

В.К.Семенов

**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ
ПО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЮ ЭНЕРГИИ СПЕКТРА ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ**

Традиционным способом анализа состояния поверхностного слоя материалов, пар трения, усталостных повреждений, накопленных при эксплуатации, является исследование спектра виброакустических сигналов, возбуждаемых в конструкции [1 - 4].

Как правило, неудовлетворительным по точности, чувствительности и однозначности диагностическим признаком потери работоспособности конструкции является абсолютное изменение общего уровня акустического шума или отдельной компоненты спектра [1, 2, 4].

Лучший результат дает изучение тонкой структуры спектра: относительного уровня энергии периодической и шумовой компонент, соотношений между отдельными компонентами, а также возникновения новых.

У подшипников скольжения и качения при появлении неровностей в зоне контакта, при исследовании роста усталостных повреждений в стальных токовыверных датчиках, при провучивании изделий ультразвуковыми волнами и при сканировании диагностируемой поверхности алмазным идентификатором увеличивается обычно доля высокочастотных составляющих сигнала в общей энергии [1 - 3].

Для зубчатых передач, у которых растет уровень шумовой компоненты в общем сигнале [1], для оценки ширины спектра воздействий и последующего применения методов схематизации (замены широкополосного сигнала эквивалентным узкополосным) также необходимо проводить относительное сравнение составляющих спектра [4]; при распознавании состояния следует оценивать долю мощности в полосе частот [1, 4].

Заметим, что нормированная спектральная плотность мощности, являясь нестрикательной функцией, аналогична по свойствам плотности вероятности. Тогда информативную частоту, до которой, например, сосредоточена определенная доля мощности сигнала, можно рассматривать как квантиль нормированной спектральной плотности мощности, а центральная частота спектра будет являться медианой [3].

Наиболее известным путем измерения относительной структуры спектра является применение метода фильтрации, согласно которому полосовой фильтр должен обладать высокой прямоугольностью своей амплитудочастотной характеристики (АЧХ), ее постоянством в требуемой полосе частот, линейностью фазочастотной характеристики (ФЧХ), что может быть

достигнуто одновременно лишь сложным техническим решением. Используемая при этом прямая разомкнутая схема измерения предъявляет высокие требования по стабильности, метрологии фильтра и всех других блоков анализатора (квадраторов, смесителей, генераторов и др.), так как любая погрешность блоков целиком и полностью входит в результат измерения.

Нахождение относительных процентных точек спектра в известных анализаторах осуществляется лишь после измерения всей кривой спектральной плотности (при априорной информации о ее виде - в нескольких точках) путем дополнительных расчетов.

Характеристикой структуры спектра анализируемого сигнала или его производной является отношение производных различных порядков корреляционной функции $K(\tau)$ анализируемого сигнала при $\tau=0$, которое известными путями определяется сложно и с малой точностью [4].

Поставим цель упростить реализацию, повысить быстродействие и точность оценки частоты ω_β , соответствующей доли (проценту) β от общей энергии анализируемого центрированного сигнала $\xi(t)$ со спектральной плотностью мощности $S(\omega)$.

Очевидна справедливость соотношения

$$\beta \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega = \beta \frac{D}{2} = \int_0^{\omega_\beta} S(\omega) d\omega,$$

где $D=K(\tau)$ при $\tau=0$ - дисперсия анализируемого сигнала.

Так как $S(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} K(\tau) \cos \omega \tau d\tau$, то, выполнив интегрирование, можем записать:

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} K(\tau) \left[\int_0^{\omega_\beta} \cos \omega \tau d\omega \right] d\tau = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} K(\tau) \frac{\sin \omega_\beta \tau}{\tau} d\tau = \frac{\beta D}{2}.$$

Вводя оператор математического ожидания M и учитывая, что $K(\tau) = M[\xi(t) \xi(t-\tau)]$, получим алгоритм оценки ω_β :

$$M \left[\xi(t) \left\{ \int_0^{\infty} 2 \xi(t-\tau) \frac{\sin \omega_\beta \tau}{\pi \tau} d\tau - \beta \xi(t) \right\} \right] = 0. \quad (I)$$

Соотношение (I) определяет построение компенсационного алгоритма или специализированного устройства для определения частоты ω_β . При этом его основным элементом является фильтр нижних частот с импульсной характеристикой $h(\tau) = \sin \omega_\beta \tau / \pi \tau$, постоянная времени которого (или порога пропускания) изменяется от нуля до искомой частоты ω_β , обеспечивающей выполнение соотношения (I).

Возможны различные технические реализации фильтра. В частности, целесообразно выполнение его в виде структуры из N фильтров Лагерра с регулируемой постоянной времени α и передаточной функцией

$$W(p) = L^{-1} \{h(\tau)\} = \sum_{i=0}^N C_i \frac{(p-\alpha)^i}{(p+\alpha)^{i+1}},$$

где коэффициенты C_i должны быть выбраны так, чтобы обеспечить возможно лучшее приближение АЧХ фильтра к прямоугольной идеальной $|W_H(j\omega)|$, соответствующей импульсной характеристике $h(\tau) = \frac{\text{Signal}}{\pi\tau}$, по среднеквадратичному критерию

$$\sigma = \int_{-\infty}^{\infty} \{ |W(j\omega)|^2 - |W_H(j\omega)|^2 \}^2 d\omega.$$

Параметр α одного фильтра Лагерра связан с верхней частотой фильтра с импульсной характеристикой $h(\tau)$ следующим образом: $\omega_B = \frac{\alpha}{2} \tan \frac{\pi}{2} y_0$, где $\pi/3 \leq y_0 \leq \pi/2$ (y_0 выбирает из условия малости σ). Например, задав $y_0 = 1,1655$ рад, $C_0 = 1,165$, $C_1 = 0,441$, $C_2 = 0,058$, $C_3 = -0,276$, $C_4 = -0,251$, получим $\sigma \approx 0,074$. Свойство ортогональности структуры предложенного фильтра позволяет обеспечивать требуемую величину σ путем увеличения числа простейших ячеек Лагерра N без изменения остальных весовых коэффициентов C_i .

Техническая реализация компенсационного метода имеет следующие преимущества:

снижены требования к ФЧХ фильтра;

АЧХ каналов блока умножения могут быть любыми, не равными нулю, а ФЧХ — лишь одинаковыми;

при цифровой реализации блока умножения может быть уменьшена длина его разрядной сетки, а следовательно, повышено быстродействие.

Другим достоинством предложенного способа оценки перераспределения спектра и характерных точек спектральной плотности является возможность его использования для детерминированных сигналов. В этом случае частота $\omega_{0,95}$ или $\omega_{0,99}$, например, будет определять номер максимальной гармоники в анализируемом периодическом сигнале. Можно проводить сравнение амплитуд основной (огливающей) и высших гармоник, определять долю мощности в полосе частот $[\omega_1, \omega_2]$ от общей. В последнем режиме полоса пропускания фильтра с импульсной характеристикой $h(\tau)$ фиксируется, а значение β , являющееся корнем уравнения (1), подбирается автоматически.

Указанные режимы допускают применение предложенного подхода для построения гистограммы и интегральной функции распределения спектральной плотности $S(\omega)$, что также может быть использовано в практике диагностирования.

Л и т е р а т у р а

1. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я.Балицкий, М.А.Иванова, А.Г.Соколова и др. - М.: Наука, 1984.-119с.
2. Дубяный В.В. Методика выявления усталостных повреждений стальных деталей при ремонте авиационной техники. - В сб.: Ремонт авиационной техники.-Киев: КИИГА, 1977, с. 74-79.
3. Запорожец В.В. Анализ процессов контактного взаимодействия и прочности поверхностных слоев твердых тел методом трибологической идентификации: Дис. ... д-ра техн.наук. - Киев: КИИГА, 1981. - 224 с.
4. Карасев В.А., Максимов В.П., Сидоренко М.К. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей. - М.: Машиностроение, 1978. - 182 с.
5. Бесекерский В.А., Небылов А.В. Робастные системы автоматического управления. - М.: Наука, 1983. - 240 с.

УДК 534.647:629.7.036.3.001.4

Е.В.Сундуков, В.И.Костин, В.И.Бояринцев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВИАЦИОННЫХ ГТД, СВЯЗАННОЙ С ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ИССЛЕДУЕМОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Вопросы повышения точности и однозначности оценки вибрационного состояния авиационных ГТД занимает важное место в обеспечении их высокой надежности, контроле качества и своевременном выявлении возникающих дефектов и неисправностей.

Вибрация ГТД в общем случае представляет собой совокупность узкополосных случайных процессов, интенсивность которых оценивается по числовым характеристикам мгновенных значений или огибающей (максимумов). Истинные значения числовых характеристик случайной вибрации могут быть получены лишь по реализациям бесконечно большой длительности. Конечность времени анализа приводит к возникновению статисти-