

**УДК 621.822.6**

Б. Л. Герике, профессор, главный научный сотрудник, д.т.н. (КузГТУ, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН)

А. А. Мокрушев – аспирант (КузГТУ)

Г. Кемерово

## **ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ ГОРНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ ВИБРОМОНИТОРИНГА.**

Аннотация. В статье рассмотрен подход к распознаванию дефектов подшипников качения, используемых в различных узлах и агрегатах горных машин и оборудования на основе вейвлет преобразования виброакустических сигналов, генерируемых различными дефектами, возникающих в опорных элементах приводных, преобразующих и исполнительных механизмов горношахтного оборудования. Приведена классификация существующих методов диагностики технического состояния подшипников качения. Рассмотрены достоинства и недостатки этих методов. Построена модель формирования ударных импульсов при возникновении дефектов и показана возможность применения вейвлет преобразований для распознавания технического состояния.

Высокая производительность современных горных предприятий и полная механизация основных технологических процессов горного производства обуславливают необходимость применения на очистных и проходческих работах самоходного бурового оборудования, проходческих и очистных комбайнов, скреперных установок, вентиляторов проветривания, которые являются источником шумового загрязнения окружающей среды и рабочего пространства а также источником вибраций.

Неисправности в работе горных машин приводят к излучению шума высокой интенсивности и недопустимому уровню вибрации, превышающие допустимые для человека санитарные нормы на частотах от 160 до 8000 Гц, что отрицательно влияет на здоровье обслуживающего персонала.

В настоящее время роль диагностики технического состояния горных машин и оборудования на основе виброакустического сигнала постоянно растет [1]. Основные проблемы механических неисправностей горношахтного оборудования (дисбаланс, расцентровка, дефекты зубчатых передач и т.п.) приводят, как правило, к возникновению проблем функционирования опорных элементов во всевозможных приводных, преобразующих и исполнительных механизмах – подшипников качения (рис.1а, б) вследствие чего повышается допустимый уровень шума и вибрации.

Существуют следующие виды повреждений подшипников – первичные и вторичные [2, 3].

- износ возникает тогда, когда в подшипник проникают инородные частицы или, имеет место недостаточное смазывание. Он может быть также следствием вибраций не вращающегося подшипника;
- вмятины на дорожках качения и тела качения могут возникать в тех случаях, когда силы монтажа передаются на кольца через тела качения. Равным образом вмятины возникают при чрезмерно больших нагрузках на подшипниковые узлы в то время, когда подшипники не вращаются. Причиной вмятин может быть проникновение в подшипник инородных частиц;
- задиры – возникают при недостаточной смазываемости поверхностей скольжения под нагрузкой, когда происходит перенос частиц металла с одной поверхности на другую. Поверхности при этом выглядят шероховатыми. При возникновении задиров материал подшипника нагревается до температуры, при которой происходит отпуск. Возникает местная концентрация напряжений, следствием которой является образование трещин и раковин. Также задиры могут возникать тогда, когда тела качения входят в нагруженную зону с большим ускорением;
- поверхностные разрушения возникают в случае слишком тонкого смазывающего слоя между дорожками и телами качения, когда вершины шероховатостей кратковременно соприкасаются друг с другом. При этом на поверхностях возникают мельчайшие трещины. В рассматриваемом процессе поверхностные разрушения первоначально микроскопически малые, затем быстро увеличиваются и, в конце концов, препятствуют плавному вращению подшипника. Трещины описанного вида могут ускорить процесс образования усталостных трещин под поверхностью дорожек качения и этим снизить долговечность подшипника. При достаточном смазывании нет опасности возникновения разрушений описанного вида до тех пор, пока смазывающий слой не становится слишком тонким, либо вследствие изменения вязкости масла из-за повышения температуры, либо при чрезмерном возрастании нагрузки;
- атмосферная коррозия возникает в случае проникновения в подшипник атмосферной влаги или агрессивной среды в таком объеме, что разрываю (размывают) смазочную пленку в местах контакта тел и дорожек качения;
- прохождение электрического тока через подшипник от одного кольца через тела качения к другому кольцу вызывает повреждения подшипника. В местах перехода процесс подобен электродуговой сварке. При этом материал подшипника может нагреваться до температуры плавления. При этом образуются окрашенные области различной величины, в которых материал отожжен и снова закален, а иногда даже оплавлен. В местах, на которых металл был оплавлен, могут также возникать маленькие лунки.

Существующие методы анализа технического состояния подшипников качения [4-6] в очень редких случаях позволяют диагностировать с достаточной точностью их неисправность, поскольку использование прямого спектрального анализа виброакустического сигнала для распознавания дефектов подшипников качения 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:

- оценка состояния подшипника качения производится на основании сравнения с данными предыдущих замеров методом BEARCON (Schenck), узкополосным спектральным анализом, кепстральным анализом, анализом эксцесса случайного процесса (Диамех 2000) и т.п. [4-6];

Вибродиагностика решает следующие практические задачи обслуживания машин и оборудования:

- разделение множества возможных технических состояний агрегата на два подмножества: исправных и неисправных;
- постановка диагноза, состоящего в определении характера и локализации одного или группы дефектов, соответствующих вибрационному состоянию агрегата;
- обнаружение возможного дефекта на ранней стадии и прогнозирование его развития во времени;
- отсутствие, как правило, монтажно-демонтажных работ оборудования и сокращение времени диагностирования;
- снижение риска возникновения аварийной ситуации при эксплуатации оборудования.

Общими недостатками этих методов являются:

- очень слабая чувствительность;
- особые требования к способу крепления датчика вибрации;
- зависимость параметров вибрации от большого количества факторов и сложность выделения вибрационного сигнала, обусловленного наличием неисправности, что требует глубокого знания методов корреляционного и регрессионного анализа и их корректного использования;
- точность диагностирования в большинстве случаев зависит от числа сглаженных параметров, например, числа оценок SPM [6].

а)



б)



Рисунок 1. Дефект двухрядного подшипника: а) износ тел качения подшипника качения; б) износ беговой дорожки подшипника качения.

В 70-х годах 20-го века появились, так называемые, вейвлет-методы (методы всплесков). На вейвлет-функцию накладываются два ограничения:

1. Она должна быть достаточно локализована (обращаться в ноль при удалении от начала координат);

2. Интеграл от функции на  $(-\infty; +\infty)$  должен быть равен нулю.

Само вейвлет преобразование выглядит следующим образом

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

где  $\Psi$  – вейвлет функция,  $a$  – масштаб,  $b$  – сдвиг.

Нормирующий коэффициент равен

$$C_{\Psi} = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty, \quad (2)$$

где  $\Psi(\omega)$  – Фурье образ вейвлета  $\Psi$ .

Свобода в выборе базисных функций  $\Psi\left(\frac{b-x}{a}\right)$  позволила ввести многие типы вейвлетов: Хаара, Добеши, Гаусса, Морле и др.

По своей сути вейвлет-преобразование представляет собой представление сигнала в виде одинаковых по форме коротких «всплесков», которые можно сдвигать и растягивать по временной оси. В этом и заключается принципиальное отличие от бесконечных волн преобразования Фурье [7].

Помимо рассмотренного выше непрерывного вейвлет-преобразования, существует дискретное преобразование, в котором имеет место процесс фильтрации. Благодаря этому возникает два таких понятия как аппроксимация (приближение) и детали. Аппроксимация представляет собой высоко-смаштабированные высокочастотные компоненты, детали – это низко-смаштабированные высокочастотные компоненты. В итоге получается, что первоначальный сигнал разбивается на два сигнала, дополняющих друг друга, что даёт в два раза больше данных о первоначальном сигнале. По сравнению с разложением сигналов на ряды Фурье, вейвлеты обладают способностью представлять локальные особенности сигналов с большей степенью точности и решать проблемы выявления дефектов оборудования более точным, комплексным способом [8, 9, 10].

Таким образом, вейвлет-функция обладает, необходимыми свойствами для решения поставленной выше задачи. Например, эволюция частот импульса во времени (рис. 2) построена при помощи модифицированного вейвлет преобразования Хаара.

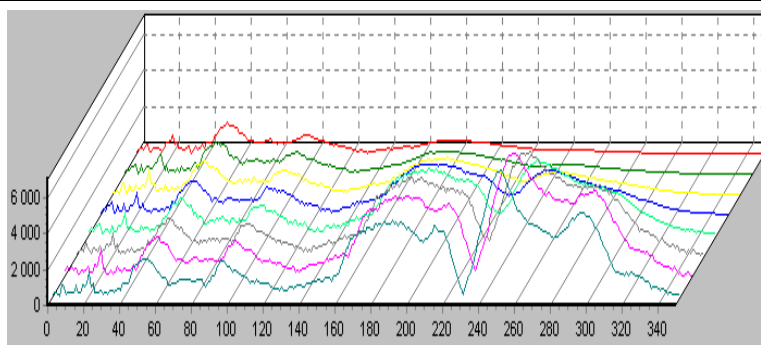


Рисунок 2. Эволюция частот импульса  
во времени

Как уже отмечалось, большим преимуществом этого метода является его локальность, то есть появляется возможность проследить динамику изменения амплитуд частотных компонент.

С использованием прогностической модели на основе статистических результатов вибродиагностики, появляется возможность в достаточной мере точно оценить исследуемую неисправность, а также спрогнозировать остаточный ресурс узла или агрегата и осуществлять эффективное планирование ремонтных работ, предупреждение возникновения аварийных отказов. В итоге предложенное решение позволит минимизировать издержки, связанные с внезапным выходом из строя подшипников качения, оптимизировать логистику и складское хозяйство. Будут созданы все условия для перехода к качественно новой системе управления техническим обслуживанием горношахтного оборудования.

### Список литературы

1. Герике Б.Л., Хорешок А.А., Дрозденко Ю.В. Обеспечение качества выпускаемой продукции заводов горного машиностроения. // Вестник КузГТУ. № 5, 2016. – С. 33 – 40.
2. Диагностика неполадок подшипников. / NSK Motion & Control, 2009. – 42 р.
3. Повреждения подшипников качения и их причины. / SKF AB, 2002. – 46 р.
4. Ширман А.Р., Соловьев А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. // М.: 1996 г. – 276 с.
5. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. 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 и др. Вибродиагностика. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 829 с.
6. Rudloff L., Arghir M., Bonneau O., Guingo S., Chemla G., Renard E. Experimental Analysis of the Dynamic Characteristics of A Hybrid Aerostatic Bearing. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 134 (18). – 2012.
7. Kelly, S. Graham. Advanced vibration analysis. 2013. – 637 p. — (Dekker mechanical engineering).

8. Шебалин О. Д. Физические основы механики и акустики. – М.: Высшая школа, 1981. с. 184.
9. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. // Успехи физических наук, 1996, т.166, № 11. – С. 1145-1170.
10. Витязев В.В. Вейвлет-анализ временных рядов: Учеб. пособие. - СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2001. – 58 с.