

Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

Designing, construction and operation of pipeline transport system

25.00.19 Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов,
баз и хранилищ (технические науки)

DOI: 10.31660/0445-0108-2019-4-122-129

УДК 621.822.6

Обоснование эффективности использования декомпозиции вибрационного сигнала как метода диагностики подшипников качения нефтяных насосов

П. С. Кононов, Е. В. Огудова*

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

**e-mail: specular@mail.ru*

Аннотация. На сегодняшний день в условиях длительной эксплуатации и широкого диапазона режимов работы важнейшую роль играют задачи по предотвращению аварий, связанных с отказом отдельных узлов оборудования и насоса в целом. Перспективный метод технической диагностики, описанный в работе, предназначен для выявления подобных дефектов и является актуальным в рассмотрении данной проблематики. Полученные данные свидетельствуют о возможности не только выделения интересующего импульса из сигнала необработанной вибрации, но и идентификации типа повреждения на ранних этапах.

Ключевые слова: нефтяной насос; диагностика; вибрация; амплитуда; декомпозиция сигнала

Rationale for the use of vibration signal decomposition as a diagnostic method for rolling bearings of oil pumps

Pavel S. Kononov, Evgenia V. Ogudova*

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**e-mail: specular@mail.ru*

Abstract. Today, the development of new technologies and their application in the oil industry is a key factor in improving the reliability of technological equipment. A promising method of technical diagnostics, described in the article, is intended to identify such defects and is relevant in the consideration of this issue. The data obtained indicate that it is possible not only to isolate the pulse of interest

from the signal of the untreated vibration, but also to identify the type of damage in the early stages.

Key words: oil pump; diagnostics; vibration; amplitude; signal decomposition

Введение

На сегодняшний день развитие новых технологий и применение их в нефтяной отрасли — ключевой фактор в вопросах улучшения показателей надежности технологического оборудования. В условиях длительной эксплуатации и широкого диапазона режимов работы важнейшую роль играют задачи по предотвращению аварий, связанных с отказом отдельных узлов оборудования и насоса в целом. Зачастую применяемые методы диагностики не способны прогнозировать дефекты отдельных узлов и деталей на ранней стадии, что влечет за собой внеплановые простои и внезапные аварии. Перспективный метод технической диагностики, описанный в работе, предназначен для выявления подобных дефектов и является актуальным в рассмотрении данной проблематики. Цель работы — выявление дефектов подшипниковых узлов нефтяного насоса посредством использования декомпозиции вибрационного сигнала на основе амплитудного уровня. При этом в рамках исследования был применены метод Отсу, который используется для автоматического определения порога амплитуды, а также простое и обратное преобразование Фурье для разложения сигнала на два компонента. Полученные данные свидетельствуют о возможности, не только выделения интересующего импульса из сигнала необработанной вибрации, но и идентифицирования типа повреждения на ранних этапах.

Объект и методы исследования

Объект исследования — промежуточная нефтеперекачивающая станция Западной Сибири с объемом годовой производительности 50 млн т/год.

Предмет исследования — магистральный нефтяной насос НМ 10000-210.

Метод исследования — анализ научных данных по теме исследования.

Диагностика подшипников качения с использованием декомпозиции вибрационного сигнала на основе амплитудного уровня

Данный диагностический подход позволяет обнаружить дефекты подшипников качения на ранних этапах их развития.

Одной из основных причин неэффективности многих диагностических подходов является тот факт, что в нефтяном насосе вибрационный сигнал подшипника качения может быть скрыт другим источником вибрации. Ключевым элементом этого подхода является полностью автоматический метод декомпозиции сигнала на основе уровня амплитуды, который позволяет извлекать информативный сигнал подшипника из сигнала вибрации машины. Для того чтобы выполнить извлечение функции, связанной с повреждением подшипника качения из низкоэнергетической составляющей вибрационного сигнала, используется спектральный анализ эмпирически определенной локальной амплитуды [1–3].

На рисунке 1 [4] представлена блок-схема рассматриваемого диагностического метода. Высокие значения индикаторов работоспособности: SSCF (Subband Spectral Crest Factor) — спектральный волновой поддиапазонный коэффициент и SSIF (Subband Spectral Impuls Factor) — спектральный импульсный

поддиапазонный коэффициент указывают на возникновение повреждений подшипника, но они не позволяют идентифицировать тип повреждения. Для идентификации требуется сравнение пикового значения спектра с характерными частотами дефектов подшипника [5–13].

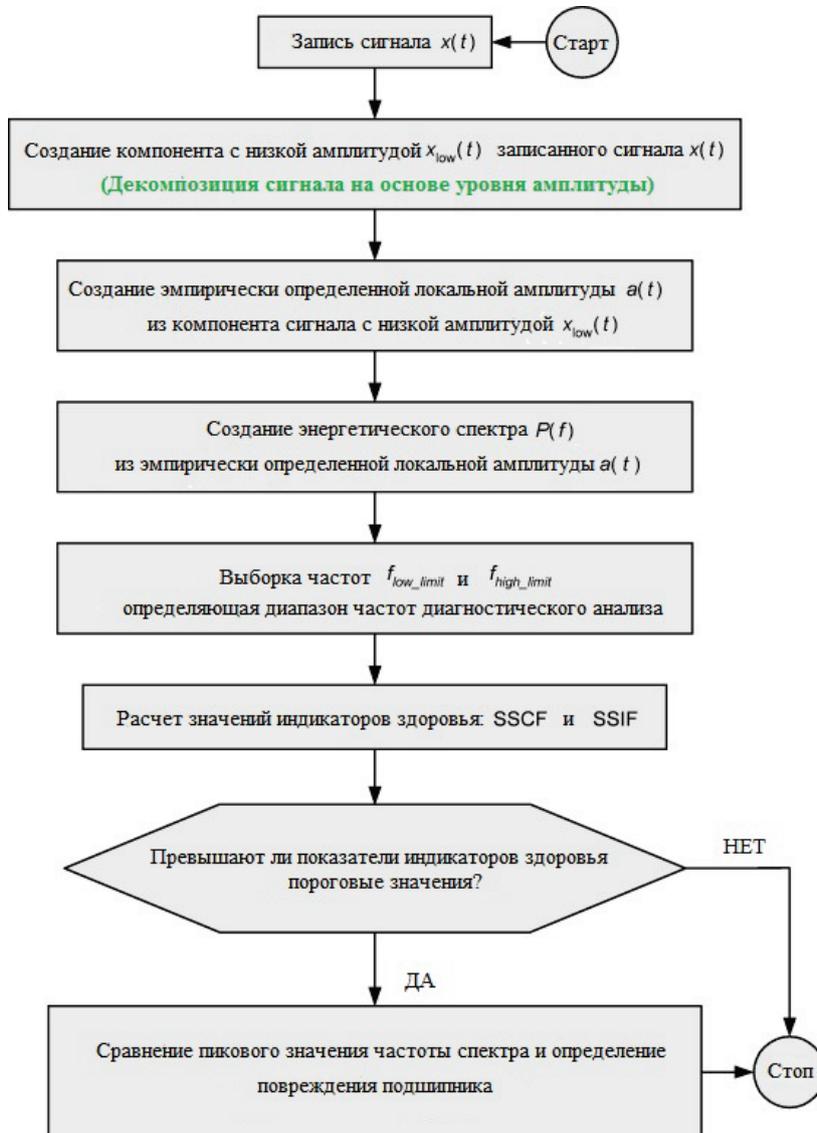


Рис. 1. Блок-схема рассматриваемого диагностического метода

Процедура декомпозиции сигнала на основе уровня амплитуды для разложения исходного сигнала на компоненты с высокой и низкой амплитудой может выглядеть следующим образом [14]:

- шаг 1: с помощью быстрого преобразования Фурье (FFT — Fast Fourier Transform) создается амплитудный спектр сигнала;
- шаг 2: с помощью обратного быстрого преобразования Фурье (IFFT) создается компонент высокой амплитуды сигнала, с использованием только

спектральных компонентов сигнала, которые имеют амплитуду, превышающую заданное пороговое значение амплитуды T_A ;

- шаг 3: с помощью обратного быстрого преобразования Фурье (IFFT) создается компонент с низкой амплитудой сигнала, с использованием только спектральных компонентов сигнала, которые имеют амплитуду, равную или меньше, чем заданное пороговое значение амплитуды T_A .

Несмотря на это одноэтапное разложение обычно недостаточно для извлечения интересующего импульса из сигнала необработанной вибрации. В этом случае сигнал разбивается на три части: компонент с высокой амплитудой сигнала, компонент сигнала средней амплитуды и компонент с низкой амплитудой сигнала. На рисунке 2 [4] представлена схема декомпозиции сигнала на три составляющие.

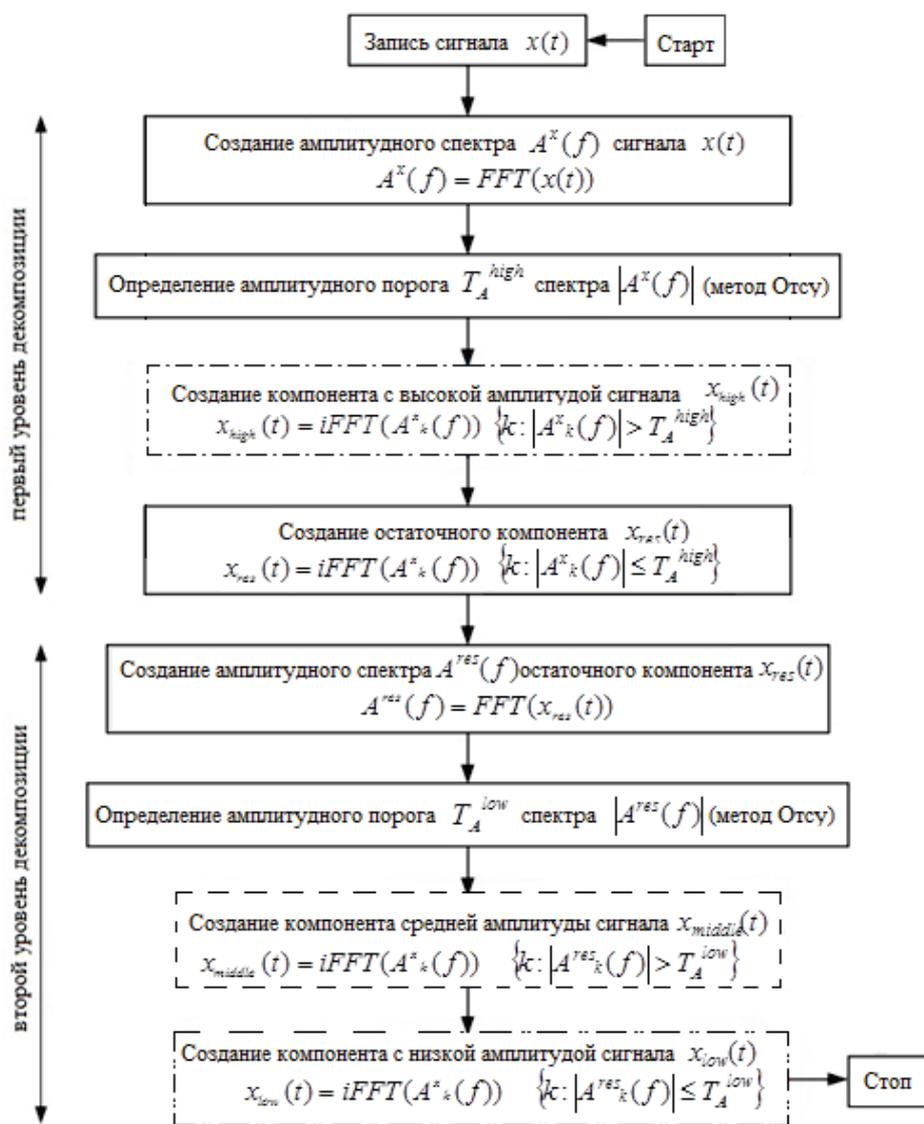


Рис. 2. Блок-схема двухэтапного разложения сигнала на основе уровня амплитуды

Результующим элементом предлагаемого диагностического подхода является разложение сигнала основного уровня амплитуды. Низкоамплитудный компонент, рассмотренный на рисунке 3 [4], используется в качестве информационного сигнала подшипника качения.

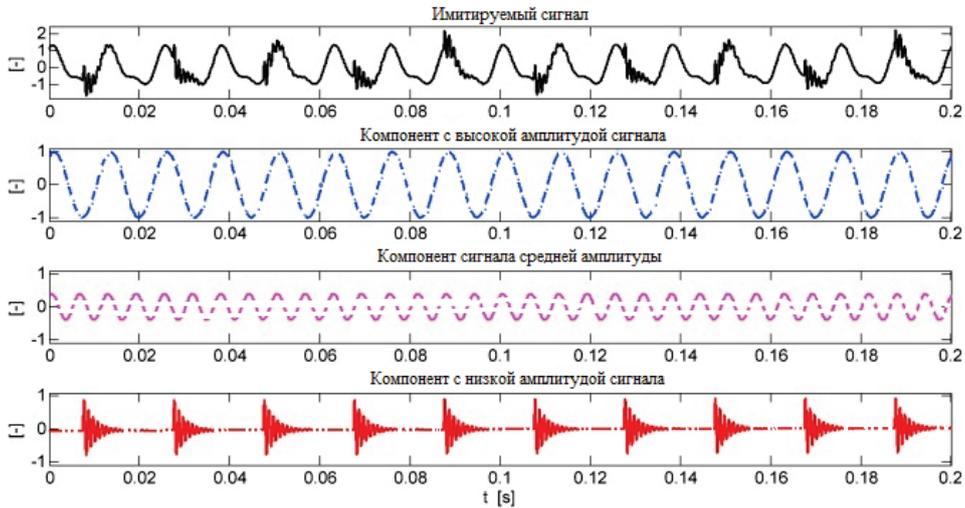


Рис. 3. Результаты декомпозиции сигнала на основе амплитудного уровня имитируемого сигнала

Чтобы выполнить извлечение функции, связанной с отказом подшипника от низкоамплитудной составляющей вибрационного сигнала, используется эмпирически определенная локальная амплитуда, которая рассчитывается следующим образом [4, 15]:

$$a(t) = \frac{|E_U(t) - E_L(t)|}{2},$$

где $E_U(t)$ — эмпирически определенная верхняя сигнальная огибающая конверта; $E_L(t)$ — эмпирически определенная нижняя сигнальная огибающая конверта.

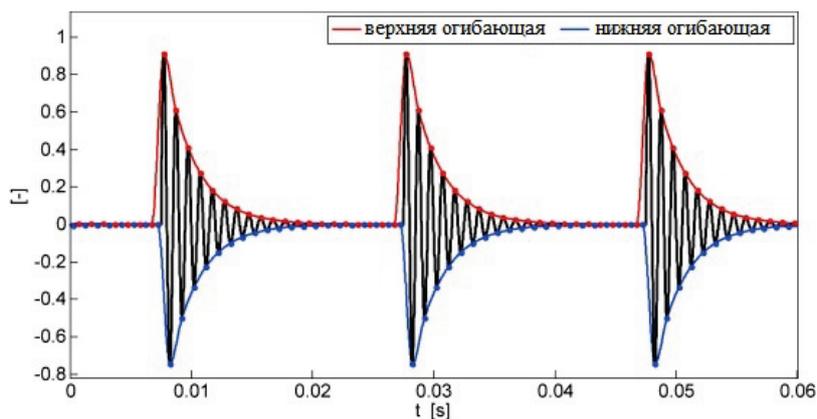


Рис. 4. Эмпирически определенные огибающие имитируемого сигнала

Процедура эмпирических определений «конвертов» — диапазона повреждения подшипника — представлена на рисунке 4 [4, 16] и состоит из следующей последовательности:

- шаг 1: определение всех локальных максимумов и минимумов сигнала;
- шаг 2: подключение линии всех локальных максимумов, образующих верхнюю огибающую конверта E_U . Следуя аналогичной процедуре, образуется нижняя огибающая конверта E_L . Локальные максимумы (минимумы) связаны линией, с использованием кусочно-кубической интерполяции (кусочно-кубические многочлены Эрмита).

Выводы

В рассмотренном методе диагностики подшипниковых узлов магистрального нефтяного насоса ключевую роль играют прогнозирование и выявление дефектов на ранней стадии. Благодаря чему удается обеспечить длительный эксплуатационный срок отдельных узлов технологического оборудования, снизить риски возникновения необратимых механических повреждений и увеличить эффективность эксплуатации оборудования с помощью технической диагностики [17–20].

Обоснование эффективности использования:

- полностью автоматический метод декомпозиции вибрационного сигнала на основе амплитудного уровня;
- выделение интересующего импульса из сигнала необработанной вибрации;
- возможность идентифицирования типа повреждения на ранних этапах развития.

Библиографический список

1. Karimi H., Nasab H. S. Diagnosis using acoustic emission // *World Pumps*. – 2012. – Vol. 2012, Issue 1. – P. 33–37. – Available at: [https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(11\)70400-X](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(11)70400-X).
2. Centrifugal compressor fault diagnosis based on qualitative simulation and thermal parameters / Y. Lu [et al.] // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2016. – Vol. 81. – P. 259–273. – Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.03.018>.
3. Wang J., He Q. B., Kong F. R. Multiscale envelope manifold for enhanced fault diagnosis of rotating machines // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2015. – Vol. 52–53. – P. 376–392. – Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.07.021>.
4. Dybala J. Diagnosing of rolling-element bearings using amplitude level-based decomposition of machine vibration signal // *Measurement*. – 2018. – Vol. 126. – P. 143–155. – Available at: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.05.031>.
5. Rotating machine fault diagnosis using empirical mode decomposition / Q. Gao [et al.] // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2008. – Vol. 22, Issue 5. – P. 1072–1081. – Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2007.10.003>.
6. Heng R. B. W., Nor, M. J. M. Statistical analysis of sound and vibration signals for monitoring rolling element bearing condition // *Applied Acoustic*. – 1998. – Vol. 53, Issue 1–3. – P. 211–226. – Available at: [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(97\)00018-2](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(97)00018-2).
7. Lin J., Zuo M. J. Gearbox fault diagnosis using adaptive wavelet filter // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2003. – Vol. 17, Issue 6. – P. 1259–1269. – Available at: <https://doi.org/10.1006/mssp.2002.1507>.
8. Барков А. В., Баркова Н. А., Азовцев А. Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: учеб. пособие. – СПб.: Издательский центр ГМТУ, 2000. – 158 с.
9. Чуи Ч. Введение в вэйвлеты / Пер. с англ. Я.М. Жилейкина. – М.: Мир, 2001. – 412 с.
10. Русов В. А. Спектральная вибродиагностика. – Пермь, 1996. – 176 с.

11. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.
12. Костюков В. Н. Ранговый метод виброакустической диагностики и оценки качества машин // Гидропривод и системы управления строительных, тяговых и дорожных машин: межвуз. сб. – Омск: ОмПИ, 1985. – С. 113–124.
13. Пат. № 1280961. РФ МПК H04B 51/0060/M13/02. № 823505038/06. Способ виброакустической диагностики машин периодического действия и устройство для его осуществления / Костюков В. Н.; заявл. 22.10.82; опубл. 20.08.98, Бюл. 16.
14. Barszcz T. Decomposition of Vibration Signals into Deterministic and Nondeterministic Components and its Capabilities of Fault Detection and Identification // International Journal of Applied Mathematics and Computation Since. – 2009. – Vol. 19, Issue 2. – P. 327–335. DOI: 10.2478/v10006-009-0028-0
15. Harish Chandra N., Sekhar A. S. Fault detection in rotor bearing systems using time frequency techniques // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2016. – Vol. 72–73. – P. 105–133. – Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.11.013>.
16. Lv Y., Yuan R., Song G. Multivariate empirical mode decomposition and its application to fault diagnosis of rolling bearing // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2016. – Vol. 81. – P. 219–234. – Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.03.010>.
17. Antoni J., Randall R. B. Unsupervised noise cancellation for vibration signals. Part I — evaluation of adaptive algorithms // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2004. – Vol. 18, Issue 1. – P. 89–101. – Available at: [https://doi.org/10.1016/S0888-3270\(03\)00012-8](https://doi.org/10.1016/S0888-3270(03)00012-8).
18. Gear crack detection by adaptive amplitude and phase demodulation / D. Brie [et al.] // Mechanical Systems and Signal Processing. – 1997. – Vol. 11, Issue 1. – P. 327–335. – Available at: <https://doi.org/10.1006/mssp.1996.0068>.
19. Chaturvedi G. K., Thomas D. W. Adaptive noise cancelling and conditional monitoring // Journal of Sound Vibration. – 1981. – Vol. 76, Issue 3. – P. 391–405. – Available at: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(81\)90519-8](https://doi.org/10.1016/0022-460X(81)90519-8).
20. Dybala J., Zimroz R. Rolling bearing diagnosing method based on Empirical Mode Decomposition of machine vibration signal // Applied Acoustic. – 2014. – Vol. 77. – P. 195–203. – Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.09.001>.

References

1. Karimi H., & Nasab, H. S. (2012). Diagnosis using acoustic emission. World Pumps, (1), pp. 33-37. (In English). Available at: [https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(11\)70400-X](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(11)70400-X).
2. Lu, Y., Wang, F., Jia, M., & Qi, Y. (2016). Centrifugal compressor fault diagnosis based on qualitative simulation and thermal parameters. Mechanical Systems and Signal Processing, 81, pp. 259-273. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.03.018>.
3. Wang, J., He, Q. B., & Kong, F. R. (2015). Multiscale envelope manifold for enhanced fault diagnosis of rotating machines. Mechanical Systems and Signal Processing, 52-53, pp. 376-392. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2014.07.021>.
4. Dybala, J. (2018). Diagnosing of rolling-element bearings using amplitude level-based decomposition of machine vibration signal. Measurement, 126, pp. 143-155. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.05.031>.
5. Gao, Q., Duan, C., Fan, H., & Meng, Q. (2008). Rotating machine fault diagnosis using empirical mode decomposition. Mechanical Systems and Signal Processing, 22(5), pp. 1072-1081. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2007.10.003>.
6. Heng, R. B. W., & Nor M. J. M. (1998). Statistical analysis of sound and vibration signals for monitoring rolling element bearing condition. Applied Acoustic, 53(1-3), pp. 211-226. (In English). Available at: [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(97\)00018-2](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(97)00018-2).
7. Lin, J., & Zuo, M. J. (2003). Gearbox fault diagnosis using adaptive wavelet filter. Mechanical Systems and Signal Processing, 17(6), pp. 1259-1269. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1006/mssp.2002.1507>.
8. Barkov, A. V., Barkova, N. A., & Azovtsev, A. Yu. (2000). Monitoring i diagnostika rotnykh mashin po vibratsii. Saint Petersburg, GMTU Publ., 158 p. (In Russian).
9. Chui, Ch. K. (1992). An Introduction to Wavelets. Texas, Academic Press. (In English). Available at: https://www.researchgate.net/publication/231222178_An_Introduction_to_Wavelets.
10. Rusov, V. A. (1996). Spektral'naya vibrodiagnostika. Perm, 176 p. (In Russian).

11. Dobeshi, I. Desyat' lektsiy po veyvletam. (2001). Izhevsk: Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika NITS, 464 p. (In Russian).
12. Kostyukov, V. N. (1985). Rangovyy metod vibroakusticheskoy diagnostiki i otsenki kachestva mashin. Gidroprivod i sistemy upravleniya stroitel'nykh, tyagovykh i dorozhnykh mashin. Omsk: OmPI Publ., pp. 113-124. (In Russian).
13. Kostyukov, V. N. Sposob vibroakusticheskoy diagnostiki mashin periodicheskogo deystviya i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya. Pat. № 1280961. RF MPK N04V 51/0060/M13/02. No 823505038/06. Applied. 22.10.82; Published: 20.08.98, Bull. 16. (In Russian).
14. Barszcz, T. (2009). Decomposition of vibration signals into deterministic and nondeterministic components and its capabilities of fault detection and identification. International Journal of Applied Mathematics and Computation Since, 19(2), pp. 327-335. (In English). DOI: 10.2478/v10006-009-0028-0
15. Harish Chandra, N., & Sekhar, A. S. (2016). Fault detection in rotor bearing systems using time frequency techniques. Mechanical Systems and Signal Processing, 72-73, pp. 105-133. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.11.013>.
16. Lv, Y., Yuan, R., & Song, G. (2016). Multivariate empirical mode decomposition and its application to fault diagnosis of rolling bearing. Mechanical Systems and Signal Processing, 81, pp. 219-234. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.03.010>.
17. Antoni, J., & Randall, R. B. (2004). Unsupervised noise cancellation for vibration signals. Part I - evaluation of adaptive algorithms // Mechanical Systems and Signal Processing, 18(1), pp. 89-101. (In English). Available at: [https://doi.org/10.1016/S0888-3270\(03\)00012-8](https://doi.org/10.1016/S0888-3270(03)00012-8).
18. Brie, D., Tomzak, M., Oehlmann, H., & Richard, A. (1997). Gear crack detection by adaptive amplitude and phase demodulation. Mechanical Systems and Signal Processing, 11(1), pp. 327-335. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1006/mssp.1996.0068>.
19. Chaturvedi, G. K., & Thomas, D. W. (1981). Adaptive noise cancelling and conditional monitoring. Journal of Sound Vibration, 76(3), pp. 391-405. (In English). Available at: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(81\)90519-8](https://doi.org/10.1016/0022-460X(81)90519-8).
20. Dybala, J., & Zimroz, R. (2014). Rolling bearing diagnosing method based on Empirical Mode Decomposition of machine vibration signal. Applied Acoustic, 77, pp. 195-203. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.09.001>.

Сведения об авторах

Information about the authors

Кононов Павел Сергеевич, студент,
Тюменский индустриальный университет,
г. Тюмень

Pavel S. Kononov, Student, Industrial University of Tyumen

Огудова Евгения Владимировна,
старший преподаватель кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет,
г. Тюмень, e-mail: specular@mail.ru

Evgenia V. Ogudova, Senior Lecturer at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen, e-mail: specular@mail.ru