

В. П. ШОРИН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

При расчете колебательных процессов в системах летательных аппаратов и двигателей оказывается целесообразным применение теории четырехполюсников ([1], [2], [3]). Преимущества этого метода заключаются в том, что при решении различных задач можно применить ряд общих соотношений, справедливых для большой группы линейных цепей, и использовать при конкретных расчетах частотные характеристики элементов трубопроводных систем, определенные заранее расчетным или экспериментальным путем.

Любой пассивный элемент трубопроводной системы может быть охарактеризован цепочечной матрицей, связывающей значения амплитуд колебаний давления и объемной скорости на входе и выходе элемента.

$$\begin{vmatrix} p_1 \\ v_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A(\omega) & B(\omega) \\ C(\omega) & D(\omega) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} p_2 \\ v_2 \end{vmatrix} \quad (1)$$

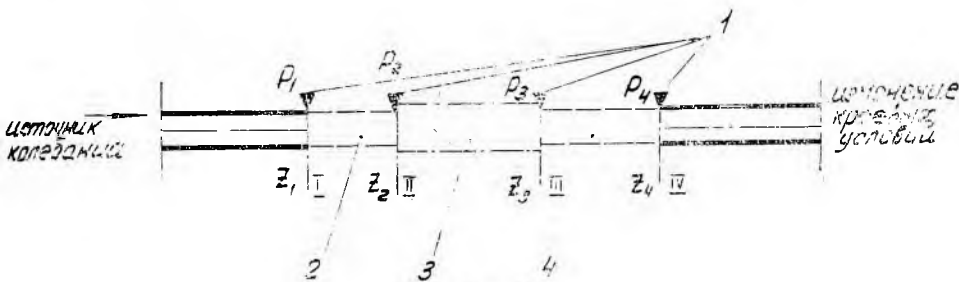
Для пассивного четырехполюсника выполняются условия $AD - BC = 1$, т. е. любой элемент характеризуется в общем случае тремя независимыми параметрами. При экспериментальном определении величины параметров A, B, C, D элемента трубопроводной системы на заданной частоте необходимо в двух опытах (т. е. при двух различных граничных условиях с одной из сторон элемента) измерять значения амплитуд колебаний давления и объемной скорости на входе и выходе, а также фазовые соотношения между ними.

В настоящее время не имеется достаточно надежных средств измерения переменного расхода, особенно при высоких частотах колебаний.

Здесь предлагаются два метода экспериментального определения параметров A, B, C, D в двух опытах без измерения объемной скорости.

В первом методе предполагается использование двух элементов трубопроводной системы с известными частотными характеристиками и четырех датчиков давления. Во втором методе предполагается использование одного элемента трубопроводной системы с известной частотной характеристикой, трех датчиков давления и предварительно определенных частотных характеристик установки, на которой проводятся исследования.

Рассматривается методика определения частотных характеристик экспериментальной установки.



Фиг. 1.

1 — датчики давления; 2, 4 — элементы с известными частотными характеристиками; 5 — исследуемый объект.

При определении частотных характеристик элементов трубопроводных систем по первому методу используется схема измерительного участка установки, представленная на фиг. 1.

Для определения характеристик исследуемого элемента в условиях, близких к реальным, экспериментальная установка в целом должна обеспечивать независимое изменение на мерном участке абсолютных значений постоянного расхода рабочей среды, среднего давления, амплитуды колебаний давления, частоты и граничных условий.

Согласно фиг. 1 имеем:

p_1, p_2, p_3, p_4 — амплитуды колебаний давления, измеряемые датчиками в сечениях I, II, III, IV мерного участка.

z_1, z_2, z_3, z_4 — импедансы в сечениях I, II, III, IV мерного участка,

причем $z_i = \frac{p_i}{v_i}$.

v_i — амплитуда объемной скорости в i -м сечении мерного участка.

Параметры элемента 2 обозначим A_1, B_1, C_1, D_1 .

Параметры элемента 4 — A_2, B_2, C_2, D_2 .

Параметры исследуемого элемента — A_x, B_x, C_x, D_x .

Отношение измеряемых амплитуд давлений в сечениях

$$\frac{p_1}{p_2} = \alpha_1; \quad \frac{p_2}{p_3} = \alpha_2; \quad \frac{p_3}{p_4} = \alpha_3.$$

Для элементов, находящихся на мерном участке, можем записать при заданной частоте:

в первом опыте

$$\alpha_1' = A_1 + \frac{B_1}{z_2};$$

$$\alpha_2' = A_x + \frac{B_x}{z_3};$$

$$\frac{\alpha_2'}{z_2} = C_x + \frac{D_x}{z_3};$$

$$\alpha_3' = A_2 + \frac{B_2}{z_4};$$

$$\frac{\alpha_3'}{z_3} = C_2 + \frac{D_2}{z_4};$$

во втором опыте

$$\alpha_1'' = A_1 + \frac{B_1}{z_2};$$

$$\alpha_2'' = A_x + \frac{B_x}{z_3};$$

$$\frac{\alpha_2''}{z_2} = C_x + \frac{D_x}{z_3};$$

$$\alpha_3'' = A_2 + \frac{B_2}{z_4};$$

$$\frac{\alpha_3''}{z_3} = C_2 + \frac{D_2}{z_4};$$

(2)

Решая систему уравнений (2) относительно неизвестных коэффициентов A_x , B_x , C_x , D_x исследуемого элемента, получим:

$$A_x = \frac{\alpha_1' \alpha_3' (\alpha_3'' D_2 - 1) - \alpha_2'' \alpha_3'' (D_2 \alpha_3' - 1)}{\alpha_3' (\alpha_3'' D_2 - 1) - \alpha_3'' (D_2 \alpha_3' - 1)};$$

$$B_x = \frac{\alpha_3'' \alpha_3' B_2 (\alpha_2'' - \alpha_2')}{\alpha_3' (\alpha_3'' D_2 - 1) - \alpha_3'' (D_2 \alpha_3' - 1)};$$

$$C_x = \frac{\alpha_2' \alpha_3' (\alpha_1' - A_1)(D_2 \alpha_3'' - 1) - \alpha_2'' \alpha_3'' (\alpha_1'' - A_1)(D_2 \alpha_3' - 1)}{B_1 [\alpha_3'' (D_2 \alpha_3' - 1) - \alpha_3' (D_2 \alpha_3'' - 1)]};$$

(3)

$$D_x = \frac{\alpha_3'' \alpha_3' B_2 [\alpha_2'' (\alpha_1' - A_1) - \alpha_2' (\alpha_1'' - A_1)]}{B_1 [\alpha_3'' (D_2 \alpha_3' - 1) - \alpha_3' (D_2 \alpha_3'' - 1)]}.$$

Используя формулы (3), можно определить коэффициенты матрицы исследуемого элемента при известных A_1 , B_1 , C_1 , D_1 , A_2 , B_2 , C_2 , D_2 и замеренных α_1 , α_2 , α_3 .

Если за элементы 2 и 4 на мерном участке взять отрезки прямолинейного трубопровода постоянного сечения с длинами l_1 и l_2 и $d_1 = d_2$, то для каждого отрезка можно применить уравнения, предложенные И. А. Чарным [4]. Решение уравнений можно записать в форме (1) и коэффициенты матриц каждого из участков будут иметь вид:

$$\begin{aligned} A_1 &= ch \gamma l_1; & A_2 &= ch \gamma l_2; \\ B_1 &= z_B sh \gamma l_1; & B_2 &= z_B sh \gamma l_2; \\ C_1 &= \frac{1}{z_B} sh \gamma l_1; & C_2 &= \frac{1}{z_B} sh \gamma l_2; \\ D_1 &= ch \gamma l_1; & D_2 &= ch \gamma l_2. \end{aligned} \quad (4)$$

z_B — волновое сопротивление трубопровода,

$$z_B = \frac{\rho \cdot a}{S} \cdot \sqrt{\frac{1}{i\omega} \left(i\omega + \frac{\lambda v_0}{2d} \right)},$$

γ — постоянная распространения волнового процесса,

$$\gamma = \sqrt{\frac{i\omega}{a^2} \left(i\omega + \frac{\lambda v_0}{2d} \right)},$$

ρ — плотность рабочей среды,

a — скорость звука,

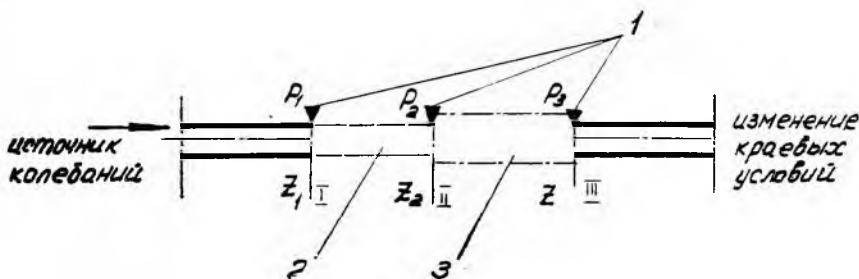
S — площадь поперечного сечения отрезка трубопровода,

λ — коэффициент сопротивления в формуле Дарси-Вейсбаха для потери напора на трение,

ω — круговая частота,

d — диаметр трубопровода,

v_0 — скорость стационарного потока в трубопроводе.



Фиг. 2.

1 — датчики давления; 2 — элемент с известными частотными характеристиками; 3 — исследуемый объект.

С использованием соотношения (4), формулы (3) для определения коэффициентов матрицы исследуемого элемента запишутся в виде:

$$A_x = \frac{\alpha_2' \alpha_3' (\alpha_3'' \operatorname{ch} \gamma l_2 - 1) - \alpha_2'' \alpha_3'' (\alpha_3' \operatorname{ch} \gamma l_2 - 1)}{\alpha_3' (\alpha_3'' \operatorname{ch} \gamma l_2 - 1) - \alpha_3'' (\alpha_3' \operatorname{ch} \gamma l_2 - 1)};$$

$$B_x = \frac{\alpha_3' \alpha_3'' \operatorname{sh} \gamma l_2 (\alpha_2'' - \alpha_2')}{\alpha_3' (\alpha_3'' \operatorname{ch} \gamma l_2 - 1) - \alpha_3'' (\alpha_3' \operatorname{ch} \gamma l_2 - 1)};$$

$$C_x = \frac{\alpha_2' \alpha_3' (\alpha_1' - \operatorname{ch} \gamma l_1) (\alpha_3'' \operatorname{ch} \gamma l_2 - 1) - \alpha_3'' \alpha_2'' (\alpha_1'' - \operatorname{ch} \gamma l_1) (\alpha_3' \operatorname{ch} \gamma l_2 - 1)}{z_B \operatorname{sh} \gamma l_1 [\alpha_3' (\alpha_3'' \operatorname{ch} \gamma l_2 - 1) - \alpha_3'' (\alpha_3' \operatorname{ch} \gamma l_2 - 1)]}; \quad (5)$$

$$D_x = \frac{\alpha_3' \alpha_3'' \operatorname{sh} l_2 [\alpha_2'' (\alpha_1' - \operatorname{ch} \gamma l_1) - \alpha_2' (\alpha_1'' - \operatorname{ch} \gamma l_1)]}{\operatorname{sh} \gamma l_1 [\alpha_3' (\alpha_3'' \operatorname{ch} \gamma l_2 - 1) - \alpha_3'' (\alpha_3' \operatorname{ch} \gamma l_2 - 1)]}.$$

При определении частотных характеристик элементов по второму методу используется схема мерного участка установки, представленная на фиг. 2.

Параметры элемента 2 — A_1, B_1, C_1, D_1 .

Параметры исследуемого объекта A_x, B_x, C_x, D_x .

Характеристики левой относительно мерного участка части установки известны и выражены в виде импеданса z_H .

Для мерного участка, представленного на фиг. 2, запишем для заданной частоты:

в первом опыте	во втором опыте	
$\alpha_1' = A_1 + \frac{B_1}{z_2'}$	$\alpha_1'' = A_1 + \frac{B_1}{z_2''}$	
$\alpha_2' = A_x + \frac{B_x}{z_H'}$	$\alpha_2'' = A_x + \frac{B_x}{z_H''}$	(6)
$\frac{\alpha_2'}{z_2'} = C_x + \frac{D_x}{z_H'}$	$\frac{\alpha_2''}{z_2''} = C_x + \frac{D_x}{z_H''}$	

Решая систему уравнений (6), получим:

$$A_x = \frac{\alpha_1' z_H' - \alpha_2'' z_H''}{z_H' - z_H''}; \quad B_x = \alpha_2'' z_H'' - \frac{\alpha_1' z_H' - \alpha_2'' z_H''}{z_H' - z_H''} z_H'';$$

$$C_x = \frac{\alpha_2' z_H' (\alpha_1' - A_1) - \alpha_2'' (\alpha_1'' - A_1) z_H''}{B_1 (z_H' - z_H'')}; \quad (7)$$

$$D_x = \frac{z_H' z_H'' [\alpha_2'' (\alpha_1'' - A_1) - \alpha_2' (\alpha_1' - A_1)]}{B_1 (z_H' - z_H'')}.$$

Применяя в качестве элемента 2 отрезок прямолинейного трубопровода постоянного сечения длиной l и диаметром d , получим выражения для коэффициентов C_x и D_x в виде:

$$C_x = \frac{1}{z_B} \cdot \frac{\alpha_2' z_H' (\alpha_1' - ch \gamma l) - \alpha_2'' (\alpha_1'' - ch \gamma l) z_H''}{sh \gamma l (z_H' - z_H'')};$$

$$D_x = \frac{z_H' z_H''}{z_B} \cdot \frac{\alpha_2'' (\alpha_1'' - ch \gamma l) - \alpha_2' (\alpha_1' - ch \gamma l)}{sh \gamma l (z_H' - z_H'')}.$$

Во втором методе определения характеристик необходимо знать краевые условия на мерном участке, выраженные импедансом z_H . Импеданс может быть определен в предварительном опыте следующим образом.

Между сечениями II и III мерного участка устанавливается элемент с известными частотными характеристиками, например, отрезок прямолинейного трубопровода постоянного сечения.

Тогда

$$\alpha_2 = ch \gamma l + \frac{z_B sh \gamma l}{z_H};$$

отсюда

$$z_H = \frac{z_B sh \gamma l}{\alpha_2 - ch \gamma l}. \quad (8)$$

Используя формулу (8), можно определить импеданс z_H для всех частот и изменений краевых условий в установке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Н. Гризодуб. Применение теории пассивных четырехполюсников к расчету распространения колебаний давления в разветвленных гидравлических системах авиадвигателей. «Автоматика и телемеханика». Т. XI, № 2, 1950.
2. Ю. Н. Гризодуб. О расчете распространения гармонических возмущений в жидкости, наполняющей системы последовательно и параллельно соединенных труб насосных агрегатов. ЖТФ. Т. XXI. Вып. 5, 1951.
3. В. П. Шорин. Применение направленных графов к расчету вынужденных колебаний давления в гидравлических системах летательных аппаратов и двигателей. ИзВУЗ, серия «Авиационная техника», № 4, 1966.
4. И. А. Чарный. Неустановившееся течение реальной жидкости в трубах. Гостехтеориздат, 1951.