

1. Справочник по надежности: В 3-х т./Пер. с англ.; Под ред. Б.Е.Бердичевского.-М.:Мир, 1969-1970. Т.1.- 339 с.; Т.2. - 304 с.; Т.3.- 376 с.
2. Каганов В.Л., Капитонов В.Л. Обобщенная модель надежности и отработочные испытания.- В сб.:Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. Куйбышев:КуАИ, 1984, с. 83-90.

УДК 534.63(088.8)

М.А.Караблин, В.А.Медников

#### ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИСКРЕТНО-ФАЗОВОГО АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ЛОПАТОЧНЫХ ВЕНЦОВ ГТД

Геометрическая неоднородность лопаточной решетки турбомшины в рабочих условиях приводит к появлению дополнительной аэродинамической и массовой неуравновешенности лопаточного венца, которая может вызвать существенное повышение вибрации ГТД на частоте вращения ротора  $/1/$ .

Для разработки эффективных методов подавления возникающей дополнительной неуравновешенности лопаточного венца необходимо определить взаимное положение лопаток и изменения этого положения в венце для различных режимов работы турбомшины. Если о положении лопаток судить по периферийному зазору, шагу лопаток, изгибу, раскрутке, перемещению кромок лопаток относительно их корня, то дополнительную неуравновешенность лопаточного венца можно характеризовать величинами первых членов разложения в ряд Фурье распределения по лопаткам вентилятора измеренных значений зазора, шага, изгиба и т.д.

Одним из эффективных способов определения положения лопаток является метод дискретно-фазового анализа. Для получения усредненных за много оборотов ротора значений взаимного расположения кромок лопаток и амплитуды их колебаний может быть использована известная аппаратура ЭДУРА  $/2/$ . Однако дополнительная неуравновешенность обусловлена не столько средним положением лопаток, сколько их взаимным относительным положением на каждом обороте ротора. Кроме того, указанная аппара-

тура не позволяет измерять периферийные зазоры, требует значительного объема работ по препарированию турбомашин и не дает возможности автоматизировать анализ распределения положений лопаток по всему лопаточному венцу.

Для устранения отмеченных недостатков предлагается следующий метод обработки информации.

При вращении ротора турбомашины каждая лопатка исследуемого лопаточного венца проходит в непосредственной близости от датчика, в результате на выходе первичного преобразователя появляются периодически повторяющиеся с каждым оборотом серии импульсов, параметры которых характеризуют как каждую лопатку, так и неоднородность геометрии лопаточного венца в целом. При этом амплитуда импульсов характеризует выступание лопаток, интервал времени между соседними импульсами одного и того же датчика — шаг лопаток, а интервалы времени между импульсами, полученными от разных датчиков в зависимости от схемы их расположения, — относительное перемещение кромок, изгиб, раскрутку или шаг лопаток.

Для простоты анализа примем, что длительность импульсов пропорциональна сумме толщины контролируемого торца лопатки  $\Delta K$  и протяженности чувствительной зоны датчика  $3\delta$ , а форму импульсов будем считать прямоугольной с амплитудой

$$a(t) = A_0 + A_K \text{ при } T \left[ \frac{K}{N} (1 + \tau_K) - \frac{\Delta K + 3\delta}{2\pi D} \right] \leq t \leq T \left[ \frac{K}{N} (1 - \tau_K) + \frac{\Delta K + 3\delta}{2\pi D} \right]$$

и  $a(t) = 0$  вне этого интервала,

где  $A_0$  — средняя амплитуда сигналов датчика;

$A_K$  — отклонение амплитуды сигнала от средней для  $K$ -й лопатки;

$T$  — период вращения ротора;

$K$  — порядковый номер лопатки;

$\tau_K = \frac{\Delta \psi_K}{\psi} = \frac{\Delta \psi_K N}{\pi D}$  — относительное отклонение шага лопаток от среднего;  
 $\Delta \psi_K$  — абсолютное отклонение шага лопаток от среднего;  $N$  — число лопаток в венце;

$D$  — диаметр по концам лопаток.

Спектр таких сигналов будет содержать постоянную составляющую

$$\alpha_0 = \sum_{K=1}^N (A_0 + A_K) \frac{\Delta K + 3\delta}{\pi D} \approx A_0 N \frac{\Delta_{ср} + 3\delta}{\pi D}$$

и гармонические составляющие с амплитудами

$$a_n = \frac{2 \sin(n \frac{\Delta_k + 3\delta}{D})}{\pi n} \sum_{k=1}^N (A_0 + A_k) e^{-j[2\pi n \frac{k}{N} (1 + \tau_k)]},$$

где  $n$  - порядковый номер роторной гармоники;

$\Delta_{cp}$  - среднее значение толщин торцов лопаток в зоне контроля.

Так как величина неуравновешенной силы связана с первым членом разложения в ряд Фурье геометрических параметров лопаточного колеса, то

$$\begin{aligned} A'_k &= A_1 \sin(2 \frac{\pi k}{N} + \varphi_a); \\ \tau'_k &= \tau_1 \sin(2 \frac{\pi k}{N} + \varphi_\tau), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $A'_k$  и  $\tau'_k$  - амплитуды переменных составляющих  $k$ -й лопатки по выступанию и временному смещению ее кромок, обусловленные величиной дополнительной неуравновешенной силы ротора;  $A_1$  и  $\varphi_a$  - амплитуда и фаза первого члена разложения в ряд Фурье неоднородности по выступанию лопаток;  $\tau_1$  и  $\varphi_\tau$  - амплитуда и фаза первого члена разложения в ряд Фурье временных интервалов, связанные с относительным перемещением кромок лопаток.

Анализ выражения (1) с учетом уравнений (2) показывает, что спектр сигнала датчика содержит достаточно интенсивную лопаточную гармонику  $a_n$  с частотой  $f_n = N f_p$  ( $f_p$  - частота вращения ротора), боковые частоты лопаточной гармоники, амплитуды которых ( $a_{n+1}$  и  $a_{n-1}$ ) зависят от амплитуды первой гармоники выступления лопаток и первой гармоники неравномерности распределения шага лопаток по лопаточному венцу.

Выделение роторных гармоник непосредственно из спектра сигналов первичных преобразователей не позволяет раздельно охарактеризовать влияние выступления и смещения кромок на величину неуравновешенной силы и поэтому не может явиться эффективной оценкой для устранения неуравновешенности.

Для разделения оценок по временным (характеризующим перемещение кромок лопаток в окружном направлении) и амплитудным параметрам необходимо величины  $A_k$  и  $\tau_k$  выделить и преобразовать в форму, позволяющую раздельно определить амплитуды  $A_1$  и  $\tau_1$ , фазы  $\varphi_a$  и  $\varphi_\tau$  аппаратными методами.

При выделении  $A_k$  предлагается для каждого импульса датчика производить измерение его амплитуды, пропорциональной выступанию лопаток. Если полученный таким образом сигнал (например, в виде напряжения)

сохранять до момента появления очередного импульса, с приходом которого это выходное напряжение изменять на новое измеренное значение для вновь пришедшего импульса, то спектр такого сигнала будет содержать преимущественно информацию о выступании лопаток, а параметр импульса, характеризующий шаг, будет подавлен. Спектр такого выходного сигнала в общем случае можно записать как

$$\alpha_{n1} = \frac{1}{2\pi n} \sum_{k=1}^N (A_0 + A_k) \left[ e^{-j \frac{2\pi n}{N} (k+1 + \tau_{k+1})} - e^{-j \frac{2\pi n}{N} (k + \tau_k)} \right] =$$

$$= \frac{1}{\pi n} \sum_{k=1}^N (A_0 + A_k) \sin \frac{\pi n}{N} (1 + \Delta \tau_k) e^{-j \frac{\pi n}{N} (2k+1 + \tau_k + \tau_{k+1})},$$

где  $\Delta \tau_k = \tau_{k+1} - \tau_k$  - разношаговость.

Отсюда следует, что толщина лопаток и протяженность чувствительной зоны датчика не оказывает влияния на полученный спектр. Для реальных лопаточных венцов  $\tau_k$  не превышает единиц процентов, поэтому влияние разношаговости на полученный спектр незначительно и напряжение в этом случае полностью характеризует лопаточный венец по выступанию лопаток. Среднее значение напряжения будет полностью соответствовать среднему выступанию лопаток, а первая роторная гармоника этого напряжения - первому члену разложения в ряд Фурье неравномерности геометрии лопаточного венца по выступанию лопаток.

Для выделения полезной информации о разношаговости и шаге между лопатками  $\tau_k$  можно преобразовать в напряжение временной интервал  $\Delta t_k$ , который может быть получен от одного периферийного датчика /3/ или от двух расположенных по окружности датчиков с шагом, равным теоретическому шагу лопаток  $\Delta l = \frac{\pi D}{N}$ .

В первом случае  $\Delta \tau_k$  и  $\Delta t_k$  будут связаны соотношением

$$\Delta t_k' = \frac{T}{N} (\Delta \tau_k + 1) \quad \text{или} \quad \Delta \tau_k = \frac{\Delta t_k' N}{T} - 1,$$

во втором - соотношением

$$\Delta t_k'' = \frac{T}{N} \Delta \tau_k \quad \text{или} \quad \Delta \tau_k = \frac{\Delta t_k'' N}{T}.$$

Преобразование временного интервала в амплитуду импульсов можно осуществить, например, с помощью генератора линейно нарастающего напряжения со сбросом в момент прохождения импульса лопатки.

Спектр таких пилообразных сигналов, амплитуда которых пропорциональна временному интервалу, будет в основном содержать гармоники неравномерности шага. Однако в этом спектре преобладают высшие гармоники, особенно лопаточная, что существенно затрудняет выделение пер-

вой роторной гармонике, характеризующей дополнительную неуравновешенность лопаточного венца. Более целесообразно произвести измерение амплитуды этих пилообразных импульсов и сохранить их измеренное амплитудное значение до появления очередного импульса, после чего величина выходного напряжения должна быть изменена на новое значение, соответствующее амплитуде вновь сформированного пилообразного импульса.

Сформированный таким образом сигнал можно охарактеризовать спектром с амплитудами гармонических составляющих роторных частот:

$$a'_{n\tau} = \frac{1}{2\pi n} \sum_{k=1}^N \frac{CT}{N} (1 + \Delta\tau_k) \left[ e^{-j\frac{2\pi n}{N}(k+1+\tau_{k+1})} - e^{-j\frac{2\pi n}{N}(1+\tau_k)} \right] = \\ = \frac{CT}{\pi n N} \sum_{k=1}^N (1 + \Delta\tau_k) \sin \frac{\pi n}{N} (1 + \Delta\tau_k) e^{-j\frac{\pi n}{N}(2k+1+\tau_k+\tau_{k+1})}, \quad (4)$$

где  $C$  - крутизна пилообразного напряжения.

При измерении равношаговости с помощью двух датчиков постоянная составляющая выходного напряжения будет подавлена полностью или частично. Это может уменьшить погрешность измерения, так как

$$a''_{n\tau} = \frac{CT}{\pi n N} \sum_{k=1}^N \Delta\tau_k \sin \frac{\pi n}{N} (1 + \Delta\tau_k) e^{-j\frac{\pi n}{N}(2k+1+\tau_k+\tau_{k+1})}. \quad (5)$$

Преобразование параметров лопаточного венца по неравномерности раскрутки лопаток и по перемещениям кромок относительно корня лопаток производится аналогично измерению неравномерности шага с помощью двух датчиков.

Следует отметить, что уменьшить погрешность измерения можно за счет фиксирования во времени смены уровней напряжений. В этом случае  $\tau_k = \tau_{k+1} = 0$  в соотношениях (4) и (5) и выражения для спектров существенно упрощаются.

Так, в последнем случае спектр сигнала, характеризующий изгиб лопаток, будет иметь вид

$$a_{n\mu} = \frac{CT}{\pi n N} \sum_{k=1}^N (\tau_B - \tau_{k\mu}) \sin \frac{\pi n}{N} (2k+1) e^{-j\frac{\pi n}{N}(2k+1)},$$

где  $\tau_{k\mu}$  - относительное смещение импульса периферийного датчика;  $\tau_B$  - относительное смещение возбудителя корневого датчика от теоретического положения.

Экспериментальные исследования, проведенные для различных ГТД с помощью аппаратуры ИНЛВ-2, разработанной в КуАИ для реализации

предложенного метода и включающей в свой состав быстродействующий амплитудно-фазовый анализатор гармоник следящего типа ИПВС-3, показали эффективность такой обработки информации, оперативность ее получения в темпе испытаний и удобную для использования форму ее представления в виде графических зависимостей исследуемых параметров лопаточного венца от частоты вращения ротора.

Измеряемыми параметрами системы ИНЛВ-2 являются:

- осредненные по всем лопаткам значения статических относительных перемещений кромок лопаток, выступаний и разношаговости;
- амплитуды перемещений, выступания и разношаговости для каждой лопатки венца при исследовании колебаний лопаток;
- максимальные отклонения кромок для всех лопаток венца от средних значений;
- амплитуды и фазы роторных гармоник по разношаговости, раскрутке, выступанию, изгибу лопаток и вибрации опор.

В качестве первичных преобразователей аппаратура ИНЛВ-2 использует бесконтактные датчики вихретокового, емкостного, индукционного и оптического типов с колоколообразной или знакопеременной формой сигнала.

#### Библиографический список

1. Динамика авиационных газотурбинных двигателей /Под ред. И.А.Биргера, Б.Ф.Шорра.-М.:Машиностроение, 1981. - 232 с.
2. Заболоцкий И.Е., Коростелев Ю.А., Шипов Р.А. Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин.- М.:Машиностроение, 1977.- 160 с.
3. А.с. 979880 (СССР). Устройство для измерения динамической неравномерности параметров лопаточного венца турбомашин /В.А.Медников, В.А.Олейников, Г.З.Заров.-Опубл. в Б.И., 1982, № 45.