

Сергій Михалків, Анатолій Фалендиш, Владислав Бульба, Андрій Ходаківський

ЗАСТОСУВАННЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ЕКСЦЕСУ ДЛЯ ВІБРОДІАГНОСТУВАННЯ ТЯГОВОГО РЕДУКТОРА ЕЛЕКТРОПОЇЗДА

Актуальність теми дослідження. Установлено, що запровадження дієвих вібродіагностичних заходів із вчасного виявлення відмов вузлів тягової зубчастої передачі електропоїздів є актуальним завданням.

Постановка проблеми. Вібродіагностування механічних вузлів електропоїздів вважається ефективною процедурою, яка здатна виділяти імпульсні складові, які періодично повторюються відповідно до обертання пошкоджених частин зубчастого зачеплення або підшипників. Основною проблемою є розробка ефективних методів з усунення завад і встановлення ознак технічного стану підшипників кочення й редукторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками розрахунок величини ексцесу посів провідне місце у виділенні слабких періодичних імпульсів, однак нечіткі рекомендації з підвищення точності цих розрахунків потребували удосконалення, що спричинило появу методу спектрального ексцесу, заснованого на залученні фільтрів для відновлення сигналів, що носять випадковий характер і заповнені високим рівнем адитивного стаціонарного шуму.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Недостатньо досліджено виявлення підшипникової складової вібрації і вплив на неї редукторної складової у високочастотному діапазоні.

Постановка завдання. Метою статті є визначення інформативної частотної смуги збудження підшипникової вібрації за допомогою методу спектрального ексцесу.

Виклад основного матеріалу. У статті за допомогою спектрального ексцесу обирається найкраща ширина вікна процедури віконного перетворення Фур'є, що дозволяє виявити найбільший рівень спектрального ексцесу й відшукати відповідний частотний діапазон.

Висновки відповідно до статті. Завдяки фільтру Вінера вдалося виявити широкосмугові структури вібрації тягової зубчастої передачі електропоїзда й зафіксувати частотну смугу з добре вираженою резонансною складовою підшипникової вібрації.

Ключові слова: вібрація; електропоїзд; підшипник; редуктор; спектральний ексцес; частота.

Рис.: 6. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. Тягова зубчаста передача (ТЗП) є одним із ключових компонентів на моторвагонному рухомому складі (МВРС). Завдяки ТЗП здійснюється передача тягових, електродинамічних гальмових зусиль від тягового електричного двигуна (ТЕД) до зони контакту поверхні кочення колеса й рейки. Отже, комбінація внутрішніх збуджень ТЗП (помилки виготовлення, жорсткість зубозачеплення, що змінюється із плином часу) та зовнішніх збуджень (порушена геометрія колії, крутні моменти на валу ТЕД) спричиняють неминучу вібрацію ТЗП, прискорюють відмови її елементів і підвищують ймовірність настання аварій [1].

Тому видається актуальним запровадження дієвих вібродіагностичних заходів із вчасного виявлення згаданих відмов.

Постановка проблеми. Вібродіагностування пошкоджень механічних вузлів МВРС вважається ефективною процедурою, яка володіє високим потенціалом до виявлення пошкоджень серед сильних завад, які наповнюють зареєстровану вібраційну реалізацію й суттєво ускладнюють інтерпретацію результатів діагностування в практичних додатках [2].

Загальноприйнятим твердженням є те, що багато пошкоджень в обертальних механічних вузлах на ранніх стадіях розвитку спричиняють появу серій ударів і збуджують певні структурні резонанси. Це стосується пошкоджень у вигляді раковин, тріщин зубчастого зачеплення й підшипників кочення. Вібраційний сигнал наповнений імпульсними складовими, які періодично повторюються відповідно до обертання пошкоджених частин зубчастого зачеплення або підшипників. Запропоновано велику кількість методів із визначення діагностичних ознак завдяки застосуванню специфічної обробки сигналів [3].

Таким чином, основною проблемою є розробка ефективних методів із усунення завад і встановлення ознак технічного стану підшипників кочення й редукторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками провідне місце у виділенні слабких періодичних імпульсів обійняв інструментарій обробки сигналів, що заснований на величинах частотної форми вібрації, які отримують із величини ексцесу, який вважають мірою наповнення сигналу імпульсними складовими ще з 1970-х років

[4]. За умови наявного пошкодження в сигналі ексцес набуває високого значення й демонструє майже нульові значення за наявного шуму. Імпульси мають бути відфільтрованими й сильно вираженими про що свідчитиме висока величина відношення сигнал-шум. Шум зазвичай заповнює широкий частотний діапазон і маскує сигнал, що несе діагностичну цінність. Результатом цього є неспроможність ексцесу зафіксувати характерні піки імпульсів, які асоціюються з пошкодженнями і величина ексцесу є трохи вище за нуль [3]. Однак відтоді надавалися лише нечіткі рекомендації з підвищення точності отриманих результатів за допомогою використання фільтрації в певних частотних смугах [5]. Тривалий час велика увага приділялася удосконаленню процедур використання ексцесу, що вплинуло на появу методу спектрального ексцесу, заснованого на залученні фільтрів для відновлення сигналів, що носять випадковий характер і заповнені високим рівнем адитивного стаціонарного шуму, також цей метод можна використовувати разом зі спектральною щільністю потужності.

Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми. Серед поширених методів аналізу частотної форми вібрації для визначення технічного стану елементів підшипників кочення й редукторів питання виявлення підшипникової складової вібрації ТЗП і вплив на неї редукторної складової у високочастотному діапазоні вібрації приділено недостатньо уваги.

Постановка завдання (цілей статті). Метою статті є визначення інформативної частотної смуги збудження підшипникової вібрації за допомогою методу спектрального ексцесу.

Виклад основного матеріалу. Системний підхід до вирішення завдань із вібродіагностування ґрунтується на уявленні про гомогенну систему, що зазнає впливу низки сил збурень, які спричиняють відгуки і полягає в пошуках експериментальних взаємозв'язків між вхідними й вихідними збуреннями. Для реєстрації збурень на виході системи слугують заздалегідь відібрані зони, а вхідні збурення зафіксувати дуже важко, оскільки вони породжуються внутрішніми силами. Поширені складнощі, перед якими постають дослідники, пов'язані з тим, що суміш вібрацій формується за типом згортання, число індивідуальних джерел у цій суміші заледве упізнавано і є дуже великим, зокрема в обертальних машинах. Також зареєстрована вібрація наповнена сильним шумом.

Відомо [6], що зареєстрований сигнал $x(t)$ (рис. 1) містить вібраційні компоненти $p(t)$, що викликані періодичними джерелами внаслідок обертання зубчастого зачеплення й залишкову випадкову складову $r(t)$, яка зі свого боку складається з короткотривалих імпульсних складових $t(t)$, що генеруються обертанням елементів підшипників кочення та кінцевої залишкової складової $r_1(t)$, m/c^2

$$x(t) = p(t) + t(t) + r_1(t). \quad (1)$$

Часова форма сигналу здебільшого не несе інформації з наявних пошкоджень підшипників кочення на початкових і середніх стадіях розвитку, і ексцес набуває невисоких значень унаслідок впливу сильних складових вібрації зубозачеплення. Це викликано тим, що вібрація елементів підшипників кочення занурена в гармоніки частоти зубозачеплення, яка домінує в низькочастотному й середньому частотному діапазоні, однак в області високих частот підшипникова вібрація наповнена випадковими флуктуаціями, які превалюють над гармонічною структурою сигналу [3].

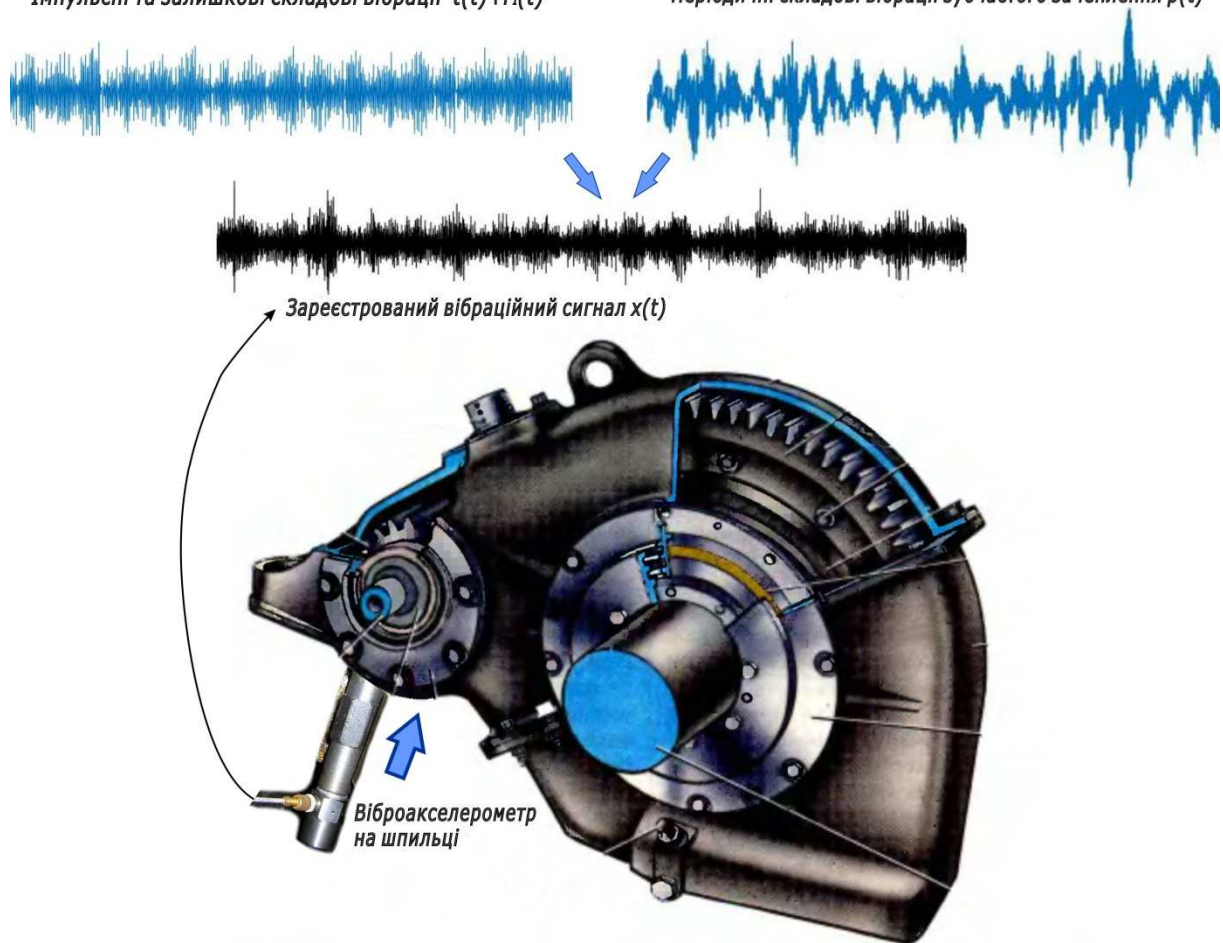


Рис. 1. Вібраційні компоненти зареєстрованої часової реалізації ТЗП електропоїзда EP2T

Вищою результативністю з визначення виду пошкодження підшипників кочення володіє загальнозживаний спектральний аналіз, інтерпретація якого суттєво спрощується, якщо заздалегідь відома частотна смуга найвищого резонансного збудження вібраційних складових, яке ототожнюється з наявними пошкодженнями елементів підшипників і має високий ексцес. Однак вплив випадкових флуктуацій на певних частотах призводить до розмивання резонансних збуджень [7] і широкосмуговий спектр вібрації побудований завдяки швидкому перетворенню Фур'є (ШПФ) надає обмаль діагностичної інформації у високочастотному діапазоні (рис. 2).

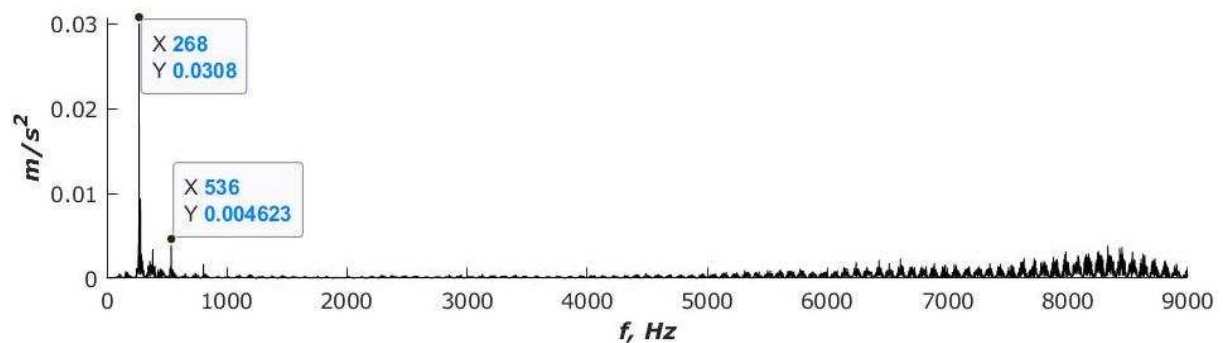


Рис. 2. Широкосмуговий спектр вібрації ТЗП електропоїзда EP2T із пошкодженням підшипником кочення

Отже, завдання з правильного визначення резонансного високочастотного діапазону дозволить виділяти вузькосмуговим фільтром відрізок сигналу в цьому діапазоні для наступного застосування процедури демодуляції.

Експериментальні дослідження здійснювались у моторвагонному депо на випробувальному стенді, куди встановлювався колісно-редукторний блок КРБ електропоїзда ЕР2Т, під час технічного обслуговування якого в стійлі виникли підозри щодо його справності. Колісна пара розкручувалася до частоти 219 об/хв⁻¹. Віброакселерометр для реєстрації вібраційного сигналу має верхній робочий частотний діапазон 9 кГц і вгвинчувався у шпильку й до отвору додавання мастила в опорні підшипники підшипникового вузла ТЗП (рис. 1). Зареєстрований аналоговий вібросигнал у цифровому самописці зазнавав дискретизації частотою 46 кГц.

Для визначення шуканого частотного діапазону залучався метод спектрального ексцесу, який якнайкраще підходить саме для вирішення завдань із виявлення короткотривалих складових серед високого рівня шуму у вібраційних сигналах [3]. Спектральний ексцес є функцією частоти та оцінює міру імпульсивності вібраційного сигналу. Набуває високих значень у частотних смугах, де переважають імпульсні складові, а домінування стаціонарних компонентів спричиняє зниження спектрального ексцесу до нуля.

Ідея використання спектрального ексцесу полягає в його обчисленні у відповідних частотних смугах і вибору тієї смуги до якої потрапить частота з найвищим обчисленим значенням спектрального ексцесу, яку можна вважати місцем розташування наявного пошкодження. Для обчислення спектрального ексцесу запропоновано процедуру віконного перетворення Фур'є (ВПФ)

$$K_Y(f) \approx \left(\frac{f_s}{f_d} \frac{\gamma_{4w}}{N_w} (k_X + 3) - 2 \right) \frac{1}{(1 + \rho(f))^2}, \quad (2)$$

де $f_s = 46$ кГц – частота дискретизації;

f_d – частота повторювання імпульсів, Гц;

$\gamma_{4w} = N_w \sum_n |w(n)|^4 / \left| \sum_n |w(n)|^2 \right|^2$ – нормалізований момент четвертого порядку ви-

падкових змінних;

$w(n)$ – вікно ВПФ;

N_w – ширина вікна ВПФ;

k_X – інтенсивність флуктуацій амплітуд імпульсів;

$\rho(f) = S_N(f) / S_X(f)$ – відношення шум-сигнал;

$S_N(f)$ і $S_X(f)$ – спектральні густини потужності шуму й сигналу з пошкодженням.

Вибір вузького вікна N_w призводить до зростання спектрального ексцесу й начебто є бажаним, однак надмірна вузькість продукує величини спектрального ексцесу з незадовільною спектральною роздільністю, де втрачаються відповідні деталі. Для обрання найкращої ширини вікна ВПФ потрібно провадити декілька обчислень із різною шириною вікна з відповідним аналізом отриманих результатів спектрального ексцесу уздовж усього частотного діапазону.

Для мінімальної ширини вікна $N_w = 32$ відліки спектральний ексцес (рис. 3) набуває вигляду кривої з найменшими піками й локальними сплесками. Натомість ширина вікна з $N_w = 256$ відліками наповнює криву спектрального ексцесу піками, найвищі з яких варто ототожнювати з наявними пошкодженнями й для подальших досліджень вибрати

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

частоту, на якій вони проявляються найкраще, а саме нормалізовану частоту 0,166 або $f = \text{нормалізована частота} \times f_s = 0,166 \times 46000 = 7636$ Гц. Величина розрахованого спектрального ексцесу не є високою (1,83), що спричинено періодичною модуляцією внаслідок обертання вхідного вала.

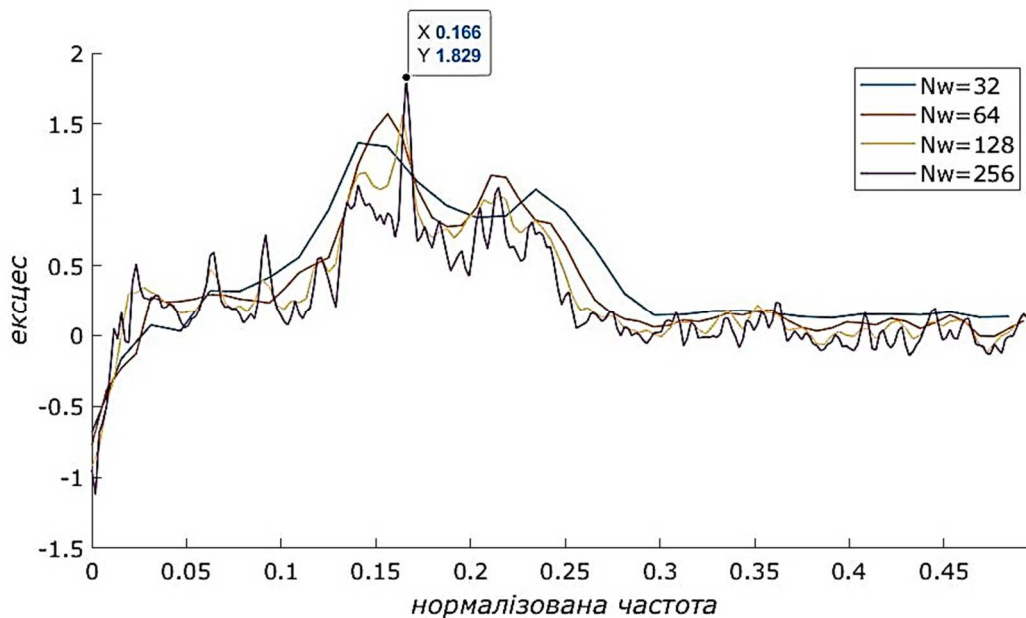


Рис. 3. Величини спектрального ексцесу вібрації ТЗП для різних ширин вікна ВПФ

Спектральний ексцес зростає у високочастотному діапазоні, де джерела вібрації, які викликані динамікою зубчастого зачеплення з найвищим проявом на першій і другій гармоніках частоти зубозачеплення 268 Гц, 536 Гц (рис. 2) вичерпали свою енергію, що призвело до кращого відношення сигнал/шум.

Відновити сигнал $t(t)$ безліччю доступних вузькосмугових фільтрів видається занадто складним завданням, оскільки вони засновані лише на оптимізації певного критерію вібраційного сигналу, тому великий інтерес становить здатність широкосмугової фільтрації відновлювати вібраційний сигнал із максимальним наближенням до сигналу з наявним пошкодженням, проте такі фільтри дуже важко спроектувати. Фільтр Вінера є оптимальним у виявленні широкосмугових структур і намаганні відновити сигнал $t(t)$ серед інших згаданих складових (1) у зареєстрованому вібраційному сигналі (рис. 4) та розраховується взяттям квадратного кореня зі спектрального ексцесу. Подібна фільтрація не здатна відновити справжню форму вібраційного сигналу з короткотривалими імпульсами підшипника кочення, однак спроможна забезпечити покращене відношення сигнал-шум (рис. 5). На побудованому широкосмуговому спектрі вібрації (рис. 6) відфільтрованого сигналу з'являється посилена складова на частоті 7637 Гц у високочастотному діапазоні, що повністю відповідає результатам обчислень спектрального ексцесу і для подальших спектральних побудов дозволяє обрати ширину 1/3-октавного фільтра $B = 6,3 - 8$ кГц, у якій проявлятимуться ознаки пошкоджень підшипників кочення ТЗП.

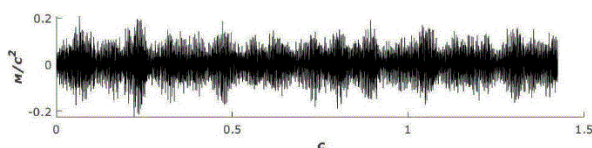


Рис. 4. Вібраційний сигнал ТЗП електропоїзда EP2T

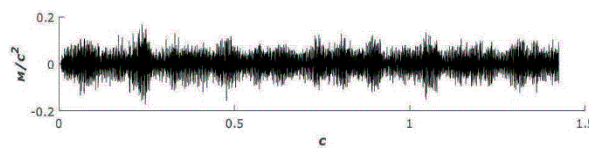


Рис. 5. Вібраційний сигнал ТЗП електропоїзда EP2T після фільтру Вінера

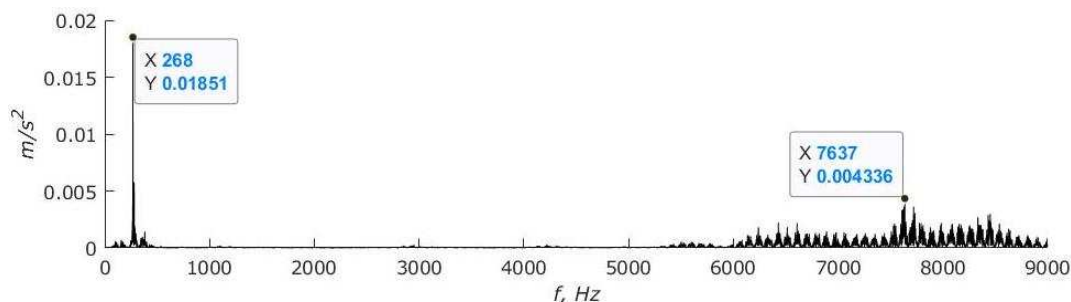


Рис. 6. Широкопasmовий спектр відфільтрованої вібрації ТЗП фільтром Вінера електропоїзда EP2T із пошкодженням підшипником кочення

Висновки відповідно до статті. Установлена цінність спектрального ексцесу розрізняти періодичні й вузькопasmові шумові та імпульсні компоненти вібраційних сигналів і точно знаходити частоту з пошкодженнями підшипників кочення, де найсильніше проявляються імпульсні складові, усуваючи потребу в тривалому періодичному діагностуванні для стеження за динамікою зростання енергетичних складових у відповідних частотних смугах за накопиченими замірами вібрацій.

Виявлена безпорадність цього методу у визначенні виду пошкодження підшипника кочення ТЗП електропоїзда, що обумовлює потребу додаткового залучення процедури перетворення Гілберта для побудови спектрів обвідної вібрації у знайденому частотному діапазоні відфільтрованого сигналу фільтром Вінера.

Список використаних джерел

1. Zhang, T., Chen, Z., Zhai, W., Wang, K. (2019). Establishment and validation of a locomotive–track coupled spatial dynamics model considering dynamic effect of gear transmissions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 119, 328–345. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.09.032>.
2. Ding, J., Zhao, W., Miao, B., Lin, J. (2018). Adaptive sparse representation based on circular-structure dictionary learning and its application in wheelset-bearing fault detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 111, 399–422. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.04.012>.
3. Antoni, J., Randall, R. B. (2006). The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20 (2), 308–331. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.09.002>.
4. Dyer, D., Stewart, R. M. (1978). Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis. *Journal of Mechanical Design*, 100(2), 229–235. Retrieved from <https://doi.org/10.1115/1.3453905>.
5. Zhang, H., Chen, X., Du, Z., Yan., R. (2016). Kurtosis based weighted sparse model with convex optimization technique for bearing fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 80, 349–376. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.04.033>.
6. Antoni, J. (2005). Blind separation of vibration components: Principles and demonstrations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(6), 1166–1180. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.08.008>.
7. Randall, R. B. (2005). Applications of spectral kurtosis in machine diagnostics and prognostics. *Key Engineering Materials*, 293-294, 21–32. Retrieved from <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.293-294.21>.

References

1. Zhang, T., Chen, Z., Zhai, W., Wang, K. (2019). Establishment and validation of a locomotive–track coupled spatial dynamics model considering dynamic effect of gear transmissions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 119, 328–345. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.09.032>.
2. Ding, J., Zhao, W., Miao, B., Lin, J. (2018). Adaptive sparse representation based on circular-structure dictionary learning and its application in wheelset-bearing fault detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 111, 399–422. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.04.012>.
3. Antoni, J., Randall, R. B. (2006). The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(2), 308–331. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.09.002>.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

4. Dyer, D., Stewart, R. M. (1978). Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis. *Journal of Mechanical Design*, 100(2), 229–235. Retrieved from <https://doi.org/10.1115/1.3453905>.

5. Zhang, H., Chen, X., Du, Z., Yan., R. (2016). Kurtosis based weighted sparse model with convex optimization technique for bearing fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 80, 349–376. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.04.033>.

6. Antoni, J. (2005). Blind separation of vibration components: Principles and demonstrations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(6), 1166–1180. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.08.008>.

7. Randall, R. B. (2005). Applications of spectral kurtosis in machine diagnostics and prognostics. *Key Engineering Materials*, 293-294, 21–32. Retrieved from <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.293-294.21>.

UDC 629.423.2:681.518.54

Serhii Mykhalkiv, Anatoliy Falendysh, Vladyslav Bulba, Andrii Khodakivskiy

APPLICATION OF THE SPECTRAL KURTOSIS FOR THE TRACTION GEARBOX VIBRODIAGNOSTICS OF AN ELECTRIC TRAIN

Urgency of the research. It is established that introduction of effective vibrodiagnostics techniques, which are capable of the early identification of the traction gearbox faults of electric trains, is a relevant task.

Target setting. The vibrodiagnostics of mechanical units of electric trains is known to be a trustworthy technique that is able to extract impulsive components with a periodic repetition in accordance with the revolution of the faulty parts of gears or bearings. The main problem is development of effective methods for the noise elimination and identification of the technical condition features of gears and bearings.

Actual scientific researches and issues analysis. Recently the calculation of the kurtosis index has taken a leading role in the extraction of weak periodic impulses. However, unclear recommendations on increasing the accuracy of these results needed improvement, which led to emergence of the spectral kurtosis method based on the filters for the reconstruction of random signals with a high level of additive stationary noise.

Uninvestigated parts of general matters defining. The identification of a bearing vibration component and the influence of a gear component in high frequency band on it were not clearly understood.

The research objective. The objective of the paper is identification of the informative frequency band of excited bearing vibration by means of the spectral kurtosis method.

The statement of basic materials. The paper selects the best window length of the Short-Time Fourier Transform by means of the spectral kurtosis method, which allows to identify the highest level of the spectral kurtosis and to find the proper frequency band.

Conclusions. By means of Wiener filter, the broadband structures of the traction gearboxes vibration of electric trains were identified, and the frequency band with excited resonance component of the bearing vibration was registered.

Keywords: bearing; frequency; gear; electric train; spectral kurtosis; vibration.

Fig.: 6. References: 7.

Михалків Сергій Васильович – кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту (майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна).

Mykhalkiv Serhii – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport (7 Feuerbach Square, 61050 Kharkiv, Ukraine).

E-mail: svm_m@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0425-6295>

Фалендиш Анатолій Петрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теплотехніки та теплових двигунів, Український державний університет залізничного транспорту (майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна).

Falendysh Anatoliy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Heat engineering and heat engines, Ukrainian State University of Railway Transport (7 Feuerbach Square, 61050 Kharkiv, Ukraine).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3602-7945>

Scopus Author ID: 57163640900

Булба Владислав Ігорович – інженер, регіональна філія «Південна залізниця» (вул. Є. Котляра, 7, м. Харків, 61052, Україна).

Bulba Vladyslav – engineer of the Regional branch “Southern Railway” (7 E. Kotliar Str., 61052 Kharkiv, Ukraine).

Ходаківський Андрій Миколайович – старший викладач кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту (майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна).

Khodakivskiy Andrii – Senior Lecturer, Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport (7 Feuerbach Square, 61050 Kharkiv, Ukraine).