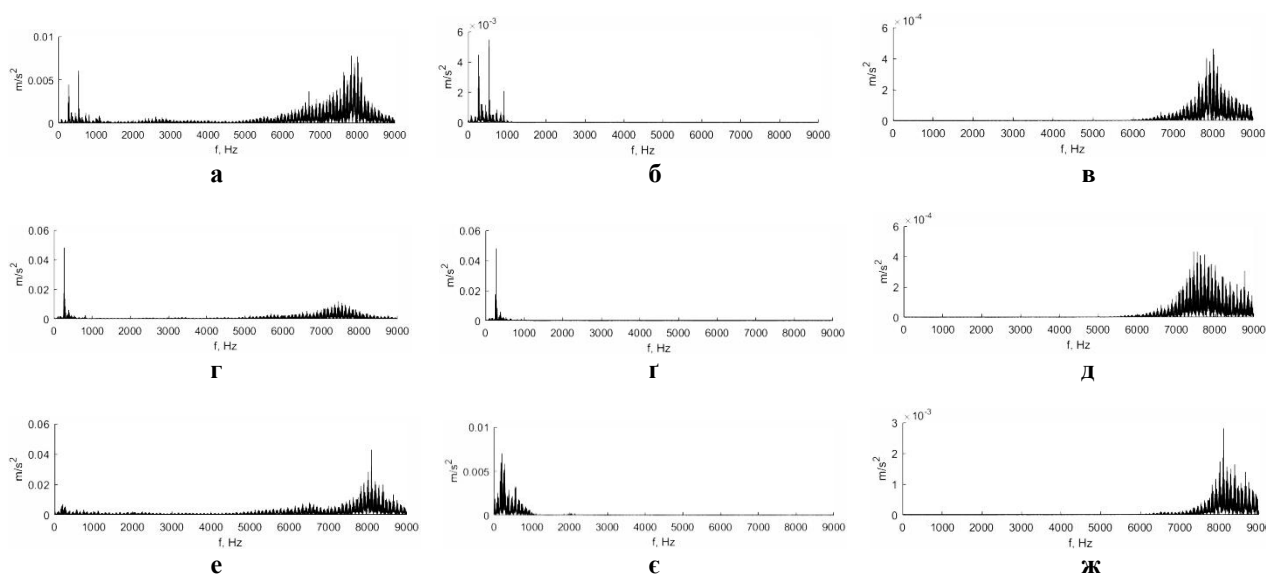


Рис. 2. Спектри вібрації редукторів

а — широкосмуговий спектр вібрації справного редуктора; б — спектр вібрації справного редуктора в діапазоні 0 — 1 кГц; в — спектр вібрації справного редуктора в діапазоні 7 — 9 кГц; г — широкосмуговий спектр вібрації редуктора з несправним підшипником; з — спектр вібрації редуктора з несправним підшипником у діапазоні 0 — 1 кГц; д — спектр вібрації редуктора з несправним підшипником у діапазоні 7 — 9 кГц; е — широкосмуговий спектр вібрації несправного редуктора й підшипника у діапазоні 0 — 1 кГц; ж — спектр вібрації несправного редуктора й підшипника у діапазоні 7 — 8 кГц



Рис. 3. СКЗ редукторів із різним технічним станом і різних частотних діапазонах

$$TALAF = \log\left[Ku + \frac{RMS}{RMS_0}\right] \quad (1)$$

де Ku — ексцес (четвертий центральний момент вібрації);
 RMS — поточне значення СКЗ, m/c^2 ;
 RMS_0 — значення СКЗ для справного редуктора, m/c^2 ;

$$THIKAT = \log\left[(Ku)^{CF} + \left(\frac{RMS}{RMS_0}\right)^{Peak}\right] \quad (2)$$

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

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

Крест-фактор та ексцес менше залежать від рівня сигналу проте є чутливими до імпульсного характеру вібраційних реалізацій і можуть забезпечити ранішнє виявлення суттєвих змін у вібраційних сигналах, які пов'язані з появою імпульсних складових. У

широкому частотному діапазоні та у діапазонах 0 — 1 кГц, 7 — 9 кГц найвищі значення демонструє справний редуктор без мастила, а найнижчі — редуктор із руйнуванням підшипника. Досліджено [3], що певний спад TALAF притаманний розвинутому пошкодженню, а стрімке зростання сигналізує про передаварійний стан. Отримані результати поведінки нового індикатора є достовірними лише для двох видів несправності редуктора. Натомість ТНІКАТ покликаний суттєво доповнювати TALAF інформацією, яка дозволяє діагностові впевнено ухвалювати рішення про припинення експлуатації обладнання, яке вже має пошкодження. Протягом зростання кривої ТНІКАТ діагност не повинен вживати жодних превентивних заходів аж доти, поки не з'явиться негативний схил, що сигналізуватиме про аварійний стан. Головна перевага у використанні ТНІКАТ замість ексцесу полягає в тому, що останній демонструє високі значення на ранішніх стадіях розвитку пошкодження, а в технічно справному редукторі без мастила (рис. 1 а) величина ексцесу є найвищою з-поміж аналогічних значень для інших двох редукторів зі зруйнованою шестірнею і підшипником (рис. 1 б, в), що надає повністю викривлені результати і ймовірність ухвалення хибних рішень є дуже високою.

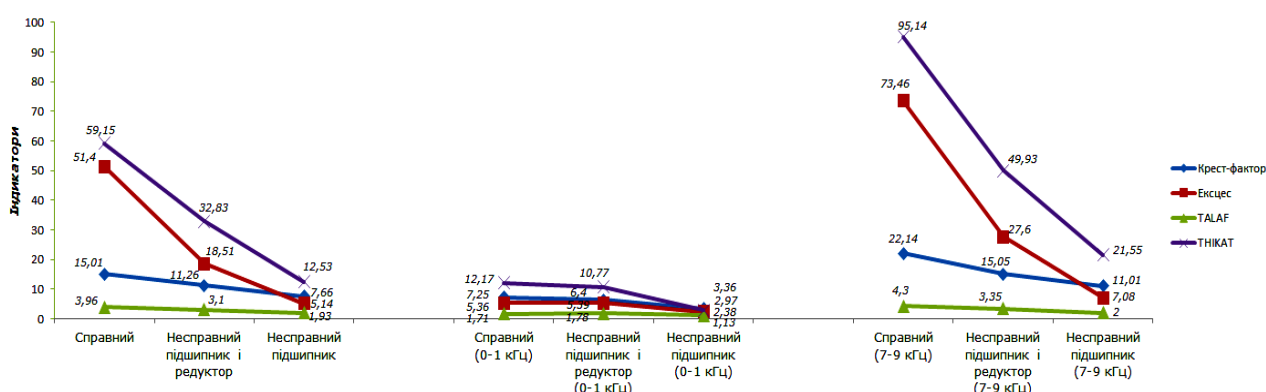


Рис. 4. Розраховані величини крест-фактору, ексцесу, TALAF, ТНІКАТ у різних частотних діапазонах

Отже, специфіка ТО й ПР електропоїздів не дозволяє провадити безперервний вібраційний моніторинг, проте такі дії можна вчиняти з відповідною періодичністю їх проведення згідно з правилами ремонту. Відповідно до згаданих правил відсутні будь-які норми граничної вібрації, які б забороняли подальшу експлуатацію. Тому побудова трендів відомих індикаторів на відміну від нового індикатора ТНІКАТ дозволяє лише аналізувати їх загальну поведінку без визначення конкретного порогу початку катастрофічної зміни технічного стану, ба більше, крест-фактор і ексцес для справного редуктора без мастила перевищують аналогічні значення для несправних редукторів, а СКЗ вібрації для справного редуктора без мастила є найнижчим, що разом призводить до суперечності й вводить діагноста в оману.

Список літератури:

- 1 Nembhard A.D., Sinha J.K., Pinkerton A.J., Elbhah K. Condition monitoring of rotating machines using vibration and bearing temperature measurements. In: Dalpiaz G. et al. (eds) Advances in condition monitoring of machinery in non-stationary operations. Lecture notes in mechanical engineering. 2014; Springer, Berlin, Heidelberg: 159 — 169. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39348-8_13
- 2 Galar D., Sandborn P., Kumar U., Johansson CA. SMART: Integrating Human Safety Risk Assessment with Asset Integrity. In: Dalpiaz G. et al. (eds) Advances in condition monitoring of machinery in non-stationary operations. Lecture notes in mechanical engineering. 2014; Springer, Berlin, Heidelberg: 37 — 59. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39348-8_3
- 3 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;11(3):36 — 45
- 4 W. Wang. Early detection of gear tooth cracking using the resonance demodulation technique. Mechanical Systems and Signal Processing. 2001;15(5):887—903. <https://doi.org/10.1006/mssp.2001.1416>.