

УДК 534.211

К. В. ЧЕРНЫШЕВ, В. В. ШЕГАЙ

О ДВУХСЛОЙНОМ СОГЛАСОВАНИИ КОМПЛЕКСНЫХ ИМПЕДАНСОВ

Возможности применения слоистых систем в акустике хорошо известны: они используются для «просветления» границ раздела двух сред, согласования электроакустических преобразователей и т. д. Эти задачи можно рассматривать как частные случаи проблемы согласования комплексных акустических импедансов. Задача расчета параметров слоистых систем, согласующих два действительных импеданса, а также действительный и комплексный импедансы, решена в работах [1, 2]. Под целью согласования в них понималось получение нулевого коэффициента отражения гармонической волны от согласующей системы.

Наиболее общая постановка задачи согласования сопротивлений — задача согласования комплексных импедансов. Однослойное согласование в такой постановке (с целью передачи максимальной мощности от источника к нагрузке) рассмотрено в работе [3]. В [4] даны необходимые предпосылки для решения задачи о двухслойном согласовании комплексных импедансов. В этой работе рассмотрена задача расчета двухслойной системы для согласования двух полупространств, отделенных от согласующих слоев реактивными четырехполюсниками, дается аналитический метод расчета толщины и волновых сопротивлений слоев через волновые сопротивления сред, заполняющих полупространства, и параметры промежуточных четырехполюсников. Если не налагать ограничений на толщины и волновые сопротивления слоев, то на одной частоте двухслойное согласование всегда возможно. Настоящая статья является непосредственным продолжением работы [4].

Задача согласования комплексных импедансов возникает, например, при необходимости передать максимальную мощность от электроакустического излучателя к нагрузке. В этом случае один из импедансов является комплексным механическим сопротивлением преобразователя z_g , а другой — комплексным сопротивлением излучения ξ . Условие такого согласования имеет вид:

$$z_g = \xi^* \quad (1)$$

В тех случаях, когда соотношение (1) не выполняется, необходимо использовать согласующее устройство. Если преобразователь имеет плоскую излучающую поверхность, совершающую поршневые колебания, то для согласования можно использовать системы плоскопараллельных слоев.

Задачу согласования комплексных импедансов с помощью двухслойной системы сформулируем следующим образом: требуется определить волновые сопротивления w_i и волновые толщины φ_i ($\varphi_i = 2\pi f l_i / c_i$, где l_i — геометрическая толщина, а c_i — скорость волны для i -того слоя, $i=1,2$; f — частота) слоев системы, помещаемой между источником акустической энергии и нагрузкой и обеспечивающей выполнение условия (1) на некоторой заданной частоте f_s . Для реше-

ния поставленной задачи воспользуемся результатами, полученными в работе [4]. С этой целью представим комплексное механическое сопротивление преобразователя как входное сопротивление реактивного четырехполюсника с характеристической матрицей $\|a\|$, замкнутого на действительное сопротивление z_0 , а комплексное сопротивление нагрузки — как входное сопротивление реактивного четырехполюсника с характеристической матрицей $\|c\|$, замкнутого на действительное сопротивление z_L . Возможность такого представления для любых физически реализуемых импедансов показана в работе [5]. Элементы характеристических матриц и сопротивления z_0 , z_L должны удовлетворять соотношениям:

$$z_g = \frac{a_{22} z_0 + ja_{12}}{ja_{21} z_0 + a_{11}} \quad a_{11}a_{22} + a_{12}a_{21} = 1,$$

$$\zeta = \frac{c_{11} z_L + jc_{12}}{jc_{21} z_L + c_{22}} \quad c_{11}c_{22} + c_{12}c_{21} = 1$$

(недиагональные элементы обеих матриц — мнимые величины, в которых выделена мнимая единица). Для выполнения этих соотношений достаточно положить:

$$\begin{aligned} z_0 &= \text{Re}[z_g], \quad z_L = \text{Re}[\zeta], \\ a_{12} &= \text{Im}[z_g], \quad c_{12} = \text{Im}[\zeta], \\ a_{11} &= a_{22} = c_{11} = c_{22} = 1, \quad a_{21} = c_{21} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Вместо условия согласования (1) теперь можно пользоваться условием равенства действительных импедансов:

$$z_0 = z_1, \quad (3)$$

где z_1 — входное сопротивление четырехполюсника с матрицей $\|a\|$, замкнутого на сопротивление нагрузки, образованной двухслойной согласующей системой, четырехполюсником с матрицей $\|c\|$ и замыкающим сопротивлением z_L (рис. 1). Поскольку выполнение условия (3)

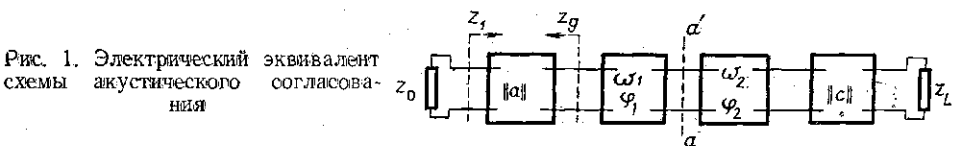


Рис. 1. Электрический эквивалент схемы акустического согласования

на одной стороне реактивного четырехполюсника (с матрицей $\|a\|$) автоматически приводит к выполнению условия (1) на другой его стороне, условия согласования (1) и (3) являются эквивалентными.

Таким образом, задача двухслойного согласования комплексных импедансов сводится к рассмотренной в [4] задаче согласования действительных импедансов z_0 и z_L , отделенных от согласующей системы реактивными четырехполюсниками с известными характеристическими матрицами $\|a\|$ и $\|c\|$. В [4] получены формулы для волновых сопротивлений ω_1 и ω_2 и волновых толщин ϕ_1 и ϕ_2 согласующих слоев. Помимо введенных в настоящей статье величин z_0 , z_L и элементов матриц $\|a\|$ и $\|c\|$ в эти формулы входят также величины R и X — действительная и мнимая части входного сопротивления системы в сечении aa' (см. рис. 1).

Подставив z_0 , z_L , а также a_{ik} и c_{ik} , определяемые соотношениями (2), в формулы работы [4], получим следующие выражения:

$$\omega_1^2 = \frac{\operatorname{Re}[z_g](R^2 + X^2) - R|z_g|^2}{R - \operatorname{Re}[z_g]}, \quad (4)$$

$$\omega_2^2 = \frac{\operatorname{Re}[\zeta](R^2 + X^2) - R|\zeta|^2}{R - \operatorname{Re}[\zeta]},$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{(R - \operatorname{Re}[z_g])\omega_1}{\operatorname{Im}[z_g]R - \operatorname{Re}[z_g]X}, \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{(R - \operatorname{Re}[\zeta])\omega_2}{\operatorname{Im}[\zeta]R + \operatorname{Re}[\zeta]X}.$$

Области допустимых значений параметров R и X , определяемые неравенствами

$$\omega_i^2 > 0, \quad i = 1, 2, \quad (6)$$

приведены в [4]; там же показано, что такие области всегда существуют. Поэтому двухслойное согласование комплексных импедансов всегда возможно в том смысле, что всегда можно найти значения волновых сопротивлений φ_i и волновых толщин ω_i ($i=1, 2$) двухслойной системы, обеспечивающей выполнение условия согласования (1).

На практике, однако, диапазон возможных значений волновых сопротивлений ограничен, поэтому вместо неравенства (6) естественно задать условия:

$$\omega_{\min} \leq \omega_i \leq \omega_{\max}, \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

и исходя из них определять области допустимых значений параметров R и X . Аналитическое решение системы неравенств (7) с учетом (4) несложно, но имеет громоздкий вид, поэтому приведем графический способ решения. Каждому из значений ω_1 и ω_2 на плоскости ROX соответствуют окружности, центры которых лежат на оси OR в точках

$$R_{01} = \frac{\omega_1^2 + |z_g|^2}{2 \operatorname{Re}[z_g]}, \quad R_{02} = \frac{\omega_2^2 + |\zeta|^2}{2 \operatorname{Re}[\zeta]}, \quad (8)$$

а радиусы равны:

$$r_1 = (R_{01}^2 - \omega_1^2)^{1/2}, \quad r_2 = (R_{02}^2 - \omega_2^2)^{1/2}. \quad (9)$$

Значения параметров R и X , удовлетворяющие неравенствам (7), лежат в области, ограниченной окружностями, соответствующими минимальному и максимальному значениям волновых сопротивлений слоев.

В отличие от системы неравенств (6) система (7) может оказаться несовместной, т. е. двухслойное согласование при данном диапазоне значений волновых сопротивлений согласующих слоев осуществить нельзя. Если же система неравенств (7) совместна, то целесообразно искать решение задачи синтеза двухслойных согласующих систем при заранее заданных волновых сопротивлениях согласующих слоев. Это соответствует задаче согласования на основе заданных материалов [6] и снимает проблему реализуемости системы.

Выбирая для изготовления согласующих слоев несколько материалов и строя на плоскости ROX окружности, соответствующие этим материалам (каждому материалу отвечают две окружности — одна

для первого, другая для второго слоя), можно определить те комбинации материалов, которые обеспечивают двухслойное согласование. Взяв подходящую пару материалов, находим волновые толщины слоев. Значения параметров R и X , входящих в формулу (5), вычисляются из системы уравнений (4).

Для иллюстрации полученных результатов рассмотрим две задачи согласования импедансов: акустическое «просветление» плоской границы раздела двух полубесконечных сред (вода — сталь) и согласование электроакустического преобразователя с акустической нагрузкой. Будем считать, что возможные значения

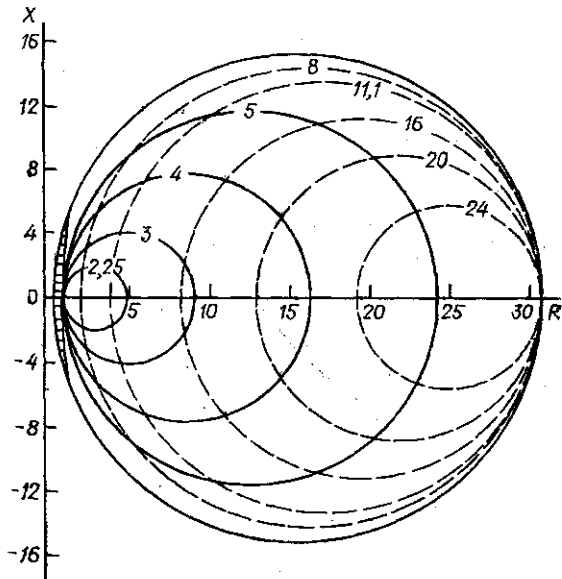


Рис. 2. Номограмма для определения волновых сопротивлений и волновых толщин двухслойной согласующей системы, «просветляющей» границу раздела вода — сталь. Сплошные окружности соответствуют волновым сопротивлениям первого слоя; пунктирные — волновым сопротивлениям второго слоя. Числа на окружностях дают значения волновых сопротивлений слоев, нормированные на величину волнового сопротивления воды

волновых сопротивлений лежат в пределах от $\omega_{\min}=1$ до $\omega_{\max}=30,6$ (единицей измерения волновых сопротивлений и импедансов является волновое сопротивление воды).

В первой задаче $z_0=1$, а $z_L=30,6$. Область допустимых значений параметров R , X представляет собой круг радиуса $r=15,3$, за исключением заштрихованной части круга и его границы (рис. 2). Внутри круга проведены окружности, соответствующие различным значениям ω_1 и ω_2 . Выберем, например, в качестве материала первого слоя пластмассу ($\omega_1=2,25$), а для второго слоя — алюминий ($\omega_2=11,1$) и найдем значения параметров ($R=4,14$ и $X=\pm 1,70$). По формулам (5) определим значения волновых толщин согласующих слоев: $\varphi_1=1,335$, $\varphi_2=1,395$ при $X=-1,70$ и $\varphi_1=1,807$, $\varphi_2=1,746$ при $X=+1,70$.

В рассмотренной задаче осуществляется согласование действительных импедансов при заданных материалах. Комплексные импедансы получаются, например, в задаче о согласовании электроакустического преобразователя, излучающего в воду на некоторой частоте, лежащей выше частоты механического резонанса преобразователя (на частоте механического резонанса $\text{Im}[z_g]=0$), с нагрузкой. Зависимость действительной и мнимой частей механического сопротивления преобразователя от частоты f , нормированной на частоту согласования f_0 , представлена на рис. 3.

Будем считать, что излучающая поверхность преобразователя имеет форму круга и совершает поршневые колебания в бесконечном жестком экране. Комплексное сопротивление излучения такой системы рассчитано по формулам, приведенным в работе [7]. На частоте со-

гласования отношение радиуса излучающей поверхности к длине волны в воде принималось равным 0,833. Для этого отношения сопротивление излучения равно $\zeta = 1,045 + j \cdot 0,168$. Снова выбирая в качестве материалов согласующих слоев пластмассу и алюминий, получим значения параметров $R = 1,699$, $X = \pm 8,864$ и соответствующие значения волновых толщин $\varphi_1 = 0,738$, $\varphi_2 = 0,665$ при $X = +8,864$ и $\varphi_1 = 0,256$, $\varphi_2 = 2,446$ при $X = -8,864$. Отметим, что однослойное согласование здесь оказывается невозможным.

Хотя в работе рассматривается одночастотное согласование, интегрес представляют также частотные характеристики рассчитанных вы-

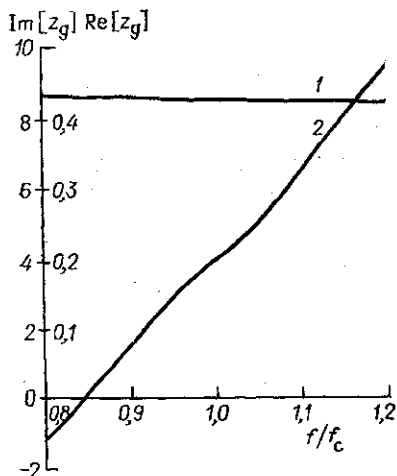


Рис. 3. Зависимость действительной (1) и мнимой (2) частей механического сопротивления преобразователя от частоты

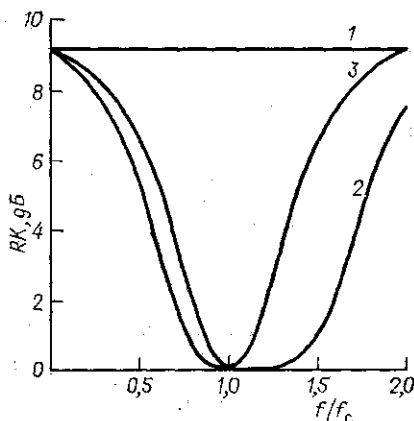


Рис. 4. Частотные характеристики «просветляющих» систем для границы вода—сталь: 1 — без согласующей системы, 2 — двухслойная просветляющая система, 3 — однослойная система

ше согласующих систем. Для оценки эффективности согласования будем пользоваться величиной действующего затухания $RK = 10 \lg \frac{W_{\max}}{W}$, где W_{\max} — максимальная мощность, которая может быть передана в нагрузку, а W — мощность, передаваемая с помощью согласующей системы. На рис. 4 приведена частотная характеристика двухслойной системы, «просветляющей» границу раздела воды и стали. На этом же рисунке приводится частотная характеристика однослойной согласующей системы — четвертьволнового слоя из материала с волновым сопротивлением $\omega = 5,532$. В результате двухслойное согласование даже при заданных материалах дает более широкую полосу «просветления», чем однослойное.

Одночастотное двухслойное согласование преобразователя с нагрузкой приводит к сравнительно узкой полосе согласования, поскольку механическое сопротивление преобразователя зависит от частоты значительно сильнее, чем параметры двухслойной согласующей системы.

В заключение авторы благодарят сотрудников кафедры акустики, принявших участие в обсуждении этой работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тартаковский Б. Д. Звуковые переходные слои.— ДАН СССР, 1950, 75, 29—32.
2. Пирогов В. А., Тартаковский Б. Д. О согласующих слоях для границы с комплексным входным импедансом.— Акуст. журнал, 1969, 15, 407—413.
3. Чернышев К. В. О согласовании электроакустического преобразователя с нагрузкой.— Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон., 1969, № 4, 83—88.
4. Шегай В. В. Об одном случае двухслойного согласования.— Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон., 1974, 15, № 4, 419—423.
5. Darlington S. Synthesis of reactance 4-poles.— J. Math. Phys., 1939, 18, 275—353.
6. Прудников А. С., Шегай В. В. Об одном способе синтеза слоистых согласующих систем.— Акуст. журнал, 1977, 23, 424—429.
7. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука. М., 1960, 312—318.

Поступила в редакцию
07.02.78

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1980, Т. 21, № 4

УДК 537.533

М. Н. ДЕВЯТКОВ, В. И. КИТОРОВ

ВТОРИЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ ТРИГЛИЦИНСУЛЬФАТА

Немногие опубликованные работы по вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ) сегнетоэлектриков [1—4] показывают, что эти вещества обладают рядом специфических особенностей вторичноэмиссионных характеристик, связанных с сегнетоэлектрическими свойствами.

В работе [1] описаны исследования коэффициента ВЭЭ σ титанатов бария и свинца. Измеренные значения σ этих сегнетоэлектриков оказались невысоки ($\sigma_{\max} \approx 1,3$); в окрестности фазового перехода наблюдалось резкое уменьшение σ , что связывалось [2] с увеличением диэлектрической проницаемости. Исследования ВЭЭ ниобата лития [3, 4] показали, что и этот сегнетоэлектрик обладает невысоким коэффициентом ВЭЭ ($\sigma_{\max} = 1,8$), причем величина σ и ширина энергетического спектра вторичных электронов зависят от направления вектора спонтанной поляризации.

В данной работе приводятся результаты исследования вторичноэмиссионных характеристик триглицинсульфата (ТГС). Измерены зависимости коэффициента ВЭЭ от энергии первичных электронов и энергетические спектры медленных вторичных электронов. Исследовалась зависимость вторичноэмиссионных характеристик ТГС от температуры. Измерения вторичноэмиссионных характеристик, так же как и в работе [4], проводились в электронно-вакуумном приборе типа сферического конденсатора с антидинаatronной сеткой. Вакуум в приборе поддерживался ионным насосом, и при непрерывной откачке давление составляло 10^{-6} — 10^{-7} Па. При измерениях использовался метод одиночных импульсов (параметры импульсов первичного тока: $I_1 = 10^{-5}$ А, $\tau_1 = 5 \cdot 10^{-6}$ с). Коэффициент ВЭЭ вычислялся по величине импульсов тока в цепях мишени и коллектора вторичных электронов. Ошибка в определении σ не превышала 5%. Мишенью служила пластинка монокристалла ТГС толщиной 0,5 мм, помещенная на ни-