

А.Н.Тырсин

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ  
СИСТЕМЫ ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ  
С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ГТД

В вибрационной диагностике ГТД широкое распространение получило спектральное представление вибросигналов, что объясняется наличием в двигателе вращающихся узлов /1/. Большая размерность частотного исходного описания вибросигналов, получаемого на ЭВМ, создает значительные вычислительные трудности при их дальнейшей диагностической обработке. В связи с этим становится актуальной задача сокращения частотного описания путем формирования системы вибродиагностических признаков. Во многих случаях в качестве таких признаков можно использовать локальные максимумы спектра вибросигнала.

Наибольшая трудность при сокращении частотного описания состоит в флуктуации физических частот вращения роторов  $f_p$  двигателей на одинаковых режимах работы, вследствие чего один и тот же признак может иметь разные частоты. Появление неоднозначности признаков приводит к ошибкам диагностирования, а также к увеличению размерности вектора признаков.

Известен алгоритм, устраняющий данную неоднозначность путем введения зоны неопределенности частот спектральных составляющих /2/. Ее величина определяется значением разброса частот вращения роторов исследуемых двигателей. Однако при этом не разделяются признаки, попадающие в одну зону неопределенности. Указанный недостаток заключается в том, что при разбросе частот вращения роторов двигателей с идентичным техническим состоянием на  $\ell$  % признаки с кратностями, отличающимися менее чем на  $2\ell$  %, не могут быть правильно разделены при любой величине зоны неопределенности. Под кратностью здесь понимается отношение частоты признака к частоте  $f_p$ .

Предлагаемый в статье алгоритм позволяет устранить это ограничение. Суть его заключается в представлении частотного описания в нормированном виде относительно частоты  $f_p$ . При этом спектральные составляющие будут характеризоваться своими кратностями. Это исключает влияние разброса частот  $f_p$  исследуемых двигателей.

Алгоритм состоит из двух этапов. Вначале определяют частоты  $f_p$  и соответствующего данному режиму диапазона их возможных значений  $(f_{pH}, f_{pK})$ , затем формируют систему вибродиагностических признаков.

В целях уменьшения ошибок определения частоты  $f_p$  исходный частотный диапазон  $(f_{pH}, f_{pK})$  необходимо предварительно сократить.

При определении частоты  $f_p$  используем априорную информацию о двигателе, включающую данные о кинематических связях ротора с вращающимися узлами [3]. В любом спектре вибрации ГТД практически всегда можно обнаружить несколько дискретных составляющих с известными кратностями. Значимость их выразим неравенством

$$\text{вд } \frac{A(f_n)}{\bar{A}(f_n)} > Z, \quad (I)$$

где  $A(f_n)$  - амплитуда спектральной составляющей с частотой

$$f_n = k_n f_p;$$

$\bar{A}(f_n)$  - среднее значение вибрационного шума в заданной полосе относительно частоты  $f_n$  (например, 6%);

$Z$  - пороговый уровень, выбираемый на основании особенностей объекта диагностирования.

Определив значимую составляющую, например с частотой  $f_n$ ,

формируем интервал частот  $(f_n^{(1)}, f_n^{(2)})$ . Экспериментально установлено, что в качестве этого интервала можно использовать полосу шириной 1,5% относительно частоты  $f_n$ . Сокращение диапазона возможных значений частоты  $f_p$  до  $(f_{pH}^{(1)}, f_{pK}^{(1)})$  осуществляется по формулам (рис. 1)

$$f_{pH}^{(1)} = \frac{f_n^{(1)}}{k_n}, \quad f_{pK}^{(1)} = \frac{f_n^{(2)}}{k_n}.$$

Р и с. 1. Сокращение диапазона возможных значений частоты вращения ротора

Частоту  $f_p$  находим минимизацией невязки отклонений  $\frac{f_i}{k_i}$ ,  $i=1,2,\dots,M$ . Здесь  $f_1, f_2, \dots, f_M$  - частоты дискретных спектральных составляющих, удовлетворяющих условию значимости (I) и находящихся в интервалах  $(k_i f_{pH}^{(1)}, k_i f_{pK}^{(1)})$ , где  $k_1, k_2, \dots, k_M$  - априорно заданные кратности, выбираемые из особенностей кинематической схемы двигателя

Определить частоту  $f_p$  можно путем решения задачи

$$\begin{cases} \varphi(f_p) = \sum_{i=1}^M \left( \frac{f_i}{K_i} - f_p \right)^2 \rightarrow \min, \\ \min_i \frac{f_i}{K_i} < f_p < \max_i \frac{f_i}{K_i}. \end{cases} \quad (2)$$

Для оценки вероятности ошибки расчета значения  $f_p$  в случае раз-  
новероятного выбора локальных максимумов спектра в виде значимых  
дискретных составляющих может быть предложена следующая формула:

$$P_{\sigma} \approx \frac{(\sigma_f \Delta f)^{M+1} n_{max}}{(f_{pk}^{(1)} - f_{pk}^{(2)})^M P} \prod_{i=1}^M \frac{n_{maxi}}{K_i}, \quad (3)$$

где  $\sigma_f$  - абсолютная погрешность определения частоты значимой  
дискретной составляющей;

$\Delta f$  - шаг дискретизации по частоте;

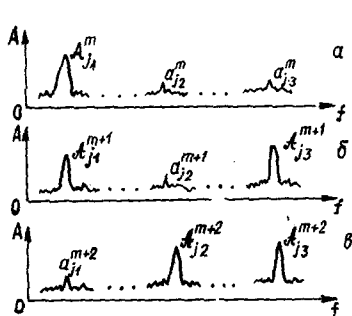
$P$  - ширина спектра;

$n_{maxi}$  - число локальных максимумов спектра, лежащих в диапазоне  
( $K_i f_{pk}^{(1)}, K_i f_{pk}^{(2)}$ ) и удовлетворяющих условию (I);

$n_{max}$  - число локальных максимумов спектра, удовлетворяющих  
условию (I).

После нахождения значений частот вращения роторов исследуемых  
двигателей формируем систему вибродиагностических признаков. Это  
можно сделать несколькими способами. Один из них состоит в следую-  
щем. Из каждого нормированного к частоте  $f_p$  спектра выбираем  
только локальные максимумы, удовлетворяющие условию (I), причем по-  
пороговый уровень может быть различным. Если кратность ло-  
кального максимума изменяется от объекта к объекту в пределах за-  
данного интервала неопределенности, то такой максимум считаем одним  
признаком. Интервал неопределенности в данном случае значительно  
меньше, чем введенный в работе /2/, и не зависит от разброса частот  
вращения роторов. Его величина определяется лишь погрешностью вы-  
числения частот  $f_p$  значений и обычно не превосходит 0,7%.

Если в очередном спектре на некоторой нормированной частоте  
обнаружен признак, удовлетворяющий условию (I) и ранее отсутствовав-  
ший, то считаем, что в предыдущих спектрах ему соответствует макси-  
мальная спектральная составляющая в данном интервале неопределеннос-  
ти. Описанная процедура иллюстрируется рис. 2. Здесь обозначено:



$A_j^m$  - спектральная составляющая, удовлетворяющая условию (I);

$a_j^m$  - максимальная спектральная составляющая из соответствующего  $j$ -му признаку интервала, не удовлетворяющая условию (I);

$m$  - номер спектра;

$j$  - номер признака.

Р и с. 2. Пример формирования системы признаков

Проверка работы предложенного алгоритма на спектрах вибрации двигателей показала, что достигаемая разрешающая способность достаточно для его практического использования в задачах вибрационной диагностики ГТД. Был проведен эксперимент, в котором частоты вращения роторов двух двигателей отличались на 3%. При этом все дискретные составляющие были правильно разделены. Минимальная разница между кратностями этих составляющих составляла 2%.

Описанный алгоритм наряду с формированием системы вибродиагностических признаков на одном режиме дополнительно позволяет включить в сокращенное описание признаки из разных режимов. Каждый признак в этом случае будет представлять собой вектор значений, полученных на нескольких режимах работы двигателя.

Область эффективного применения алгоритма - спектры с большой плотностью дискретных составляющих целых и дробных кратностей.

### Библиографический список

1. Карасев В.А., Максимов В.П., Сидоренко М.К. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей. - М.: Машиностроение, 1978. - 132 с.
2. Камынин Н.А., Крупец Н.Г. Система автоматизированного поиска информативных признаков в задачах вибродиагностики // Методы и средства вибродиагностики машин и механизмов. - М.: Каунас, 1983. - С. 78-79.
3. Иванов Ю.В., Сундуков Е.В. Алгоритм поиска диагностических признаков в спектре вибраций // Там же. - С. 81-82.