статистикам, и ОВДП прототипов. Эти, по существу прогнозируемые, ОВДП позволят более обоснованно определить диагностическую модель двигателя, выбрать оптимальные методы диагностики, оценить требуемую контролепригодность. Содержание ОВДП, получаемых на этапе проектирования, должно быть шире, чем на этапах производства и эксплуатации. Они должны включать данные специальных диагностических исследований для оценок возможностей, эффективности и перспективности вибродиагностики.

Разработка и внедрение ВДП представляется необходимым условием развития вибродиагностики и решения сопутствующих организационных вопросов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дубицкий Л. Г.* Физическая диагностика. В сб.: «Измерение, контроль, автоматизация», вып. 2. М., 1974.

2. *Сидоренко М. К.* Характеристики технической диагностики. В сб.: «Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов», вып. 3. КуАИ, 1976.

3. Вибрационная диагностика. Экспресс-информация «Испытательные приборы и стенды», 1975, № 31, реф. 218.

УДК 620.178.3:519.24

Е. В. Сундуков

О РАСЧЕТЕ СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ПРОГРАММНОЙ НАГРУЗКИ

Требование совершенствования методов расчета усталостных характеристик деталей и узлов привело к увеличению объема усталостных испытаний на нагрузки, в той или иной мере имитирующие эксплуатационные. При этом воспроизводится или случайная нагрузка, или программная, полученная путем схематизации эксплуатационной.

В качестве параметра, характеризующего нагруженность образца при случайной нагрузке, часто используют среднеквадратическое значение процесса.

При выборе параметров эквивалентных испытаний используют величину коэффициента эквивалентности, которую обычно определяют отношением среднеквадратического значения синусоидальной нагрузки к среднеквадратическому значению случайного или программного процессов нагружения, взятых при равной долговечности.

В связи с этим представляет интерес определение величины среднеквадратического значения процесса программного нагружения по параметрам его блока.

Определим эту величину, исходя из следующих рассуждений.

Пусть блок программной симметричной нагрузки состоит из k ступеней с числом циклов $n_1, n_2, \ldots, n_i, \ldots, n_k$; круговой частоты ω_i, объемом блока N (рис. 1).

Длительность каждой ступени соответственно составит:

$$\Delta t_1 = \frac{2\pi n_1}{\omega_1}, \quad \Delta t_2 = \frac{2\pi n_2}{\omega_2}, \ldots,$$

$$\Delta t_j = \frac{2\pi n_j}{\omega_j}, \ldots, \quad \Delta t_k = \frac{2\pi n_k}{\omega_k}.$$

Длительность блока —

$$T = \sum_{i=1}^{k} \Delta t_i.$$

Представим программный блок как сумму процессов вида 1, 2, ..., j, ..., k (рис. 1), где σ — уровень нагрузки.

Дисперсия суммарного процесса определится как сумма дисперсий:

$$D_\Sigma = D_1 + D_2 + \ldots + D_j + \ldots + D_k. \tag{1}$$

Определим дисперсию каждой из k составляющих.

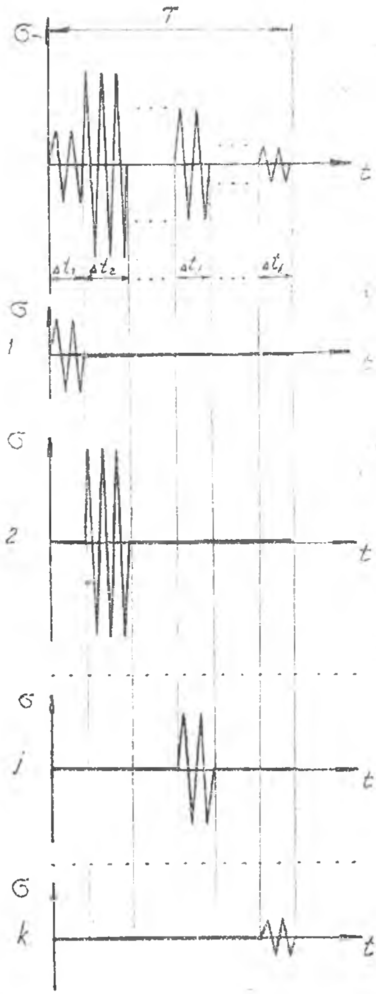

Рис. 1. Блок программной нагрузки: *1, 2, ..., j, ..., k* — составляющие процесса

Известно, что дисперсия случайной функции

$$D_x = \psi_x^2 - \mu_x^2;$$

где

$$\psi_x^2 = \lim_{\lambda\to\infty} \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda x^2(t)\,dt;$$

$$\mu_x = \lim_{\lambda\to\infty} \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda x(t)\,dt.$$

В рассматриваемом случае $\mu_x = 0$, тогда для j-й составляющей

$$D_x = D_j = \psi_j^2;$$

$$D_j = \frac{1}{T} \int_0^T x_j^2(t)\,dt.$$

Интервал $[0 \div T]$ разобьем на отрезки $\Delta t_1, \Delta t_2, \ldots, \Delta t_j, \ldots, \Delta t_k$ (рис. 1), тогда

$$D_j = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} x_{j_{0-1}}^2(t)\,dt + \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} x_{j_{1-2}}^2(t)\,dt + \ldots +$$

$$+ \frac{1}{T} \int_{t_{j-1}}^{t_j} x_{j_{(j-1)-1}}^2(t)\,dt + \ldots + \frac{1}{T} \int_{t_{k-1}}^{t_k} x_{j_{(k-1)-k}}^2(t)\,dt.$$

Из рис. 1 очевидно, что для j-го интервала все функции, кроме $x_{j\,(j-1)-j}(t) = \sigma_j \sin \omega_j t$, равны нулю, тогда

$$D_j = \frac{1}{T} \int_{t_{j-1}}^{t_j} x_j^2(t)\,dt = \frac{1}{T} \int_{t_{j-1}}^{t_j} \sigma_j^2 \sin^2 \omega_j t\,dt = \frac{\sigma_j^2}{T} \int_{t_{j-1}}^{t_j} \frac{1 - \cos 2\omega_j t}{2}\,dt =$$

$$= \frac{\sigma_j^2}{2T}\, t \Bigg|_{t_{j-1}}^{t_j} - \frac{\sigma_j^2}{4T\omega_j} \sin 2\omega_j t \Bigg|_{t_{j-1}}^{t_j} = \frac{\sigma_j^2}{2} \frac{\Delta t_j}{T} - \frac{\sigma_j^2}{4T\omega_j} \sin 2\omega_j t_j +$$

$$+ \frac{\sigma_j^2}{4T\omega_j} \sin 2\omega_j t_{j-1}.$$

Дисперсия блока программного нагружения определится согласно зависимости (1), как

$$D_\Sigma = \sum_{i=1}^{k} D_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{\sigma_i^2}{2} \frac{\Delta t_i}{T} - \sum_{i=1}^{k} \frac{\sigma_i^2}{4T\omega_i} \sin 2\omega_i t_i +$$

$$+\sum_{i=1}^{k}\frac{\sigma^2_i}{4T\omega_i}\sin 2\omega_i t_{i=1}. \qquad (2)$$

Обозначим два последних слагаемых в формуле (2) через В. Максимальное значение величины В по модулю

$B_{max}=\sum_{i=1}^{k}\frac{\sigma^2_i}{2T\omega_i}$ может быть получено при

$2\omega_i t_i-2\omega_i t_{i-1}=\pm\pi$ и $/\sin 2\omega_i t_i/=/\sin 2\omega_i t_{i-1}/=1$.

Относительную величину B_{max} обозначим через

$$\Delta=\frac{B_{max}}{D_\Sigma}=\frac{\sum_{i=1}^{k}\frac{\sigma^2_i}{2T\omega_i}}{\sum_{i=1}^{k}\frac{\sigma^2_i}{2}\frac{\Delta t_i}{T}-\sum_{i=1}^{k}\frac{\sigma^2_i}{2T\omega_i}}.$$

Если принять число циклов в ступенях блока и частоту нагрузки одинаковыми, то

$$\Delta=\frac{1}{2\pi n-1}. \qquad (3)$$

Из уравнения (3) видно, что величина Δ уменьшается с ростом n, при $n=10$, $\Delta=1{,}6\%$. Как правило, число циклов в ступенях существенно больше. Поэтому ввиду малости величины Δ последними двумя слагаемыми в (2) можно пренебречь. Тогда дисперсия блока программной нагрузки

$$D_\Sigma\simeq\sum_{i=1}^{k}\frac{\sigma^2_i}{2}\frac{\Delta t_i}{T},$$

а среднеквадратическое значение процесса

$$S_\Sigma=\sqrt{D_\Sigma}\simeq\sqrt{\sum_{i=1}^{k}\frac{\sigma^2_i}{2}\frac{\Delta t_i}{T}}. \qquad (4)$$

Блок программного одночастотного нагружения можно рассматривать как узкополосный случайный процесс с определенным чередованием амплитуд.

При анализе узкополосных случайных процессов часто пользуются математической моделью в виде суммы узкополосного шума и гармоники. Плотность распределения амплитуд такого процесса описывается законом распределения Райса [1]:

$$p(R)=\frac{R}{S^2}\exp\left(-\frac{R^2+A^2_\Gamma}{2S^2}\right)I_0\left(\frac{RA_\Gamma}{S^2}\right), \qquad (5)$$

где R — амплитуда узкополосного случайного процесса;

A_r — амплитуда гармоники;

S — среднеквадратическое значение узкополосного шума;

I_0 — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

В работе [2] для процессов, распределение амплитуд которых описывается законом (5), получено выражение среднеквадратического значения через параметры огибающей:

$$S_v = \sqrt{\frac{S^2_R + \bar{A}^2}{2}}, \tag{6}$$

где S_R и $\bar{A}$ — среднеквадратическое и среднее значения амплитуд соответственно.

Покажем возможность использования выражения (6) для расчета среднеквадратического значения процесса программной нагрузки.

Выразим величины S_R и $\bar{A}$ через характеристики блока программной нагрузки, представленного на рис. 1. При этом отношение $\frac{\Delta t_i}{T}$ будем рассматривать как вероятность амплитуды уровня σ_i, тогда

$$\overline{A} = \overline{\sigma} = \sum_{i=1}^{k} \sigma_i p_i = \sum_{i=1}^{k} \sigma_i \frac{\Delta t_i}{T}; \tag{7}$$

$$S_R^2 = S^2_{\sigma_A} = \sum_{i=1}^{k} (\sigma_i - \overline{\sigma})^2 p_i = \sum_{i=1}^{k} \sigma_i^2 p_i - 2\overline{\sigma} \sum_{i=1}^{k} \sigma_i p_i + \overline{\sigma}^2 \sum_{i=1}^{k} p_i =$$

$$= \sum_{i=1}^{k} \sigma_i^2 p_i - 2\overline{\sigma}^2 + \overline{\sigma}^2 = \sum_{i=1}^{k} \sigma_i^2 p_i - \overline{\sigma}^2 =$$

$$= \sum_{i=1}^{k} \sigma_i^2 \frac{\Delta t_i}{T} - \left(\sum_{i=1}^{k} \sigma_i \frac{\Delta t_i}{T} \right)^2. \tag{8}$$

Подставив (7) и (8) в (6), получим

$$S_\sigma = \sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{k} \sigma_i^2 \frac{\Delta t^2_i}{T} - \left(\sum\limits_{i=1}^{k} \sigma_i^2 \frac{\Delta t_i}{T} \right)^2 + \left(\sum\limits_{i=1}^{k} \sigma_i \frac{\Delta t_i}{T} \right)^2}{2}} =$$

$$= \sqrt{\sum_{i=1}^{k} \frac{\sigma^2_i}{2} \frac{\Delta t_i}{T}}.$$

Выводы

1. Среднеквадратическое значение процесса программного нагружения с достаточной точностью определяется выражением (4).
2. Для определения моментов процесса колебаний при программных нагружениях можно использовать распределение Райса.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Тихонов В. И.* Статистическая радиотехника. М., «Сов. радио», 1966.
2. *Костин В. И.* Сравнительная оценка интенсивности вибрации с переменной во времени амплитудой эквивалентным значением виброскорости гармонических колебаний. «Проблемы прочности», 1974, № 9.

УДК 534.002.23:621.45.452

Е. В. Чемохуд, М. К. Сидоренко, П. П. Власов, С. М. Дорошко, Ю. В. Киселев, И. А. Камынин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСБАЛАНСА РОТОРА НА ВИБРАЦИЮ АВИАЦИОННОГО ГТД

В вибрационной диагностике большое значение имеют тестовые эксперименты с искусственно внесенными дефектами, так как они позволяют решить такие важные вопросы, как выбор наиболее информативных режимов работы двигателя, числа и места размещения вибропреобразователей и т. д. Такие эксперименты с целью исследования влияния технического состояния роторов на характер вибрации проводились на ДТРД небольшой тяги.

Исследовались вибрационные характеристики двигателя в исходном состоянии и при двух видах дисбаланса: механическом и аэродинамическом. Дополнительный механический дисбаланс по компрессору $\delta_к$ создавался путем постановки грузика на диск первой ступени компрессора низкого давления (НД). Устанавливались три градации $\delta_к$ — 60, 125 и 170 Г·см. Кроме того, с помощью грузика в плоскости диска третьей ступени турбины увеличивался механический дисбаланс $\delta_т$ по турбине НД до величины 100 Г·см.