

УДК 629.423.3:681.518.54

Виділення інформативних вібраційних складових підшипників кочення різновидами адаптивних методів

Михалків С.В.

Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна

***Анотація.** Для виділення інформативних вібраційних складових підшипників кочення запропоновано обрати найкращий адаптивний метод після відповідних порівняльних досліджень. Наведений опис і недоліки методу розкладання за емпіричними модами та подані особливості більш досконалих методів розкладання за ансамблем емпіричних мод та повного розкладання за ансамблем емпіричних мод із адаптивним шумом. Симульований адитивний сигнал містив імпульсну, модуляційну компоненту та дві синусоїди. Результатом розкладання стало отримання відповідних вбудованих функцій мод, які продемонстрували повну неспроможність перших двох адаптивних методів розділяти імпульсну та модуляційну компоненти, тоді як вбудовані функції мод за результатами застосування третього адаптивного методу містили окремо імпульсну та модуляційну компоненти, що засвідчило його подальшу спроможність у розділенні корисних вібраційних складових упродовж вібродіагностування підшипників кочення та зубчастих зачеплень відповідного промислового обладнання*

***Ключові слова:** адаптивний; вібрація; емпіричний; компонента; мода; підшипник; розкладання*

Підшипники кочення відіграють важливу роль в механічних вузлах різноманітного обладнання, важкі умови роботи яких спричиняють появу різноманітних пошкоджень. Для запобігання аварійних зупинок у різних промислових додатках широко залучають засоби вібродіагностування. Зареєстровані вібраційні сигнали володіють цінною інформацією щодо наявних пошкоджень підшипників та зубчастих зачеплень, тому вібродіагностичні методи, які зазнають постійного удосконалення, тривалий час демонструють ефективність із визначення діагностичних ознак технічного стану [1].

Зазвичай вібраційний сигнал підшипника кочення з ознаками пошкоджень носить нестаціонарний характер, який викликається короткотривалими збуреннями і на спектрі вібрації наявне ширококосмугове збудження, що суттєво ускладнює виявлення пошкодження на ранній стадії загальноновживаними методами. Розкладання за емпіричними модами (РЕМ) є адаптивним методом, яке не потребує жодних зовнішніх материнських функцій, сигнал зазнає саморозкладання на декілька коливних компонентів, які називаються вбудованими функціями мод (ВФМ) [2].

Отримана реалізація вважається ВФМ, якщо задовольняються дві умови:

- упродовж усієї тривалості реалізації кількість максимумів і мінімумів має дорівнювати кількості нульових перетинів реалізації або різниця має бути не більше одного;
- у будь-якій точці середнє значення верхньої і нижньої обвідної має дорівнювати нулю.

Відповідно до двох сформульованих умов існування ВФМ для сигналу $x(t)$ ($t > 0$), алгоритм методу РЕМ є таким:

1) визначення всіх екстремумів (максимумів і мінімумів) сигналу, що аналізується. З'єднання усіх максимальних і мінімальних точок кубічним сплайном для побудови верхньої $u(t)$ та нижньої $v(t)$ обвідної;

2) визначення середнього значення кривої $m_1(t)$, як середнє значення верхньої та нижньої обвідної;

3) відокремлення $m_1(t)$ від $x(t)$: $x(t) - m_1(t) = h_1(t)$. У ідеалі, якщо $h_1(t)$ задовольняє двом раніше згаданим умовам, то її можна вважати першою ВФМ сигналу $x(t)$;

4) якщо $h_1(t)$ не задовольняє вимогам, тоді слід замінити $x(t)$ на $h_1(t)$ і повторити кроки 1)–3) для розрахунку середнього значення $m_{11}(t)$. Якщо $h_{11}(t) = h_1(t) - m_{11}(t)$ задовольняє вимогам ВФМ, тоді $h_{11}(t)$ призначається першою ВФМ сигналу $x(t)$. Якщо вимоги знову не задоволені,

то слід заново повторити зазначені кроки k раз, допоки $h_{1,k}(t) = h_{1,k-1}(t) - m_{1,k}(t)$ не задовільнить вимогам приналежності до ВФМ. Нехай $c_1(t) = h_{1,k}(t)$ і $c_1(t)$ є першою ВФМ;

5) відокремлення $c_1(t)$ від $x(t)$ і отримання залишку $r_1(t) = x(t) - c_1(t)$. Подальше обрання $r_1(t)$, як оригінального сигналу й повторення кроків 1) – 4) для розрахунку другої ВФМ;

6) здійснення обчислення третьої, четвертої ... та n -ої ВФМ;

7) зупинка розкладання, як тільки залишок матиме не більше одного екстремуму.

Насамкінець оригінальний сигнал набуває вигляду $x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t)$ [3].

Основним недоліком РЕМ є змішування коливних компонентів, що можна пояснити потраплянням до складу однієї ВФМ декількох компонентів на різних масштабах, або компоненти на одному масштабі можуть потрапляти до різних ВФМ, що зрештою позбавляє ВФМ будь-якої здатності виявляти окремі частотні компоненти, які є ознаками пошкоджень на різних стадіях. Для подолання згаданих обмежень розроблялись удосконалені методи РЕМ, зокрема розкладання за ансамблем емпіричних мод (РАЕМ), яке спочатку додає білий шум до вібраційного сигналу, а далі реалізує звичний метод РЕМ для отримання ансамблю розкладань, де середнє значення кожного ансамблю визначатиме дійсну ВФМ. Другим знаковим удосконаленням РЕМ є метод повного розкладання за ансамблем емпіричних мод із адаптивним шумом (ПРАЕМАШ). Метод ПРАЕМАШ спочатку додає різні реалізації білого шуму до вібраційного сигналу з подальшим використанням методу РЕМ до відповідних ансамблів. Дійсними ВФМ обираються середні значення кожного ансамблю. На відміну від РАЕМ метод ПРАЕМАШ використовує білий шум у певному частотному діапазоні, що дозволяє мінімізувати його присутність у ВФМ після усереднення [2].

Ознакою появи пошкоджень в елементах підшипників кочення є імпульси і модуляція. Для моделювання вібраційного сигналу залучалися чотири компоненти (рис. 1):

- імпульсна;
- модуляційна;
- низькочастотна синусоїда;
- високочастотна синусоїда [1].

Дві синусоїди відповідають частотам обертання різних елементів вузла, що діагностується. На рис. 1 наведені чотири компоненти та симульований адитивний вібраційний сигнал. Для використання методів ПРАЕМАШ та РАЕМ обиралося 100 реалізацій, а середньоквадратичне відхилення білого шуму дорівнювало 0,02. За результатами розкладання трьома методами були отримані: 11 ВМФ методом ПРАЕМАШ, 9 ВМФ методом РАЕМ та 7 ВМФ методом РЕМ. На рис. 2–4 вибірково наведені найбільш інформативні ВМФ. На рис. 3 *a*, рис. 4 *a* імпульсна компонента змішалася з модуляційною, а на рис. 2 *a*, *б* відбулося повне розділення імпульсної та модуляційної складової. Спільною ознакою методів ПРАЕМАШ та РАЕМ є отримання низькочастотної складової на вищих рівнях розкладання (рис. 2 *в*), 3 *б*), яка подібна до початкової імпульсної компоненти, тоді як отримана методом РЕМ третя ВФМ (рис. 4 *б*) аж ніяк не схожа на жодну з чотирьох вхідних компонентів для симуляції.

Отже, порівняння результатів розкладання засвідчує нездатність методів РЕМ та РАЕМ виділяти інформативні компоненти з симульованого сигналу, тоді як метод ПРАЕМАШ забезпечує отримання більш точних ВФМ, які краще відповідають вхідним компонентам для симуляції і може застосовуватись для розкладання зареєстрованих вібраційних реалізацій підшипникових і редукторних вузлів механічного обладнання впродовж відповідних експериментальних досліджень.

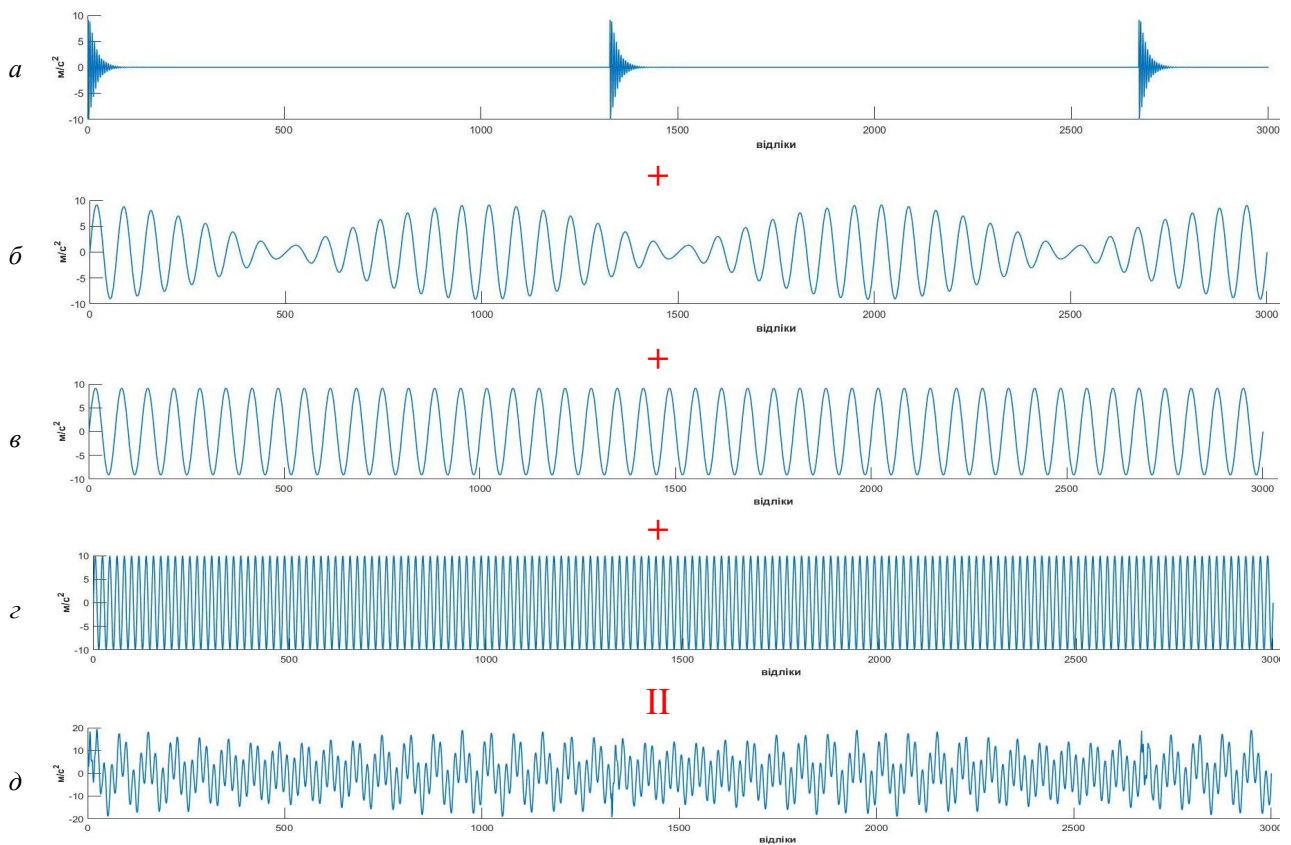


Рис. 1. Симуляція вібраційного сигналу підшипника кочення:

a – імпульсна складова; *б* – модуляційна складова; *в* – низькочастотна синусоїда; *г* – високочастотна синусоїда; *д* – симульований адитивний вібраційний сигнал із відповідних складових

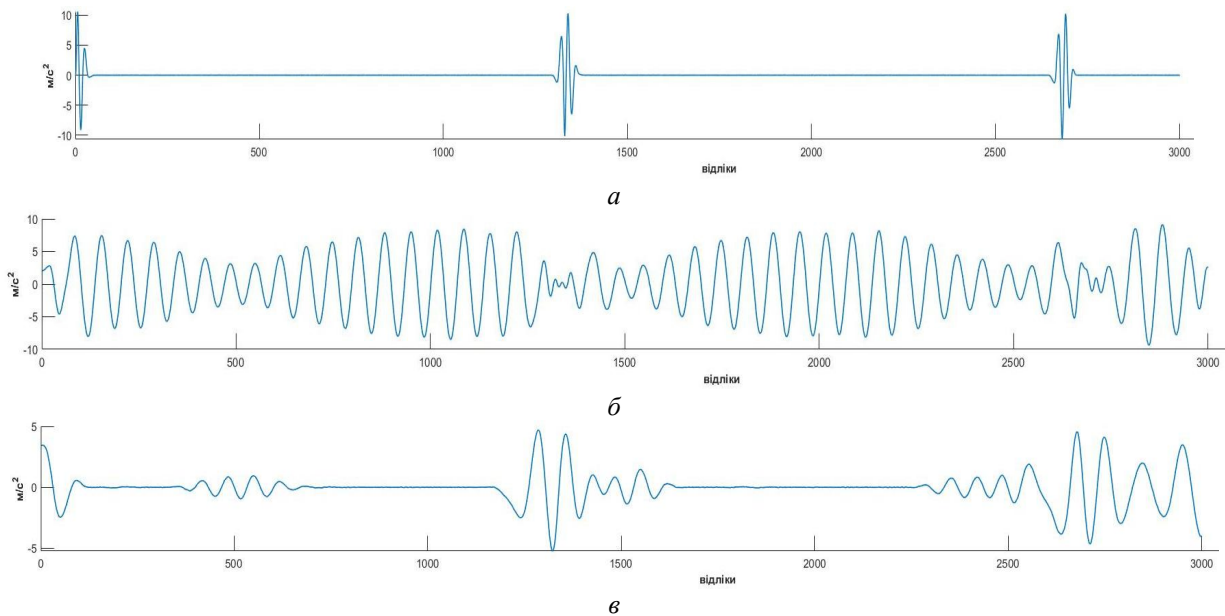


Рис. 2. Результати застосування методу ПРАЕМАШ до симульованого сигналу:

a – друга ВФМ; *б* – четверта ВФМ; *в* – п'ята ВФМ

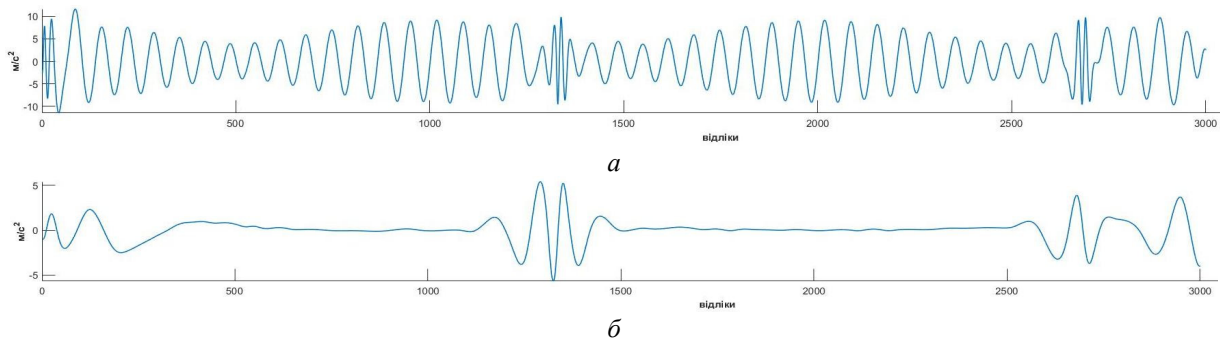


Рис. 3. Результати застосування методу РАЕМ до симульованого сигналу:
а – друга ВФМ; б – третя ВФМ

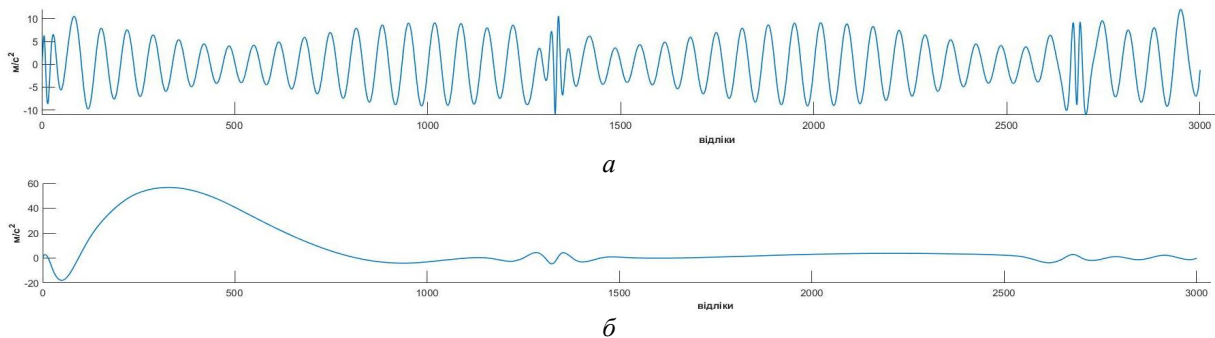


Рис. 4. Результати застосування методу РЕМ до симульованого сигналу:
а – друга ВФМ; б – третя ВФМ

Список літератури

1. Lei Y. A fault diagnosis method of rolling element bearings based on CEEMDAN / Y. Lei, Z Liu, J. Ouazri, J. Lin // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2017. – Vol. 231(10). – P. 1804 – 1815. <https://doi.org/10.1177/0954406215624126>
2. Tarek K. Comparative study between cyclostationary analysis, EMD, and CEEMDAN for the vibratory diagnosis of rotating machines / K. Tarek, D. Abderrazek, B. M. Khemissi, D. M. Cherif, C. Lilia, O. Nouredine // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 109(9 – 12). – P. 2747 – 2775. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05848-z>
3. He C. Incipient rolling element bearing weak fault feature extraction based on adaptive second-order stochastic resonance incorporated by mode decomposition / C. He, P. Niu, R. Yang, C. Wang, Z. Li, H. Li // Measurement. – 2019. Vol. 145. – P. 687 – 701. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.052>

The extraction of informative vibration components of bearings by different adaptive methods

Mykhalkiv Serhii

It was suggested to select the best adaptive method after proper comparative researches, for the extraction of informative vibration components of bearings. The description and drawbacks of empirical mode decomposition method were presented, and the properties of improved ensemble empirical mode decomposition method and complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise method were highlighted. A simulated additive signal contained impulse, modulation components and two sinusoids. The extracted intrinsic mode functions were the decomposition results of the first two adaptive methods, which failed to separate impulse and modulation components. Meanwhile, the intrinsic mode functions of the third adaptive method had separately impulse and modulation components, and the method proved to be effective in the separation of the vibration components during the vibrodiagnostics of bearings and gearboxes of the industrial equipment.

Keywords: adaptive; bearing; component; decomposition; empirical; mode; vibration