

УДК 681.34:620.178.5

Ю.Г.Баринов, С.А.Смердин

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ РОТОРНЫХ МАШИН МЕТОДОМ ОБЕЛЯЮЩЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ ВИБРОСИГНАЛОВ

Основным средством анализа сигналов вибрации машин с целью получения информации об их состоянии является спектральный анализ (СА). Популярность СА во многом объясняется наличием алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ), реализованного в приборах и системах анализа, а также запрограммированного для универсальных ЦВМ. Использование анализа спектра вибрации не всегда позволяет достаточно надежно идентифицировать появление дефекта в диагностируемом объекте. Кроме того, при спектральном анализе на основе БПФ для получения сглаженного спектра необходимо усреднение по большому числу реализаций вибросигнала. Это затрудняет применение СА в реальном масштабе времени.

Известно [1], что реальные вибросигналы широкого класса роторных машин, представленные в дискретном виде, достаточно адекватно описываются моделью процесса авторегрессии (АР-моделью). Это дает возможность при вибродиагностике объектов разработать ряд процедур, основанных на использовании параметров АР-модели в качестве диагностических признаков.

Ряд вопросов применения АР-моделирования в вибродиагностике рассмотрен в работе [1]. В настоящей статье рассмотрена реализация одной из возможных процедур диагностирования на основе АР-модели. Процедура состоит в согласовании параметров АР-модели с вибросигналом исправного объекта с последующим контролем системы в процессе эксплуатации. При изменении характера вибрации АР-модель рассогласуется с сигналом, это служит признаком появления дефекта.

Известно [2], что идентификация параметров АР-модели эквивалентна построению линейного фильтра-предсказателя наблюдаемых отсчетов дискретного вибросигнала. Линейный фильтр предсказания отсчета $x(m)$ по p предыдущим описывается как система, на выходе которой

$$\hat{x}(m) = - \sum_{k=1}^p \alpha_k x(m-k), \quad (1)$$

где α_k - коэффициенты АР-модели.

Разница между наблюдаемой $x(m)$ и предсказанной $\hat{x}(m)$ величинами m -го отсчета называется ошибкой или погрешностью предсказания:

$$e(m) = x(m) - \hat{x}(m). \quad (2)$$

В терминах Z -преобразования характеристика фильтра-предсказателя (1)

$$F(Z) = - \sum_{k=1}^p \alpha_k Z^{-k}. \quad (3)$$

Обратный фильтр с характеристикой

$$A(Z) = 1 - F(Z) = 1 + \sum_{k=1}^p \alpha_k Z^{-k} \quad (4)$$

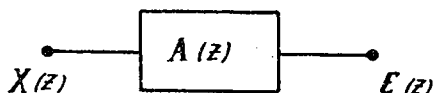
является отбеливающим фильтром (рис.1,а).

Сигнал на выходе такого фильтра близок к "белому" шуму ("белым" шумом он будет при $p \rightarrow \infty$ или при входном "чистом" АР-процессе).

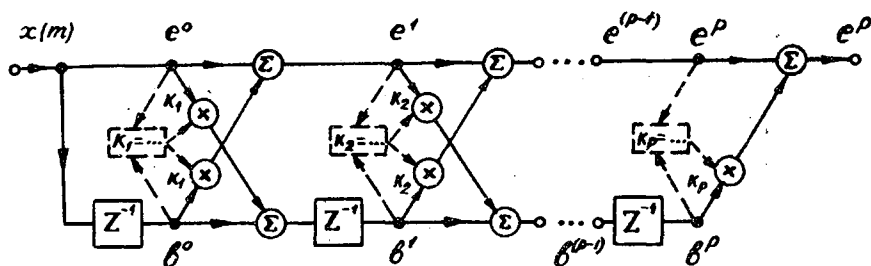
Таким образом, согласование АР-модели с вибросигналом исправной системы осуществляется путем синтеза отбеливающего фильтра, параметры которого оцениваются с помощью сигнала исправной системы.

Обычно анализ фильтра основан на определении коэффициентов АР-модели. В данном же случае нет необходимости в нахождении этих коэффициентов, а интерес представляет вычисление ошибки предсказания. Поэтому целесообразно выполнить отбеливающий фильтр во временной области на основе решетчатой структуры [2] в виде каскадного соединения p звеньев.

Структурная схема отбеливающего фильтра приведена на рис. 1,б. В соответствии с алгоритмом Бурга синтез фильтра осуществляется путем вычисления коэффициентов отражения $K_i, i=1, 2, \dots, p$ [3].



a



b

Р и с. 1. Обработка сигнала отбеливающим фильтром (а). Решетчатая (лестничная) структура отбеливающего АР-фильтра (б)

Процесс синтеза включает в себя:

1. Выбор порядка фильтра p — числа структурных звеньев. Величину p рекомендуется оценивать в соответствии с критерием конечной ошибки предсказания Аканке [4].

2. Задание начальных условий для прямой e и возвратной β погрешности предсказания [3]. Погрешность предсказания нулевого звена ($i=0$) для каждого отсчета вибросигнала есть сам отсчет $x(m)$:

$$e^0(m) = \beta^0(m) = x(m) .$$

3. Вычисление коэффициента отражения K_1 . В соответствии с алгоритмом Бурга [3] для N отсчетов вибросигналов при $i=1$

$$K_i = \frac{2 \sum_{m=0}^{N-1} [e^{(i-1)}(m) \cdot \beta^{(i-1)}(m-1)]}{\sum_{m=0}^{N-1} [e^{(i-1)}(m)]^2 + \sum_{m=0}^{N-1} [\beta^{(i-1)}(m-1)]^2} . \quad (5)$$

4. Определение $e^i(m)$ и $\beta^i(m)$ для I-го звена ($i=1$):

$$\begin{aligned} e^i(m) &= e^{(i-1)}(m) - \kappa_i e^{(i-1)}(m-1); \\ \beta^i(m) &= \beta^{(i-1)}(m-1) - \kappa_i \beta^{(i-1)}(m). \end{aligned} \quad (6)$$

5. Задание $i=2$, переход к п. 3 и т.д. до $i=p$.

Таким образом, импульсная характеристика отбеливающего фильтра определяется величинами коэффициентов отражения, которые вычисляются путем обработки сигнала исправного объекта. На рис. I,б вычисления коэффициентов отражения показаны пунктиром.

Определив коэффициенты $\kappa_i (i=1, 2, \dots, p)$ для p звеньев, фильтр можно реализовать в виде устройства или запрограммировать на ЦВМ. Важным достоинством решетчатой структуры фильтра является то, что величину его порядка можно легко изменить включением или исключением необходимого числа звеньев, не меняя остальных.

Стратегия диагностирования при использовании описанного подхода следующая:

• синтез отбеливающего фильтра в соответствии с п. I-5 (см. выше);
• многократное пропускание через полученный фильтр (рис. I,б) реализаций вибросигналов исправных объектов - определение области разброса величины ошибки предсказания $e(p)$;

• сама процедура диагностирования - пропускание через полученный отбеливающий фильтр реализации вибросигнала объекта, техническое состояние которого неизвестно.

Если величины ошибок предсказания в этом случае выходят за пределы полученной для исправного объекта области, считают, что в диагностируемом объекте имеется дефект.

Описанный метод легко применим для непрерывного автоматизированного контроля состояния объекта в реальном времени.

Метод диагностирования по величине ошибки предсказания применен при проведении экспериментального исследования влияния ошибок монтажа на вибрационные характеристики редукторов хвостовой трансмиссии вертолета [5]. На основе анализа вибросигналов исправного редуктора, проквантованных с частотой 20 кГц, по критерию Акаике был определен порядок отбеливающего фильтра $p=16$. Отбеливающий фильтр был смоделирован на ЭВМ, и через него пропускались реализации вибросигналов редуктора, имеющего дефект монтажа - повышенный зазор в зацеплении конических зубчатых колес с круговым зубом. На выходе зафиксировано уве-

личение ошибки предсказания по сравнению с ошибкой для исправного редуктора.

Представляется перспективным исследование с целью выявления возможности диагностирования других дефектов роторных машин. Следует отметить, что чувствительность метода в каждом конкретном случае определяется степенью близости реального проквантованного вибросигнала роторной машины процессу авторегрессии.

Таким образом, применение метода обеляющей фильтрации сигналов вибрации, представленных в дискретном виде, является перспективным в вибродиагностике роторных машин.

Метод реализуется в виде устройства либо легко программируется на универсальных ЦВМ. Возможно создание на базе метода автоматизированных устройств контроля технического состояния машин, работающих в реальном масштабе времени.

Л и т е р а т у р а

1. Баринов Ю.Г. Линейные дискретные временные модели виброакустических сигналов в диагностике машин. - В кн.: Точность и надежность механических систем. Рига: Риж.политехн.ин-т, 1983, с. 37-48.

2. Фридландер Б. Решетчатые фильтры для адаптивной обработки данных. - Труды Ин-та инженеров по электронике и радиотехнике. М.: Мир, 1982, № 9, с. 95-125.

3. Рабинер Л.Р., Шафер Р.В. Цифровая обработка речевых сигналов. - М.: Радио и связь, 1981. - 496 с.

4. Theodoridis S., Cooper P.

Application of the maximum entropy spectrum analysis technique to signals spectral peaks of finite width. - Signal Processing, vol. 3, No. 2, 1981, 109-122.

5. Балицкий Ф.Я., Левин В.И., Соколова А.Г., Хомяков Е.И., Баринов Ю.Г., Смородин С.А. Вибродиагностика дефектов монтажа конических передач с круговой формой зубьев. - В кн.: Точность и надежность механических систем. Рига: Риж.политехн.ин-т, 1983, с. 77-87.