

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-

ческой погрешности оценки. Длительность реализации, обеспечивающую величину статистической погрешности не выше заданной, назовем временем стационарности вибрационного процесса.

Для узкополосной вибрации, описываемой математической моделью в виде суммы гармоник и узкополосного шума, в работе [1] на базе теоретического анализа получены соотношения, определяющие время стационарности  $T_{CT}$ , требуемое для оценки среднего значения огибающей (максимумов)  $\bar{A}$  и среднего квадратического значения процесса  $S_x$  с заданной погрешностью  $\delta$ :

$$T_{CT}[\bar{A}] = \frac{2\nu^2}{\Delta f_{x3} \delta^2[\bar{A}]}, \quad (1)$$

$$T_{CT}[S_x] = \frac{4(1+a^2)}{(2+a^2)^2 \Delta f_{x3} \delta^2[S_x]}. \quad (2)$$

Здесь  $\Delta f_{x3}$  - ширина энергетического спектра узкополосного вибрационного процесса;

- $\nu = S_A / \bar{A}$  - коэффициент вариации огибающей (максимумов);  
 $S_A$  - среднее квадратическое значение огибающей (максимумов);  
 $a$  - отношение амплитуды гармоник к среднему квадратическому значению шума.

В качестве  $T_{CT}$  следует принимать наибольшую из величин, полученных по формулам (1) и (2). Соотношение между  $T_{CT}[\bar{A}]$  и  $T_{CT}[S_x]$  при равных погрешностях  $\delta[\bar{A}]$  и  $\delta[S_x]$  имеет следующий вид:

$$\frac{T_{CT}[\bar{A}]}{T_{CT}[S_x]} = \frac{\nu^2(2+a^2)^2}{2(1+a^2)}.$$

График этой зависимости, построенный с учетом известного выражения [2]

$$\nu = \frac{\left\{ (2+a^2) - \frac{\pi}{2} \left[ \left(1 + \frac{a^2}{2}\right) I_0\left(\frac{a^2}{4}\right) + \frac{a^2}{2} I_1\left(\frac{a^2}{4}\right) \right] e^{-\frac{a^2}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{\frac{\pi}{2}} \left[ \left(1 + \frac{a^2}{2}\right) I_0\left(\frac{a^2}{4}\right) + \frac{a^2}{2} I_1\left(\frac{a^2}{4}\right) \right] e^{-\frac{a^2}{4}}},$$

где  $I_0$ ,  $I_1$  - модифицированные функции Бесселя, приведен на рис. 1.

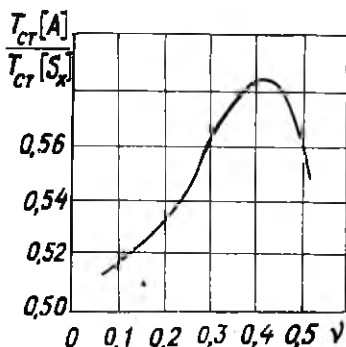
Увеличение длительности реализации сверх необходимой по условию стационарности процесса приводит к неоправданным затратам времени и материальных средств, поэтому экспериментальное подтверждение аналитических зависимостей (1) и (2) представляет значительный практический интерес.

Оценка времени  $T_{CT}$  производилась путем анализа стабильности результатов измерений среднего значения максимумов  $\bar{A}$  фильтрованных вибрационных составляющих ГТД в зависимости от длительности реализации.

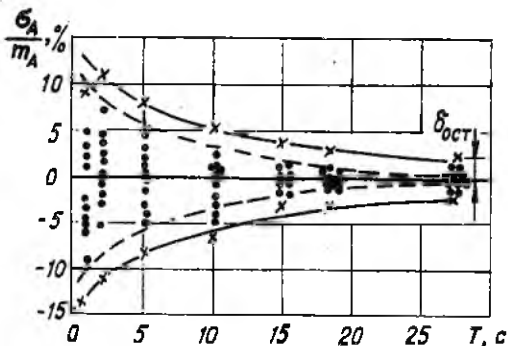
Для измерений использовалась автоматизированная система обработки быстропеременных процессов на базе ЦВМ М-6000, в запоминающее устройство которой после предварительной аналоговой фильтрации вводились исследуемые процессы. Выборка максимумов процесса и расчет по ним величин  $\bar{A}$  и  $\nu$  осуществлялись программным путем. Частота квантования процесса по времени выбиралась из условия обеспечения погрешности выделения максимумов не более 1%.

Величина  $\bar{A}$  определялась по отрезкам реализации последовательно увеличивавшейся продолжительности, вплоть до момента относительной стабилизации разброса измеренных значений. Наблюдения на указанных отрезках времени предполагались независимыми. По ансамблю из десяти отрезков фиксированной длительности вычислялись среднее значение  $m_A$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma_A$  результатов измерений. Величина  $\sigma_A/m_A$  принималась в качестве оценки погрешности  $\sigma[\bar{A}]$  при данной длительности реализации. Теоретической зависимостью, с которой сравнивались величины отношений  $\sigma_A/m_A$ , служило соотношение (1) при подстановке в него измеренных значений  $\Delta f_{\text{вз}}$  и  $\nu$  вибрационных составляющих ГТД.

На рис. 2 представлены данные о результатах измерений величины  $\bar{A}$  одной из вибрационных составляющих ГТД при различных длительностях реализаций  $T$  и рассчитанный по этим данным доверительный интервал  $\pm 3\sigma$ . Как видно, начиная с некоторых значений  $T$ , увеличение длительности реализации не приводит к существенному сужению доверительного интервала. Это свидетельствует о том, что "остаточный" до-



Р и с. 1. Зависимость отношения  $T_{CT}[A]/T_{CT}[S_x]$  от коэффициента вариации  $S_x$  для случая равных допустимых погрешностей оценки величин  $\bar{A}$  и  $S_x$



Р и с. 2. Влияние длительности реализации на результаты измерений интенсивности вибрации камеры сгорания ГТД ( $\Delta f_{\Phi} = 12\%$ ):  
 ● - экспериментальные значения величины  $\sigma_A / m_A$  ;  
 ——— доверительный интервал  $\pm 3\sigma$  ;  
 - - - - - условный доверительный интервал  $\pm 3\sigma$ , связанный только с длительностью реализации;  
 x - расчетные точки для доверительного интервала  $\pm 3\sigma$

верительный интервал  $\delta_{ост}$  вызван причинами, не связанными с величиной  $T$ . Эквидистантный перенос доверительного интервала  $\pm 3\sigma$  на линию нулевой погрешности позволяет выделить условный доверительный интервал, обусловленный только длительностью реализации.

Эксперимент проводился для трех значений полосы пропускания фильтра - 6, 12 и 21%. Данные, приведенные в таблице, показывают, что ширина полосы пропускания фильтра, используемого для аналоговой фильтрации составляющих спектров вибрации ГТД, не должна превышать 12%.

Экспериментальные данные о времени стационарности составляющих спектра вибрации ГТД при различных значениях погрешности  $\sigma_A / m_A$  и полосах пропускания фильтра

Физическое происхождение вибрации	$\frac{\sigma_A}{m_A}, \%$	Ширина фильтра, %		
		6	12	21
I	2	3	4	5
4-я "гармоника" винта ТВД	5	-	-	25
	10	-	-	16
	15	-	-	10

I	2	3	4	5
8-я "гармоника" винта ТВД	5	23	20	11
	10	15	12	6
	15	11	8	3
Вибрация камеры сгорания ТВД и ТРДД	5	7	7	5
	10	2	2	2
	15	1	1	1

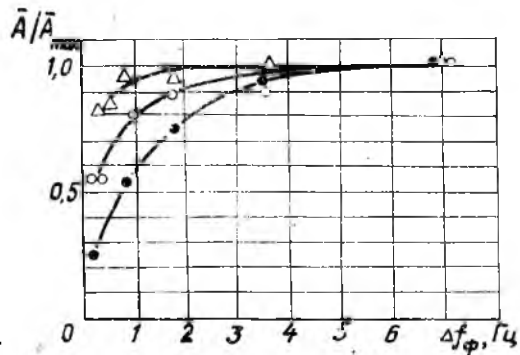
Измерения ширины спектра  $\Delta f_{\Sigma}$  проводились по следующей методике.

На среднюю частоту вибрационной составляющей настраивался фильтр, полоса пропускания которого  $\Delta f_{\Phi}$  могла регулироваться. Выполнялась серия измерений величины  $\bar{A}$  при различных значениях  $\Delta f_{\Phi}$ . По результатам измерений строилась эмпирическая зависимость  $\bar{A}(\Delta f_{\Phi})$ , из которой при уровне 0,95 от максимального значения  $\bar{A}(\Delta f_{\Phi})$  определялась ширина спектра вибрационной составляющей.

Для иллюстрации результатов применения методики на рис. 3 приве-

Р и с. 3. Зависимость измеренных значений интенсивности спектральных составляющих вибрации ГТД от полосы пропускания фильтра:

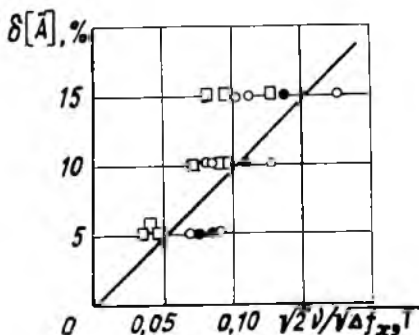
- - 4-я "гармоника" винта ТВД;
- - 8-я "гармоника" винта ТВД;
- △ - 1-я "гармоника" ротора ТВД и ТРДД;
- — аппроксимация экспериментальных данных



дены зависимости относительного уровня составляющих спектра вибрации ГТД от ширины полосы пропускания анализирующего фильтра  $\Delta f_{\Phi}$

Анализ полученных данных показывает, что относительная ширина спектра составляющих вибрации роторов ГТД лежит в пределах 1...2%. Это, по-видимому, связано с нестабильностью частот вращения роторов. Величины  $\Delta f_{x_2}$  составляющих вибрации, генерируемых воздушными винтами ТВД, несколько больше - 2...4%, что объясняется особенностями конструкции и регулирования этих двигателей. Вибрация, вызванная процессами горения в основной и форсажной камерах сгорания ГТД, занимает еще более широкую полосу частот - 10 ... 30%, величина которой зависит от ряда факторов (от интенсивности вибрации, типа камеры сгорания и др.).

Сравнение экспериментальных величин  $\sigma_A / m_A$  с теоретической зависимостью (1), приведенное на рис. 4, при различных значениях  $T$  показывает их удовлетворительное согласование. Это позволяет рекомендовать применение зависимостей (1) и (2) в практике вибрационных измерений ГТД для оценки необходимой длительности реализации.



Р и с. 4. Составление теоретических и экспериментальных погрешностей оценки величины  $A$  :

- - теоретическая зависимость (1);
- экспериментальные точки:
- - 4-я "гармоника" винта ТВД;
- - 8-я "гармоника" винта ТВД;
- - вибрация камеры сгорания ТВД и ТРДД

#### Л и т е р а т у р а

1. Бояринцев В.И., Кости В.И. Выбор длительности реализации при определении интенсивности вибрации. Куйбышев, 1982, 22 с. Деп. в ВИНТИ 23 авг. 1982, № 4638-82.

2. Кости В.И. Сравнительная оценка интенсивности вибрации о переменной во времени амплитудой эквивалентным значением виброскорости гармонических колебаний. - Проблемы прочности, 1974, № 9, с. 103-109.