

Контроль электроакустических пьезопреобразователей акустических антенных решеток по электрическим измерениям

В.Л. Земляков, С.Н. Ключников

Южный федеральный университет, Ростов н/Д, Россия

Аннотация: описан метод контроля параметров электроакустических преобразователей пьезоэлектрического типа в составе акустических антенных решеток по электрическим измерениям, а также предложена удобная практическая реализация этого метода путем определения интеграла (площади под кривой) от активной составляющей проводимости.

Ключевые слова: акустическая антенная решетка, электроакустический преобразователь, пьезоэлемент, контроль параметров.

Акустические антенные решетки (АР) используют для излучения и приема звука. Они непосредственно контактируют со средой и содержат электроакустические преобразователи (ЭАП), как правило пьезоэлектрического типа, работающие изолированно или группами. Сигналы от ЭАП (элементов решетки) складываются с определенным фазовым сдвигом, обеспечивающим формирование требуемых характеристик направленности.

В процессе эксплуатации АР параметры ЭАП могут изменяться, вплоть до полного отказа преобразователя. Причины отказов можно условно разбить на три группы: причины, вызванные изменением свойств пьезоактивного материала, причины, вызванные изменением условий работы преобразователей (нарушение контакта ЭАП с герметизирующим покрытием, обрыв или замыкание электрических цепей, проникновение жидкости в элементы конструкции ЭАП) и причины, вызванные нарушением целостности преобразователей. Отказы, в частности, приводят к перераспределению звукового давления в пределах диаграммы направленности (ДН) АР, падению давления и изменению направления максимума излучения.

Отметим, что многоэлементная АР, как и любая многоканальная система, обладает функциональной избыточностью. Поэтому, отказы отдельных ее элементов не вызывают полного отказа АР, а лишь ухудшают

ее рабочие характеристики. Малоэлементные же АР обладают, в отличие от многоэлементных, значительно меньшей избыточностью, то есть выход из строя одного – двух элементов может практически привести к отказу АР в целом.

Поскольку в статье рассматриваются активные элементы ЭАП составленные из пьезоэлементов, приведем кратко их основные свойства, необходимые для дальнейшего изложения. Более подробно эти вопросы рассмотрены в [1-4].

Особенность пьезоэлемента заключается в том, что в нем можно условно выделить электрическую и механическую стороны.

С электрической стороны пьезоэлемент рассматривают как конденсатор с емкостью C_0 , имеющий пьезоактивный диэлектрик.

С механической стороны пьезоэлемент представляет собой колебательную систему. Форма и размеры пьезоэлемента определяют характер возникающих механических колебаний.

Будем рассматривать пьезоэлементы с обособленным ярко выраженным резонансом. В области механического резонанса такие пьезоэлементы приближенно описываются механическим осциллятором, представляющим собой колебательную систему, с одной степенью свободы. Этот осциллятор имеет эквивалентную массу $m_э$, гибкость $c_э$ и сопротивление механических потерь $r_{мп}$. Он характеризуется частотой механического резонанса f_p или $\omega_p = 2\pi f_p$ и механической добротностью Q_M :

$$\omega_p = 1/(m_э c_э)^{1/2}, \quad Q_M = \omega_p m_э / R_{мп}.$$

Если использовать электромеханические аналогии и понятие электромеханического трансформатора, то можно представить реальный пьезоэлемент с электрической стороны некоторой эквивалентной электромеханической схемой [4]. Эта схема на частотах обособленного резонанса в пренебрежении диэлектрическими потерями имеет вид,

представленный на рис. 1, а: n_e – коэффициент электромеханической трансформации, зависящий от пьезоэлектрических, упругих свойств материала и формы пьезоэлемента.

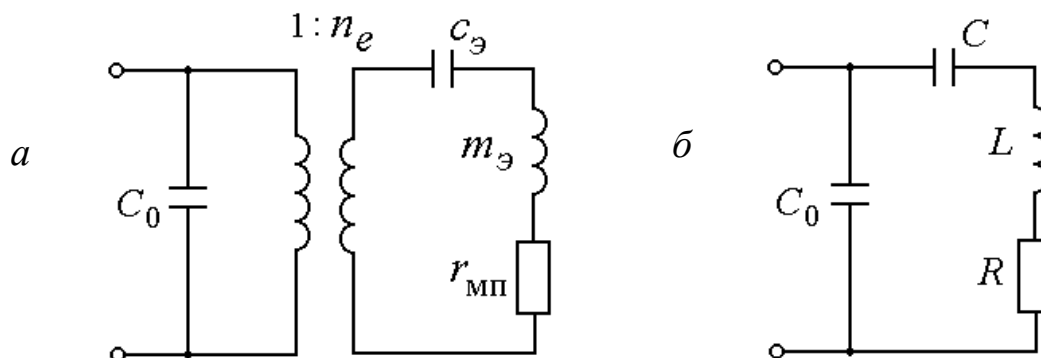


Рис. 1. Эквивалентные электромеханическая (а) и электрическая (б) схемы пьезоэлемента

Как следует из рис. 1, а, колебания в механической части пьезоэлемента будут возникать за счет энергии, поступающей в колебательную систему благодаря пьезоэффекту от электрического генератора через электромеханический трансформатор.

Для учета влияния механической части пьезоэлемента на электрическом входе, воспользуемся формулами пересчета сопротивлений из одной обмотки трансформатора в другую. Приведенная к электрической стороне эквивалентная схема пьезоэлемента показана на рис. 1, б. Емкость $C = c_э n_e^2$, индуктивность $L = m_э / n_e^2$ и активное сопротивление $R = r_{мп} / n_e^2$ характеризуют динамические свойства пьезоэлемента.

Эквивалентная электрическая схема пьезоэлемента имеет последовательную RLC и параллельную $RLCC_0$ резонансные цепи. Поэтому эта электрическая схема обладает соответственно двумя резонансами: механическим (проводимость максимальна) и электромеханическим или антирезонансом (проводимость, наоборот, минимальна).

В пренебрежении активными потерями, частота механического резонанса ω_p и частота антирезонанса ω_a будут определяться соотношениями:

$$\omega_p^2 = \frac{1}{LC}, \quad \omega_a^2 = \frac{1}{L} \left(\frac{1}{C} + \frac{1}{C_0} \right).$$

На низких частотах емкость пьезоэлемента определяется по формуле

$$C^T = C_0 + C.$$

Как следует из предыдущего рассмотрения, пьезоэлемент характеризуют три основных вида параметров:

- электрические (емкость на низкой частоте),
- механические (механическая добротность и частота механического резонанса),
- параметры, связывающие электрическую и механическую стороны (коэффициент электромеханической трансформации n_e и эффективный коэффициент электромеханической связи k_e).

Значение k_e и n_e определяют по формулам [1, 2]:

$$n_e^2 = m_\varepsilon \omega_p^2 C = m_\varepsilon \omega_p^2 C^T k_e^2, \quad (1)$$

$$k_e^2 = \frac{C}{C_0 + C} = \frac{C}{C^T} = \frac{1}{r_c + 1},$$

где $r_c = C_0/C$ – емкостное отношение.

В свою очередь, параметры, характеризующие ЭАП, можно также условно разбить на три группы. К первой группе относятся параметры, связанные с электрическим полем (электрическое сопротивление), ко второй группе относятся параметры, связанные с энергией акустических волн (ДН АР), к третьей группе относятся параметры, связанные с процессом преобразования электрической энергии в акустическую и наоборот

(чувствительность преобразователя-излучателя γ_u и чувствительность преобразователя-приемника γ). Кроме того, к третьей группе параметров ЭАП пьезоэлектрического типа можно отнести и сформулированные ранее параметры, связывающие электрическую и механическую стороны пьезоэлемента.

В соответствии с принципом суперпозиции, ДН АР $F(\theta, \varphi)$ определяется суммой полей всех элементов, и определяется формулами [4]:

$$\dot{F}(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N \dot{V}_n \dot{F}_n(\theta, \varphi)$$

или

$$\dot{F}(\theta, \varphi) = \dot{V}_1 \sum_{n=1}^N \dot{A}_n \dot{F}_n(\theta, \varphi),$$

где N – число ЭАП (элементов решетки), \dot{A}_n – комплексное, нормированное на \dot{V}_1 распределение колебательной скорости по элементам решетки, $\dot{F}_n(\theta, \varphi)$ – комплексная ДН n – го ЭАП при остальных заторможенных (неколеблющихся).

В формулу для ДН АР, входят значения колебательной скорости, которые связаны с напряжениями возбуждения ЭАП соотношением:

$$\sum_{q=1}^N \dot{V}_q z_{qn} = n^n e \dot{U}_n,$$

где z_{qn} – собственное ($q = n$) и взаимное ($q \neq n$) сопротивления излучения.

Видно, например, что изменение коэффициента электромеханической трансформации отдельных ЭАП изменяет ДН АР.

Поскольку электрические измерения осуществляются проще, и они более точны, чем акустические, в практике испытаний пьезопреобразователей важное место занимают методы их контроля с электрической стороны [5, 6]. Для электрического контроля характерно то,

что воздействие на ЭАП и все измерения являются электрическими, а акустическое (механическое) воздействие на преобразователь отсутствует. При контроле ЭАП во время эксплуатации с электрической стороны пьезопреобразователь подвергается внешнему электрическому воздействию синусоидальным сигналом различных частот.

Рассмотрим возможность контроля по электрическим измерениям при одной и той же акустической нагрузке параметров ЭАП, характеризующих его способность преобразовывать электрическую энергию в механическую (акустическую), или осуществлять обратное преобразование.

Одним из таких параметров является коэффициент электромеханической трансформации, величина которого влияет на амплитуду колебательной скорости при заданном электрическом напряжении его возбуждения. Величину n_e возможно контролировать только по электрическим измерениям, как это следует из соотношения (1).

Если ЭАП работает на резонансе, то контролируют величину $n_e Q_M$ так как давление на оси равно [3]:

$$p(r) = a_d \frac{(\rho c)_в n_e Q_M \omega_p c_э U}{r},$$

где константа a_d описывает дифракционные эффекты, c – скорость звука в среде. Видно, что чувствительность ЭАП в режиме излучения $\gamma_u = p(r)/U \sim n_e Q_M / \omega_p$.

Присвоим индекс «1» исходным параметрам исправного преобразователя, измеренным на момент установки ЭАП в конструкцию. Тогда получим:

$$\frac{n_e}{n_{e1}} = \frac{k_e}{k_{e1}} \left(\frac{C^T}{C_1^T} \right)^{1/2} = \left(\frac{C}{C_1} \right)^{1/2},$$

$$\frac{\gamma_u}{\gamma_{u1}} = \frac{n_e Q_M}{n_{e1} Q_{M1}}.$$

Для контроля чувствительности преобразователя – приемника воспользуемся формулой, полученной в [3] из эквивалентной схемы ЭАП:

$$\gamma = \frac{U}{p} = k_d S \frac{1}{\omega_p^2 m_s} \frac{n_e}{C^T}, \quad \gamma_0 = \gamma Q_e,$$

где k_d – коэффициент дифракции, S – площадь излучающей поверхности ЭАП, γ – чувствительность на частотах много ниже резонанса, γ_0 – максимальная чувствительность на частоте антирезонанса, Q_e – электромеханическая добротность.

Учитывая, что в процессе эксплуатации k_d , S и m_s не изменяются, получим:

$$\frac{\gamma}{\gamma_1} = \frac{k_e}{k_{e1}} \left(\frac{C_1^T}{C^T} \right)^{1/2} \frac{Q_e}{Q_{e1}} = \frac{n_e}{n_{e1}} \frac{C_1^T}{C^T} \frac{Q_e}{Q_{e1}}$$

Благодаря свойству обратимости один и тот же пьезообразователь можно использовать и как излучатель, и как приемник. В таком случае ЭАП необходимо калибровать по некоторому совокупному параметру, характеризующему его работу в обоих режимах. Выберем в качестве такого параметра чувствительность в режиме прием – излучение (чувствительность в эхолокационном режиме) χ , определяемую произведением $\gamma \gamma_u = U_2/U_1$, где U_2 – напряжение холостого хода в режиме приема, U_1 – напряжение, подводимое к ЭАП в режиме излучения.

Обозначая, как и ранее, индексом «1» исходные значения, для изменения χ получим следующее выражение:

$$\frac{\chi}{\chi_1} = \frac{k_e^2 Q_M^2}{k_{e1}^2 Q_{M1}^2}.$$

Приведенные соотношения позволяют сформулировать простой метод электрического контроля параметров ЭАП, характеризующих его способность преобразовывать электрическую энергию в механическую

(акустическую), или осуществлять обратное преобразование. Согласно этому методу необходимо знать исходное значение контролируемого параметра ЭАП и исходные значения элементов для его эквивалентной электрической схемы. Чтобы осуществить контроль необходимо измерить, например, частотную зависимость проводимости испытуемого ЭАП, определить на момент испытаний параметры элементов его эквивалентной схемы, например, как это описано, в [1], и провести расчеты по указанным выше формулам.

Контроль ЭАП удобно проводить путем интегрирования частотной зависимости активной составляющей его проводимости в области частот механического резонанса [7, 8]. Интеграл (площадь под кривой активной составляющей проводимости) определяется формулой [9]:

$$I = \int_0^{\infty} G(\omega) d\omega = \frac{\pi}{2} \frac{1}{L}.$$

Тогда

$$L = \frac{\pi}{2} \frac{1}{I}, \quad C = \frac{2}{\pi} \frac{I}{\omega_p^2}.$$

Например, можно записать

$$n_e^2 = m_{\text{Э}} \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} G(\omega) d\omega.$$

Приведем пример контроля на идентичность по величине коэффициента электромеханической трансформации четырех пьезоэлементов в форме шайбы, проведенный на аппаратуре [10].

На рис. 2 приведены зависимости активной составляющей проводимости образцов (в мСм) от частоты (в кГц) в области резонанса, а в таблице 1 – приведены результаты сравнение интеграла (площади под кривой активной составляющей проводимости) с величиной квадрата

коэффициента электромеханической трансформации. Видно их практически полное совпадение в относительных единицах.

Представленные результаты исследований позволяют проводить контроль параметров ЭАП, характеризующих его способность преобразовывать электрическую энергию в механическую (акустическую), или осуществлять обратное преобразование, по электрическим измерениям. Предложенный метод позволяет прогнозировать направленные свойства акустической АР при наличии отказов преобразователей путем компьютерного моделирования ДН АР.

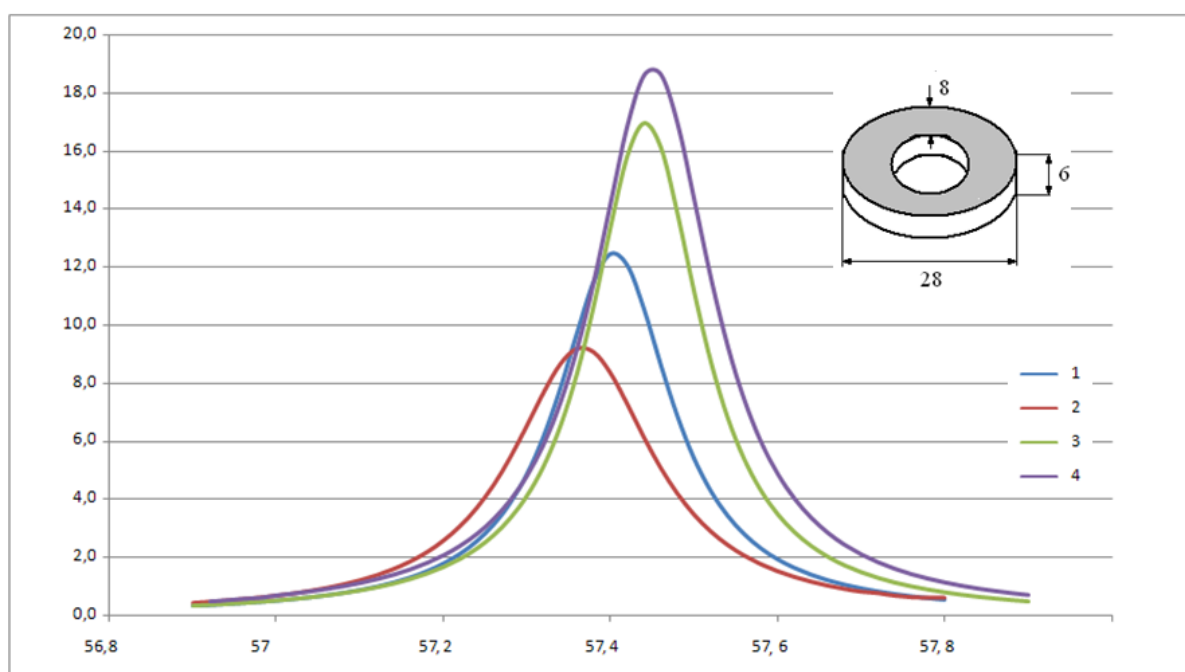


Рис. 2. Активные составляющие проводимости образцов пьезоэлементов

Таблица 1

Результаты испытаний

	1		2		3		4	
	<i>абсол.</i>	<i>относ.</i>	<i>абсол.</i>	<i>относ.</i>	<i>абсол.</i>	<i>относ.</i>	<i>абсол.</i>	<i>относ.</i>
I	2,902	100 %	2,631	92 %	3,875	132 %	4,662	160 %
n_e^2	101	100 %	94	93 %	131	130 %	161	159 %

Литература

1. Земляков В. Л. Методы и средства измерений в пьезоэлектрическом приборостроении: монография. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. 180 с. (Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 5).
2. Пьезокерамические преобразователи: Справочник / под ред. С.И. Пугачева. Л.: Судостроение, 1984. 356с.
3. Подводные электроакустические преобразователи: справочник / под ред. В. В. Богородского. Л.: Судостроение, 1982. 348 с.
4. Сврдлин Г. М. Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1990. 320с.
5. Земляков В. Л. Методы определения и контроля параметров пьезоэлектрических резонаторов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 5. С. 66–70.
6. Доля В.К., Земляков В.Л., Ключников С.Н. Метод контроля качества пьезоэлектрических преобразователей. Инженерный вестник Дона. 2016. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3496.
7. V.L. Zemlyakov Methods for Determination of the Piezoelectric Coefficient of Piezoceramic Materials in Terms of Parameters of an Equivalent Circuit of a Piezoelement // Piezoelectrics and Related Materials: Investigations and Applications. Pub. Date:2012 2nd Quarter, pp. 117-142.
8. Земляков В. Л., Толмачев С.А. Диагностика пьезокерамического элемента по активной составляющей проводимости // Инженерный вестник Дона. 2013. № 2.URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1780.
9. Zemlyakov V.V., Zemlyakov V.L. A new approach to measuring the piezomodulus of a piezoceramic material under dynamic conditions // Measurement Techniques. 2002. V. 45. N 4. pp. 421.
10. Земляков В.Л., Ключников С.Н. Программно-аппаратный комплекс для исследовательских целей в области пьезоэлектрического приборостроения. Инженерный вестник Дона. – 2015. №4. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3430

References

1. Zemlyakov V. L. Metody i sredstva izmereniy v p'ezoelektricheskom priborostroenii: monografiya [Measurements Methods and Means in Piezoelectric Device-making]. Rostov on Don. YuFU. 2009. 180 p. (P'ezoelektricheskoe priborostroenie. T. 5).
2. P'ezokeramicheskie preobrazovateli: Spravochnik [Piezoceramic transformers. Reference manual]. Under S.I. Pugachev edition. L.:Sudostroenie, 1984. 356 p.
3. Podvodnyye ehlektroakusticheskie preobrazovateli: Spravochnik [Underwater electroacoustic transducers. Reference manual]. Under S.I. Bogorodskogo edition. L.: Sudostroenie, 1982. 348 p.
4. Sverdlin G. M. Prikladnaya gidroakustika [Applied underwater acoustics]. L.: Sudostroenie, 1990. 320 p.
5. Zemlyakov V. L. Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. 2010. № 5. pp. 66–70.
6. Dolya V. K., Zemlyakov V. L., Klyuchnikov S. N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3496.
7. Zemlyakov V.L. Piezoelectrics and Related Materials: Investigations and Applications. 2012 2nd Quarter, pp. 117-142.
8. Zemlyakov V. L., Tolmachev S.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1780.
9. Zemlyakov V. V., Zemlyakov V. L. Measurement Techniques. 2002. V. 45. N 4. P. 421.
10. Zemlyakov V. L., Klyuchnikov S. N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3430.