

*Е. Н. ЧУКРЕЕВ*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЕЙ БЕЗ СПЕЦИАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

При проектировании двигателей необходимо знание динамических характеристик отдельных агрегатов и магистралей, а также всего двигателя для исследования на устойчивость собственно двигателя и системы автоматического управления, в которую он может входить в качестве исполнительного органа.

Динамические характеристики получают экспериментальным или расчетным путем, который требует экспериментальной проверки.

В последние годы в практику внедряются частотные испытания двигателей, позволяющие получить динамические характеристики ценой дополнительных затрат, связанных с проведением специальных испытаний.

В данной работе исследуется возможность определения динамических характеристик в процессе доводки двигателя без специальных испытаний.

Определение динамических характеристик представляет значительные трудности, т. к. магистрали и агрегаты двигателей, как правило, не обладают свойством однонаправленности и являются активными, т. е. содержат внутри себя источники энергии.

Можно определять динамические характеристики без специальных испытаний, если входные и выходные величины исследуемых объектов рассматривать как стационарные случайные процессы и объект принимать линейным. В частности, возможно определение динамических характеристик систем, входными величинами которых являются колебания давления (пульсации), а выходными — механические колебания (вибрации). Вопрос связи пульсаций и вибраций двигателей мало изучен, хотя представляет большой практический интерес. Знание этих динамических характеристик позволяет выявить причину (источник) вибраций агрегата с дан-

ной частотой и в случае, если вибрации не желательны, устранить их причину или рекомендовать другие мероприятия для ликвидации вибраций.

### Постановка задачи

Рассмотрим двигатель как сложную динамическую систему, которая имеет в качестве входных величин пульсации давления в камере сгорания, газогенераторе и т. д. и в качестве выходных — вибрации различных агрегатов двигателя. В качестве выходных величин можно рассматривать и вибрации агрегатов летательного аппарата.

Будем считать, что вибрации являются следствием пульсаций, т. е. пренебрегаем обратным влиянием механических вибраций на пульсации давления. Тогда можно выделить однонаправленную динамическую систему, входными величинами которой являются пульсации давления, а выходными — вибрации. Данная система является линейной, т. к. вибрации — это упругие деформации конструкции (в пределах линейного участка закона Гука).

Ставится задача определения динамических характеристик, описывающих реакцию механической конструкции на пульсации давления в различных агрегатах, по реализации пульсаций и вибраций, нанесенным на какой-то носитель (магнитную, кино- или бумажную ленту) при доводочных испытаниях двигателя.

### Решение задачи

Вибрации агрегатов двигателей и летательных аппаратов и пульсации давления имеют сложный частотный состав и в них присутствуют случайные составляющие, поэтому связь между пульсациями и вибрациями неявная и требует привлечения аппарата теории случайных функций.

Пульсации давления и вибрации можно представить как сумму полигармонического и случайного процессов [3]:

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= x'(t) + x''(t) \\ y(t) &= y'(t) + y''(t) \end{aligned} \right\} (A),$$

где  $x'(t)$ ,  $y'(t)$  — полигармонические функции;

$x''(t)$ ,  $y''(t)$  — случайные процессы (шумы).

Если рассматривать пульсации и вибрации как эргодический стационарный случайный процесс, то импульсная переходная функция линейной системы определяется из уравнения

$$R_{xy}(\tau) = \int_0^{\infty} R_x(\tau - \Theta) k(\Theta) d\Theta, \quad (1)$$

в котором  $k(\Theta)$  — импульсная переходная функция системы;

$R_x(\tau - \Theta)$  — автокорреляционная функция входного сигнала;

$R_{xy}(\tau)$  — взаимная корреляционная функция входа и выхода;

$\tau$  и  $\Theta$  — обозначения времени.

Корреляционные функции определяются выражениями

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^T x(t) y(t + \tau) dt, \quad (2)$$

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^T x(t) x(t + \tau) dt. \quad (3)$$

Преобразовав по Фурье обе части уравнения (1), получим уравнение

$$S_{xy}(\omega) = W(j\omega) S_x(\omega),$$

которое избавляет от необходимости решения интегрального уравнения (1).

В уравнении (4)

$$S_{xy}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega\tau} R_{xy}(\tau) d\tau \quad (5)$$

— взаимная спектральная плотность входного и выходного сигналов;

$$S_x(\omega) = 2 \int_0^{\infty} e^{-j\omega\tau} R_x(\tau) d\tau \quad (6)$$

— автоспектральная плотность входного сигнала;

$$W(j\omega) = \int_0^{\infty} k(t) e^{-j\omega t} dt \quad (7)$$

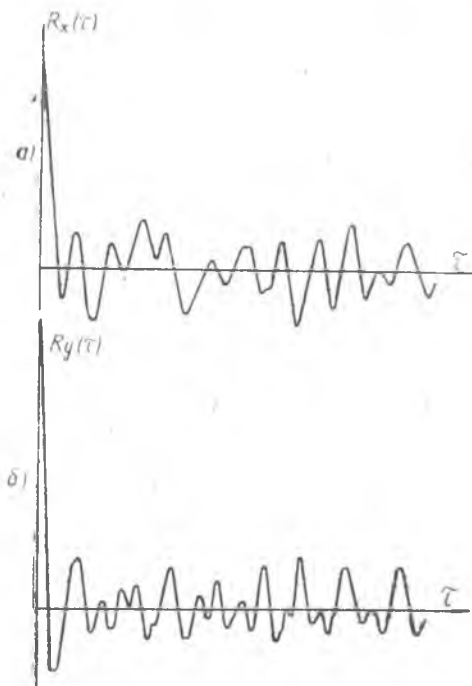
— амплитудно-фазовая характеристика исследуемой динамической системы;

$\omega$  — круговая частота.

При необходимости импульсную переходную функцию системы можно определить, применив обратное преобразование Фурье к амплитудно-фазовой характеристике, найденной из выражения (4). Представление пульсаций и вибраций в виде  $A$  позволяет определять динамические характеристики как в том случае, когда исследуемый процесс является близким к периодическому, так и в случае, когда он носит ярко выраженный случайный характер.

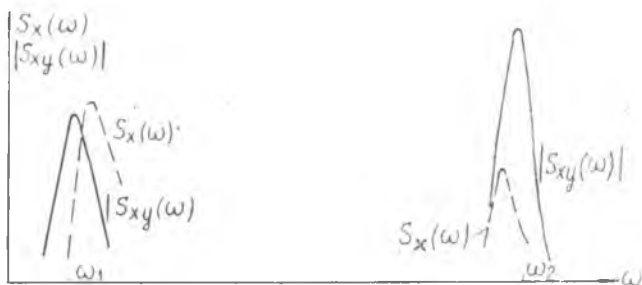
В рассматриваемых системах на долю случайных составляющих пульсаций и вибраций приходится меньшая часть энергии, поэтому частотная характеристика будет определяться характером периодических (полигармонических) составляющих реализаций пульсаций и вибраций, то есть частотная характеристика может быть вычислена только для частот, присутствующих в периодических составляющих реализаций. Это является недостатком метода, но как будет показано ниже, не очень существенным.

На фиг. 1 представлены кривые автокорреляционных функций пульсаций ( $\lambda$ ) и вибраций ( $\delta$ ) газогенератора. Анализ этих кривых показывает, что в исследуемых сигналах присутствует случайная составляющая, которая имеет узкий спектр частот, поэтому затухание корреляционных функций происходит очень медленно, периодические составляющие в ней не проявляются. Известно, что если исследуемый сигнал равен сумме случайной и периодической



Фиг. 1.

вибрации корпуса газогенератора» наблюдается резко выраженный резонанс на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$  при запаздывании вибраций относительно пульсаций  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  соответственно. (Причем  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  не равны  $\frac{\pi}{2}$  из-за погрешностей, связанных с различными запаздываниями в каналах записи пульсаций и вибраций).



Фиг. 2.

составляющих, то на графике корреляционной функции при больших  $\tau$  должны установиться периодические колебания с амплитудой, равной квадрату амплитуды исследуемого периодического сигнала и с частотой, равной частоте последнего [2].

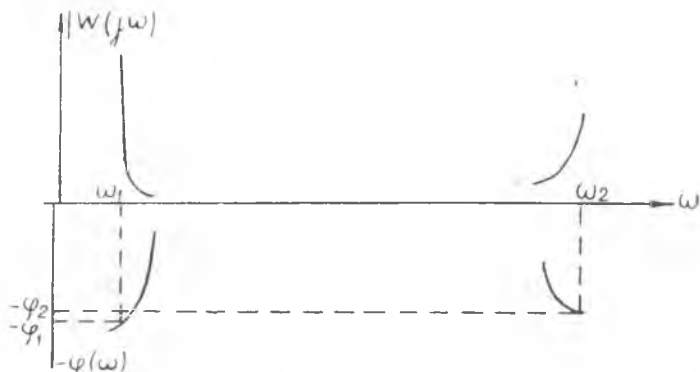
На фиг. 2 представлены графики автоспектральной плотности пульсаций  $S_x(\omega)$  и модуля взаимной спектральной плотности пульсаций и вибраций  $|S_{xy}(\omega)|^*$  в районе частот, которые наиболее ярко проявляются в исследуемом сигнале.

На фиг. 3 изображены амплитудно- и фазочастотные характеристики исследуемой системы\*.

На основании этих характеристик можно сделать вывод, что в динамической системе «пульсации давления

в газогенераторе — вибрации корпуса газогенератора» наблюдается резко выраженный резонанс на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$  при запаздывании вибраций относительно пульсаций  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  соответственно. (Причем  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  не равны  $\frac{\pi}{2}$  из-за погрешностей, связанных с различными запаздываниями в каналах записи пульсаций и вибраций).

\* По просьбе автора вычисления выполнены в ИАТ АН СССР инж. Зубковым Ю. В. на ЭАСП-С.



Фиг. 3.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из всего сказанного можно сделать вывод, что возможно определение динамических характеристик двигателей летательных аппаратов и их агрегатов в процессе доводки двигателей без специальных испытаний.

Вышеназванный недостаток предлагаемого метода — ограниченность спектра исследуемых частот — не является существенным, т. к. для конструкторов представляют интерес частотные характеристики только в диапазоне частот, которые могут встретиться в процессе эксплуатации двигателя.

Накопление статистики при доводке двигателя позволяет получить частотную характеристику в диапазоне частот, которые возможны в эксплуатации.

Другая трудность метода — громоздкость вычислений — легко разрешается применением специализированных вычислительных устройств (например, ЭАСП-С [4]).

Пульсации и вибрации двигателей летательных аппаратов имеют очень широкий спектр частот, а существующие промышленные корреляторы имеют полосу пропускания до 200 гц, поэтому запись реализаций пульсаций и вибраций надо вести на повышенных скоростях, а считывание на малых скоростях. Это позволяет несколько расширить возможности вычислительных устройств.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Пугачев. «Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления». ФМ, 1962.
2. В. В. Солодовников и др. «Вычислительная техника в применении для статистических исследований и расчетов систем автоматического управления». Машгиз, 1963.
3. М. Г. Серебрянников, А. А. Первозванский. «Выявление скрытых периодичностей». Наука, 1965.
4. Т. И. Бартнус и др. «Специализированная электронная вычислительная машина для корреляционного и спектрального анализа визуальных и магнитных записей случайных процессов». АИТ, mXXIV, № 6, 1963.