

**ОБ АКУСТОЭЛЕКТРОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ
АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СТРУКТУРАХ СО СЛОЕМ ПЬЕЗОДИЭЛЕКТРИКА**

Вьюн В. А.

В структурах со слоем пьезодиэлектрика рассмотрим взаимодействие поверхностных акустических волн (ПАВ) посредством электрических полей одновременно с обеими прилегающими к слою средами в отличие от работы [1], в которой аналогичная задача решалась в частном случае, когда проводимость σ одной из сред равна нулю или бесконечности. Пусть слой занимает область $0 < x_3 < h$, ПАВ с циклической частотой ω , волновым числом k распространяется в направлении оси x_1 . Считаем фиксированными механические свойства прилегающих непьезоэлектрических сред в отличие от электрических, которые будем задавать через непрерывные на границах $x_3=0$ (с индексом «1») и $x_3=h$ (с индексом «2») электрические потенциалы φ_1, φ_2 и нормальные компоненты индукции D_1, D_2 известным способом с помощью поверхностных эффективных диэлектрических проницаемостей [2]

$$\varepsilon_1 = -D_1/(k\varphi_1), \quad \varepsilon_2 = D_2/(k\varphi_2). \quad (1)$$

Для ПАВ с заданной частотой ω в приближении слабой электромеханической связи найдем значение волнового числа k в зависимости от $\varepsilon_1, \varepsilon_2$. (Подробнее о постановке задачи см. работу [3].) Решение выразим через характеризующие ПАВ импедансы взаимодействия, используемые в работах [1, 4, 5].

Из теории нормальных мод [4, 5] следует, что для n -й поверхностной акустической моды в слое

$$\varphi_1 = \varphi_{a1} + \varphi_{s1}, \quad \varphi_2 = \varphi_{a2} + \varphi_{s2}, \quad (2)$$

где $\varphi_{a1}, \varphi_{a2}$ и $\varphi_{s1}, \varphi_{s2}$ — связанные с ПАВ и в случае нулевого пьезоэффекта в слое потенциалы на соответствующих границах. Из интегрирования соотношения взаимности [4] и решения в слое уравнения $\operatorname{div} \mathbf{D} = 0$ легко показать, что потенциалы выражаются через значения D_1, D_2 :

$$\varphi_{a1} = \omega k_n [-D_1 Z_{11} + D_2 Z_{12} \exp(-i\gamma h)] / (k^2 - k_n^2), \quad (3)$$

$$\varphi_{a2} = \omega k_n [-D_1 Z_{12}^* \exp(i\gamma h) + D_2 Z_{22}] / (k^2 - k_n^2), \quad (4)$$

$$\varphi_{s1} = [-D_1 \operatorname{ch}(\kappa h) + D_2 \exp(-i\gamma h)] / [k\varepsilon_p \operatorname{sh}(\kappa h)], \quad (5)$$

$$\varphi_{s2} = [-D_1 \exp(i\gamma h) + D_2 \operatorname{ch}(\kappa h)] / [k\varepsilon_p \operatorname{sh}(\kappa h)], \quad (6)$$

где $\gamma = k\varepsilon_{13}/\varepsilon_{33}$; $\kappa = k\varepsilon_p/\varepsilon_{33}$; $\varepsilon_p = (\varepsilon_{33}\varepsilon_{11} - \varepsilon_{13}^2)^{1/2}$; $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{33}, \varepsilon_{13}$ — компоненты тензора диэлектрической проницаемости в слое; вместо одного [1, 4, 5] введены три импеданса взаимодействия

$$\begin{aligned} Z_{11} &= \varphi_{n1}\varphi_{n1}^*/(2P_n), \quad Z_{22} = \varphi_{n2}\varphi_{n2}^*/(2P_n), \\ Z_{12} &= \varphi_{n1}\varphi_{n2}^* \exp(i\gamma h)/(2P_n); \end{aligned} \quad (7)$$

$k_n, \varphi_{n1}, \varphi_{n2}$ — волновое число и потенциалы на соответствующих границах при мощности ПАВ P_n в предельном случае «открытых» поверхностей слоя, когда $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0$ [2].

С учетом формул (2)–(6) после исключения φ_1, φ_2 с помощью (1) получаем линейную однородную систему уравнений относительно D_1, D_2 . Условие ее нетривиального решения (равенство нулю детерминанта) позволяет получить для волнового числа его изменение $\Delta k = k - k_0$ относительно значения k_0 при металлизации обеих поверхностей слоя (когда $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \infty$ [2]) в приближении слабой электромеханической связи $\Delta k \ll k_0$. Окончательный результат, как и в работе [3], можно записать в виде

$$\Delta k = \frac{(\Delta k_2 \varepsilon_1 + \Delta k_1 \varepsilon_2) \varepsilon_p \operatorname{cth}(\kappa h) + \Delta k_3 \varepsilon_p^2}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \varepsilon_p \operatorname{cth}(\kappa h) + \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_p^2}, \quad (8)$$

где в отличие от работы [3] через импедансы взаимодействия (7) получены выражения для параметров:

$$\Delta k_1 = -k_0 \varepsilon_p \omega [Z_{11} \operatorname{ch}^2(\kappa h) + Z_{22} - 2Z_{12} \operatorname{ch}(\kappa h)] / \operatorname{sh}(2\kappa h), \quad (9)$$

$$\Delta k_2 = -k_0 \varepsilon_p \omega [Z_{11} + Z_{22} \operatorname{ch}^2(\kappa h) - 2Z_{12} \operatorname{ch}(\kappa h)] / \operatorname{sh}(2\kappa h), \quad (10)$$

$$\Delta k_3 = -k_0 \varepsilon_p \omega [(Z_{11} + Z_{22}) \operatorname{ch}(\kappa h) - 2Z_{12}] / [2 \operatorname{sh}(\kappa h)]. \quad (11)$$

Для их вычисления достаточно при заданной мощности ПАВ P_n получить, например, на ЭВМ только два значения $\varphi_{n1}, \varphi_{n2}$. Последние через параметры (9)–(11) входят в формулу (8) и при заданных значениях $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ определяют Δk . Так, величины $\Delta k/k_0$ работы [1], вычисленные на ЭВМ в случае, когда у прилегающих сред $\sigma = 0, \infty$, легко получаются из (8) и являются зависимыми между собой. В принципе доста-

точно знать только два значения $\Delta k/k_0$ при некоторых фиксированных $\varepsilon_1, \varepsilon_2$. Отметим, что при $h \rightarrow \infty$ полученные результаты совпадают с результатами работ [4, 5] для случая полубесконечного пьезодиэлектрика.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kino G. S., Wagers R. S.* Theory of interdigital couplers on nonpiezoelectric substrates.— *J. Appl. Phys.*, 1973, v. 44, № 4, p. 1485–1488.
2. *Greebe C. A. A. J., Dalen P. A. van, Swanenburg T. J. B., Wolter J.* Electric coupling properties of acoustic and electric surface waves.— *Phys. Repts*, 1971, v. 1, № 5, p. 236–268.
3. *Вьюн В. А.* Акустоэлектронное взаимодействие поверхностных акустических волн в структурах со слоем пьезодиэлектрика.— *Акуст. журн.*, 1985, т. 31, № 4, с. 459–463.
4. *Auld B. A., Kino G. S.* Normal mode theory for acoustic waves and its application to the interdigital transducer.— *IEEE Trans. on ED*, 1971, v. ED-18, № 10, p. 898–908.
5. *Kino G. S., Reeder T. M.* A normal mode theory for the Rayleigh wave amplifier.— *IEEE Trans. on ED*, 1971, v. ED-18, № 10, p. 909–920.

Поступило в редакцию
11.X.1985

УДК 534.64:621.634

О СПОСОБЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАЧИ КОЛЕБАНИЙ ПО ЖИДКОСТНОМУ ТРАКТУ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Горин С. В., Ким Я. А., Лесняк А. Н., Селезский А. И.

Колебания скорости и давления в трубопроводах, наполненных жидкостью, имеют акустическую природу и давно привлекают внимание исследователей. Расчет динамических процессов в трубопроводных системах требует достаточно точных знаний об акустических параметрах передачи — коэффициентах четырехполюсников всех составных элементов этих систем. Если для простых в акустическом отношении элементов (отрезка прямых труб, емкости и т. д.) имеются аналитические выражения, позволяющие достаточно точно определять их параметры передачи, то для таких сложных элементов, как теплообменные аппараты, фильтры и т. д. таковые отсутствуют. В этих условиях важное значение приобретает экспериментальное исследование.

Так, например, в работе [1] для элементов гидросистем предлагается определять параметры передачи — коэффициенты четырехполюсника A, B, C и D , связывающие колебательные давление и скорость на входе $p_{вх}, v_{вх}$ с давлением и скоростью на выходе $p_{вых}, v_{вых}$ через уравнение четырехполюсника

$$\begin{vmatrix} p_{вх} \\ S_{вх} \cdot v_{вх} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} p_{вых} \\ S_{вых} \cdot v_{вых} \end{vmatrix}. \quad (1)$$

Здесь $S_{вх}, S_{вых}$ — соответственно площади входного и выходного сечений исследуемого элемента гидравлической системы.

Для определения искомых коэффициентов экспериментальным путем предлагается измерять амплитуды давления в трех-четыре точки при вариации граничных условий. Однако определение параметров передачи элементов гидросистем по известному способу не может обеспечить необходимой для практических целей точности, так как при измерении давлений не учитываются их фазы, а искомые параметры определяются в результате многих операций умножения, вычитания и деления близких по значению величин.

В данной статье предлагается методика экспериментального определения параметров передачи колебаний через жидкостный тракт элементов гидравлических систем, обеспечивающая существенно более высокую точность, что позволяет использовать результаты исследований при решении практических и теоретических задач.

На фиг. 1 показана схема определения параметров передачи, состоящая из испытуемого элемента I с входным II и выходным III патрубками, соединенного с измерительно-возбужденным устройством IV. В случае, если выход элемента нагрузить на очень малое акустическое сопротивление, при котором давление пульсаций в выходном сечении выходного патрубка $p_{вых} = 0$, то из (1) следует

$$D = S_{вх} \cdot v_{вх} / S_{вых} \cdot v_{вых}, \quad (2)$$

$$B = p_{вх} / S_{вых} \cdot v_{вых}. \quad (3)$$

Поменяв местами вход и выход элемента, получим

$$A = S_{вх}^n v_{вх}^n / S_{вых}^n v_{вых}^n, \quad (4)$$