

УДК 534.832:275.055

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Ю. А. Гаспарян

Новый метод измерения импеданса резонансных  
 низкочастотных конструкций

(Представлено чл.-корр. НАН Армении Б. К. Карапетяном 5 XII 1995)

При теоретических и экспериментальных исследованиях резонансных низкочастотных звукопоглощающих конструкций возникает необходимость увеличения точности акустических измерений в диапазоне низких частот [1]. Поэтому для устранения недостатков стандартной методики измерений предложены новые способы измерения импеданса и коэффициента звукопоглощения (КЗП) в акустическом интерферометре. Разработанный метод позволяет расширить низкочастотный диапазон измерения, более того, применение специального устройства дает возможность подключить ЭВМ непосредственно к измерительному акустическому тракту и, таким образом, полностью автоматизировать процесс измерений [2, 3].

Известно [4], что звуковое поле по длине оси в трубе акустического интерферометра образуется в результате интерференции падающей прямой и отраженной волны; его звуковое давление описывается в виде:

$$P(x) = P e^{jk_0(t-x)} + P(-) e^{jk_0(t+x)}; \quad k = \frac{\omega}{c} \quad (1)$$

Коэффициент отражения, представляющий комплексную величину и равный отношению амплитуд падающей и отраженной волны, равен  $k_{отр} = (B_2/B_1) e^{-2\psi}$ ; подставляя в уравнение (1), получим:

$$P(x) = P_0 e^{j\omega t - \psi} \operatorname{ch}(\bar{\Psi} - jkx); \quad P_0 = 2P \quad (2)$$

При измерении уровня звукового давления фактически микрофон-зонд регистрирует модуль звукового давления, т. е.  $e^{-j\omega t + \psi} = 1$ , откуда  $|P(x)| = P_0 / \operatorname{ch}(\bar{\Psi} - jkx)$ , где  $\bar{\Psi} = \Psi_1 + j\Psi_2$ .

После преобразования получим

$$|P(x)| = B |\operatorname{ch} 2\Gamma_1 + \cos(\Psi_2 - kx)|^{-1} \quad (3)$$

Поскольку звуковое давление зависит от координаты и частоты

$x, f$ , то производную величины (3) можно определять как по  $x_1$ , так и по  $K(f)$

$$N_k = P'(k) = \frac{\Delta P}{\Delta k} = \frac{P_1 - P_2}{k_1 - k_2}; \quad N_x = P'(x) = \frac{\Delta P}{\Delta x} = \frac{P_1 - P_2}{x_1 - x_2} \quad (4)$$

Следовательно, изменение звукового давления можно получить и при изменении частоты на 1 Гц или координаты на 1 см, т. е. на любой заданный диапазон. Дифференцируя по  $k$  уравнение (3), получим

$$\begin{aligned} P(k, x_1) P'(k, x_1) &= -B_1^2 x_1 \sin 2(kx_1 + \Psi_2) | \\ P(k, x_2) P'(k, x_2) &= -B_1^2 x_2 \sin 2(kx_2 + \Psi_2) | \end{aligned} \quad (5)$$

Определение  $\Psi_2$  по изменению давления с частотой производится в следующей последовательности:

$$\begin{aligned} P^2(k, x) &= B_1^2 |\operatorname{ch} \Psi_1 + \cos 2(kx + \Psi_2)|, \\ P(kx) \frac{\partial P(kx)}{\partial k} &= -x \sin 2(kx + \Psi_2). \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, для микрофонных позиций  $x_1$  и  $x_2$  имеем:

$$\begin{aligned} P(kx_1) \frac{\partial P(kx_1)}{\partial k} &= -B_1^2 x_1 \sin 2(kx_1 + \Psi_2), \\ P(kx_2) \frac{\partial P(kx_2)}{\partial k} &= -B_1^2 x_2 \sin 2(kx_2 + \Psi_2). \end{aligned} \quad (7)$$

Разделив величины друг на друга, имеем

$$\frac{P(kx_1)}{P(kx_2)} \cdot \frac{\partial P(kx_1) / \partial k}{\partial P(kx_2) / \partial k} = \frac{x_1}{x_2} \cdot \frac{\sin 2(kx_1 + \Psi_2)}{\sin 2(kx_2 + \Psi_2)} \quad (8)$$

Раскрывая синус двойного аргумента, после некоторых преобразований получим

$$\frac{\sin 2kx_1 \cdot \cos 2\Psi_2 + \cos 2kx_1 \cdot \sin 2\Psi_2}{\sin 2kx_2 \cdot \cos 2\Psi_2 + \cos 2kx_2 \cdot \sin 2\Psi_2} = \frac{x_2}{x_1} \cdot \frac{P_1(kx_1)}{P_2(kx_2)} \cdot \frac{\frac{\partial P(kx_1)}{\partial k}}{\frac{\partial P(kx_2)}{\partial k}} \quad (9)$$

После некоторых преобразований левой части уравнения, обозначив правую через  $A$ , получим:

$$\frac{\sin 2kx_1 + \cos 2kx_1 \operatorname{tg} 2\Psi_2}{\sin 2kx_2 + \cos 2kx_2 \operatorname{tg} 2\Psi_2} = A; \quad \frac{\cos 2kx_1}{\cos 2kx_2} \cdot \frac{\operatorname{tg} 2kx_1 + \operatorname{tg} 2\Psi_2}{\operatorname{tg} 2kx_2 + \operatorname{tg} 2\Psi_2} = A \quad (10)$$

$$\text{Обозначим } B = \frac{\cos 2kx_1}{\cos 2kx_2}, \text{ откуда } \operatorname{tg} 2\Psi_2 = \frac{B \operatorname{tg} 2kx_1 - A \operatorname{tg} 2kx_2}{B - A}$$

Для определения величины  $A$  необходимо определить производную

значения (9), т. е. изменение звукового давления можно получить при изменении частоты на один герц (при измерении от 1—5 Гц) и координаты на один сантиметр при движении каретки с микрофоном-зондом акустического интерферометра.

Известно, что изменение величины звукового давления регистрируется  $mV$ ,  $V$ ,  $dB$ , измерение производилось с помощью аппаратуры «Брюль и Кьер» и RFT. При измерении в милливольтгах и вольтах числовые коэффициенты выражений (9) и (10) определяются:

$$A = \frac{x_2}{x_1} \cdot \frac{P_1(kx_1)}{P_2(kx_2)} \cdot \frac{P_1(kx_1) - P_2(k + \Delta k, x_1)}{P_1(kx_2) - P_2(k + \Delta k, x_2)} \cdot \frac{\Delta f_2}{\Delta f_1} \quad (11)$$

При измерении  $P(kx)$  в децибеллах имеем:

$$\frac{P(kx_1)}{P(kx_2)} = \frac{10^{0,05P_1}}{10^{0,05P_2}} = 10^{0,05(P_1 - P_2)}; \quad B = \frac{\cos 2kx_1}{\cos 2kx_2} \quad (12)$$

Тогда производная при одинаковом изменении частоты, т. е.  $\Delta f_1 = \Delta f_2$  равна

$$\frac{\partial P(kx_1)/\partial k}{\partial P(kx_2)/\partial k} = \frac{\Delta P(x_1)}{\Delta P(x_2)} = 10^{0,05(P_{x_1} - P_{x_2})} \quad (13)$$

$$\text{Здесь } \Delta P(x_1) = 10^{0,05P_{x_1}}; \quad \Delta P(x_2) = 10^{0,05P_{x_2}} \quad (14)$$

Акустические характеристики звукопоглощающих конструкций могут быть определены по минимуму звукового давления  $P_{min}$ . В стандартном методе минимум звукового давления определялся передвижением каретки по шкале нониуса и регистрирующего прибора. Но мы можем найти минимум, «подстраивая» частоту. У нас имеется набор микрофонных позиций с фиксированными координатами и, таким образом, набор частот, близких к частоте, соответствующей минимуму; ищем минимум, когда  $x_1 \approx l/4$ . Определяем минимум звукового давления  $P_{min}$  в точке с координатой  $x_1$ ; соответствующая частота равна  $f_1$ . Очевидно, согласно выражению (16),  $P$  будет минимальным, когда  $\cos 2(kx + \Psi_2) = 1$ ;  $2(kx + \Psi_2) = \pi$ , в этом случае  $P_1 = B^2(\text{ch} 2\Psi_1 - 1)$ . Для определения затухания измерим давление в любой другой фиксированной микрофонной позиции с координатой  $x_2$ , тогда  $P_2 = B^2|\text{ch} 2\Psi_1 + \cos 2(kx_2 + \Psi_2)|$

$$P_2 = B^2|\text{ch} 2\Psi_1 + \cos 2(k\Delta x + \pi)| \quad (15)$$

$$\text{Откуда } P_2 = B^2|\text{ch} 2\Psi_1 - \cos 2k \cdot \Delta x| \quad (16)$$

где  $\Delta x = x_1 - x_2$ , учтено также, что  $\cos(\varphi \pm \pi) = -\cos \varphi$ . Тогда

$$N^2 = (P_{x_1}/P_{x_2})^2 = (\text{ch} 2\Psi_1 - 1)/|\text{ch} 2\Psi_1 - |\cos 2k\Delta x|| \quad (17)$$

Преобразуя, получим  $\text{ch} 2\Psi_1 = (1 - N^2)^{-1} |1 - N^2 \cos 2k\Delta x|$ ,

где

$$N = P_{x_1}/P_{min}; \quad N^2 = 10^{0,1(P_1 - P_2)} \quad (18)$$

КЗП может быть определен и по  $P_{max}$ . Настройка на  $P_{max}$  аналитически производится следующим способом.

$$P_{max}^2 = B^2 [\operatorname{ch} 2\psi_1 + \cos 2(kx_2 - \psi_2)] = B^2 (\operatorname{ch} 2\psi_1 + \cos 2k\Delta x); \quad (19)$$

$$P_{max}^2 = B^2 (\operatorname{ch} 2\psi_1 + 1); \quad 2(kx_2 - \psi_2) = 0; \quad 2\pi; \quad (20)$$

$$N = \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^2 = \frac{\operatorname{ch} 2\psi_1 + 1}{\operatorname{ch} 2\psi_1 + \cos 2k\Delta x}; \quad \operatorname{ch} 2\psi_1 = \frac{1 - N^2 \cos 2k\Delta x}{N^2 - 1}. \quad (21)$$

Согласно теории Ф. Морза и Ингарда звуковое давление и скорость звука равны:

$$|P| = A (\operatorname{ch}^2 \pi x - \cos^2 \pi \beta)^{0.5}; \quad P_{max} = A \operatorname{ch} \pi x;$$

$$|U| = \frac{A}{\rho c} (\operatorname{ch}^2 \pi x - \sin^2 \pi \beta)^{0.5}; \quad \gamma = x + ik;$$

$$\operatorname{ch}^2 \pi x - \cos^2 \pi \beta = \left( \frac{P_x}{P_{max}} \operatorname{ch} \pi x \right)^2; \quad P_x = \frac{P_{max}}{\operatorname{ch} \pi x} \cdot (\operatorname{ch}^2 \pi x - \cos^2 \pi \beta)^{0.5} \quad (22)$$

откуда импеданс характеристики определяется

$$\frac{|z|}{\rho c} = \frac{|P_x|}{|U_x| \rho c}; \quad \frac{z}{\rho c} = \frac{P_x}{P_{max}} \left[ \frac{N^2 + 1}{N^2 - 1} - \left( \frac{P_x}{P_{max}} \right)^2 \right]^{-0.5}.$$

Следовательно,

$$\frac{P(f)}{\rho c} = N_2 (1 - N_2^2) (1 - 0.5 N_2^2 \gamma) (1 - N_2^2). \quad (24)$$

Следовательно, зная величину  $P_{max}$  и любую величину звукового давления  $P_x$  в произвольной точке оси интерферометра, можно рассчитать КЗП и импеданс РЗП.

Наряду с измерением характеристик импеданса низкочастотных резонансных конструкций необходимо производить измерение и расчет двухсторонней концевой поправки (обратная величина проводимости, [5], характеризующей протяженность звукового поля в щели-отверстии РНК, которая определяется по формуле

$$2\delta = \frac{c \tau_{ин}}{\omega} \left[ \frac{(N^2 - 1) \operatorname{sh} 2\psi_1}{(N^2 + 1) - (N^2 - 1) \cos 2\psi_1} + \operatorname{ctg} \frac{\omega(L+h)}{c} \right] - \tau. \quad (25)$$

Предлагаемая методика измерений позволяет увеличить количество определяемых акустических параметров, обеспечивая точность и автоматизацию процессов измерения в низкочастотном диапазоне

Ереванский архитектурно-строительный институт

Ցածր հաճախության սեղանասային կոնստրուկցիաների  
իմպեդանսի չափման նոր մեթոդներ

Աշխատանքում բերված են ցածր հաճախության սեղանասային կոնստրուկցիաների (ՑՀՄԿ) իմպեդանսի և ձայնակլանման գործակցի (ԶԳ) չափման նոր մեթոդները: Առաջարկված են ՑՀՄԿ ակուստիկական բնութագրերի չափման մի շարք մեթոդներ և միջոցներ, որոնք թույլ են տալիս իրականացնել հաշվարկման ինժեներային մեթոդները: Տեղադրելով Մ. Ի. Մեծոֆյունները ստացված (25) բանաձևում կարելի է լուծել ՑՀՄԿ ֆիզիկատեխնիկական պարամետրերի հաշվարկման ոչ միայն ուղիղ, այլև նաև հակադարձ խնդիրը:

ЛИТЕРАТУРА—ՔՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

1. А. С. 1613874, С.01Н15.00, Россия, 1682908 Способ измерения характеристик звукопоглощающих конструкций. Ю. А. Гаспарян, Ю. М. Чудинов, Л. А. Борисов и др. БИ. №46, 3с, 15.12.1990 г.
2. Ю. А. Гаспарян, ДАН Армении, т. 91, №2, с. 65—73 (1990).
3. Ю. М. Чудинов, Ю. А. Гаспарян, С. А. Маргарян, Сб. трудов НИИСФ, Москва, с. 84—89, 1989.
4. Л. Беранек, Акустические измерения, ИЛ, М., 1952.
5. P. Morse, U. Ingard, Theoretical acoustics, N. Y., 1968.
6. Ч. Аудоли, Ч. Гиангреко, Акустические измерения. Доклады Международной конференции «Noise-93», May 31—June 3, 1993, St. Petersburg, Russia.
7. Барвек, Измерение импеданса материалов, таж же.