

Сергій Михалків¹, Денис Жалкін², Сергій Жалкін³, Василь Равлюк⁴

¹Доцент, кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0425-6295>

²Професор, кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3450-160X>

³Професор, кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0089-3489>

⁴Доцент, кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4818-9482>

¹Автор, відповідальний за листування: svm_m@kart.edu.ua

ВИЗНАЧЕННЯ ІНФОРМАТИВНИХ СКЛАДОВИХ МЕТОДОМ ШВИДКОЇ ЕКСЦЕСОГРАМИ ДЛЯ ВІБРОДІАГНОСТУВАННЯ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

У статті розглядаються властивості методу швидкої ексцесограми для вібродіагностування підшипників кочення електричного двигуна. Зважаючи на недоліки класичних методів вібродіагностування у часовому поданні, для вибору прийнятної частотної смуги для демодуляції та побудови спектру обвідної вібрації запропоновано використовувати метод швидкої ексцесограми, яка розраховує спектральний ексцес сигналу та визначає центральну частоту та ширину частотної смуги. Упродовж експериментальних досліджень реєструвалась вібрація підшипника кочення електричного двигуна мотор-компресора електровоза ЧС7 та будувався широкосмуговий спектр вібрації. Для отримання спектрів обвідної вібрації на широкосмуговому спектрі в діапазоні 0 – 9 кГц за допомогою емпіричного підходу обирались відповідні чотири частотні смуги з резонансними сплесками. На жодному з побудованих спектрів обвідної вібрації відповідних інформативних складових серед безлічі випадкових компонентів виявлено не було. Застосування методу швидкої ексцесограми дозволило обрати відповідну частотну смугу з найвищим ексцесом для здійснення демодуляції. Отриманий спектр обвідної вібрації містив дуже виражені три гармоніки частоти перекочування роликів відносно зовнішнього кільця, що відповідає діагностичній ознаці несправного зовнішнього кільця підшипника кочення.

Ключові слова: амплітуда, вібрація, двигун, діагностування, діапазон, ексцес, обвідна, підшипник, спектр, частота

Вступ. У різноманітних галузях промисловості механічне обладнання застосовує підшипники кочення, елементи яких можуть зазнавати пошкоджень і в разі можливої відмови дуже впливати на вартість ремонту встаткування, яка значно вища за вартість заміни підшипників. Зокрема в морській галузі вихід з ладу електричних двигунів із причин відмови підшипників кочення становить 37 % [1].

Також від технічного стану підшипників кочення буксових вузлів сучасного високошвидкісного рухомого складу залежить його безвідмовна експлуатація впродовж тривалого часу. Згідно з [2] відмови буксових вузлів високошвидкісних поїздів становлять 22 % серед інших відмов екіпажної частини.

Здебільшого відмови в підшипниках трапляються передчасно й викликані корозією, тріщинами, раковинами, браком змащування, потраплянням сторонніх компонентів між кільцями, надмірними навантаженнями, непередбачуваними наслідками внаслідок теплового впливу. Перелічені причини відмов упродовж тривалого часу актуалізують розробку ефективних діагностичних заходів, зокрема методів вібраційного діагностування.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Вібраційні сигнали роликів підшипників кочення з пошкодженнями містять багато завад та сторонніх компонентів, що ускладнює отримання корисної інформації для ранішнього діагностування технічного стану. Загальноживані методи вібродіагностування мають спільну властивість, яка полягає в потребі попереднього вибору частотної смуги в якій проявляються діагностичні ознаки наявних пошкоджень.

Для подолання недоліків спектральної щільності потужності Двайером був розроблений метод ексцесу в частотному поданні, який розраховує ексцес амплітуд спектральних складових, визначаючи вплив гармонік, які внаслідок випадкових коливань зазнають розмивання [3].

Натхнений цим методом, Антоні розробив метод спектрального ексцесу, який обчислює ексцес обвідної відфільтрованих сигналів з реалізацією адаптивного процесу смугової фільтрації, що зрештою дозволило йому розробити метод ексцесограми, яка базується на віконному перетворенні Фур'є (ВПФ) та спектральному ексцесі [4, 5]. Отже, спектральний ексцес володіє здатністю виявляти й локалізувати наявність короткотривалих складових сигналу. Однак для виявлення вузькосмугового короткотривалого фрагменту в шумі слід зважати на залежність спектрального ексцесу від частоти й частотної роздільності [6].

У комерційних діагностичних системах алгоритми обробки сигналів передбачають виділення вузькочастотних діапазонів для подальшого отримання обвідної, однак подібний підхід не здатен розв'язати проблему оптимального вибору центральної частоти й ширини бажаної частотної смуги оскільки ці два параметри невідомі навіть априорі й обираються емпірично, а сильні завади та інші компоненти сигналу, які з'являються впродовж роботи електричного завдання, поглиблюють згадану проблему ще більше [7].

Мета і завдання дослідження. Метою статті є визначення центральної частоти та ширини частотної смуги вібраційного сигналу підшипника кочення для пошуку діагностичних ознак його технічного стану методом швидкої ексцесограми.

Завдання дослідження є такими:

обґрунтувати переваги методу швидкої ексцесограми;

здійснити вібродіагностування підшипника кочення електричного двигуна мотор-компресора електровоза ЧС7.

Матеріали та методи дослідження. Основною ідеєю вібродіагностування є виявлення характерних частот, які носять квазіперіодичний характер і властиві пошкодженням елементів підшипників кочення. Зважаючи на імпульсну природу, навіть слабка вібрація внаслідок раннього пошкодження елементів підшипника має широкосмуговий характер. З'являються несучі, які моделюються слабкими вібраційними складовими, й вібрація з ознаками пошкодження може бути демодульована в прийнятній частотній смузі з подальшим виділенням обвідної та одночасною ізоляцією завад.

Методика вібродіагностування складається з таких етапів:

реестрація вібрації. Аналоговий вібраційний сигнал рееструється вібраційним датчиком на підшипниковому вузлі електричного двигуна з подальшим набуттям дискретної форми завдяки аналого-цифровому перетворювачу;

смугова фільтрація. Цифрова смугова фільтрація залучається до дискретної вібраційної послідовності в прийнятній резонансній частотній смузі, що дозволяє позбутись інших складових поза межами обраної смуги та підвищити видимість слабких імпульсних компонентів у межах обраної смуги;

виділення обвідної. Обвідна відфільтрованої вібраційної смуги виділяється завдяки перетворенню Гілберта;

спектр обвідної. Виділена обвідна перетворюється на спектр обвідної в якому можливо виявити частотні складові, які властиві пошкодженням на ранніх стадіях розвитку [8].

Найскладнішим є другий етап вібродіагностування, оскільки вібраційні сигнали підшипників кочення містять шум із невідомим відношенням сигнал/шум (ВСШ). Це відношення визначає залежність потужності сигналу до потужності шуму й може оцінювати рівень завод. Подібний шум суттєво приховує компоненти вібраційного сигналу, які містять інформацію про наявні пошкодження в механічних вузлах. ВСШ зазвичай не піддається контролю, тому періодична імпульсна компонента, що містить інформацію про пошкодження, прихована в шумі та її ефективне виділення є ускладненим. Частина діагностичних методів здатна визначати наявність періодичних імпульсних компонентів у часовій формі вібрації за результатами обчислення коефіцієнта ексцесу з подальшим порівнянням отриманого значення з пороговим значенням, яке дорівнює трьом [9]. Якщо обчислене значення зареєстрованого сигналу менше або дорівнює трьом, то періодична імпульсна компонента відсутня, а значить відсутнє й пошкодження. Однак задеклароване припущення позбавлене будь-яких доказів, які спираються на відповідну теорію.

Короткотривалі імпульсні складові часової форми вібрації підшипників у частотному просторі розповсюджуються вздовж широкої частотної смуги, а збудження з найвищою амплітудою фіксується навкруги резонансного вузькосмугового діапазону. Здебільшого періодичні короткотривалі складові в зареєстрованих вібраційних сигналах підшипників кочення заховані в шумі у відповідних смугах усього частотного діапазону.

Антоні запропонував більш досконалий метод – швидку ексцесограму, яка розглядає тільки обрані частотні смуги для побудови ексцесограми та володіє коротшою тривалістю обчислення [10]. Швидка ексцесограма розраховує спектральний ексцес сигналу на $(f, \Delta f)$ площині. Частота f і частотна роздільність Δf є ключовими для визначення амплітуди спектрального ексцесу, а пошук їх найкращої комбінації дозволяє отримати максимальний ексцес, що й визначає концепцію швидкої ексцесограми. Цей метод для обробки сигналу залучає 1/3-бінарне дерево фільтрів із подальшим конструюванням деревоподібного смугового фільтру. Цей процес складається з таких кроків:

Крок 1. Відбувається поділ спектральних меж. Зареєстрований сигнал знаходиться на нульовому рівні в частотній смузі $\Delta f \in [0, F_s/2]$, де F_s – частота дискретизації. Є дві схеми поділу частотних смуг на цьому кроці:

поділ рівня 0 на дві частини: низьку та високу частоту й отримання рівня 1. Частотні смуги двох частин перебувають у діапазонах $[0, F_s/4]$ та $[F_s/4, F_s/2]$;

поділ рівня 0 на три частини: низьку, середню та високу частоти з формуванням рівня 1,6. Три частотні смуги перебувають у діапазонах $[0, F_s/6]$, $[F_s/6, F_s/3]$ і $[F_s/3, F_s/2]$, що є еквівалентом поділу частотної смуги $[0, F_s/2]$ на три частини.

Дві частини рівня 1 використовують для подальшого поділу. Згідно з першою схемою поділу чотири частини, а саме: низька-низька частота, низька-висока частота, висока-низька частота, висока-висока частота належать рівню 2. Згідно з другою схемою шість частин, а саме: низька-низька частота, низька-середня частота, низька-висока частота, висока-низька частота, висока-середня частота та висока-висока частота належать рівню 2,6. Повторення згаданих кроків розкладань призведе до досягнення межі найнижчої частотної компоненти, що відповідає рівню k $[0, F_s/2^{k+1}]$. Насамкінець отримують відповідну конструкцію з частотним поділом – швидку ексцесограму, що зображена на рис. 1.

Крок 2. Здійснюється відновлення сигналу. Після поділу сигналу в частотному поданні згідно з кроком 1, слід здійснити зворотнє перетворення кожної частотної компоненти для отримання сигналу в часовому поданні. Цей метод залучає виконне перетворення Фур'є та фільтр із кінцевою імпульсною характеристикою (КИХ) для розкладання та фільтрації сигналів.



Рис. 1. Частотно-смуговий розподіл із застосуванням 1/3-бінарного дерева фільтрів

Залучають межі двох частотних смуг на рівні 1 для конструювання двох фільтрів: низькочастотного $h_0(n)$ та високочастотного $h_1(n)$

$$\begin{cases} h_0(n) = h(n)e^{\frac{j\pi n}{4}} = h(n) \left[\cos\left(\frac{\pi n}{4}\right) + j \sin\left(\frac{\pi n}{4}\right) \right] \\ h_1(n) = h(n)e^{\frac{j3\pi n}{4}} = h(n) \left[\cos\left(\frac{3\pi n}{4}\right) + j \sin\left(\frac{3\pi n}{4}\right) \right] \end{cases} \quad (1)$$

де $h(n)$ — низькочастотний КИХ фільтр з частотою зрізу $f_c = 1/8 + \varepsilon$. На цьому етапі сигнал зазнає фільтрації сконструйованими низько- й високочастотними фільтрами для отримання високочастотного та низькочастотного сигналів.

Цей метод використовує три групи меж у частотному поданні на рівні 1,6 для конструювання трьох фільтрів: низькочастотний фільтр, смуговий фільтр, високочастотний фільтр. Насамкінець отримують низькочастотний сигнал, високочастотний сигнал і спектр усередині високочастотного й низькочастотного сигналів. За аналогічним сценарієм із використанням чотирьох меж у частотному поданні отримують рівень 2 для конструювання фільтра й отримання чотирьох компонент сигналу.

Крок 3. Побудова швидкої ексцесограми. Слід розрахувати кожну компоненту згідно з кроком 2 й заповнити відповідні позиції на схемі рис. 1 із залученням різних кольорів для відображення відповідних значень ексцесу.

Крок 4. Пошук відповідної компоненти. Слід відшукати компоненту, яка відповідає максимальному значенню ексцесу та здійснити її демодуляцію з подальшою побудовою спектру обвідної вібрації [11].

Упродовж експериментальних досліджень на першому етапі вібродіагностування здійснювалась реєстрація цифровим самописцем вібраційного сигналу підшипникового вузла електродвигуна мотор-компресора електровоза ЧС7 п'єзоелектричним віброакселерометром у частотному діапазоні 0 – 9 кГц (рис. 2, 3). Частота обертання валу становила 7 Гц.

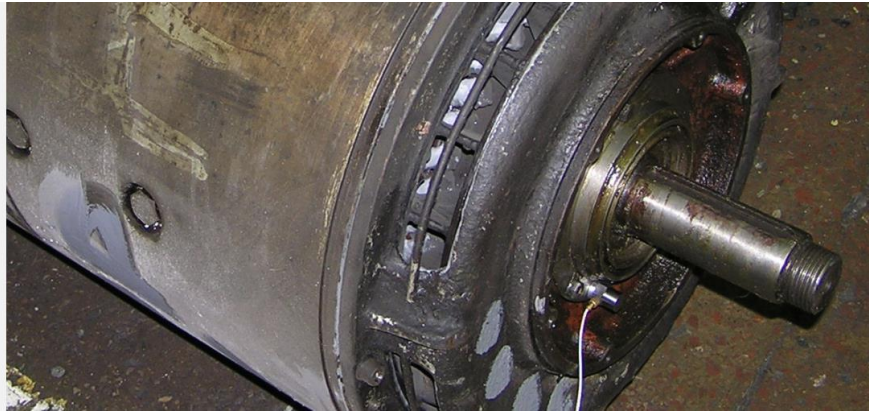


Рис. 2. Електричний двигун мотор-компресора електровоза ЧС7

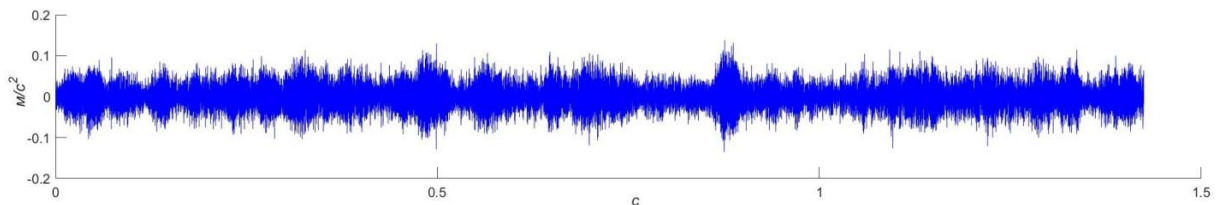


Рис. 3. Часова форма зареєстрованого вібраційного сигналу підшипника кочення

Загальноживаним методом, який демонструє дієвість упродовж багатьох років, є аналіз обвідної вібрації за результатом резонансної демодуляції [8]. Процедурі демодуляції передують побудова та аналіз широкосмугового спектру вібрації (рис. 4).

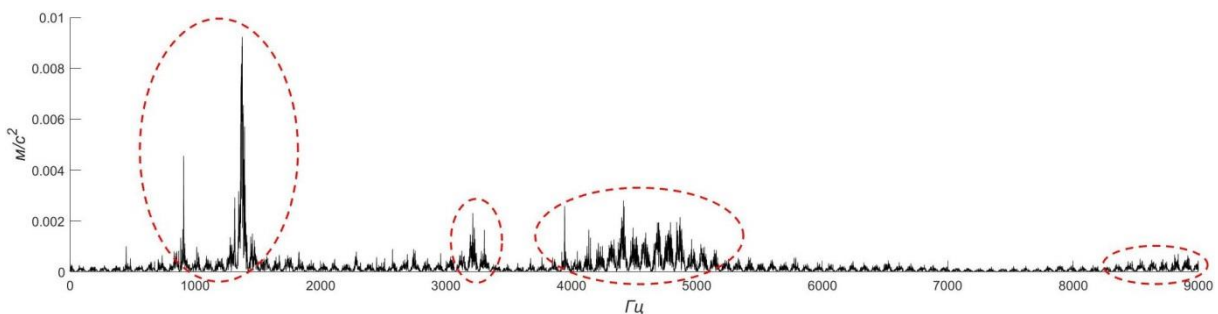


Рис. 4. Широкосмуговий спектр вібрації підшипника кочення

Відомо, що обвідна вібрації демонструє високу чутливість до наявних широкосмугових завад, які спотворюють кінцевий результат діагностування. Частково уникнути подібної несприятливої обставини дозволяє попередній інтуїтивний вибір прийнятної частотної смуги всередині якої наявні резонансні сплески [8]. На рис. 4 відокремлені чотири частотні смуги з відповідними сплесками.

Чотири спектри обвідної вібрації у зазначених діапазонах наведені на рис. 5.

На кожному побудованому спектрі обвідної вібрації наявна велика кількість гармонік (червоні позначки), однак розраховані за класичними виразами [12 – 15] характерні комбінації

гармонік, які властиві відповідним пошкодженням елементів підшипника кочення відсутні. Окрема п'ята роторна гармоніка $5 \cdot f_{об}$ (рис. 5 б), перша $f_{зобн}$ й третя $3 \cdot f_{зобн}$ гармоніки частоти перекочування роликів відносно зовнішнього кільця (рис. 5 б, в) не дозволяє встановити вид пошкодження з високою достовірністю.

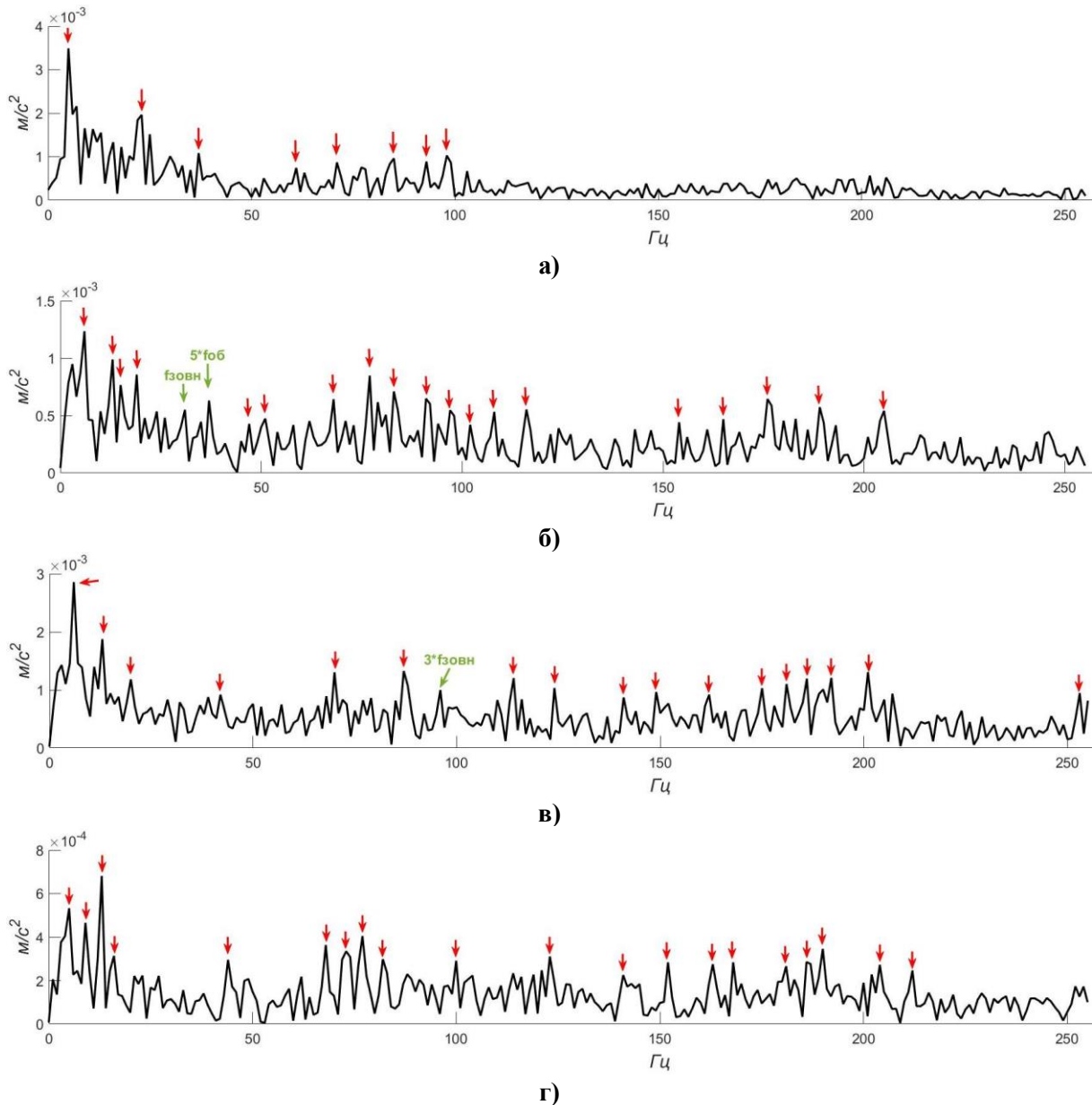


Рис. 5. Спектри обвідної вібрації:

а) у діапазоні 0,9 – 1,5 кГц, б) у діапазоні 3,0 – 3,5 кГц, в) у діапазоні 4,0 – 4,5 кГц, г) у діапазоні 8,4 – 9,0 кГц

Результатом реалізації методу швидкої ексцесограми став розрахунок центральної частоти $f_c = 120$ Гц, ширини частотної смуги $B_w = 240$ Гц у якій ексцес досяг максимального значення $K_{max} = 4,7$ (рис. 6).

В отриманій частотній смугі, де ексцес досяг найвищого значення, відбувалась демодуляція з подальшою побудовою спектру обвідної вібрації (рис. 7). Згідно з [7], для ефективного

вібродіагностування підшипників кочення достатньо виявити на спектрі обвідної вібрації до трьох гармонік, які відповідають ознаці пошкодження елементів підшипника. Незважаючи на складність отримання послідовності трьох гармонік, які можуть швидко спадати аж до рівня завад, вдалося виділити комбінацію з трьох гармонік частоти перекочування роликів відносно зовнішнього кільця: $f_{\text{зовн}} = 31$ Гц, $2 \cdot f_{\text{зовн}} = 63$ Гц, $3 \cdot f_{\text{зовн}} = 94$ Гц. Подібна комбінація є діагностичною ознакою пошкодження зовнішнього кільця і є достатньою для реалізації ефективного вібродіагностування.

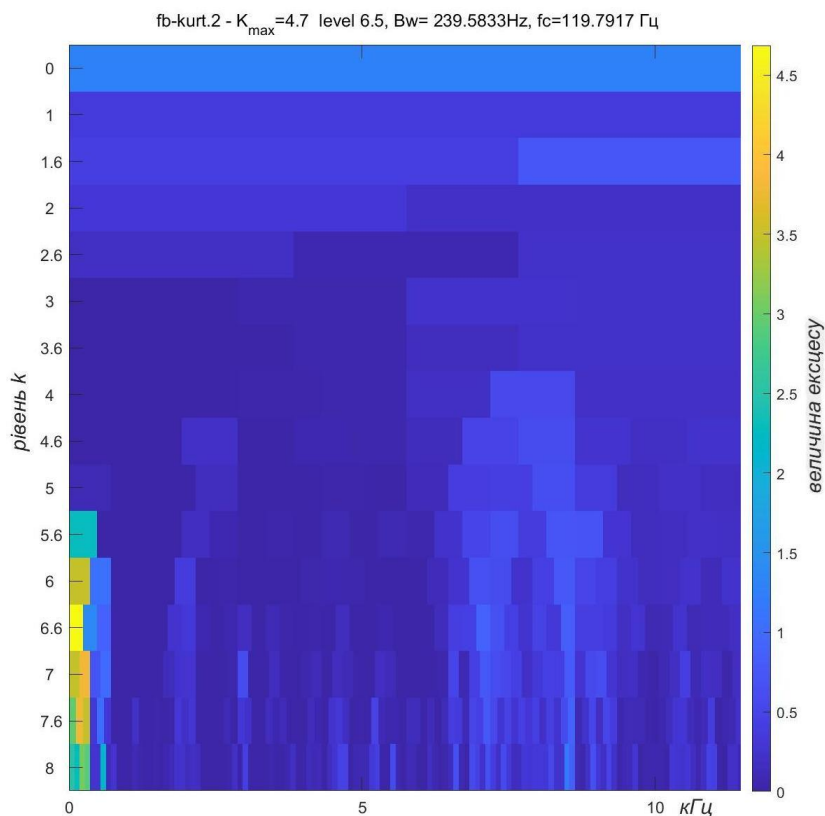


Рис. 6. Швидка ексцесограма зареєстрованої вібрації підшипника кочення

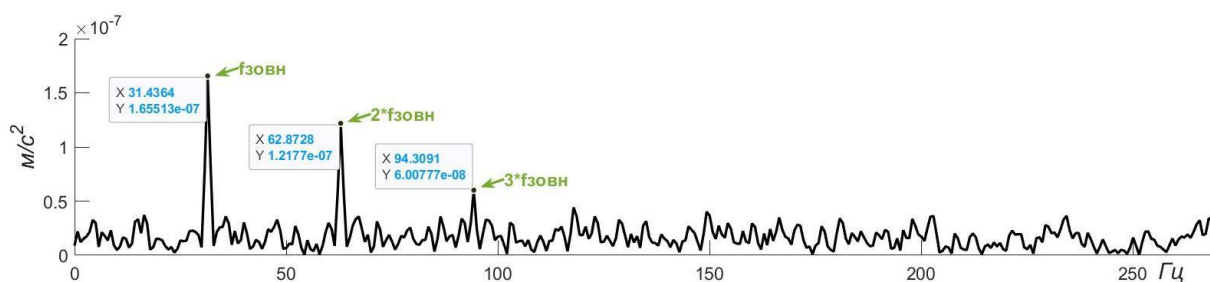


Рис. 7. Спектр обвідної вібрації у діапазоні 0 – 240 Гц

Висновки. Метод швидкої ексцесограми відкидає потребу в апріорних знаннях стосовно об'єкта діагностування, забезпечуючи швидкий вибір оптимальних параметрів фільтру та використання спектрального ексцесу для пошуку короткотривалих імпульсів, а також дозволяє усувати завади завдяки розрахунку центральної частоти й ширини частотної смуги.

Результати вібродіагностування роликів підшипника кочення з використанням емпіричного підходу до вибору частотних смуг для подальшої демодуляції виявились незадовільними. Метод швидкої ексцесограми згідно з найвищим значенням ексцесу розрахував відповідну частотну смугу

в діапазоні 0 – 240 Гц із центральною частотою 120 Гц для наступної побудови спектру обвідної вібрації, де зафіксована діагностична ознака пошкодження зовнішнього кільця підшипника кочення у вигляді послідовності трьох відповідних гармонік.

ЛІТЕРАТУРА

1. Osorio Santander E. J., Silva Neto S. F., Vaz L. A., Monteiro U. A. Using spectral kurtosis for selection of the frequency bandwidth containing the fault signature in rolling bearings. *Marine Systems & Ocean Technology*. 2020. Vol. 15(4). P. 243 – 252. <https://doi.org/10.1007/s40868-020-00084-2>
2. Rongye L., Zhiwen L., Yulin J. Instantaneous frequency estimation for wheelset bearings weak fault signals using second-order synchrosqueezing S-transform with optimally weighted sliding window. *ISA Transactions*. 2021. Vol. 115. P. 218 – 233. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.01.010>
3. Dwyer R. Detection of non-Gaussian signals by frequency domain Kurtosis estimation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1983. P. 607 – 610.
4. Antoni J. The spectral kurtosis: a useful tool for characterising non-stationary signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20(2). P. 282 – 307. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.09.001>
5. 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>
6. Ren Y., Li W., Zhang B., Zhu Z., Jiang F. Fault diagnosis of rolling bearings based on improved kurtogram in varying speed condition. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9(6). P. 1157. <https://doi.org/10.3390/app9061157>
7. Barszcz T., Jabł owski A. A novel method for the optimal band selection for vibration signal demodulation and comparison with the Kurtogram. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2011. Vol. 25(1). P. 431 – 451. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.05.018>
8. Guo Y., Na J., Li B., Fung R-F. Envelope extraction based dimension reduction for independent component analysis in fault diagnosis of rolling element bearing. *Journal of Sound and Vibration*. 2014. Vol. 333(13). P. 2983 – 2994. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2014.02.038>
9. 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>
10. Antoni J. Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2007. Vol. 21(1). P. 108 – 124. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.12.002>
11. Xu Y., Zhang K., Ma C., Cui L., Tian W. Adaptive Kurtogram and its applications in rolling bearing fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol. 130. P. 87 – 107. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.05.003>
12. Gupta P., Pradhan M. K. Fault detection analysis in rolling element bearing: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2017. Vol. 4(2). P. 2085 – 2094. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.054>
13. Jena D. P., Panigrahi S. N. Precise measurement of defect width in tapered roller bearing using vibration signal. *Measurement*. 2014. Vol. 55. P. 39 – 50. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.023>
14. Saruhan H., Sandemir S., Çiçek A., Uygur I. Vibration analysis of rolling element bearings defects. *Journal of Applied Research and Technology*. 2014. Vol. 12(3). P. 384 — 395. [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)71620-7](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)71620-7)
15. Tyagi S., Panigrahi S. K. An improved envelope detection method using particle swarm optimisation for rolling element bearing fault diagnosis. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2017. Vol. 4(4). P. 305 – 317. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2017.05.002>

REFERENCES

1. Osorio Santander E. J., Silva Neto S. F., Vaz L. A., Monteiro U. A. (2020). Using spectral kurtosis for selection of the frequency bandwidth containing the fault signature in rolling bearings. *Marine Systems & Ocean Technology*. Vol. 15(4). 243 – 252. <https://doi.org/10.1007/s40868-020-00084-2>
2. Rongye L., Zhiwen L., Yulin J. (2021). Instantaneous frequency estimation for wheelset bearings weak fault signals using second-order synchrosqueezing S-transform with optimally weighted sliding window. *ISA Transactions*, Vol. 115. 218 – 233. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.01.010>
3. Dwyer R. (1983). Detection of non-Gaussian signals by frequency domain Kurtosis estimation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 607 – 610.
4. Antoni J. (2006). The spectral kurtosis: a useful tool for characterising non-stationary signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 20(2). 282 — 307. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.09.001>
5. Antoni J., Randall R. B. (2006). The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 20(2). 308. – 331. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.09.002>
6. Ren Y., Li W., Zhang B., Zhu Z., Jiang F. (2019). Fault diagnosis of rolling bearings based on improved kurtogram in varying speed condition. *Applied Sciences*. Vol. 9(6). 1157. <https://doi.org/10.3390/app9061157>

7. Barszcz T., Jabł ǳński A. (2011). A novel method for the optimal band selection for vibration signal demodulation and comparison with the Kurtogram. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 25(1). 431 – 451. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.05.018>
8. Guo Y., Na J., Li B., Fung R-F. (2014). Envelope extraction based dimension reduction for independent component analysis in fault diagnosis of rolling element bearing. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 333(13). 2983 – 2994. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2014.02.038>
9. Dyer D., Stewart R. M. (1978). Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis. *Journal of Mechanical Design*. Vol. 100(2). 229 – 235. <https://doi.org/10.1115/1.3453905>
10. Antoni J. (2007) Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 21(1). 108 – 124. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.12.002>
11. Xu Y., Zhang K., Ma C., Cui L., Tian W. (2019). Adaptive Kurtogram and its applications in rolling bearing fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 130. 87 – 107. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.05.003>
12. Gupta P., Pradhan M. K. (2017). Fault detection analysis in rolling element bearing: A review. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 4(2). 2085 – 2094. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.054>
13. Jena D. P., Panigrahi S. N. (2014). Precise Measurement of Defect Width in Tapered Roller Bearing using Vibration Signal. *Measurement*. Vol. 55. 39 – 50. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.023>
14. Saruhan H., Sandemir S., Çiçek A., Uygur I. (2014). Vibration Analysis of Rolling Element Bearings Defects. *Journal of Applied Research and Technology*. Vol. 12(3). 384 – 395. [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)71620-7](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)71620-7)
15. Tyagi S., Panigrahi S. K. (2017). An improved envelope detection method using particle swarm optimisation for rolling element bearing fault diagnosis. *Journal of Computational Design and Engineering*. Vol. 4(4). 305 – 317. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2017.05.002>

Serhii Mykhalkiv¹, Denys Zhalkin², Sergey Zhalkin³, Vasyl Ravlyuk⁴

¹Associate Professor of the Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq. 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0425-6295>

²Professor of the Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq. 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3450-160X>

³Professor of the Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq. 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0089-3489>

⁴Associate Professor of the Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq. 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4818-9482>

THE IDENTIFICATION OF INFORMATIVE FEATURES BY THE FAST KURTOGRAM TECHNIQUE FOR THE VIBRODIAGNOSTICS OF ROLLING BEARINGS

The paper deals with the properties of the Fast Kurtogram technique for the vibrodiagnostics of rolling bearings of electric motor. Taking into account the disadvantages of the classic tools of vibrodiagnostics in the time domain, the proper frequency band selection procedure was suggested for the further demodulation and envelope spectrum extraction. Fast Kurtogram represents the spectral kurtosis value of the signal on the (f, Δf) plane. The frequency and the frequency resolution are used as the key functions to determine the magnitude of the spectral kurtosis. The best combination makes the kurtosis maximum. During the experimental research the vibration of the rolling bearing of electric motor of electric locomotive ChS7 series was acquired. The broadband spectrum in the frequency range 0 – 9 kHz was extracted and with the help of empiric approach the four frequency bands with resonance excitations were selected. None of four envelope spectra did not have any informative features among numerous random components. After the selection of a proper center frequency and the frequency band by the Fast Kurtogram, the extracted envelope spectrum has shown the series of harmonics related to the outer race faults.

Keywords: amplitude, band, bearing, diagnostics, envelope, frequency, kurtosis, motor, spectrum, vibration