АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1996, том 42, № 2, с. 276 - 278

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 539.216.2:621.317

ЭХО-ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭФФЕКТИВНЫХ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

© 1996 г. **М. А. Григорьев, Ю. Н. Навроцкая**

Саратовский государственный университет им. А.Г. Чернышевского

410001 Саратов, ул. Астраханская, 83

Поступила в редакцию 20.12.94 г.

При измерениях на СВЧ акустического затухания (АЗ) и коэффициента электроакустического преобразования эхо-методом с помощью экспериментальной установки с ферритовым циркулятором обычно вначале определяется отношение электромагнитных (ЭМ) мощностей двух соседних эхо-импульсов $A = P_{эхо,i}/P_{эхо,i+1}$, где i – номер эхо-импульса. Затем измеряются так называемые полные потери ПП = $P_{эм+}/P_{эхо,1}$, где $P_{эм+}$ – мощность прямой ЭМ-волны, подводимой к преобразователю. По полученным результатам приближенно находятся искомые величины – коэффициент затухания α и коэффициент преобразования η.

Если исходить из определения $\eta = P_{ак+}/P_{эм+} = P_{эм-}/P_{ак-}$, где $P_{ак+}$ и $P_{эм-}$ – мощности АК- и ЭМ-волн, возбуждаемых преобразователем, $P_{ак-}$ – мощность падающей на преобразователь упругой волны, то при параллельных торцах звукопровода можно провести следующие рассуждения. Импульс ЭМ-волны в подводящем волноводе возбуждает с помощью преобразователя в звукопроводе АК-волну мощностью $P_{ак+,1} = P_{эм+}\eta$. Последняя, дойдя до свободного торца звукопровода, за счет затухания в нем уменьшит свою мощность до величины $P_{ак+,1}\exp(-2\alpha l)$, где l – длина звукопровода. Отразившись от торца и вернувшись к преобразователю, она будет иметь мощность $P_{ак-,1} = P_{ак+,1}\exp(-4\alpha l)$. В результате обратного преобразования возбудится ЭМ эхо-импульс с мощностью

$$P_{эхо,1} = P_{ак-,1}\eta = P_{эм+}\eta^2\exp(-4\alpha l). \quad (1)$$

При этом в результате диссипации энергии в колебательной системе преобразователя (в контуре) потеряется некоторая мощность $P_{п,1}$, а в звукопроводе появится отраженный АК-импульс с мощностью $P_{ак+,2} = (P_{ак-,1} - P_{эхо,1} - P_{п,1})$.

Если ввести коффициент полезного действия (КПД) контура

$$\eta_к = P_{эм-}/(P_{эм-} + P_п) = P_{эхо,1}/(P_{эхо,1} + P_{п,1}), \quad (2)$$

то будем иметь $P_{ак+,2} = P_{эм+}\exp(-4\alpha l)\eta(1 - \eta/\eta_к)$. Повторив рассуждения, нетрудно прийти к выражению для мощности второго, а затем и i-го ЭМ эхо-импульса:

$$P_{эхо,i} = P_{эм+}\eta^2\exp(-4i\alpha l)(1 - \eta/\eta_к)^{i-1}. \quad (3)$$

Из (1) и (3) следует

$$A = \exp(4\alpha l)(1 - \eta/\eta_к)^{-1}, \quad (4)$$

$$ПП = \exp(4\alpha l)\eta^{-2}. \quad (5)$$

Выражая все величины, кроме $\eta_к$, в децибелах, а также введя для акустического затухания обозначение АЗ, дБ = $10\lg\exp(4\alpha l)$, из (4) и (5) получим

$$\eta = (A - ПП) + 10\lg\{[1/(2\eta_к)^2 + 10^{(ПП - A)/10}]^{1/2} - 1/(2\eta_к)\}, \quad (6)$$

$$АЗ = A + 10\lg(1 - 10^{0.1\eta}/\eta_к). \quad (7)$$

Обычно в (4) пренебрегают величиной $\eta/\eta_к$ по сравнению с единицей, полагая, что $\eta \ll 1$. Это избавляет от необходимости измерять коэффициент $\eta_к$ и сводит формулы (6) и (7) к виду

$$\eta \simeq (A - ПП)/2, \quad (8)$$

$$АЗ \simeq A. \quad (9)$$

Однако такое пренебрежение может привести к заметным погрешностям [1] даже в случае $\eta \ll 1$, если и $\eta_к \ll 1$. Для высокоэффективных преобразователей ($\eta \geq 0.1$) формулы (8) и (9) совершенно непригодны. Чтобы правильно найти η и АЗ, необходимо знать КПД контура $\eta_к$. В [1] обсуждался вопрос об измерении $\eta_к$ и были даны рекомендации как следует поступать, если возбуждающими системами пьезопреобразователей служат объемный резонатор или двухпроводная линия. Воспользоваться этими рекомендациями на практике не всегда возможно в связи с частным характером примеров, рассмотренных в [1] и трудностями выбора знака перед корнем в формуле (14) в [1].

Здесь мы подробно остановимся на обосновании строгой методики измерений АЗ и η с учетом $\eta/\eta_к$ для общего случая, когда пьезоэлемент соединен с передающим трактом посредством некоторого четырехполюсника.

Найдем сначала связь КПД контура с измеряемыми величинами. Предположим, что собственными потерями в указанном четырехполюснике можно пренебречь. Тогда закон, по которому он трансформирует сопротивление, будет иметь вид [2]

$$Z_{вх} = (aZ_{вых} + jb)/(jcZ_{вых} + 1), \qquad (10)$$

где j – мнимая единица, a, b, c – действительные коэффициенты, зависящие от частоты и называемые обычно приведенными A-параметрами четырехполюсника; $Z_{вых}$ – импеданс на выходных клеммах; $Z_{вх}$ – трансформированный импеданс на входных клеммах. В рабочем состоянии к выходу подключен пьезоэлемент, расположенный на торце звукопровода. Можно считать, что данный четырехполюсник трансформирует ЭДС и внутреннее сопротивление генератора к плоскости подключения пьезоэлемента. В результате последний оказывается нагрузкой как бы другого генератора с новыми значениями ЭДС и внутреннего импеданса $Z_{вн} = R_{вн} + jX_{вн}$. Тогда в соответствии с определением (2) можно записать

$$\eta_к = R_{вн}/(R_{вн} + R_п), \qquad (11)$$

где $R_п$ – сопротивление потерь.

Будем считать, что используемый генератор согласован с волноводом. Это означает, что его внутреннее сопротивление равно волновому сопротивлению волновода Z_0. В таком случае можно считать, что при нахождении трансформированного значения $Z_{вн}$ клеммы генератора могут быть отнесены к любому сечению волновода. Выберем входные клеммы четырехполюсника в максимуме стоячей волны при разомкнутых клеммах на выходе (максимум при "холостом ходе"). Назовем эти входные клеммы сечением "a". Последнее можно отыскать с помощью зонда измерительной линии, если снять с возбуждающей системы звукопровод с пьезоэлементом. Так как при этом $Z_{вых} = \infty$, из (10) плучим $Z_{вх} = a/jc$. Поскольку сечение "a" расположено в максимуме стоячей волны при КСВН $\longrightarrow \infty$, можно записать $Z_{вх} = Z_0$КСВН $= \infty = a/jc$. Таким образом, для выбранного четырехполюсника в формуле (10) следует положить $c = 0$. В результате получим

$$Z_{вх} = aZ_{вых} + jb. \qquad (12)$$

Чтобы вычислить импеданс $Z_{вн}$ в случае согласованного с волноводом исходного генератора, надо в (12) положить $Z_{вх} = Z_0$ и найти $Z_{вых}$. Это и будет новый внутренний импеданс $Z_{вн}$. Так как Real$Z_{вн} = Z_0/a$, то из (11) будем иметь

$$\eta_к = (Z_0/a)/(Z_0/a + R_п) = Z_0/(Z_0 + R_п a). \qquad (13)$$

Легко видеть, что величина $(R_п a)$ есть сопротивление потерь преобразователя, трансформированное четырехполюсником в сечение "а". Этот вывод является следствием линейного характера зависимости $Z_{вх}$ от $Z_{вых}$ в формуле (12). Очевидно на этом основании и трансформированное в сечение "a" сопротивление излучения также можно найти, умножив исходную величину на коэффициент a: $R_{изл,\,a} = R_{изл}a$. Полное активное сопротивление в сечении "a", равное $(R_п + R_{изл})a$, выражается через измеряемые величины – модуль $|\Gamma|$ и фазу φ коэффициента отражения в указанном сечении формулой

$$\frac{(R_{изл} + R_п)\,a}{Z_0} = \frac{1 - |\Gamma|^2}{1 + |\Gamma|^2 - 2|\Gamma|\cos\varphi}. \qquad (14)$$

Сопротивление излучения связано с коэффициентом η известным (см., например, [3]) выражением

$$\eta = (1 - |\Gamma|^2)\,\frac{R_{изл}\,a}{(R_{изл} + R_п)\,a}. \qquad (15)$$

Модуль $|\Gamma|$ определяется коэффициентом стоячей волны: $|\Gamma| = (k - 1)/(k + 1)$. Если в (14) подставить $(R_{изл}a)$ из (15), а затем выразить $(R_п a)$ и подставить в (13), то будем иметь

$$\frac{1}{\eta_к} = 1 + \frac{1 - |\Gamma|^2 - 10^{0.1\eta}}{1 + |\Gamma|^2 - 2|\Gamma|\cos\varphi}. \qquad (16)$$

Здесь коэффициент η представлен в децибелах.

Итак, чтобы найти $\eta_к$, необходимо измерить величины k, φ и η. Однако экспериментальное значение η может быть вычислено по формуле (6), если, в свою очередь, известен $\eta_к$. Следовательно, для правильного нахождения АЗ и η по измеренным величинам ПП, А, k, φ необходимо совместно решать систему уравнений (6), (7) и (16) с тремя неизвестными η, АЗ, $\eta_к$. Решение этой системы легко получить даже с помощью программируемого микрокалькулятора.

Дадим теперь некоторые практические рекомендации как правильно реализовать предлагаемый метод.

Измерение фазы коэффициента отражения в сечении "a" выполняется с помощью измерительной линии (ИЛ), включаемой между циркулятором и возбуждающей системой преобразователя. Чтобы исключить влияние эхо-импульсов на стоячую волну в волноводе, генератор должен работать в импульсном режиме с длительностью импульса τ, удовлетворяющей условию $\tau < 2l/v_{зв}$, где l – длина звукопровода, $v_{зв}$ – скорость звука в нем. К детектору ИЛ подключается усилитель видеоимпульсов с осциллографом на выходе. Сначала находится сечение "а". Для этого из возбуждающей системы удаляется звукопровод с пьезоэлементом и на рабочей частоте зондом ИЛ отыскивается пучность стоячей волны. Затем в возбуждающую систему возвращается звукопровод с пьезоэлементом. Зондом ИЛ измеряется длина волны Λ и находится узел стоячей волны, ближайший к сечению "a" в сторону генератора. Искомая величина φ вычисляется по формуле $\varphi = 4\pi(d/\Lambda) - \pi$, где d – расстояние от найденного узла до сечения "a" [4].

Измерение КСВН осуществляется с помощью той же ИЛ. Чтобы исключить ошибки, обуслов-

ленные неквадратичностью вольтамперной характеристики детектора и нелинейностью усилителя, следует пользоваться методом калиброванного переменного аттенюатора [4], включаемого между генератором и циркулятором.

Измерения величин ПП и А выполняются посредством указанного выше калиброванного аттенюатора. Для того чтобы избежать ошибок, вызванных неидеальностью циркулятора [1] при измерении ПП, следует, отметив показания приемника, обусловленные 1-м и эхо-импульсом, заменить исследуемый преобразователь поршнем и измерить с его помощью $ПП_{max}$ и $ПП_{min}$, дБ. Искомая величина вычисляется [1] в децибелах по формуле

$$ПП = ПП_{max} + 20\lg\{1 + \exp[(\ln 10) \times \times (ПП_{min} - ПП_{max})/20]\} - 10\lg 4.$$

В заключение приведем таблицу, показывающую как различаются результаты обработки измерений выполненных по обычной методике с использованием формул (8) и (9) и предлагаемой в настоящей статье на основе формул (6), (7) и (16).

КСВН	φ/π	ПП, дБ	А, дБ	АЗ, дБ	(ПП – А)/2, дБ	$-\eta$, дБ	$\eta_к$
3	0.1	43	3	2.84	20	20.07	0.29
3	1	43	3	2.94	20	20.03	0.75
3	0.1	23	3	1.6	10	10.7	0.31
3	1	23	3	2.44	10	10.3	0.77
3	0.2	13	3	0.05	5	6.5	0.46
3	1	13	3	1.34	5	5.83	0.82

За исходные величины (с 1 по 4 столбец) взяты типичные для эксперимента значения КСВН, φ, ПП, А. Чтобы проиллюстрировать пределы применения предлагаемой методики величина ПП задавалась равной 43, 23 и 13 дБ. В 4-м и 5-м столбцах соседствуют значения А и АЗ, а в 6-м и 7-м – (ПП – А)/2 и η. Легко видеть, что акустическое затухание АЗ заметно отличается от А уже при $\eta = -20$ дБ. С ростом η различие может достигнуть 100%, см. случай $\eta = -6.5$ дБ. Видно также, что коэффициент преобразования η отличается от (ПП – А)/2. Это отличие становится особенно заметным при малом КПД контура (8-й столбец) и $\eta > -10$ дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Григорьев М.А., Зайцев Б.Д., Петров В.В., Толстиков А.В.* Об ошибках при измерении на СВЧ коэффициента электроакустического преобразования и затухания упругих волн эхо-методом // Акуст. журн. 1981. Т. 27. № 3. С. 351 - 357.

2. *Шимони К.* Теоретическая электротехника. М.: Мир, 1964. С. 773.

3. *Григорьев М.А., Петров В.В., Толстиков А.В.* Сверхвысокочастотный пьезопреобразователь с электродами конечной толщины в качестве нагрузки коаксиальной линии // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35. № 9. С. 1977 - 1987.

4. *Гинзтон Э.Л.* Измерения на сантиметровых волнах. М.: ИЛ. 1960. С. 620.