

УДК 621.822.6

Б. Л. Герике, профессор, главный научный сотрудник, д.т.н. (КузГТУ, Феде-
ральный 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 вибрационных сигналов, генерируемых различными дефектами, возникающими в опорных элементах приводных, преобразующих и исполнительных механизмов горно-шахтного 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 вибрационного 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 телах 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 разрушают (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 эксперимента 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

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

$$\left(\frac{b-x}{a} \right) f(x) dx.$$

где Ψ – вейвлет функция, a – масштаб, b – сдвиг.

Нормирующий коэффициент равен

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

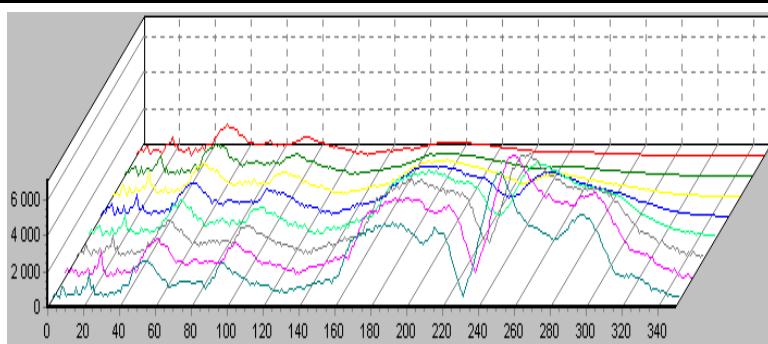
где $\Psi(\omega)$ – Фурье образ вейвлета Ψ .

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 высокосмаштабированные 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 прослеживать 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 неожиданным 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.