

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 622.23:681.518.43

ОБ ОДНОЙ ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОПОРНЫХ УЗЛОВ ГОРНЫХ МАШИН

Б. Л. Герике^{1,2}, В. И. Клишин^{1,2}, А. А. Мокрушев^{1,2}

¹Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
E-mail: gbl_42@mail.ru, просп. Ленинградский, 10, 650056, г. Кемерово, Россия
²Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева,
E-mail: andy-mokrushev@yandex.ru, ул. Весенняя, 28, 650099, г. Кемерово, Россия

Рассмотрена классификация существующих методов диагностики технического состояния опорных узлов горных машин с подшипниками качения, показаны их достоинства и недостатки. Построена модель формирования ударных импульсов в подшипниках качения при возникновении в них различного рода дефектов, пригодная для проведения мониторинга технического состояния опорных узлов горных машин. Исследована возможность применения вейвлет-преобразований вместо стандартного быстрого преобразования Фурье случайных процессов, формирующихся виброакустических сигналов в подшипнике качения, для распознавания дефектов, возникающих при изготовлении и эксплуатации горных машин.

Горные машины, опорные узлы, подшипники качения, дефекты изготовления и сборки, оценка технического состояния, мониторинг, вибродиагностика

DOI: 10.15372/FTPRI20190611

Тяжелые условия эксплуатации горных машин и высокий уровень динамической нагрузки приводят к снижению срока их эксплуатации. Количественная оценка надежности машин по ресурсному показателю широко распространена во всех отраслях техники. Важным методом повышения надежности является техническое диагностирование, задачами которого являются [1–3]:

- контроль технического состояния, т. е. проверка соответствия значений параметров объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов технического состояния на текущий момент времени;
- поиск места и выявление причин отказа (неисправности);
- прогнозирование технического состояния.

В соответствии с нормативами по безопасности забойных машин, комплексов и агрегатов, к технической диагностике предъявляются следующие требования:

— горные машины и оборудование должны включать в себя подсистему диагностического обеспечения, выполняющую безопасный контроль технического состояния путем измерения и индикации параметров машин, устройств автоматики, электрических, гидравлических и пневматических систем, систем смазки, а также подшипниковых узлов;

— в подсистеме диагностического обеспечения должны предусматриваться неразрушающий контроль технического состояния объектов, определение внезапных и параметрических отказов горных машин и их систем, обнаружение постепенных отказов путем прогнозирования изменения контролируемых параметров, непрерывный и периодический контроль технического состояния.

Все детали горных машин и оборудования в зависимости от условий работы и вида изнашивания можно разделить на четыре группы. В первую входят: зубья и режущие кромки ковшей экскаваторов; основания крепи; перекрытия крепей; шнеки; бары, отвалы бульдозеров; траки, опорные ролики, пальцы, втулки, звездочки ходовой части машин на гусеничном ходу и др., долговечность деталей которых обуславливается абразивным износом. Во вторую — детали со шлицами и резьбами, зубчатые муфты, посадочные места под подшипники качения валов, станков, поверхности зубчатых передач и др., долговечность которых определяется механическим износом поверхностей деталей. В третью — детали двигателей внутреннего сгорания автосамосвалов, бульдозеров, скреперов, устройства для термического разрушения горных пород и огневого бурения и др., долговечность которых лимитируется молекулярно-химическим или коррозионно-механическим износом. В четвертую — подшипники качения и скольжения, рессоры, пружины, шатуны, шатунные болты и др., долговечность которых зависит от усталостной прочности металла.

В настоящее время на угольных предприятиях эксплуатируется значительное количество ленточных конвейеров, от работоспособного состояния которых зависят показатели работы угольной промышленности Кузбасса. В ближайшее время ожидается увеличение энерговооруженности и технической оснащенности ленточных конвейеров, производительности и длины транспортирования горной массы; широко внедряется частотно-регулируемый электропривод [4–6].

Повышающиеся объемы добычи угля подземным способом требуют создания надежных транспортных систем. Это основная задача, стоящая перед производителями поточных линий шахтных ленточных конвейеров. Не менее важным является сокращение затрат на их техническое обслуживание и ремонт [7, 8]. Для обеспечения безотказности работы ленточного конвейера в течение продолжительного времени необходимо установить причины выхода из строя различных составляющих элементов, в первую очередь зубчатых зацеплений и подшипниковых узлов, долговечность которых определяется механическим износом трущихся поверхностей [3, 9].

ЗАДАЧА ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ простоев, вызванных отказом редукторов магистральных и забойных конвейеров, показывает, что их доля колеблется от 7 до 18 %, среднее время восстановления работоспособного состояния составляет 24–48 ч [3, 10]. Это свидетельствует об актуальности исследований.

Для контроля технического состояния механического оборудования хорошо зарекомендовал себя метод вибрационного контроля [3, 11, 12]. Вибрационная диагностика применяется для:

- контроля текущего состояния оборудования;
- разделения множества возможных технических состояний агрегата на два подмножества (исправные и неисправные);
- постановки диагноза, определяющего характер и локализацию одного или группы дефектов, соответствующих вибрационному состоянию агрегата;

- обнаружения возможного дефекта на ранней стадии и прогнозирования его развития во времени;
- оценки остаточного ресурса;
- установления сроков и объемов ремонтных работ;
- снижения риска возникновения аварийной ситуации.

Из всего перечня задач вибродиагностики наибольшего внимания заслуживают последние четыре, как наименее развитые [6, 8, 11, 12].

Как показывает опыт контроля технического состояния горного оборудования, для обнаружения возможных износных отказов наиболее эффективен контроль по параметрам вибрации (до 77 %), а с привлечением методов функциональной диагностики (спектрального анализа масла и тепловизионного контроля) достоверность распознавания причин возникновения дефекта при таком контроле возрастает до 95 % [11, 13 – 15].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Полный анализ технического состояния редуктора после сборки и обкатки на испытательном стенде (рис. 1) позволяет не только выявить и локализовать дефекты изготовления, но и исключить возможность поставки потребителю некачественной продукции. Полученные данные могут лечь в основу разработки системы автоматизированного контроля качества.



Рис. 1. Общий вид испытательного стенда на ОАО «Анжеромаш»

Согласно анализу методов вибрационного контроля, для автоматизации контроля выпускаемой продукции, предназначенной для угольной отрасли, целесообразно применять метод опорных масок. Он основан на том, что дефекты изготовления и сборки машины генерируют вибрацию в частотных полосах, характерных для конкретных видов дефектов, а частотные составляющие определяют степень опасности того или иного дефекта. Метод дает возможность устанавливать ширину частотной полосы, ее положение и значения критериев оценки, которые сравниваются с текущими в произвольном порядке. Анализируя изменения контролируемого параметра в частотной полосе (число полос изменяется от 6 до 30), осуществляется оценка и прогноз состояния оборудования [16].

Частотные диапазоны спектральной маски (ширина полос) принимают исходя из следующих условий [12, 16]:

- высокоэнергетические составляющие спектра, сопровождающие дисбаланс или расцентровку, $(0.5 \div 1.5)f_r$ и $(1.5 \div 2.5)f_r$, где f_r — частота вращения приводного двигателя;
- низкоэнергетические составляющие колебаний, сопровождающие дефекты подшипника качения $(7.5 \div 12.5)f_r$;
- общее нарушение жесткости системы $(2.5 \div 10.5)f_r$;

- первая среднечастотная полоса $(3 \div 15)f_r$;
- вторая среднечастотная полоса $(15 \div 40)f_r$;
- первая высокочастотная полоса $40f_r$, 20 кГц;
- боковые частоты $(n \pm 1)f_r$, характерные для повреждения элементов соединительных муфт;
- целочисленная переменная, где $n = 1, 2, 3$.

Благодаря применению современных технологий контроля технического состояния оборудования, осуществляется индивидуальный подход к каждому выпускаемому агрегату при оценке его технического состояния и устанавливаются пороговые значения исходного, работоспособного и предельного состояний. На рис. 2 показаны контрольные точки измерения виброакустического сигнала на редукторе РКЦ-400 (ОАО “Анжеромаш”) с использованием виброанализатора “Corvet”. Обработка полученной информации проводилась на программной платформе Safe Plant (НПО “Диатех”).

Такие механические неисправности горношахтного оборудования, как дисбаланс, расцентровка, дефекты зубчатых передач приводят к возникновению проблем функционирования опорных элементов во всевозможных приводных, преобразующих и исполнительных механизмах — подшипниках качения. Наиболее полное представление о возможных дефектах подшипников качения приведено в [17, 18]. Оно не является исчерпывающим и содержит только основные встречающиеся повреждения, причины их вызывающие и локализацию повреждений. В [1, 16, 19] описаны методы анализа технического состояния подшипников качения. Они в редких случаях позволяют диагностировать неисправность, поскольку использование прямого спектрального анализа виброакустического сигнала для распознавания дефектов затруднено из-за малых амплитуд этих частотных составляющих, теряющихся на фоне “коврового шума”.

Основные методы диагностики неисправностей в подшипниках качения можно разделить на две группы [1, 12, 16, 19, 20]:

- на основании сравнения с данными предыдущих замеров методом BEARCON (Schenck), узкополосным спектральным анализом, кепстральным анализом (Bruel@Kjar), анализом процесса случайного процесса (Диамех 2000) и т. п.;
- по однократному замеру ударных импульсов методами SPM (SKF) [18], анализу огибающих (Boeing) и т. п.

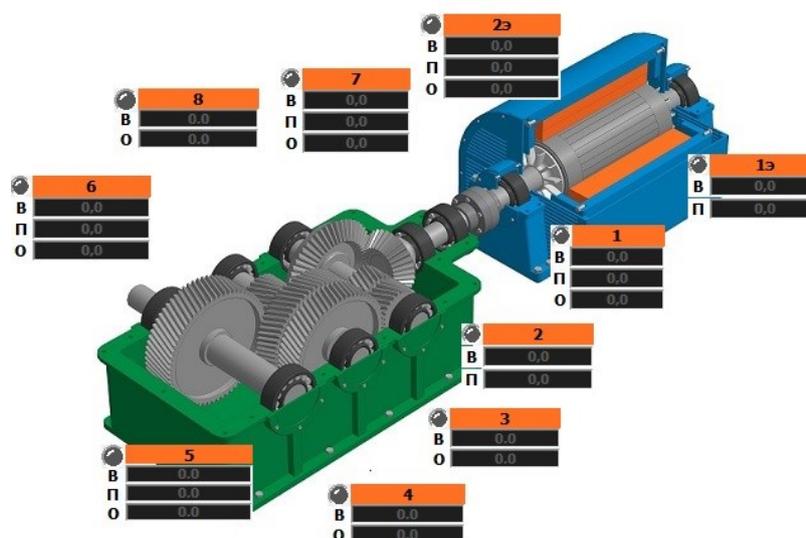


Рис. 2. Контрольные точки измерения вибрации на редукторе РКЦ-400: В — вертикальная плоскость; П — поперечная; О — продольная

МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ДЕФЕКТНОМ ПОДШИПНИКЕ КАЧЕНИЯ

Для создания более чувствительного метода диагностики дефектов необходимо тщательное изучение и моделирование динамических процессов, происходящих в подшипниках качения. Рассмотрим возникновение ударного импульса и опишем его зависимость $x(t) = a_0 \lambda^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0)$, где x — смещение; a_0 — начальная амплитуда; ω — частота затухающих колебаний, связанная с частотой собственных колебаний $\omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2$; $\beta = r t / 2m$ — скорость затухания колебаний, r — коэффициент сопротивления, m — масса колеблющейся системы.

На рис. 3а показана форма сигнала виброускорения, зафиксированная на неработающей экспериментальной установке, по которой осуществлялись периодические удары металлическим молотком. Даже в самом исходном сигнале заметно присутствие низко- и высокочастотных составляющих. Наиболее различимы частотные компоненты при преобразовании фурье-виброакустического сигнала (рис. 3б), которое приводит к возникновению ложных частотных компонент, не присущих исходному сигналу.

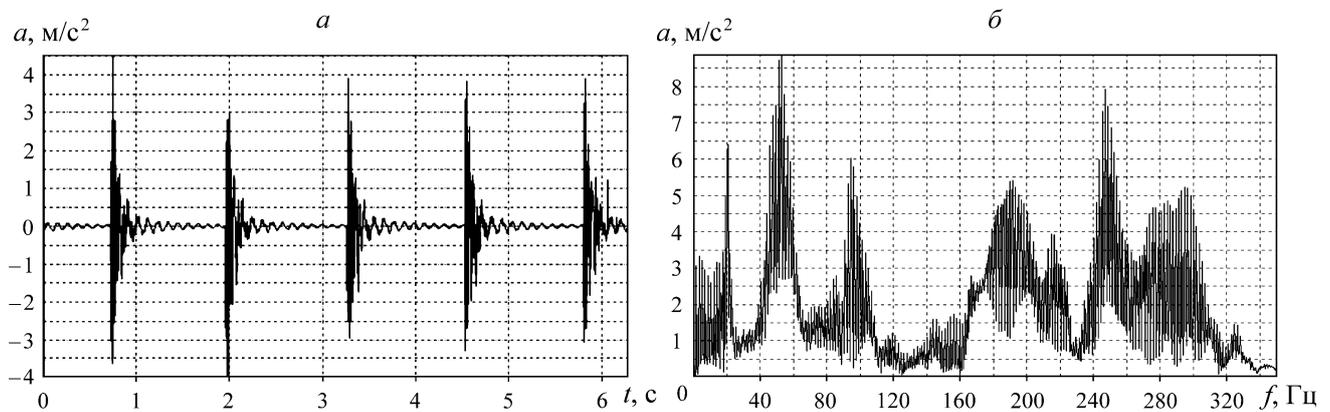


Рис. 3. Сигнал виброускорения (а) и его спектр (б)

Для каждой частоты характерны различные скорости затухания. На рис. 4 показано изменение амплитуд различных частотных составляющих центрального ударного импульса во времени, расположенного в середине временной развертки. Приведенные срезы разделены равными временными интервалами. Здесь можно провести аналогию с электромагнитными волнами, которые в зависимости от длины (частоты) имеют большие или, соответственно, меньшие свойства поглощаться (рассеиваться). С другой стороны, это связано с массой конкретного узла, создающего данную частоту, и присутствием каких-либо поглотителей энергии (например, амортизаторов).

Различие в амплитуде ударного импульса в начальный момент времени обусловлено геометрией механизма, т. е. расстоянием между источником импульса и конкретным узлом, наличием препятствий для распространения виброакустического сигнала. Предполагая линейность изучаемой системы, реальный импульс представим в виде суммы модельных импульсов с различными частотами и скоростями затухания:

$$I(t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \lambda^{-\beta t} \cos(\omega_i t + \varphi_i). \quad (1)$$

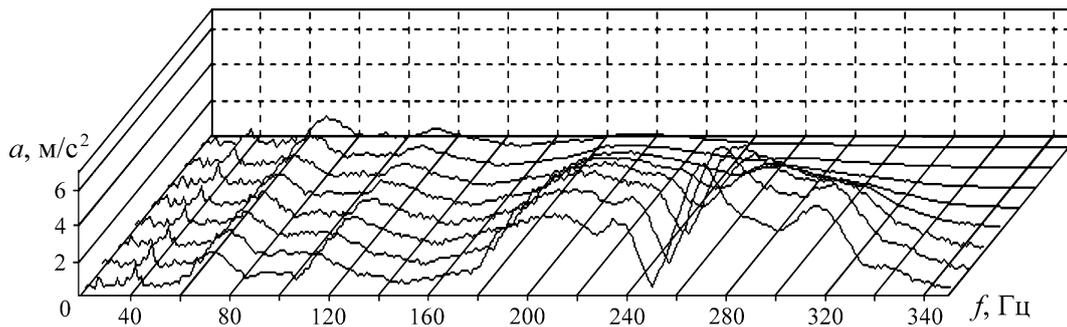


Рис. 4. Эволюция частот импульса

Для преобразования исходного сигнала к виду (1) оптимально его разложение по базису $x_i(t)$, но система $x_i(t)$ неортогональна. Следовательно, необходимо построить ортонормированную систему по аналогии с рядами Фурье, причем с минимальной коррекцией исходной системы $x_i(t)$.

В 70-х годах XX в. появились вейвлет-методы. На вейвлет-функцию W_Ψ накладываются два ограничения: она должна быть достаточно локализована, т. е. обращаться в нуль при удалении от начала координат; интеграл от функции на $(-\infty; +\infty)$ должен равняться нулю. Вейвлет-преобразование выглядит следующим образом:

$$W_\Psi f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{C_\Psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{b-x}{a}\right) f(x) dx.$$

Здесь a — масштаб; b — сдвиг; $C_\Psi = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} (|\Psi(\omega)|^2 / |\omega|) d\omega$ — нормирующий коэффициент,

$\Psi(\omega)$ — фурье-образ вейвлета W_Ψ . Свобода в выборе базисных функций $\Psi[(b-x)/a]$ позволила ввести многие типы вейвлетов (Хаара, Добеши, Гаусса, Морле и др.).

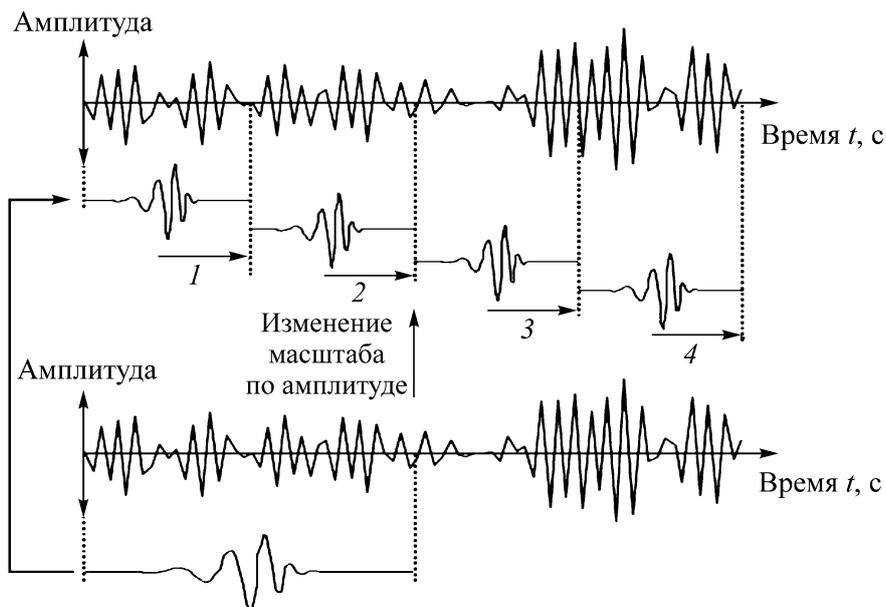


Рис. 5. Алгоритм обработки сигнала вейвлет-преобразованием: 1–4 — смещение по оси времени

Вейвлет-преобразование представляет собой сигнал в виде одинаковых по форме коротких всплесков, которые можно сдвигать и растягивать по временной оси (рис. 5). Это принципиальное отличие от бесконечных волн преобразования Фурье [21 – 23].

Помимо непрерывного вейвлет-преобразования, существует дискретное преобразование, в котором происходит процесс фильтрации. Благодаря этому возникают понятия аппроксимации (высокомасштабированные высокочастотные компоненты) и детали (низкомасштабированные). Таким образом, первоначальный сигнал разбивается на два, дополняющих друг друга, что дает в 2 раза больше данных о нем. По сравнению с разложением сигналов в ряды Фурье, вейвлеты обладают способностью представлять локальные особенности сигналов с большей точностью и решать проблемы выявления дефектов оборудования комплексным способом [21 – 23].

АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ

Вейвлет-функция обладает необходимыми свойствами для решения поставленной задачи. На рис. 6а показана эволюция частот импульса во времени, построенная с помощью модифицированного вейвлет-преобразования Хаара. Большим преимуществом этого метода является его локальность, т. е. возможность проследить динамику изменения амплитуд частотных компонентов.

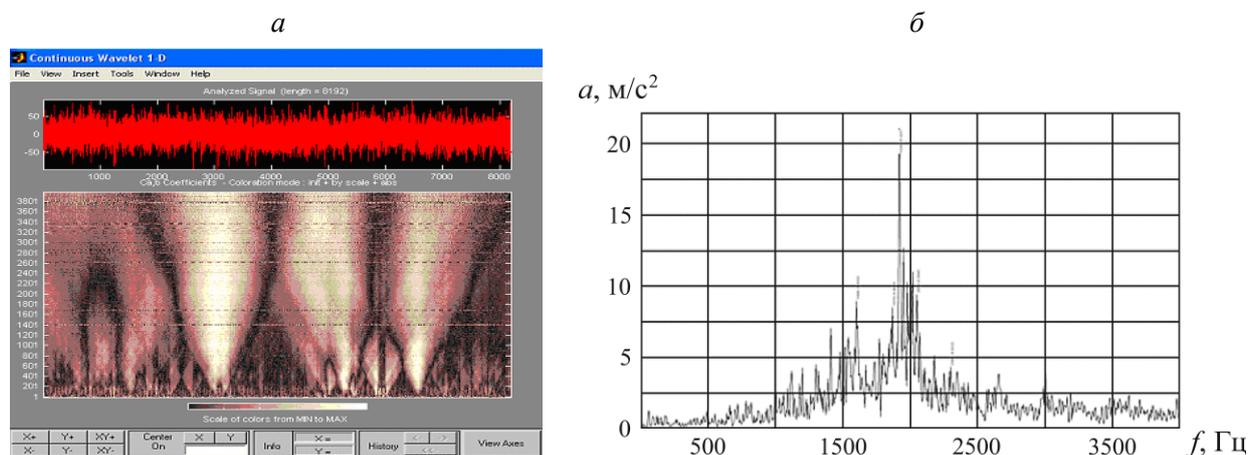


Рис. 6. Вейвлет-преобразование Хаара (а) виброакустического сигнала развитого дефекта подшипника качения и преобразование Фурье (б)

На рис. 6б приведены результаты обработки виброакустического сигнала, измеренного в контрольной точке 5 на выходном валу редуктора РКЦ-400 после года эксплуатации. Виброактивность в этой точке оказалась выше допустимых норм, что свидетельствует об износе подшипника качения и подтвердилось при разборке и осмотре тел качения и беговой дорожки внутреннего кольца (рис. 7).



Рис. 7. Дефект двухрядного подшипника качения: а — износ тел качения; б — износ беговой дорожки

ВЫВОДЫ

Предложенный подход к нормированию параметров механических колебаний может быть использован при разработке стандарта предприятия по нормированию вибрации выпускаемой продукции для включения в паспорт изделия. Разработка большого числа спектральных масок для широкого типового ряда горной техники является одним из условий выпуска заводами горного машиностроения качественной продукции и осуществления перехода на новые формы технического обслуживания и ремонта горных машин. С использованием прогностической модели, построенной на основе статистических результатов мониторинга технического состояния горных машин, появляется возможность в достаточной мере оценить исследуемую неисправность, а также спрогнозировать остаточный ресурс узла или агрегата и осуществлять эффективное планирование ремонтных работ, предупреждение возникновения аварийных отказов. Предложенное решение позволит минимизировать издержки эксплуатации, связанные с внезапным выходом из строя подшипников качения, оптимизировать логистику и складское хозяйство. Это важно при создании условий для перехода к качественно новой системе управления техническим обслуживанием горношахтного оборудования на основе распознавания его технического состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Неразрушающий контроль:** справочник в 8 т. / под ред. В. В. Клюева. Т. 7 в 2 кн. Кн. 1. В. И. Иванов, И. Э. Власов. Метод акустической эмиссии. Кн. 2. Ф. Я. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова. Вибродиагностика. — М.: Машиностроение, 2006. — 829 с.
2. **Kukharensko V. G.** Indirect identification of low-pressure compressor blade flutter with oscillation record preprocessing in use // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2008. — № 4. — С. 37–43.
3. **Герике П. Б., Нестерова О. А.** Применение результатов неразрушающего контроля для создания методики распознавания технического состояния горно-шахтного оборудования по параметрам вибрации // Вестн. КузГТУ. — 2017. — № 6. — С. 161–169.
4. **Гаммершмидт А. А.** Состояние и перспективы развития угольной промышленности Кузбасса // Уголь. — 2015. — № 5. — С. 14–15.
5. **Галкин В. И., Шешко Е. Е.** Транспортные машины. — М.: Горн. книга, 2010. — 588 с.
6. **Герике Б. Л., Сушко А. Е., Герике П. Б.** Внедрение цифровых технологий в области технической диагностики, обслуживания и ремонта горных машин и оборудования // Техника и технология горного дела. — 2018. — № 3. — С. 19–28.
7. **Wu J. D. and Liu C. H.** Investigation of engine fault diagnosis using discrete wavelet transform and neural network, Expert Systems with Applications, 2008, Vol. 35. — P. 1200–1213.
8. **Bendjama H., Bouhouche S., Boucherit M. S., and Mansour M.** Vibration signal analysis using Wavelet-PCA-NN technique for fault diagnosis in rotating machinery, The Mediterranean J. of Measurement and Control, 2010, Vol. 6, No. 4. — P. 145–154.
9. **Захаров А. Ю., Ширямов Д. В.** Определение критической величины сопротивления вращению конвейерных роликов // Горное оборудование и электромеханика. — 2016. — № 1. — С. 3–8.
10. **Маметьев Л. Е., Любимов О. В., Дрозденко Ю. В.** Обоснование параметров технического ресурса подшипниковых узлов инструмента бурошнековых машин // Вестн. КузГТУ. — 2013. — № 1 (95). — С. 16–18.
11. **Краковский Ю. М.** Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. — Новосибирск: Наука, 2005. — 200 с.

12. Kelly S. Graham. Advanced vibration analysis, 2013. — 637 p.
13. Капранов Б. И., Короткова И. А. Спектральный анализ в неразрушающем контроле. — Томск: ТПУ, 2010. — 122 с.
14. **Неразрушающий контроль**: справочник: в 8 т. / под ред. В. В. Клюева. Т. 5. В. П. Вавилов. Тепловой контроль. — М.: Машиностроение, 2005. — С. 361.
15. **Профилактическое обслуживание** оборудования с применением виброанализа // CSI. — 1990. — 252 с.
16. Ширман А. Р., Соловьев А. Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. — М., 1996. — 276 с.
17. **Диагностика** неполадок подшипников // NSK Motion & Control. — 2009. — 42 p.
18. **Повреждения** подшипников качения и их причины // SKF AB. — 2002. — 46 p.
19. Rudloff L., Arghir M., Bonneau O., Guingo S., Chemla G., and Renard E. Experimental analysis of the dynamic characteristics of a hybrid aerostatic bearing, J. Eng. for Gas Turbines and Power, 2012, Vol. 134, No. 18.
20. Сальников А. Ф. Виброакустическая диагностика технических объектов. — Пермь: ПНИПУ, 2011. — 246 с.
21. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук. — 1996. — Т. 166. — № 11. — С. 1145–1170.
22. Витязев В. В. Вейвлет-анализ временных рядов. — СПб.: СПбГУ, 2001. — 58 с.
23. Дьяконов В. П. МАТЛАБ: полный самоучитель. — СПб.: ДМК Пресс, 2012. — 770 с.

Поступила в редакцию 05/VI 2019

После доработки 07/X 2019

Принята к публикации 27/XI 2019