

*Е. Д. ТАРТАКОВСЬКИЙ*, д-р. техн. наук,  
*С. В. МИХАЛКІВ*, канд. техн. наук (м. Харків)

## ДІАГНОСТУВАННЯ ТЯГОВОГО РЕДУКТОРА З ВИКОРИСТАННЯМ АДАПТИВНОГО ВЕЙВЛЕТ-ФІЛЬТРУ

В данной статье рассматривается адаптированный вейвлет-фильтр Морле. Проведена оптимизация параметров вейвлета Морле по принципу максимума эксцесса. Показана эффективность применения адаптированного вейвлет-фильтра для идентификации в вибрационных сигналах диагностических признаков трещин зубьев редуктора на ранних стадиях

An adaptive wavelet filter based on Morlet wavelet is introduced in this paper. The parameters in the Morlet wavelet function are optimised based on the kurtosis maximisation principle. The adaptive wavelet filter is found to be very effective in detection of symptoms from vibration signals of a gearbox with early fatigue tooth crack.

**Вступ.** Раптова відмова тягового редуктора може бути причиною аварійної зупинки тягового рухомого складу (ТРС) на шляху прямування. Тому виявлення симптомів пошкоджень вузлів тягових редукторів на ранніх стадіях є вкрай важливим. Злам зубу є одним із серйозних пошкоджень в тяговому редукторі. Отже актуальним завданням є ранішня ідентифікація тріщин в зубах для запобігання раптових руйнувань.

**1 Аналіз останніх публікацій.** Віброакустичному діагностуванню механічних вузлів тягового рухомого складу присвячено багато робіт [1 – 4]. Розроблена номенклатура пошкоджень, яка ідентифікується за вібраційними характеристиками після впровадження необхідних заходів реєстрації, фільтрації та аналізу отриманих вібраційних реалізацій. Зареєстрований вібраційний сигнал на тяговому редукторі представляє собою суперпозицію адитивних та мультиплікативних складових від працюючого зубчастого зачеплення, обертаючих валів, підшипників та інших частин, що не сприяє ефективному діагностуванню пошкоджень. Перекошування валів ідентифікується за допомогою аналізу бічних смуг [6]. Бічні смуги легко виявляються в частотному просторі, бо вони містять декілька одиничних частотних складових. Для ідентифікації тріщин є достатнім відшукати імпульси в сигналах, що повторюються через певний період. Імпульси є короткими у часі й прихованими у шумі доти, доки розміри тріщини не стануть значними. Фазова демодуляція, що базується на синхронному усередненні в [4, 7] визнана ефективним засобом для виділення діагностичної ознаки тріщини зуба. Синхронне усереднення здатне усувати шуми в періодичних сигналах. В разі періодичності сигналу, шум носить випадковий характер і він прагнучиме до нуля коли кількість періодів прагне до нескінченності. Процедура синхронного усереднення вимагає точного встановлення віброакселерометру на тяговому редукторі для реєстрації вібраційної реалізації саме генерованої зубчастим зачеплен-

ням. Зазвичай отримати вібраційну реалізацію саме від зубчастого зачеплення під час діагностування в депо вдається вкрай рідко, тому існує необхідність в новій процедурі аналізу сигналів для ідентифікації тріщин зубів в тягових редукторах. Протягом останніх декількох років безперервне вейвлет-перетворення (БВП) використовувалось для діагностування редукторів [5, 7]. Проте метод, застосований в [7] досі потребує точної реєстрації опорного сигналу, а метод в [5] передбачає вибір порогу фільтрації вручну, керуючись досвідом діагностування. Отже, актуальним завданням є впровадження адаптивного методу для усунення зазначених недоліків, смисл якого полягає у автоматичному налаштуванні форми вейвлет-фільтру (частотно-часова роздільність).

**Мета статті** – підвищення ефективності діагностування тріщин зубів тягового редуктора локомотивів запропонованим вейвлет-фільтром Морле за принципом максимізації експесу досліджуваних компонентів вібраційної реалізації.

**2 Використання адаптивного вейвлет-фільтру.** Схожі на вейвлет-функцію перехідні компоненти вібраційних сигналів мають локальний енергетичний розподіл в частотному та часовому просторах. Вейвлет-функції можуть використувуватись для ідентифікації перехідних компонентів сигналів малої нестационарності за рахунок схожої частотно-часової структури. З огляду на те, що різні типи вейвлетів мають різну частотно-часову структуру, нам слід використовувати вейвлет, частотно-часова структура якого схожа на перехідні компоненти сигналів для можливості ефективного обліку малої нестационарності віброграм. Вейвлет-фільтр слід застосовувати для виділення періодичних імпульсів з-поміж шуму сигналів для ідентифікації тріщин зубів тягових редукторів. Коли часове подання вейвлету згортається із сигналом, досягається ефект фільтрації. В наслідок того, що вейвлет Морле є функцією косинусу з експоненційним спаданням з обох сторін є схожим до імпульсу, що визначає його придатність для виділення імпульсів. Для впровадження високої ефективності фільтрації, масштаб та параметр частотно-часової роздільності вейвлету Морле повинен обиратись правильно. Вейвлет-перетворення є результатом взаємодії сигналу з вейвлет-родиною, яка отримується з материнського вейвлету шляхом масштабування та переміщення.

Багато досліджень присвячено вейвлет-реконструкції. Ранні дослідження використовували ортогональну вейвлет-реконструкцію. Пізні дослідження зосередились на неортогональній вейвлет-реконструкції [5]. Існує універсальний вираз для реконструкції будь-якого типу вейвлету

$$x(t) = C_{\psi}^{-1} \iint W(a, b) \psi_{a,b}(t) \frac{da}{a^2} db \cdot \quad (1)$$

де  $W(a, b)$  – вейвлет-перетворення досліджуваної реалізації;

$\psi_{a,b}(t)$  – дочірній вейвлет, який отримується шляхом масштабування та зсування материнського вейвлету.

Якщо дочірній вейвлет розглядається як фільтр, тоді вейвлет-перетворення розглядається як процедура фільтрації. Зазвичай прагнуть виділити особливості сигналів шляхом реконструкції вейвлет-коефіцієнтів на обраних масштабах. Проте на практиці складно обрати правильний поріг для вейвлет-фільтрації. Для уникнення цього явища слід використовувати адаптивний вейвлет-фільтр замість вейвлет-фільтрації.

Імпульси, які існують в вібраційних сигналах відрізняються від теоретичних імпульсів. Теоретичні імпульси в частотному просторі мають суцільний енергетичний розподіл вздовж усієї осі частот. Змодельований імпульс, який присутній у вібраційних сигналах зображений на рис. 1 а). З рис. 1 б) видно, що спектр імпульсу не має суцільного розподілу. Основна енергія імпульсу зосереджується на певній частотній смузі і швидко спадає із збільшенням та зниженням частоти, що є не типовою поведінкою для теоретичного імпульсу. До того ж рівень спадання енергії є різним для лівої та правої сторін.

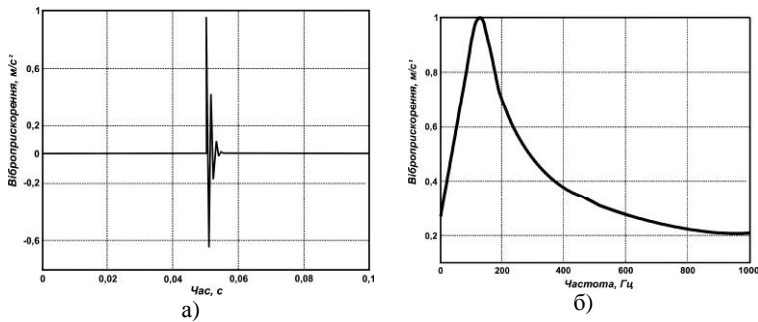


Рис. 1. Часове та частотне подання вібраційних імпульсів

Дочірній вейвлет Морле отримується шляхом масштабування та зсування материнського вейвлету

$$\psi_{a,b}(t) = \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) = \exp\left[-\frac{\beta^2(t-b)^2}{2a^2}\right] \cos\left[\frac{\pi(t-b)}{a}\right] \quad (2)$$

де  $a$  – параметр масштабування;

$b$  – параметр зсуву у часі.

Вираз (2) можна розглядати як фільтр. Для ідентифікації ділянок з малою нестаціонарністю вібраційних реалізацій шляхом фільтрації, перш за все, слід обрати частотну смугу в якій знаходяться імпульси. Параметри  $a$  та  $\beta$  відповідають за розташування та за форму дочірнього вейвлету Морле. Як наслідок, побудова адаптивного вейвлет-фільтру можлива шляхом проведення оптимізації двох параметрів дочірнього вейвлету.

Екссес використовується в діагностуванні за рахунок своєї чуттєвості до появи імпульсів [3]. Екссес збільшується по мірі збільшення імпульсів. Отже,

ексцес може служити індикатором появи імпульсів у досліджуваних реалізаціях.

Методика побудови адаптивного вейвлет-фільтру наступна:

- 1) Змінюючи параметри  $a$  та  $\beta$ , побудувати низку дочірніх вейвлетів;
- 2) Провести вейвлет-фільтрацію отриманими дочірніми вейвлетами та підрахувати ексцес виділених частотних смуг;
- 3) Порівняти значення ексцесу. Параметри  $a$  та  $\beta$ , які відповідають дочірньому вейвлету із максимальним ексцесом в отриманій частотній смузі є оптимальними для ідентифікації вібраційних імпульсів.

Для реєстрації вібрації віброакселерометр кріпився до зовнішньої поверхні підшипникового вузла вихідного валу зубчастого колеса. За рахунок меншої частоти обертання даного валу, він сприймає більший крутний момент, тому вірогідність появи тріщини зуба саме на зубчастому колесі, а не на шестерні є вищою. Частота обертання вхідного валу становила 1500 об/хв або 25 Гц, а вихідного – 150 об/хв або 2,5 Гц. Тріщини були виявлені у двох симетрично розташованих зубах, а тому вібраційний сигнал має містити імпульси, що повторюються з періодом 0,2 с.

На рис. 2 наведена вібраційна реалізація тягового редуктора із зламаним зубом. Сигнал містить чітко виражені імпульси. Багато дослідників намагаються ідентифікувати тріщини для запобігання зламу зуба і на їх думку нема необхідності аналізувати сигнали із зламаним зубом. Хоча на рис. 3 наведений вібраційний сигнал, зареєстрований до зламу зуба на якому нема жодних періодичних імпульсів, які приховані у шумі, що носить випадковий характер. Проте на зубчастому колесі присутні розвинені тріщини зуба. Для порівняння ефективності запропонованого адаптивного вейвлет-фільтра проводилась вейвлет-фільтрація ортогональним вейвлетом Сімлета 4-го порядку (рис. 3 – 8). Після розкладання даним вейвлетом досліджуваної реалізації на вібраційні складові, в останніх не було помічено жодних імпульсів на жодних рівнях розкладання. Отже, з рис. 5 важко виділити симптоми тріщин зубів тягового редуктора.

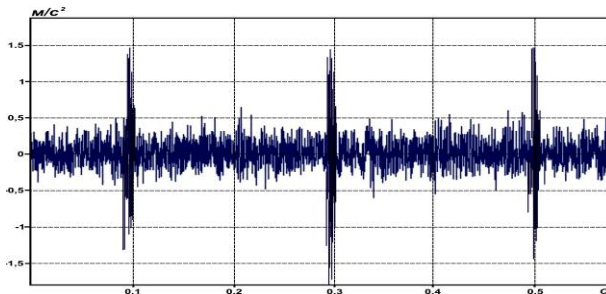


Рис. 2. Вібраційна реалізація тягового редуктора із зламаним зубом

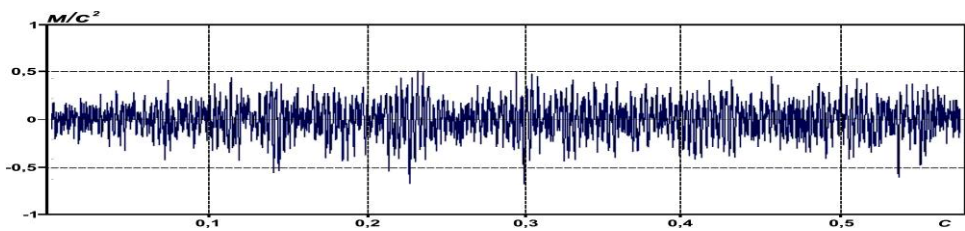


Рис. 3. Вібраційна реалізація тягового редуктора із тріщиною зуба

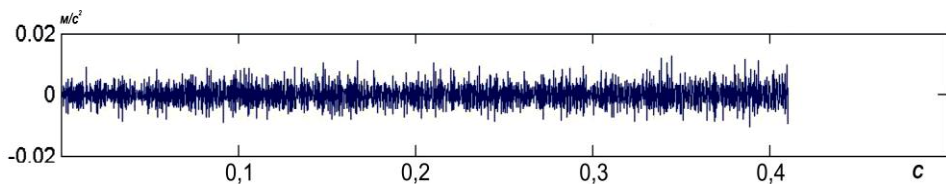


Рис. 4. Досліджувана реалізація

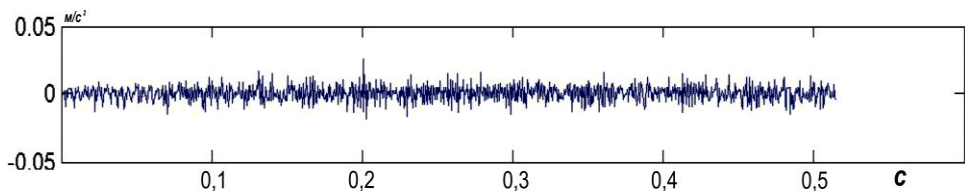


Рис. 5. Компонент вібраційного сигналу на першому рівні розкладанні

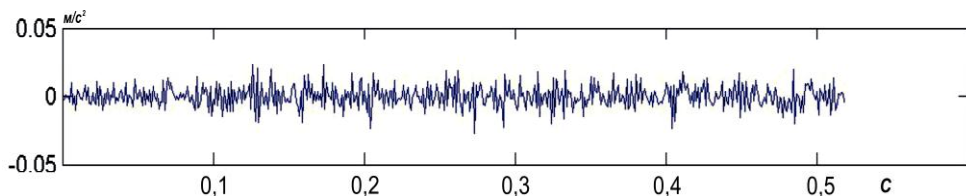


Рис. 6. Компонент вібраційного сигналу на другому рівні розкладанні

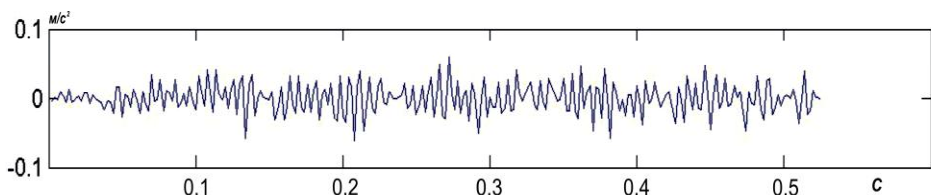


Рис. 7. Компонент вібраційного сигналу на третьому рівні розкладанні

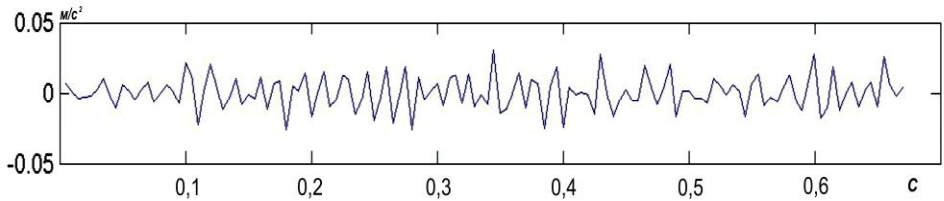


Рис. 8. Компонент вібраційного сигналу на четвертому рівні розкладанні

Для реалізації запропонованого адаптованого вейвлет-фільтру змінювали параметр  $\beta$  від 0,1 до 4 із кроком 0,2, масштаб змінювався від 1 до 25 із кроком 1. Найбільше значення ексцесу 8,9 досягається, коли  $\beta = 3,63$ , а масштаб дорівнює 24, як показано на рис. 9 ексцес є дуже чутливим до параметру  $\beta$  дочірніх вейвлетів Морле. Результат фільтрації оптимізованим вейвлет-фільтром ( $\beta = 3,55$ ,  $a = 20$ ) зображений на рис. 10. Наявність періодичних вібраційних імпульсів є очевидним, період складає близько 0,2 с. Для демонстрації ефективності запропонованого адаптивного вейвлет-фільтру виділялась низка компонентів сигналу за умови різних значень параметрів  $a$  та  $\beta$ , які відповідають відносно великим значенням ексцесу. На рис. 11 наведений компонент сигналу із  $a = 18$  та  $\beta = 3,45$  якому відповідає значення ексцесу 8,58. Проте даний компонент містить значну частку шуму і частково розпізнати можна лише два імпульси з-поміж шуму. На рис. 12 вже чітко можна виділити три вібраційні імпульси в компоненті вібраційного сигналу із максимальним значенням ексцесу. Дані вібраційні імпульси повторюються саме із періодом 0,2 с, що відповідає періоду контакту двох зубів із тріщинами. Це визначає придатність адаптованого вейвлет-фільтру до вибору корисного компоненту зареєстрованої вібраційної реалізації, керуючись принципом максимуму ексцесу.

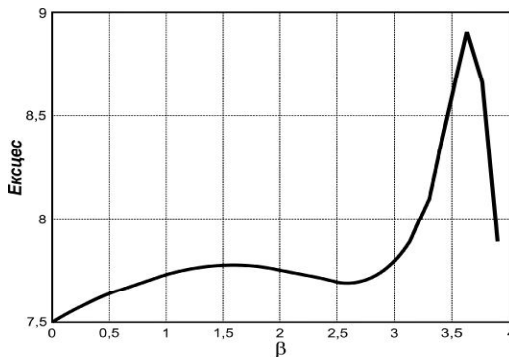


Рис. 9. Залежність ексцесу від параметру  $\beta$  в отриманих компонентах сигналу

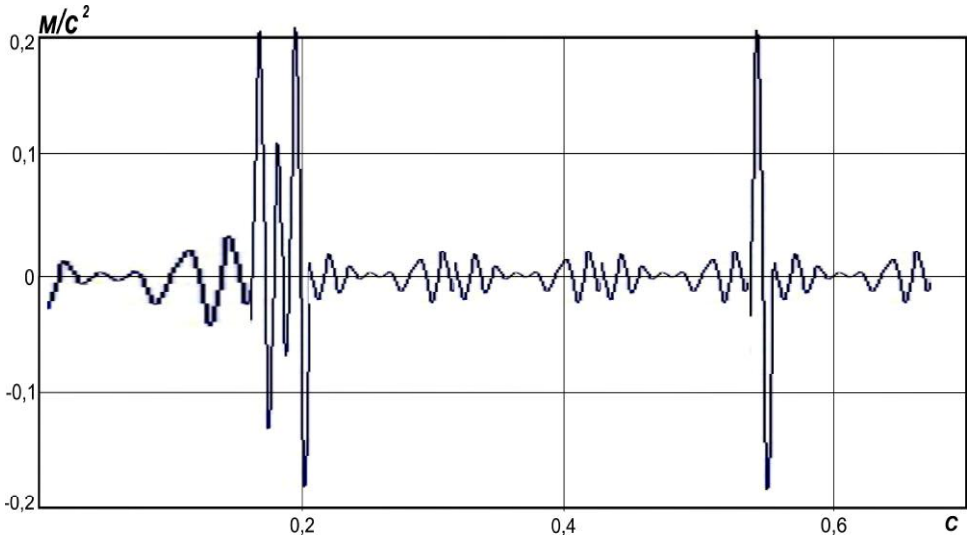


Рис. 10. Компонент вібраційної реалізації з параметрами  $a = 20$  та  $\beta = 3,55$

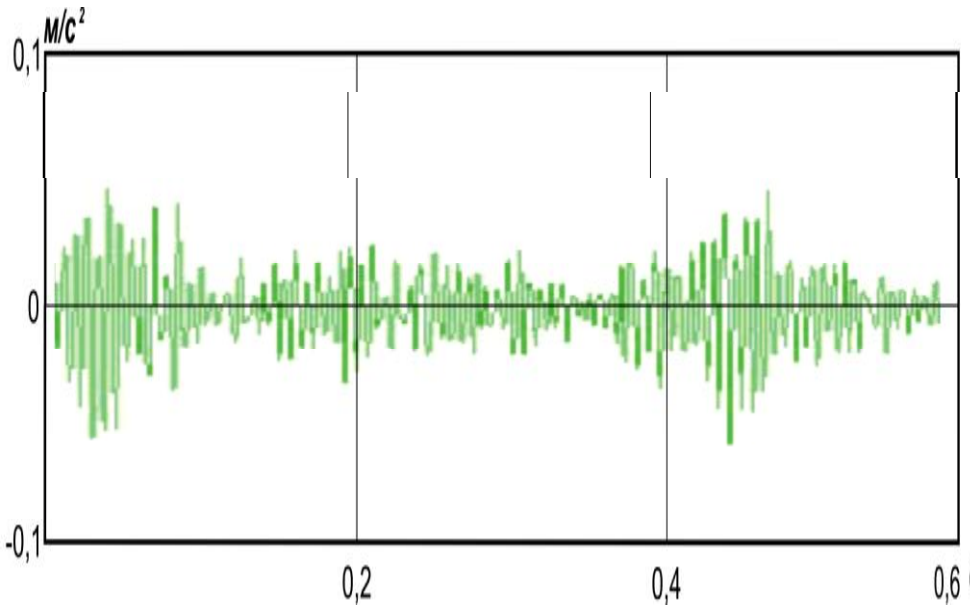


Рис. 11. Компонент вібраційної реалізації з параметрами  $a = 8$  та  $\beta = 3,45$

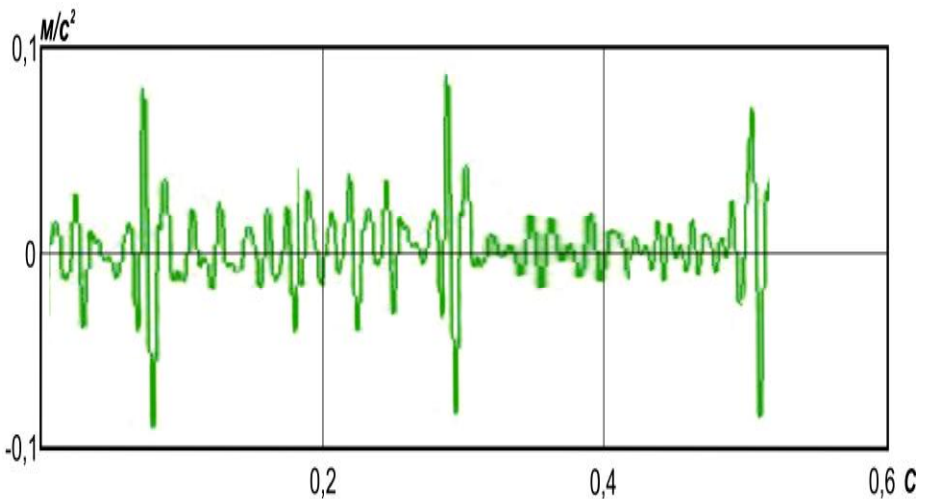


Рис. 12. Компонент вібраційної реалізації з параметрами  $\alpha = 24$  та  $\beta = 3,63$

**Висновки.** Запропонований адаптивний вейвлет-фільтр є придатним до використання в бортових системах вібродіагностування механічних вузлів обертання тягового рухомого складу нового покоління. Розглянута методика дозволяє:

- використовувати ексцес в ролі діагностичної ознаки появи вібраційних імпульсів у отриманих компонентах досліджуваного вібраційного сигналу;
- змінюючи параметри  $\alpha$  та  $\beta$ , адаптувати вейвлет-фільтр шляхом підвищення чуттєвості за допомогою ексцесу до корисних складових у сигналі;
- підвищувати достовірність діагностування технічного стану зубчатої передачі тягового редуктора шляхом чіткого розділу вібраційних характеристик різного походження.

**Список літератури:** 1. Основы автоматизации технического обслуживания, диагностирования и ремонта локомотивов: Учеб. Пособие / Э. Д. Тартаковский; Харьков: ХИИТ, 1987. – 20 с. 2. Гюев З. Г. Основы виброакустической диагностики тяговых приводов локомотивов: Дис... докт. техн. наук: 05.22.07. – Ростов-на-Дону, 1998. – 382 с. 3. Михалків С. В. Удосконалення технології діагностування підшипників кочення електричних двигунів тепловозів за вібраційними характеристиками: Дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. – Харків, 2007. – 168 с. 4. Нелюбов В. П. Виброакустическая диагностика буксовых подшипников подвижного состава: Дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. – Ростов-на-Дону, 2003. – 223 с. 5. J. Lin and M. J. Zuo. 2002 Mechanical Systems and Signal Processing 17(6), 1259 – 1269. Gearbox fault diagnosis using adaptive wavelet filter. 6. R. L. Eshleman 1999 Basic Machinery Vibrations. Clarendon Hills, IL: VIPress, Incorporated. 7. D. Boulahbal, M. F. Golnaraghi and F. Ismail 1999 Mechanical Systems and Signal Processing 13, 423 – 436. Amplitude and phase wavelet maps for the detection of cracks in geared systems.

Надійшла до редколегії 26.06.08