

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СЛЕДЯЩЕГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА В ЗАДАЧАХ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ

Особенностью спектра общей вибрации газотурбинных двигателей (ГТД) является наличие ряда узкополосных составляющих, жестко связанных с числом оборотов ротора. Каждая из этих составляющих аналитически представляется в виде гармонического колебания

$$s(t) = A(t) \cos \Psi(t), \quad (1)$$

амплитуда и частота которого независимо друг от друга модулированы соответственно по законам  $A(t)$  и  $\omega(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt}$ .

Спектр колебания (1) вследствие смешанной амплитудно-частотной модуляции имеет очень сложную структуру: возле каждой составляющей спектра, вызванной модуляцией частоты по закону  $\omega(t)$ , появляется ряд боковых частот, повторяющий спектр закона  $A(t)$ .

Параметры амплитудной модуляции (АМ) имеют связь с техническим состоянием ГТД и, следовательно, содержат диагностическую информацию [3]. Однако извлечение этой информации методами обычного спектрального анализа [4] на переходных режимах работы ГТД невозможно, а на установившихся режимах сопряжено с искажениями, поскольку обычные методы не учитывают частотной модуляции (ЧМ).

В целях борьбы с мешающим действием ЧМ применяют методы следящего спектрального анализа (ССА), основанные на принципах, изложенных в [2]. Использование ССА позволяет «очистить» спектр сигнала (1) от составляющих спектра закона  $\omega(t)$  и тем самым уменьшить полосу пропускания анализатора, выбирая ее исходя лишь из ширины спектра АМ. От параметров ЧМ эта полоса не зависит.

Уменьшение полосы пропускания анализатора спектра в  $a$  раз снижает, как известно, уровень шума на его выходе в  $\sqrt{a}$  раз, что эквивалентно повышению точности измерений. Поэтому в качестве характеристики эффективности применения ССА можно использовать коэффициент сжатия полосы

$$a = \frac{\Pi_{\text{ЧМ}}}{\Pi_{\text{АМ}}}. \quad (2)$$

Определим величину  $a$  для составляющих роторной и вентиляторной вибрации при работе ГТД на установившемся режиме, т. е. для случая, когда частота анализируемой спектральной составляющей колеблется около среднего значения  $f_0$  в преде-

лах  $\pm \Delta f$ , изменяясь по некоторому случайному закону  $\eta(t)$ . Тогда, считая  $A(t) = A_0 = 1$ , имеем:

$$s(t) = \cos [2\pi f_0 t + 2\pi \Delta f \int_0^t \eta(t) dt].$$

Ширина спектра ЧМ данного сигнала определяется как интервал частот, на границах которого энергетический спектр сигнала составляет половину максимального значения. Энергетический спектр, в свою очередь, находится преобразованием Фурье от автокорреляционной функции сигнала.

Найти автокорреляционную функцию сигнала не представляется возможным, поскольку не известен закон распределения  $\eta(t)$ . Поэтому ограничимся приближенным определением ширины спектра ЧМ, приняв закон модуляции синусоидальным,

$$\eta(t) = \cos 2\pi F t.$$

В таком случае ширина спектра ЧМ зависит от индекса модуляции

$$\beta = \frac{\Delta f}{F}. \quad (3)$$

При  $\beta < 10$  ширина спектра

$$П_{ЧМ} = 2F\nu, \quad (4)$$

где  $\nu$  — порядок функции Бесселя  $I_\nu(\beta)$ , значение которой больше некоторой малой величины  $\alpha$ , выбираемой в пределах  $\alpha = 0,01 - 0,1$ . При  $\beta > 10$  ширина спектра находится по формуле

$$П_{ЧМ} = 2F(1 + \beta). \quad (5)$$

Свяжем параметры ЧМ с техническими характеристиками двигателя.

Частоту измеряемой спектральной составляющей в общем случае можно выразить через обороты ротора  $n_0$  следующим образом:

$$f_0 = \frac{n_0 K z}{60}, \quad (6)$$

где  $K$  — номер гармоники;

$z$  — число лопаток вентилятора (для составляющих роторной вибрации необходимо брать  $z = 1$ ).

Величина  $\Delta f$  может быть определена через относительную нестабильность частоты  $\delta$ :

$$\Delta f = \delta f_0 = \frac{\delta n_0 K z}{60}. \quad (7)$$

Частоту модуляции найдем из приемистости двигателя

$$F = \frac{C}{2\Delta f}. \quad (8)$$

Здесь  $C$  — максимально возможная скорость изменения частоты анализируемой спектральной составляющей (1). Аналогично (6) она может быть выражена через максимальную скорость изменения частоты вращения ротора  $C_p$

$$C = C_p Kz, \quad (9)$$

$C_p$  определяется из кривой разгона двигателя.

После подстановок формулы (3), (4), (5) преобразуются соответственно к виду:

$$\beta = \frac{(\delta n_0)^2 Kz}{1800C_p}, \quad (10)$$

$$\Gamma_{чМ} = \frac{60C_p}{\delta n_0} \nu, \quad (11)$$

$$\Gamma_{чМ} = \frac{1800C_p + (\delta n_0)^2 Kz}{30\delta n_0}. \quad (12)$$

Ширина спектра АМ сигнала (1) имеет величину несколько герц. Полосу пропускания ССА менее 10 герц реализовать технически очень сложно. Поэтому величину  $\Pi_{AM}$  в знаменателе (2) следует принять равной 10 герцам.

Значения коэффициента  $\alpha$ , рассчитанные по изложенной методике, для двух гармоник роторной и вентиляторной вибрации двигателя, имеющего  $z = 30$ ,  $C_p = 15$  гц/сек;  $\delta = \pm 1\%$  при

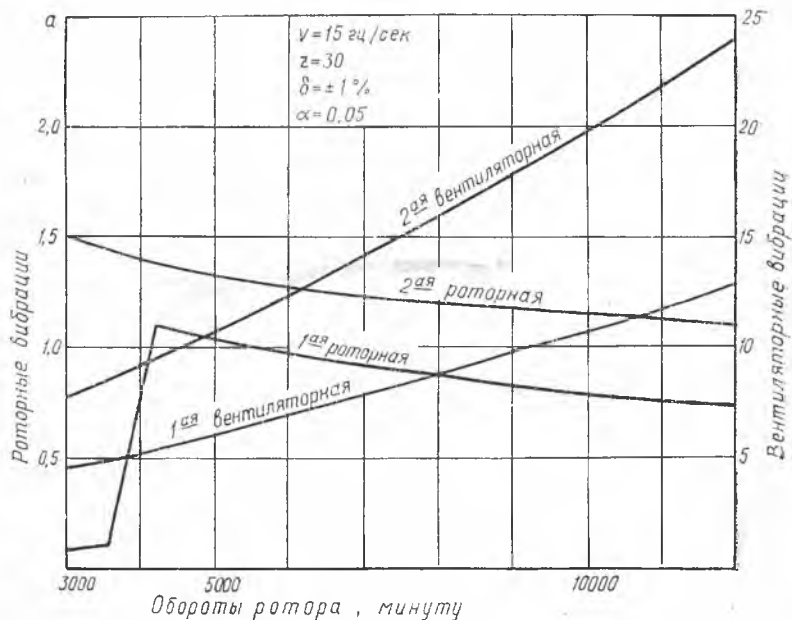


Рис. 1. Зависимость коэффициента сжатия полосы  $\alpha$  от оборотов ротора при работе на установившемся режиме

$\alpha = 0,05$ , в зависимости от оборотов ротора представлены графически на рис. 1. Так как спектр ЧМ дискретен, кривые получаются ломаными. На рисунке изображены средние значения этих ломаных кривых.

Из графиков можно сделать следующие выводы:

1) применение ССА при измерении роторных вибраций на установившихся режимах не целесообразно, поскольку ширина спектров ЧМ и АМ мало отличается друг от друга;

2) для анализа вентиляторных составляющих применение ССА дает существенный выигрыш в ширине полосы пропускания по сравнению с обычными методами спектрального анализа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. М., «Наука», 1967.
2. Ввицкий А. С. Модулированные фильтры и следящий прием ЧМ сигналов. М., «Советское радио», 1967.
3. Сидоренко М. К. Виброметрия газотурбинных двигателей. «Машиностроение». М., 1973.
4. Харкевич А. А. Спектры и анализ Государственное издательство технико-теоретической литературы. М., 1953.

**В. И. Бояринцев, П. П. Власов**

### **РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СЛЕДЯЩЕГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА С ВНЕШНИМ УПРАВЛЕНИЕМ**

Для спектрального анализа узкополосных вибрационных процессов в газотурбинных двигателях целесообразно применение метода следящего спектрального анализа [2, 3].

Известные схемы следящего спектрального анализа можно разделить на две группы. К первой группе относятся системы, в которых управляющий сигнал формируется из спектра сигнала вибрации. В системах второй группы формирование управляющего сигнала осуществляется преобразованием сигнала дополнительного источника, чаще всего тахогенератора, установленного в двигателе.

Примером систем первой группы является американская система для обнаружения неисправностей во вращающихся частях высокоскоростных двигателей CWEA [1]. Структурная схема этой системы представлена на рис. 1. Система состоит из канала измерения, включающего в себя смеситель (СМ), узкополосный фильтр (УФ), усилитель промежуточной частоты (УПЧ), детектор (Д) и индикатор (И), и канала управления состоящего из полосового фильтра (ПФ), системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и генератора отношения частот (ГОЧ). Принцип работы системы заключается в следующем. С помощью