

УТОЧНЕННЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ МАШИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ВЫЯВЛЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПРОНИ

Мишугова Г. В., Мул А.П., Рябых Г. Ю.

Донской государственный технический университет (ДГТУ),
Ростов-на-Дону, Россия

Целью работы является обнаружение эксплуатационных дефектов подшипников качения. Обнаружение эксплуатационных дефектов базируется на том, что с развитием деградиационного процесса в оборудовании наблюдается изменение формы волны вибрационного сигнала.

Подшипники качения служат в качестве опор и фиксируют положение валов в машине и, следовательно, именно подшипники воспринимают большую часть статических и динамических усилий, возникающих в работающем механизме. Чаще всего неисправности подшипников качения возникают вследствие увеличения неровностей обойм или вращающихся элементов. Со временем неровности расширяются и, если подшипники служат достаточно долго, износ может стать более равномерным. Неисправность подшипников качения может быть выявлена до их выхода из строя.

В статье рассматривается эффективность метода Прони [1–3] при диагностировании технического состояния подшипников качения на основе анализа вибрационных сигналов [4]. В методе диагностики технического состояния подшипников, основанном на выделении и анализе дискретных составляющих вынужденных колебаний либо на основных частотах возбуждения колебаний в подшипниках, либо на частотах возбуждения, которые возникают по причине появления различных дефектов элементов подшипников.

Вынужденные колебания с помощью модели, представляющей собой сумму p колебательных составляющих разной частоты f_i с соответствующими амплитудами U_i , фазами ϕ_i и затуханиями α_i . Определяем параметры модели, на основе которых можно диагностировать местонахождение деформации.

На рис. 1 представлены графики временных сигналов виброускорения тестовой установки в бездефектном и дефектном состоянии подшипника качения. При развитии деградиационных процессов в подшипниках наблюдается рост амплитуды выбросов сигнала с одновременным ростом их числа в единицу времени.

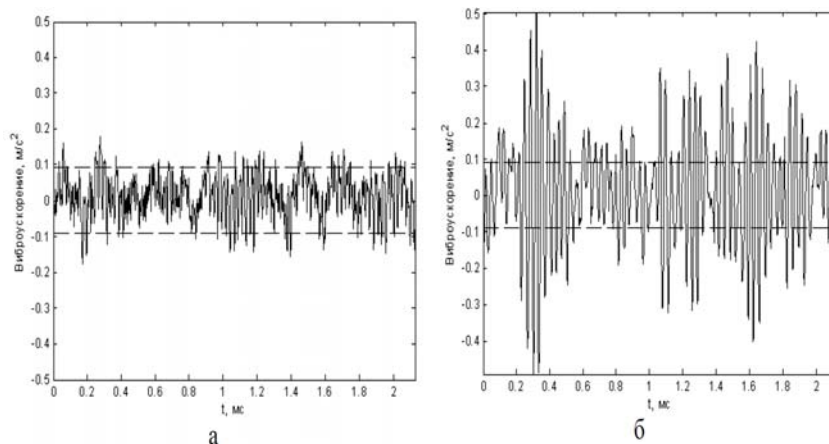


Рис.1. Графики вибросигналов бездефектного подшипника (а) и подшипника с дефектом (б).

Условия работы подшипника качения, влияющие на его работоспособность, зависят от распределения нагрузки между телами качения [5].

По условию равновесия

$$F_r = F_0 + 2F_1 \cos \gamma + 2F_2 \cos 2\gamma + \dots + 2F_n \cos n\gamma, \quad (1)$$

где $\gamma = 360^\circ / z$; z – число шариков.

В уравнение (1) входят только те члены, для которых угол $n\gamma < 90^\circ$, так как верхняя половина подшипника не нагружена.

На рис. 2 представлен массив радиальных биений подшипника U_i .

Возможные положения центра [мкм]				
14.175	16.841	17.908	18.975	21.108
17.908	24.308	18.975	17.908	16.841
18.975	16.841	20.575	17.375	16.308
22.708	22.175	21.641	17.908	17.375
17.908	17.908	22.175	20.575	23.241
18.975	14.708	15.241	25.908	23.241
23.775	17.375	22.708	26.975	22.708
18.441	20.575	17.375	20.041	15.775
21.108	26.975	20.041	17.375	20.041
23.241	17.375	22.175	20.575	15.241
19.508	16.308	24.841	23.241	17.908
20.041	21.108	18.975	16.841	21.641
Мат. ожидание			19.743	
Дисперсия:			8.719	
Среднеквадр. откл.:			2.938	

Рис.2. Массив радиальных биений подшипника (U_i)

Прямых математических методов, позволяющих связать результаты измерения y_i , $i = 1, \dots, N$ с параметрами сигналов нет, то есть нет методов и алгоритмов, выполняющих преобразование:

$$\{y_i\} = \{U_k, F_k, \phi_k, \alpha_k\}, i = 0, 1, \dots, N; k = 1, 2, \dots, p.$$

Данные параметры сигнала могут быть определены по его спектру, вычисляемому через преобразование Фурье [1–2]. Однако этому преобразованию свойственны существенные недостатки: «размывание» частотной информации из-за эффекта конечной длины и, как следствие, невозможность точного измерения частоты; ограничение частотного разрешения, т. е. способности различать спектральные линии двух или более составляющих; явление «утечки» – просачивание на соседние гармоники, что приводит к искажению спектра.

Метод Прони наилучшим образом соответствует задаче измерения параметров сигналов по критерию трудоемкости, а также на основании того факта, что модель, заложенная в методе, – сумма комплексных экспоненциальных составляющих. В методе Прони для аппроксимации данных используется детерминированная экспоненциальная модель, вычисление спектральной плотности энергии (СПЭ) которой и составляет суть спектральной интерпретации метода Прони [3].

Периодограммную оценку спектральной плотности мощности (СПМ) считаем эквивалентной среднеквадратичной аппроксимации данных с помощью ряда Фурье, т.е. гармонического набора комплексных синусоид.

Пусть для N отсчетов данных $x[0], \dots, x[N-1]$, разделенных интервалом T , аппроксимирующая последовательность

$$\hat{x}[n] = \sum_{m=0}^{N-1} a_m e^{j2\pi f_m n T}, n = 0, \dots, N-1,$$

где

$$a_m = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi f_m n T}, m = 0, \dots, N-1,$$

если коэффициенты a_m определяются из условия минимизации суммарной среднеквадратичной ошибки аппроксимации

$$\sum_{n=0}^{N-1} |x[n] - \hat{x}[n]|^2,$$

а частоты f_m гармонически связаны между собой:

$$f_m = \frac{m}{NT}, m = 0, \dots, N-1.$$

Таким образом, в гармонической модели частоты и число синусоид задаются заранее, поэтому необходимо оценивать только мощность этих синусоидальных составляющих на основе соотношения:

$$|a_m|^2 = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \exp(-j2\pi f_m n T) \right|^2, m = 0, \dots, N-1,$$

соответствующего вычислению СПМ дискретной периодограммы.

Негармоническая модель, используемая в методе Прони, требует оценки не только мощности, но и числа синусоид и их частот. С другой стороны, гармоническая модель наблюдаемых данных предполагает их периодическое продолжение вне интервала наблюдения, что далеко не всегда соответствует реальному поведению процесса и связано с отрицательным проявлением эффектов окна. В негармонической модели Прони искажающее действие окна исключено, поэтому точность оценки СПМ по сравнению со стандартным подходом на основе преобразования Фурье значительно улучшается.

График на рис. 3 представляет спектр и фазу вибросигнала подшипника с дефектом, которые определены методом Прони. Уровень дефекта определяется порогом вибросигнала по амплитуде и равен 1.7 Гц.

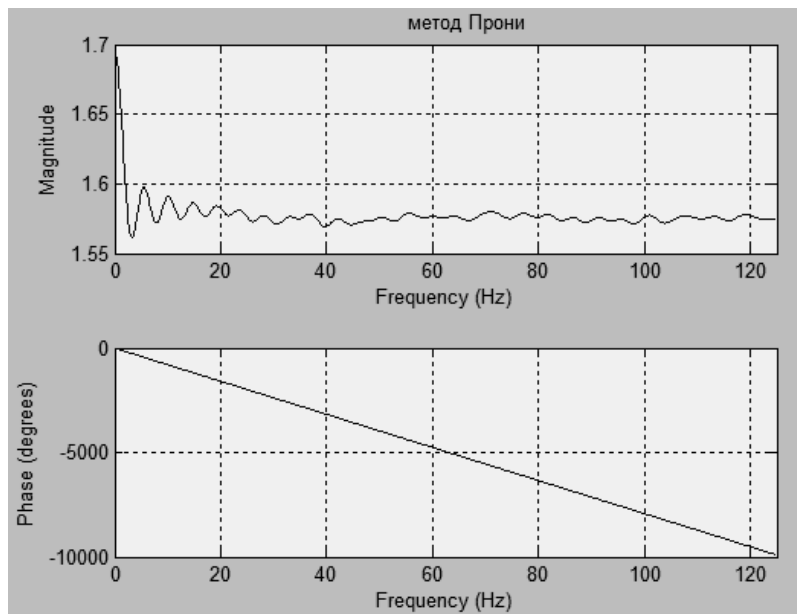


Рис.3. Спектр и фаза вибросигнала подшипника с дефектом

Достоинства метода:

– достаточно высокая помехозащищенность (маловероятно наличие в механизме источников, создающих вибрации на тех же точно частотах, что и дефекты подшипника);

– информативность метода высокая. Имеем возможность получить дифференцированную оценку состояния подшипника отдельно по каждому его кинематическому узлу, поскольку они генерируют разные частотные

ряды в спектре.

Недостатки:

– метод малочувствителен к зарождающимся и слабым дефектам. Это связано с тем, что подшипник в подавляющем большинстве механизмов является очень маломощным источником вибрации. Другими словами, небольшой скол на шарике или дорожке не в состоянии заметно качнуть механизм, чтобы мы увидели эту частотную составляющую в спектре вибрации. И только при достаточно сильных дефектах амплитуды этих частотных составляющих начинают заметно выделяться над общей шумовой частью спектра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир. – 1990 – 584 с.
2. Мясникова М. Г., Цыпин Б.В., Михайлов П.Г. Преобразование Прони в задаче измерения параметров гармонических сигналов в шумах // Датчики и системы. – 2007. – № 4.
3. Кривошеев В.И. Современные методы цифровой обработки сигналов (цифровой спектральный анализ). Учебно-методические материалы по программе повышения квалификации «Современные системы мобильной цифровой связи, проблемы помехозащищенности и защиты информации». Нижний Новгород. – 2006.
4. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика. – Пермь, – 1996.
www.vibration.ru
5. Иванов М. Н. Детали машин: Учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений. – 5-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1991. – 383 с.