

П. П. Власов

РАЗДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ ВИБРАЦИИ ПО ИСТОЧНИКАМ МЕТОДОМ СЛЕДЯЩЕГО АНАЛИЗА

Вибрация многороторных двигателей по своей структуре сложнее вибрации однороторных ГТД. В спектрах вибрации многороторных двигателей проявляются компоненты, соответствующие узлам, связанным кинематически с различными роторами. Густой спектр вибрации затрудняет получение дифференциальных оценок интенсивностей компонент. Наличие флуктуаций оборотов еще более усложняет данную задачу.

Скольжение оборотов роторов и большой набор кратностей частот исследуемых компонент по отношению к частотам вращения роторов приводят к тому, что на некоторых режимах работы ГТД спектры компонент вибрации, связанных с узлами и кинематически связанных с различными роторами, перекрываются. В этом случае общепринятыми спектральными методами невозможно разделить интенсивность компонент.

Требуемую оценку можно получить с помощью взаимного спектрального анализа, однако в этом случае необходимо установить датчик вибрации хотя бы на один из узлов.

В последнее время в газотурбинной технике для определения интенсивности компонент все шире применяются узкополосные фильтры, перестраиваемые синхронно с изменениями оборотов роторов. В этом случае следящий фильтр непрерывно выделяет из общего спектра вибрации энергию интересующей компоненты на стационарных и переходных режимах работы ГТД. Такой способ оценки интенсивности гармоник вибрации получил название следящего анализа.

Рассмотрим возможности данного метода для получения дифференциальных оценок компонент вибрации от узлов, связанных кинематически с различными роторами.

В работе [1] показано, что, учитывая флуктуации оборотов в виде случайной фазы, интенсивность компоненты с амплитудой, получаемой на выходе стационарного фильтра (при спектральном анализе), можно выразить следующим образом:

$$A_0 = kV \operatorname{erf} \left(\frac{\pi \Pi \Phi}{\sqrt{2} \sigma} \right), \quad (1)$$

где k — коэффициент передачи; $\operatorname{erf}(u)$ — интеграл вероятностей; $\sigma = \frac{1}{3} \delta z f_p$ — среднеквадратичное отклонение распределения частоты вращения компоненты; δ — величина относительных флуктуаций оборотов; f_p — частота вращения ротора; z — номер гармоники (кратность частот компоненты и вращения ротора); $\Pi_{\text{фр}}$ — полоса прозрачности фильтра.

В случае следящего анализа оценка интенсивности данной компоненты, согласно методу приведенной к фильтру шкалы времени [2], имеет вид

$$A = kV \operatorname{erf}\left(\frac{\pi \Pi_{\text{ф}}}{\sqrt{2} \sigma_{\mu}}\right), \quad (2)$$

где $\Pi_{\text{ф}}$ — полоса прозрачности следящего фильтра; σ_{μ} — среднеквадратичное значение распределения погрешности отслеживания компоненты по частоте.

Рассмотрим наихудший случай, когда средние частоты двух гармоник разных роторов совпадают, т. е. $z_1 f_{p1} = z_2 f_{p2}$.

Проведем два замера. При этом канал управления следящего анализатора подключим при первом замере к датчику оборотов первого ротора, а при втором — к датчику оборотов второго ротора. В первом случае, согласно методу приведенных координат, гармоника ротора, от которого управляется следящий фильтр, представляется как частотно-модулированный синусоидальный сигнал со среднеквадратичным отклонением частоты, равным среднеквадратичному значению погрешности отслеживания компоненты по частоте σ_{μ} .

Гармоника второго ротора выражается частотно-модулированной синусоидой со среднеквадратичным отклонением частоты:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\sigma_1\sigma_2 r + \sigma_{\mu}^2}, \quad (3)$$

где σ_1 и σ_2 — среднеквадратичные значения распределения частот компонент; r — коэффициент корреляции флуктуации оборотов роторов.

В результате первого замера получим:

$$A_1 = k V_1 \operatorname{erf}\left(\frac{\pi \Pi_{\text{ф}}}{\sqrt{2} \sigma_{\mu}}\right) + k V_2 \operatorname{erf}\left(\frac{\pi \Pi_{\text{ф}}}{\sqrt{2} \sigma_{\Sigma}}\right), \quad (4)$$

где первый член выражает попадание в следящий фильтр энергии гармоники первого ротора, а второй — энергии гармоники второго ротора.

При втором замере имеем:

$$A_2 = kV_2 \operatorname{erf}\left(\frac{\pi \Pi_{\Phi}}{\sqrt{2} \sigma_{\mu}}\right) + kV_1 \operatorname{erf}\left(\frac{\pi \Pi_{\Phi}}{\sqrt{2} \sigma_{\nu}}\right). \quad (5)$$

Примем

$$\operatorname{erf}\left(\frac{\pi \Pi_{\Phi}}{\sqrt{2} \sigma_{\mu}}\right) = a; \quad \operatorname{erf}\left(\frac{\pi \Pi_{\Phi}}{\sqrt{2} \sigma_{\nu}}\right) = b$$

и объединим результаты обоих замеров в систему уравнений, где искомыми являются интенсивности гармоник первого V_1 и второго V_2 роторов:

$$\begin{cases} akV_1 + bkV_2 = A_1; \\ bkV_1 + akV_2 = A_2. \end{cases} \quad (6)$$

Возможны три случая решения системы (6). В первом случае коэффициенты a и b уравнений непропорциональны. Тогда система имеет единственное решение, представленное следующими выражениями:

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{aA_1 - bA_2}{a^2 - b^2}; \\ V_2 &= \frac{aA_2 - bA_1}{a^2 - b^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, мы получили отдельные оценки интенсивностей гармоник различных роторов.

Во втором случае коэффициенты уравнений пропорциональны и их отношение равно отношению свободных членов:

$$\frac{a}{b} = \frac{b}{a} = \frac{A_1}{A_2}. \quad (8)$$

При этом $A_1 = A_2$, т. е. результаты обоих замеров равны. Физически это означает неправильный выбор полосы прозрачности Π_{Φ} следящего фильтра, что привело к попаданию в фильтр при обоих замерах суммарной энергии компонент.

На рис. 1 показаны зависимости результатов замеров A_1 и A_2 от соотношения полосы пропускания фильтра Π_{Φ} и флуктуаций частоты компоненты $\delta z f_p$ для двух отношений интенсивностей компонент V_1 и V_2 при $V_1 = 1$, $k = 1$; $\sigma_1 = \sigma_2$, $r = 0$ и $\sigma_{\mu} = 0,2 \sigma_1$. Из приведенных зависимостей следует, что при $\Pi_{\Phi} \geq 6 \delta z f_p$ результаты измерений совпадают. Для получения дифференциальных оценок интенсивностей компонент необходимо выбирать полосу прозрачности следящего фильтра Π_{Φ} , примерно равной $\delta z f_p$.

Третий случай решения системы уравнений заключается в том, что коэффициенты уравнений пропорциональны, но свободные члены находятся не в таком соотношении, т. е. $a = b$ и $A_1 \neq A_2$.

Практически этот случай возникает при измерениях с существенными погрешностями.

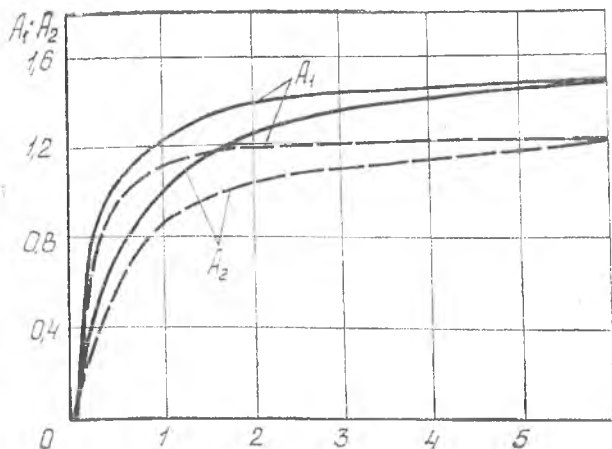


рис. 1. Зависимости результатов испытания от параметра $\frac{P_q}{b} f_n$ — — — — — $\frac{V_2}{V_1} = 0,5$; — — — — — $\frac{V_2}{V_1} = 0,25$

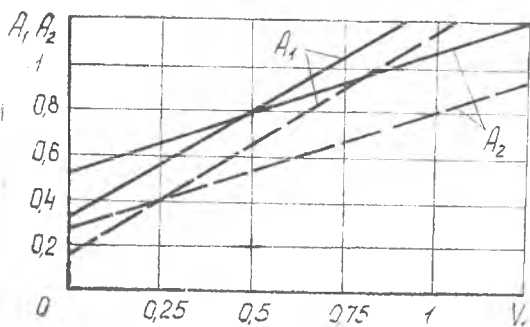


рис. 2. Зависимости результатов испытаний от интенсивности составляющих: — — — — — $V_2 = 0,5$; — — — — — $V_2 = 0,25$

Из симметричности коэффициентов системы уравнений (6) вытекает, что при равенстве интенсивностей разделяемых гармоник V_1 и V_2 результаты обоих замеров равны.

На рис. 2 приведены зависимости A_1 и A_2 от V_1 для двух значений V_2 , равных 0,25 и 0,5 при $P_{\Phi}/8 z f_p = 1$ и тех же значениях k , σ_1 , σ_2 , r и σ_p .

При $V_1 = V_2$ и $A_1 = A_2$ для отдельных оценок интенсивностей достаточно одного уравнения, решение которого имеет вид

$$V_1 = V_2 = \frac{A_1}{k(a+b)} = \frac{A_2}{k(a+b)}. \quad (9)$$

Полученные результаты применимы для трехвалвных ГТД. В этом случае для получения дифференциальных оценок трех гармоник различных роторов с перекрывающимися спектрами необходимо провести три замера, поочередно подключая канал управления следящего анализатора к датчикам оборотов каждого из роторов.

Таким образом, при правильном выборе полосы прозрачности фильтра следящий анализ позволяет получить дифференциальную оценку интенсивностей гармоник каждого из роторов при перекрытии их спектров, т. е. разделить суммарную вибрацию по источникам (по роторам). Необходимое для этого число замеров равно числу роторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авраменко А. А., Власов П. П. Влияние флуктуаций оборотов на результаты спектрального анализа. В сб.: «Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов», вып. 4. КуАИ, 1977.

2. Виницкий А. С. Модулированные фильтры и следящий прием 4М сигналов. М., «Сов. радио», 1969.

УДК 534:62—413/415

В. Н. Вякин, Н. Д. Степаненко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПЛОСКОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ НА КРУГЛЫХ ОБРАЗЦАХ

Высокочастотные усталостные испытания материалов в условиях плоского напряженного состояния применительно к пластинам и оболочкам обычно проводят при попе-