

где $B_1 = 7 \cdot 10^{-5}$ для $d_y = 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100$ мм и высоты гофра $H = 7,2$ мм; $B_1 = 4,5 \cdot 10^{-5}$ для $d_y = 32, 40, 50, 60$ и $H = 4,2$ мм; $B_2 = 0,012 \left(\frac{100}{d_y}\right)^{0,2}$; $\gamma' = \left(\frac{d_y}{100}\right)^{0,4}$.

Соотношения (4), (5), (6), (8) позволяют выполнить расчет около-резонансных амплитуд вынужденных колебаний СК с учетом рассеяния энергии при колебаниях.

Библиографический список

1. Крюков А.И., Гликин И.М., Фисин В.И. Гибкие металлические рукава. - М.: Машиностроение, 1970. - 204 с.
2. Меерсон М.Г. исследование статических и динамических характеристик гибких фторопластовых трубопроводов двигателей летательных аппаратов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Уфа, 1973. - 21 с.
3. Итоаев В.К., Хусайнов Ф.С. Демпфирующие характеристики компенсаторов // Тр. НИИД. - М., 1984. - Ч. П. - С. 116-122.

УДК 621.431.75:534

В.К.Семеновичев, В.И.Костин, А.А.Бокша

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ГТД ПО ОТСЧЕТАМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ

Опыт вибрационных исследований ГТД указывает на важное значение для оценки их технического состояния таких характеристик его элементов, как добротность Q и резонансная частота f_0 [1-3]. При измерениях Q и f_0 допустимо использование гипотез о линейности анализируемых механических конструкций и неперекрывании энергетических полос резонансных кривых [1,2]. Рассмотрим получение динамических характеристик при кинематическом характере возбуждения колебаний.

Предполагая постоянной спектральную плотность мощности сигнала возбуждения $S_x(f)$ в занимаемой конструкцией полосе частот, для спектральной плотности мощности $S_y(t)$ анализируемого сигнала $y(t)$ (перемещения, скорости или напряжения) в выбранной точке ГТД будем иметь

$$S_y(f) = |H(f)|^2 S_x(f). \quad (1)$$

Здесь квадрат модуля передаточной функции анализируемой конструкции при принятых допущениях описывается выражением

$$|H(f)|^2 = \frac{1 + \frac{f^2}{f_0^2 Q^2}}{\left(1 - \frac{f^2}{f_0^2}\right)^2 + \frac{f^2}{f_0^2 Q^2}} \quad (2)$$

Располагая отсчетами величины спектральной плотности мощности сигнала (например, полученными процедурой БФ с соответствующей избирательностью и равномерным шагом отсчетов Δ по оси частот $z_k = S_y(k\Delta)$, $k = 0, 1, 2, \dots$), рассмотрим возможность повышения точности измерения указанных динамических характеристик.

Подставив (2) в (1) и приведя к общему знаменателю, с учетом обозначений, указанных ниже, получим выражение для отсчетов z_k :

$$d = \frac{f_0^2(2Q^2 - 1)}{Q^2}, \quad a = \frac{f_0^4 S_x(f)}{Q^2},$$

$$m = f_0^4, \quad b = f_0^4 S_x(f),$$

$$z_k \{ (k\Delta)^4 - d(k\Delta)^2 + m \} = a(k\Delta)^2 + b. \quad (3)$$

Через коэффициенты соотношения (3) можно определить динамические параметры:

$$Q = (2\sqrt{m} + d)^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

$$f_0 = m^{\frac{1}{4}}. \quad (5)$$

Образует разность из соотношений (3) при двух последовательных индексах k и $k-1$:

$$\begin{aligned} d\Delta^2 \{ z_k k^2 - z_{k-1} (k-1)^2 \} - m \{ z_k - z_{k-1} \} + \\ + a\Delta^2 \{ 2k-1 \} = \Delta^4 \{ z_k k^4 - z_{k-1} (k-1)^4 \}. \end{aligned} \quad (6)$$

Как видно, в (6) отсутствует неинформативный в задаче определения Q и f_0 коэффициент b . Уменьшение размерности вектора коэффициентов резонансной кривой увеличивает быстродействие и точность их вычисления по отсчетам z_k .

Более общий подход, позволяющий получить и другие рекуррентные соотношения для равноотстоящих отсчетов спектральной плотности мощности при кинематическом (2) и других видах возбуждения, дает \mathcal{Z} -преобразование последовательности отсчетов z_k [3].

Как правило, значения Z_k , а следовательно, и рассчитываемые по ним Q и f_0 определяются не только передаточной функцией анализируемой конструкции, но и тем, что спектр сильно изрезан при реализации БИФ и содержит на ширине резонансного пика несколько (обычно пять-семь) мешающих выбросов, происхождение которых раскрыто, например, в работах [1,2].

В качестве первого приема обеспечения помехозащищенности от значительных по величине выбросов можно рекомендовать медианное сглаживание массива Z_k , согласно которому из последовательности апертур отсчетов пяти, семи и т.д. выбирается медианное значение, оно присваивается первому отсчету и т.д. [4-7]. Если половина выбранной апертур окажется больше ширины данного выброса и меньше расстояния до ближайшего следующего выброса, то осуществляется эффективное сглаживание [5-7]. В противном случае помехи в отсчетах Z_k пройдут на выход медианного фильтра.

Ошибки определения Q, f_0 из выражений (3)-(5) могут быть значительными даже при применении к (3) метода наименьших квадратов, если не соблюдаются условия медианной фильтрации или отсчеты Z_k получены на сравнительно пологом участке резонансной кривой, когда малые погрешности в отсчетах будут существенно влиять на результаты решения соответствующей системы уравнений. Заметим также, что медианная фильтрация приводит к одинаковости ряда соседних сглаженных отсчетов и небольшим случайным перепадам значений [6]. Поэтому в качестве второго приема обеспечения помехозащищенности целесообразны организация текущего сглаживания в методе наименьших квадратов и расчет на каждом i -м такте сглаживания оценок $\{Q_i\}, \{f_{0i}\}$ для $7 \dots II$ тактов. Динамические характеристики определяются как медианные значения из этих оценок. Данный прием, а также более сложные методы статистической регуляризации, оперирующие рассчитываемой на каждом такте текущего сглаживания мерой среднеквадратического приближения, принятой моделью (2) и соответственно (6) [6], позволяют существенно уменьшить дисперсию оценок Q и f_0 в условиях импульсных и аномальных по характеру закона распределения помех.

Более того, сами значения $\{Q_i\}$ и $\{f_{0i}\}$ на тактах текущего сглаживания могут быть использованы при оценке точности в проведенном конкретном измерении для каждой из динамических характеристик. Известны выражения для среднеквадратического отклонения S и доверительного 95%-ного интервала $J_{0,95}$ медианных оценок множеств $\{Q_i\}$

и $\{f_{0i}\}$ [8]. Например, для Q будем иметь

$$s[Q_i] = \frac{\text{med}\{Q_i - \text{med}\{Q_i\}\}}{0,6745},$$

$$J_{0,95}[Q_{0,5}] = Q_{0,5} \pm \frac{2(Q_{0,75} - Q_{0,25})}{\sqrt{N}},$$

где N - число тактов сглаживания (мощность множества $\{Q_i\}$ или апертура второй медианной фильтрации); Q_p - квантили медианной фильтрации при $p = 0,25; 0,5; 0,75$; $\text{med}\{\}$ - операция нахождения медианы по множеству.

Проведенное моделирование на ЭВМ показало возможность измерения Q и f_0 с точностью не менее 4 и 2% соответственно при соотношении 3:1 мощности полезного сигнала (ординат резонансной кривой) и помехи (в общем случае закон распределения ее отличен от нормального) по выборке из 30 отсчетов Z_k и при назначении апертуры сглаживания 7...13. Шаг Δ спектрального анализа по оси частот при БЧФ с соответствующей избирательностью принимали равным $1/30 \dots 1/50$ от эквивалентной ширины резонансной кривой и согласовывали с условием медианного сглаживания для выросов. Анализу подвергалась доля резонансной кривой, в общем случае несимметричная относительно f_0 , добротность исследуемой механической системы не превышала 60. При более узких резонансных пиках импульсные помехи увеличивают погрешность измерений. Частотный диапазон анализируемых систем ограничен разрешающей способностью БЧФ, требуемой длительностью реализации и т.д. При моделировании он был ограничен 5 кГц.

В ы в о д ы

Предложенный способ увеличивает точность измерения добротности и резонансной частоты в условиях импульсной и аномальной по закону распределения помехи и на пологих участках резонансной кривой (при малых значениях добротности).

При принятии в выражении (1) других моделей передаточной функции способ может быть использован на той же теоретической основе, но с учетом соответствующих ограничений по выбору Δ и апертуры.

Библиографический список

1. Канунников И.И., Сидоренко М.К. Исследование переменных напряжений в лопатках ГТД методами спектрального анализа // Проблемы прочности. - 1979. - № 12. - С. 96-100.
2. Костин В.И., Сундуков Е.В. К вопросу выбора полосы пропускания фильтра при измерениях интенсивности общей вибрации ГТД // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Сб. науч. тр. - Куйбышев: КуАИ, 1980. - С. 93-97.
3. Девис, Хеммонд. Сравнение метода преобразования Фурье и параметрических методов идентификации конструкции // Конструирование и технологии машиностроения. - 1984. - Т. 106, № 1. - С. 38-48.
4. Вучков И., Бояджиева Л., Солаков Е. Прикладной регрессионный анализ. - М.: финансы и статистика, 1987. - 239 с.
5. Тьюки Дж. Анализ результатов наблюдений. Разведочный анализ. - М.: мир, 1981. - 693 с.
6. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. Преобразования и медианные фильтры / Под ред. Т.С.Хуанга. - М.: Радио и связь, 1984. - 224 с.
7. Тырсин А.Н. Использование медианной фильтрации в вибродиагностике газотурбинных двигателей // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. Сб. науч. тр. - Куйбышев: КуАИ, 1988. - С. 72-78.
8. Парзен Э. Перспективы использования функции плотности квантилей для устойчивого оценивания. // Устойчивые статистические методы оценки данных. - М.: Машиностроение, 1984. - С. 198-206.

УДК 621.452.3:534

А.Н.Тырсин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕДИАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ВИБРОДИАГНОСТИКЕ ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Медианная фильтрация является методом нелинейной обработки сигналов. Она осуществляется движением некоторой апертуры вдоль дискретизированной последовательности и заменой значения текущего отсчета медианой исходных значений отсчетов внутри апертуры $[I]$. Медианный фильтр $M_2\{x(n)\}$ апертуры L (L - нечетно) определим как