

## Компонентный анализ бинарных сред методом акустической рефлектоимпедансометрии

П. О. Липовко<sup>а</sup>, М. Л. Логанчук

ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
им. М. И. Платова»,

Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132

E-mail: <sup>а</sup>plipovko@mail.ru

Получено 18 января 2015 г.

Рассматривается компьютерная модель компонентного анализа бинарных сред, основанная на применении нового метода — акустической рефлектоимпедансометрии и реализованная в среде графического программирования LabVIEW. Обсуждаются перспективы метрологического и приборного обеспечения экспериментальных приложений модели.

Ключевые слова: ультразвук, диагностика, неразрушающий контроль, коэффициент отражения, акустический импеданс

### Component analysis of binary media using acoustic reflecto-impedancemetry

P. O. Lipovko, M. L. Loganchuk

South-Russian State Polytechnic University named M. I. Platov,  
(Novocherkassk Polytechnic Institute), 132, Prosvetshenia st., Novocherkassk, 346428, Russia

**Abstract.** — A computer model of component analysis of binary media, based on application of a new method acoustic reflecto-impedancemetry and realized in graphic programming environment LabVIEW is considered. Prospects of metrological and instrumental provisions of experimental applications of the model are discussed.

Keywords: ultrasound, diagnosis, nondestructive testing, reflection coefficient, acoustical impedance

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2015, vol. 7, no. 2, pp. 301–313 (Russian).

## Введение

Впервые метод измерения акустического сопротивления (импеданса) исследуемой среды на основе сравнения его с импедансом эталонной среды, граничащей с первой по плоской границе контакта, и определения коэффициента отражения ультразвука на указанной границе был предложен американскими авторами более полувека назад [Mason et al., 1949]. С тех пор он остается в арсенале методов ультразвукового контроля и в неизменном виде используется для определения действительной и мнимой частей динамического модуля сдвиговой упругости жидких полимерных материалов [Feggy, 1963], а в последние десятилетия — и жидких кристаллов [Капустин, Капустина, 1986]. Суть метода ясна из прилагаемого рисунка 1.

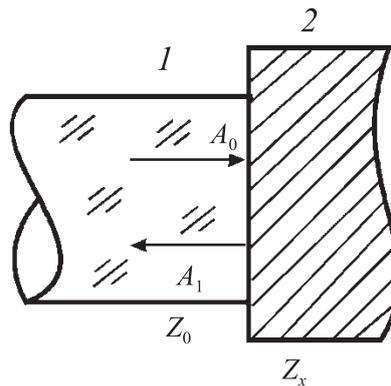


Рис. 1

Эталонную среду 1 с известным импедансом  $Z_0$  вводят в акустический контакт по плоской границе с исследуемой средой 2 с неизвестным импедансом  $Z_x$ . Через эталонную среду в направлении исследуемой пропускают ультразвуковые колебания, которые, достигнув границы раздела сред, имеют амплитуду давления  $A_0$ . Часть энергии волны (на рис. 1 не показана) проходит внутрь исследуемой среды 2, а часть отражается в обратном направлении, имея амплитуду давления  $A_1$ . В опыте измеряют амплитуды  $A_0$  (калибровкой по воздуху, обеспечивающему полное отражение) и  $A_1$  и вычисляют амплитудный коэффициент отражения  $R$ :

$$R = \frac{A_1}{A_0}. \quad (1)$$

Затем на основе известной формулы Френеля для отражения волн

$$R = \frac{Z_x - Z_0}{Z_x + Z_0} \quad (2)$$

рассчитывают искомый акустический импеданс исследуемой среды:

$$Z_x = Z_0 \frac{1 + R}{1 - R}. \quad (3)$$

В общем случае падение волны на границу происходит не перпендикулярно, а наклонно. При этом формулы усложняются. Кроме того, все величины  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $Z_0$ ,  $Z_x$ ,  $R$  являются математически комплексными, что требует проведения не только амплитудных, но и фазовых измерений. Всегда предполагается, что изучаемая среда является акустически однородной, с единственным значением импеданса  $Z_x$ .

Следует отметить, что рассматриваемый метод до сих пор не получил широкого распространения в акустическом контроле и используется как вспомогательный, поскольку нацелен

на решение узкой задачи: исследование сдвиговых характеристик жидкостей. При этом обращаем внимание, что «прямым» способом решить упомянутую задачу практически невозможно из-за сильного затухания в жидкостях поперечных (сдвиговых) волн. Поэтому приходится пользоваться методом отражения ультразвука от наружной границы исследуемой жидкости.

## Расширение возможностей метода

По имеющимся сведениям, впервые было предложено использовать рассматриваемый метод не как вспомогательный, а как один из основных методов неразрушающего акустического контроля в 1971 г. (опубликовано в работе [Липовко, 1971]). С тех пор метод, получивший название акустической рефлектоимпедансометрии (АРИ), был значительно усовершенствован: на несколько порядков величины повышена его чувствительность, упрощена процедура измерения, методика адаптирована к изучению твердых, эластомерных и консистентных сред, существенно снижены погрешности результатов и т. д.). Все это вместе взятое позволило резко расширить область применения метода и использовать его для решения в первую очередь научных задач биомедицинского характера [Липовко-Половинец, 1994]. В данной статье обсуждается возможность приложения метода АРИ к решению задачи компонентного анализа бинарных сред.

## Теоретическая часть

Пусть бинарная среда, состоящая из двух компонентов с акустическими импедансами  $Z_x$  и  $Z_y$ , в общем случае неизвестными, приводится в акустический контакт по плоской границе с эталонной средой с известным импедансом  $Z_0$  (см. рис. 2).

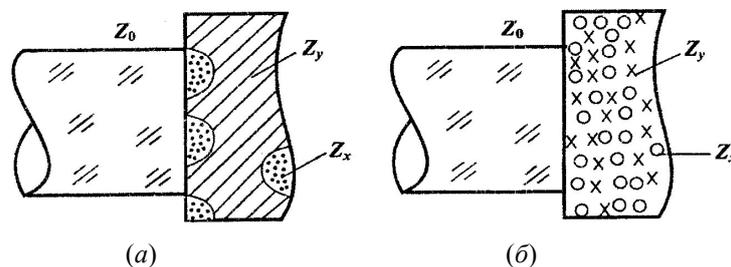


Рис. 2. Схема метода АРИ для физически неоднородных сред: (а) кусочно-однородная среда, (б) дисперсная среда

При этом хотя обе исследуемые среды на рисунке 2 являются физически *неоднородными*, в акустическом отношении между ними существует принципиальное различие: среда на рисунке 2, а является акустически *неоднородной*, или *макрокомпозиционной*, а среда на рисунке 2, б — акустически *однородной*, или *микрокомпозиционной*. Назовем последнюю среду *дисперсной*.

Решая задачу отражения звуковой волны в рамках геометрической акустики в приближении Борна (отражение от бесконечно тонкой пограничной плоскости), для кусочно-однородной границы (см. рис. 2, а) имеем

$$\bar{R} = \alpha_1 R_x + \alpha_2 R_y = \alpha_1 \frac{Z_x - Z_0}{Z_x + Z_0} + \alpha_2 \frac{Z_y - Z_0}{Z_y + Z_0}, \quad (4)$$

где  $Z_x, Z_y$  и  $Z_0$  — соответственно акустические импедансы первого и второго компонентов и эталонной среды;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — удельные площади соответствующих компонентов на границе контакта;  $R_x, R_y, \bar{R}$  — амплитудные коэффициенты отражения от границы эталонной среды с каждым из компонентов в отдельности и общий (интегральный) коэффициент отражения.

Таким образом, общий коэффициент отражения представляет среднее по площади значение от парциальных коэффициентов отражения. Следует иметь в виду, что

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1. \quad (5)$$

Для характеристики интегрального значения акустического импеданса кусочно-однородной среды можно ввести два новых понятия:

1) **средний поверхностный импеданс**, определяемый по формуле

$$\bar{Z} = \alpha_1 Z_x + \alpha_2 Z_y; \quad (6)$$

2) **эквивалентный импеданс**, определяемый по формуле

$$Z_{\text{equ}} = Z_0 \frac{1 + \bar{R}}{1 - \bar{R}}. \quad (7)$$

Второе понятие является новым для теоретической акустики (и в целом физики), однако, как будет показано в дальнейшем, весьма полезным для практики. Можно также обратить внимание, что последняя формула является аналогом формулы (3) для случая акустически неоднородной среды. Таким образом, эквивалентный импеданс акустически неоднородной среды — это импеданс такой условной однородной среды, которая обеспечивает то же значение коэффициента отражения, что и реальная акустически неоднородная среда.

Подставляя в формулу (7) выражения (4) и (3) и делая элементарные алгебраические преобразования, можно получить формулу, связывающую  $Z_{\text{equ}}$  с импедансами компонентов:

$$Z_{\text{equ}} = \frac{2Z_x Z_y + Z_0(Z_x + Z_y) + (\alpha_1 - \alpha_2)Z_0(Z_x - Z_y)}{2Z_0 + (Z_x + Z_y) - (\alpha_1 - \alpha_2)(Z_x - Z_y)}. \quad (8)$$

Из анализа формулы (8) вытекают два важных следствия:

1.  $Z_{\text{equ}} \neq \bar{Z}$ . Такое равенство возможно только в предельном случае акустического вырождения двухкомпонентной среды, когда  $Z_x = Z_y = Z$ . Если же  $Z_x \neq Z_y$ , то для любого соотношения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  и любого значения  $Z_0$  эквивалентный и средний импедансы по величине не совпадают.

2.  $Z_{\text{equ}} = f(Z_0)$ , если  $Z_x$  и  $Z_y$  выступают как параметры, т. е. известные постоянные величины, не равные друг другу.

Последнее следствие имеет важное практическое значение для экспериментов по методу АРИ. А именно, если исследуемая среда является акустически однородной, то ее адекватной математической моделью выступает формула (3), по которой результат расчета искомого импеданса  $Z_x$  от импеданса  $Z_0$  эталонной среды не зависит, ибо формула (3) есть безусловное следствие формулы (2) и при подстановке (2) в (3) получается тождество, не содержащее  $Z_0$ . Если же исследуемая среда является акустически неоднородной (в простейшем случае — кусочно-однородной), то результат расчета ее условного эквивалентного импеданса  $Z_{\text{equ}}$  от  $Z_0$  зависит.

При этом  $\bar{Z}$  от  $Z_0$  не зависит по определению из формулы (6).

Таким образом, изменение  $Z_0$  в эксперименте с сохранением всех остальных акустических условий опыта может служить индикатором акустической неоднородности исследуемой среды в пределах точности методики АРИ. А именно, совпадение в двух случаях  $Z_{\text{equ}}$  позволяет заключить, что исследуемая среда однородна и ее импеданс  $Z_x$  рассчитывается по традиционной формуле (3). Несовпадение же значений  $Z_{\text{equ}}$  влечет заключение о неоднородности исследуемой среды. В таком случае, например, при заданных  $Z_x$  и  $Z_y$  возможно рассчитать  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , применяя формулу (8) с учетом соотношений (7) и (5). Обозначим  $\alpha_1 = \alpha$ , тогда  $\alpha_2 = 1 - \alpha$ .

Удобно ввести количественный критерий  $\gamma$  — показатель акустической неоднородности среды — в виде [Липовко-Половинец, 2009]

$$\gamma = \frac{|Z'_{\text{equ}} - Z''_{\text{equ}}|}{Z'_{\text{equ}} + Z''_{\text{equ}}}, \quad (9)$$

где  $Z'_{\text{equ}}$  и  $Z''_{\text{equ}}$  — соответственно значения эквивалентных сопротивлений исследуемой среды при двух значениях  $Z'_0$  и  $Z''_0$  импеданса эталонной среды. Заключение о равенстве или неравенстве  $\gamma$  нулю выводится с учетом заданной априорно точности ее расчетов. В свою очередь,  $Z_{\text{equ}}$  определяется по формуле, аналогичной (7), где в качестве  $\bar{R}$  фигурирует измеренное значение этого коэффициента (для натурального эксперимента, формула (1)) или расчетное значение (для виртуального эксперимента, формула (4)). Если получается  $\gamma \neq 0$  (среда акустически неоднородная), то в зависимости от дополнительных условий задачи дальнейшие расчеты варьируют (знак усреднения над  $\bar{R}$  далее опускаем).

1. Для априорной известности одного из компонентов, акустическое сопротивление которого равно  $Z_y$ , записываются два уравнения с разными известными  $Z_0$  и с двумя неизвестными  $Z_x$  и  $\alpha$ :

$$R' = \alpha R'_x + (1 - \alpha) R'_y = \alpha(Z_x - Z'_0)/(Z_x + Z'_0) + (1 - \alpha)(Z_y - Z'_0)/(Z_y + Z'_0), \quad (10)$$

$$R'' = \alpha R''_x + (1 - \alpha) R''_y = \alpha(Z_x - Z''_0)/(Z_x + Z''_0) + (1 - \alpha)(Z_y - Z''_0)/(Z_y + Z''_0). \quad (11)$$

Решением этих двух уравнений выступают формулы [Липовко-Половинец, 1990]:

$$Z_x = \frac{A(Z'_0 + Z''_0) + (B + C)(Z'_0 - Z''_0) \pm \sqrt{[A(Z'_0 + Z''_0) + (B + C)(Z'_0 - Z''_0)]^2 + 4[(B - C)^2 - A^2]Z'_0 Z''_0}}{2(B - C - A)}, \quad (12)$$

где  $A = R''R'_y - R'R''_y$ ;  $B = R'' - R''_y$ ;  $C = R' - R'_y$ ;  $R'_y = (Z_y - Z'_0)/(Z_y + Z'_0)$ ;  $R''_y = (Z_y - Z''_0)/(Z_y + Z''_0)$ . Поскольку физический смысл имеет только положительное значение  $Z_x$ , в выражении (12) следует выбирать соответствующий этому знак перед радикалом.

$$\alpha = (R' - R'_y)/(R'_x - R'_y) = (R'' - R''_y)/(R''_x - R''_y), \quad (13)$$

обозначения те же.

2. Для априорной неизвестности двух компонентов, акустические импедансы которых равны  $Z_x$  и  $Z_y$ , при одновременной неизвестности концентрации первого  $\alpha$  (и второго) компонента (общий случай неоднородной среды), ввиду неизвестности трех величин необходимо добавлять в схему опыта еще третье независимое измерение: с известным значением акустического импеданса эталонной среды, равным  $Z''_0$ . При этом появится третье, аналогичное (10) и (11), уравнение:

$$R''' = \alpha R'''_x + (1 - \alpha) R'''_y = \alpha(Z_x - Z''_0)/(Z_x + Z''_0) + (1 - \alpha)(Z_y - Z''_0)/(Z_y + Z''_0). \quad (14)$$

Неизвестными в 3-х уравнениях (10), (11) и (14) выступают  $Z_x$ ,  $Z_y$  и  $\alpha$ . Решение этой системы уравнений дается формулами [Липовко-Половинец, 1991]:

$$Z_{x,y} = \frac{pl - qk \pm \sqrt{(pl - qk)^2 - 4(nk - ml)(mq - np)}}{2(nk - ml)}, \quad (15)$$

где  $p = Z_0''(R'' + 1) - Z_0'''(R''' + 1)$ ;  $q = Z_0'(R' + 1) - Z_0''(R_2 + 1)$ ;  $k = (R'' - 1)/Z_0'' - (R''' - 1)/Z_0'''$ ;  $l = (R' - 1)/Z_0' - (R'' - 1)/Z_0''$ ;  $m = R'' - R'''$ ;  $n = R' - R''$ . При этом для нахождения  $\alpha$  остается справедливой формула (13).

3. Случай неоднородной среды, для которого известны  $Z_y$  и  $\alpha$ , не представляет практического интереса, однако в математическом отношении не вызывает никаких сложностей, т. к. сводится к решению уравнения (10) относительно  $Z_x$ . Путем несложных преобразований получаем

$$Z_x = Z_0' \frac{\alpha + R' - (1 - \alpha)R_y'}{\alpha - R' + (1 - \alpha)R_y'} \quad (16)$$

обозначения прежние.

Перейдем к случаю акустически однородной среды, для которого  $\gamma = 0$ . В этом случае дифференцировать компоненты не представляется возможным, т. е. отличить однокомпонентную среду от двухкомпонентной микрокомпозиционной среды (см. рис. 2, б) не удастся. Однако, если состав среды известен заранее, возможно произвести количественный анализ. А именно, определить объемную концентрацию компонентов. В качестве основной математической модели в этом варианте анализа выступает линейно-аддитивное соотношение [Потапов, Пеккер, 1977]:

$$Z_\Sigma = \beta Z_x + (1 - \beta)Z_y, \quad (17)$$

где  $Z_\Sigma$  — акустический импеданс микрокомпозиционной, или дисперсной, среды;  $\beta$  — объемная концентрация компонента с импедансом  $Z_x$ ; остальные обозначения прежние.

Следует отметить, что объемная концентрация  $\beta$  компонента имеет большую практическую значимость, чем удельная концентрация  $\alpha$  компонента в его проекции на границу раздела, ввиду ее большей технологичности, хотя в разных вариантах технического контроля используются оба выражения концентрации. Найти  $\beta$  можно двумя равнозначными способами:

1) непосредственной подстановкой известных  $Z_x$  и  $Z_y$  в формулу (17) с разрешением ее относительно  $\beta$ , при этом в качестве  $Z_\Sigma$  следует взять определяемое из измерений по формулам (1)–(3) значение импеданса микрокомпозиционной (дисперсной) среды:

$$\beta = (Z_\Sigma - Z_y)/(Z_x - Z_y); \quad (18)$$

2) заменой микрокомпозиционной среды на эквивалентную макрокомпозиционную среду с превращением  $\alpha$  в  $\beta$ . Последнее утверждение требует пояснений.

Для данной микрокомпозиционной, или дисперсной, среды сконструируем эквивалентную макрокомпозиционную среду (см. рис. 2, а) такую, чтобы она при том же составе компонентов обеспечивала бы тот же самый интегральный (усредненный по площади) коэффициент отражения, что и реальная микрокомпозиционная среда. Такую условную среду назовем **средой с разведенными компонентами**, или просто **разведенной средой**. Это понятие, так же как и понятие *эквивалентная среда*, введенное ранее, является новым понятием в физике и теоретической акустике и в некотором смысле прямо противоположным первому. И видится таким же полезным, как будет показано далее. Очевидно, что управлять коэффициентом отражения звука от указанной условной среды можно только варьируя  $\alpha$ , которая, в свою очередь, зависит от  $Z_0$ . Поэтому запишем выражение для  $\alpha$  в неоднородной среде:

$$\alpha = \frac{R - R_y}{R_x - R_y} = \frac{\frac{Z_\Sigma - Z_0}{Z_\Sigma + Z_0} - \frac{Z_y - Z_0}{Z_y + Z_0}}{\frac{Z_x - Z_0}{Z_x + Z_0} - \frac{Z_y - Z_0}{Z_y + Z_0}}. \quad (19)$$

После некоторых элементарных преобразований получим

$$\alpha = \frac{(Z_{\Sigma} - Z_y)(Z_x Z_y + Z_y Z_0 + Z_x Z_0 + Z_0^2)}{(Z_x - Z_y)(Z_{\Sigma} Z_y + Z_y Z_0 + Z_{\Sigma} Z_0 + Z_0^2)}. \quad (20)$$

Если теперь в выражении (20) задать  $Z_0 \rightarrow \pm\infty$ , то получим  $\alpha \rightarrow (Z_{\Sigma} - Z_y)/(Z_x - Z_y) = \beta$ . То есть в рамках такого чисто виртуального эксперимента (реальные значения  $Z_0$  для жидкостей и твердых тел лежат в пределах 0.8–100 МПа · с/м и являются положительными) условное значение удельной площади одного из компонентов в проекции на границу контакта эталонной и исследуемой сред в предположении, что импеданс эталонной среды стремится к бесконечности (программно достаточно взять  $Z_0 = 10^5$  МПа · с/м), автоматически дает значение объемной концентрации этого компонента в бинарной среде.

## Алгоритм компонентного анализа

С учетом вышесказанного алгоритм компонентного анализа бинарной среды по методу АРИ (обобщенная структурная схема) может быть представлен в следующем виде (см. рис. 3).

Цифровые обозначения формул на схеме соответствуют нумерации формул в тексте. Из схемы очевидно, что процесс компонентного анализа условно можно разделить на три крупных блока:

1) определение степени неоднородности среды; 2) анализ однородной среды; 3) анализ неоднородной среды. Определение степени неоднородности среды предполагает проведение измерений и выполнение расчетов, необходимых для вычисления показателя неоднородности среды  $\gamma$  по формуле (9). Вычисленное значение показателя сравнивается с нулевым значением. При этом сравнение проводится с учетом заданной точности расчета этого показателя. По результатам сравнения принимается решение о том, является ли исследуемая среда акустически однородной или акустически неоднородной.

Анализ неоднородной среды в общем виде представляет собой построение и решение системы уравнений относительно неизвестных в общем случае величин  $Z_x$ ,  $Z_y$ ,  $\alpha$ . Очевидно, что количество уравнений (три) должно совпадать с количеством неизвестных. Решение представлено выражениями (13) и (15). При известных  $Z_x$  и  $Z_y$  система вырождается до одного уравнения, решаемого относительно  $\alpha$  (см. выражение (13)). Такая же ситуация имеет место и при известности  $Z_y$  и  $\alpha$ : решается одно уравнение относительно  $Z_x$  (см. выражение (16)). При известном  $Z_y$  остаются два уравнения относительно двух неизвестных:  $Z_x$  и  $\alpha$  (см. выражения (12) и (13)).

Количественный анализ однородной среды сводится к нахождению  $\alpha$  и (или)  $\beta$  согласно выражениям (13) и (18) при условии известности  $Z_x$  и  $Z_y$ .

## Имитационное моделирование измерительной задачи

Алгоритм реализован в среде графического программирования LabVIEW. LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench — среда разработки лабораторных виртуальных приборов, наиболее подходящая для моделирования измерительных процессов) представляет собой среду графического программирования, которая широко используется в промышленности, образовании и научно-исследовательских лабораториях в качестве стандартного инструмента для сбора данных и управления приборами [Бутырин и др., 2005].

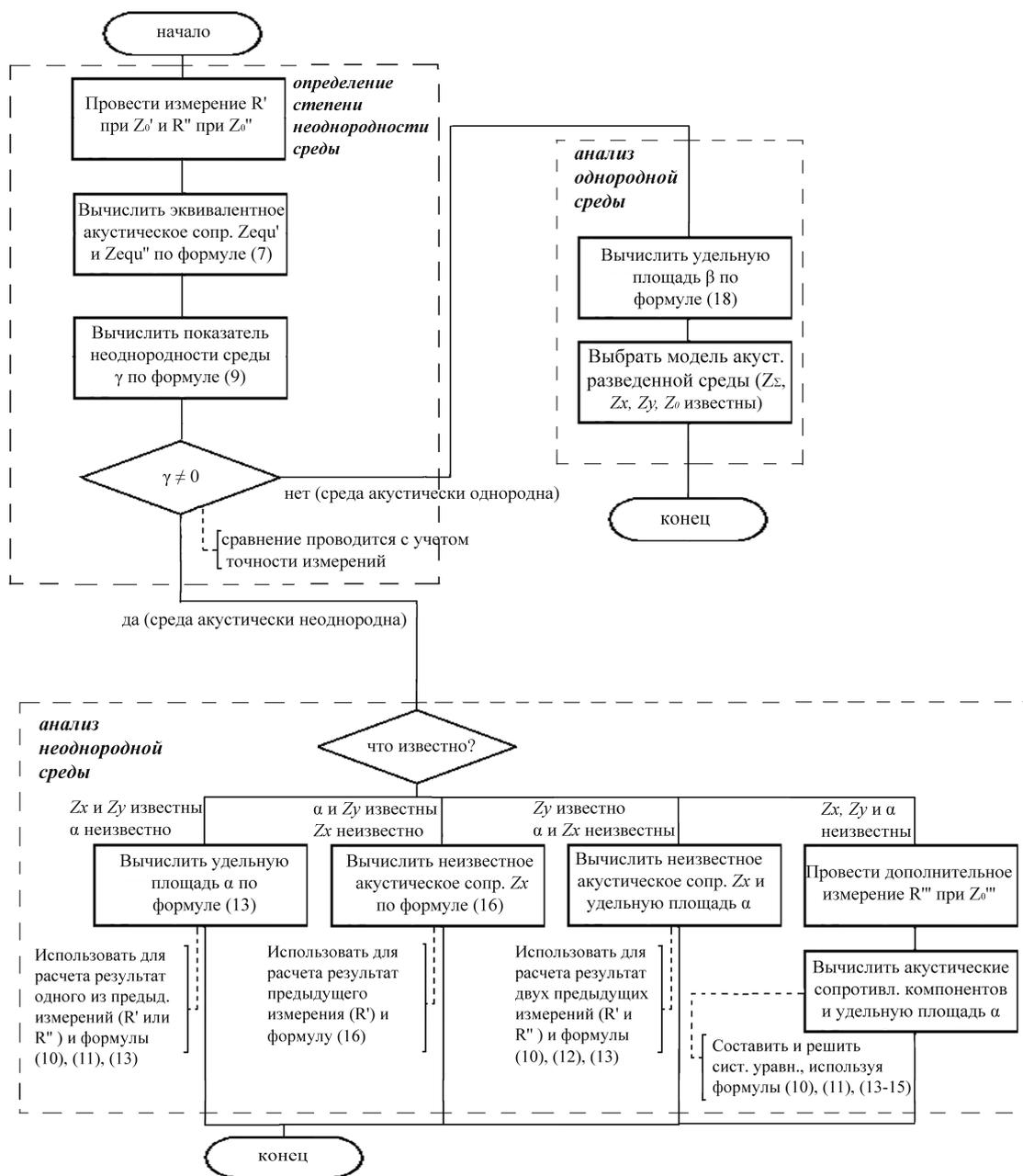


Рис. 3. Обобщенная структурная схема алгоритма компонентного анализа

Программа, разработанная в среде LabVIEW, представляет собой виртуальный прибор. Она состоит из двух частей: блочной диаграммы, описывающей логику работы виртуального прибора, и лицевой панели, описывающей внешний интерфейс. Лицевая панель разработанного виртуального прибора (см. рис. 4) визуально разбита на три зоны: исходные данные, результаты измерений и результаты расчетов. Зона «исходные данные» содержит поля для ввода известных априорно величин  $(Z_x, Z_y)$ , а также точности измерений. Если значение априорно неизвестно, соответствующее поле не заполняется (по умолчанию значение равно нулю). Виртуальные исходные данные, предназначенные для тестирования программы, индицируются свечением соответствующих индикаторов. Зона «результаты измерений» содержит поля для ввода значений коэффициента отражения  $R$ , измеренного при различных значениях  $Z_0$ . Зона «результаты расчетов» содержит поля для вывода рассчитанных значений эквивалентного со-

противления,  $\gamma$ , акустических сопротивлений компонентов и их удельной площади на границе контакта.

Блочная диаграмма, описывающая логику работы виртуального прибора, фактически является кодом программы. Фрагмент блочной диаграммы, реализующий одну из ветвей описанного выше алгоритма, приведен на рисунке 5.



Рис. 4. Лицевая панель виртуального прибора

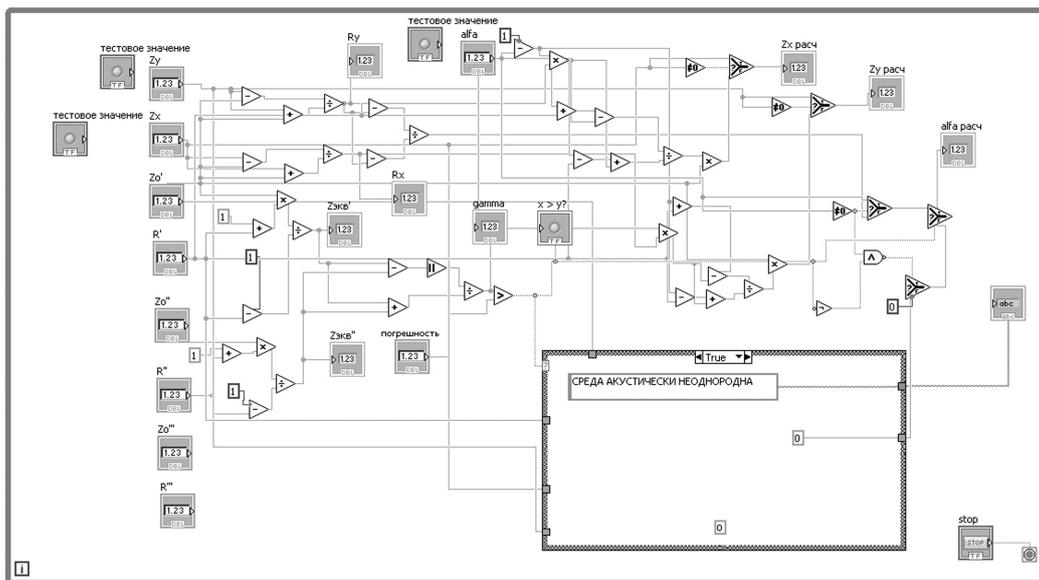


Рис. 5. Фрагмент блочной диаграммы (программная реализация алгоритма)

Технология разработки программ в среде LabVIEW позволяет подключить к персональному компьютеру (виртуальному прибору) реальный измерительный прибор и организовать ввод результатов измерений непосредственно с измеряющего устройства. Однако в настоящее время в мире нет стандартных ультразвуковых высокочастотных импульсных рефлектоимпедансометров (см. далее). Поэтому результирующие значения  $Z_x$  и  $Z_y$  приходится рассчитывать косвенно согласно формулам (1)–(3) и вводить их в компьютер в качестве исходных данных или тестовых значений.

Взаимодействие пользователя с программой заключается во вводе известных априорно значений величин  $Z_x$  и  $Z_y$  или их виртуальных эквивалентов (включая  $\alpha$ ). Кроме того, вводятся результаты измерений. Вычисленные значения оперативно отображаются в соответствующих полях. Работа программы завершается при нажатии кнопки «СТОП».

Ряд вычислительных экспериментов, проведенных с программой, позволяют сделать вывод о том, что выбор значений  $Z_0$  в процессе измерений является существенным фактором при распознавании акустически неоднородных сред. Удачный выбор пар  $Z_0$  обеспечивает устойчивое распознавание акустически неоднородных сред. В еще большей степени значения  $Z_0$  влияют на точность расчетов неизвестных (в общем случае) величин  $Z_x$ ,  $Z_y$  и  $\alpha$ .

На рисунке 6 показан пример расчета по программе для неоднородной среды в общем случае ( $Z_x$ ,  $Z_y$  и  $\alpha$  неизвестны). В качестве неоднородной среды выбрана биологическая среда — мышечный срез ( $Z_y = 1.67$  МПа · с/м), в который вкраплены частицы жира ( $Z_x = 1.33$  МПа · с/м) с концентрацией  $\alpha = 0.3$ . В качестве  $Z_0'$  взята латунь ( $Z_0 = 37.7$  МПа · с/м), в качестве  $Z_0''$  — полистирол ( $Z_0 = 2.42$  МПа · с/м), в качестве  $Z_0'''$  — вольфрам ( $Z_0 = 99.7$  МПа · с/м). Как можно видеть, программа хорошо распознает состав и концентрацию компонентов такой неоднородной бинарной среды. Причем это касается как «натурного» эксперимента (априорно неизвестны  $R', R'', R'''$ ), так и виртуального эксперимента (априорно известны  $R', R'', R'''$ , известны  $Z_x$ ,  $Z_y$  и  $\alpha$  как тестовые значения).

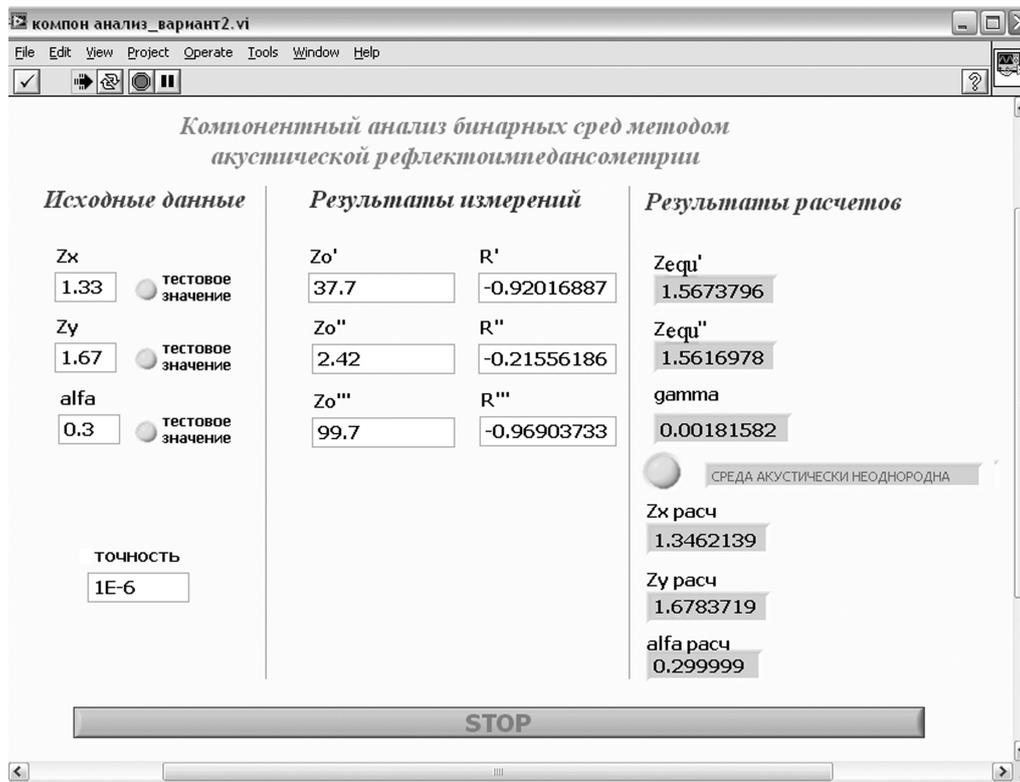


Рис. 6. Пример расчета для неоднородной среды (общий случай)

На рисунке 7 показан пример расчета по программе для однородной среды того же состава и концентраций компонентов. В качестве  $Z_\Sigma$  использованы результаты расчета по формуле (17). Как можно видеть, и в этом случае программа успешно справилась с поставленной задачей.

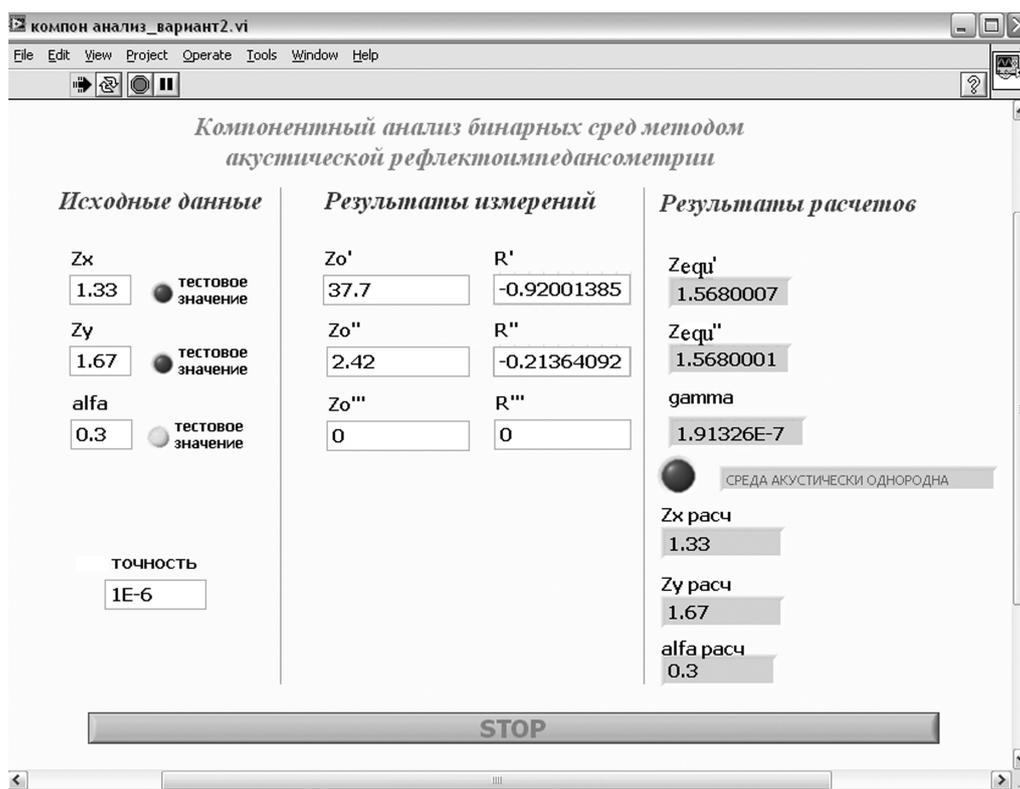


Рис. 7. Пример расчета для однородной среды

## Метрология и прибористика

Ключевым моментом в исследовании перспектив практической реализации описанной методики выступает расчет погрешностей величины  $\gamma$  как в вычислительном эксперименте, так и в особенности в натурном опыте (в последнем случае необходимо учитывать доступную приборную базу), ибо от этой величины зависит выбор ветвей алгоритма решения задачи. Рассмотрим вначале случай виртуального эксперимента, когда вдобавок среда является акустически неоднородной ( $\gamma \neq 0$ ). В этом случае все требуемые величины  $R', R'', R'''$  (в общем случае) априорно известны и, следовательно, считаются точными величинами. Такой же вывод справедлив и в отношении величин  $Z_0', Z_0'', Z_0'''$ , а также в отношении величин  $Z_x, Z_y, \alpha$ , получающихся путем расчетов по точным формулам (15) и (13) или используемых для тестирования программы. При этом программные ошибки мы не принимаем во внимание, т. к. все расчеты программно ведутся не численными, а аналитическими методами. Поэтому точность величины  $\gamma$  для рассматриваемого случая удобно связать не с погрешностью, а с требуемой разрешающей способностью метода, которую рационально принять равной  $0.01 \text{ МПа} \cdot \text{с/м}$ . То есть, например, для рассмотренного выше варианта задачи принять  $Z_x = 1.33$ , а  $Z_y = 1.34 \text{ (МПа} \cdot \text{с/м)}$ . Как следует из таблицы, обобщающей различные примеры вычислений по разработанной программе, для данного примера  $\gamma \cong 2 \times 10^{-6}$ . А значит, целесообразно задать точность расчета пограничного значения  $\gamma$  величиной  $1 \times 10^{-6}$ .

Теперь рассмотрим тот же пример, что и выше, но в натуральных условиях измерений. Здесь погрешности результатов приобретают решающее значение. Прежде всего, значения  $R', R'', R'''$  (в общем случае), а также ошибки  $Z_x, Z_y$  оказываются априорно неизвестными, их необходимо найти, базируясь на формулах (1)–(3). Как было ранее нами показано [Липовко, 1987], при

использовании серийных высокочастотных осциллографов и специальных приемов снижения погрешностей ошибки измерения амплитуд импульсов имеют величину 0.5 %, ошибки измерения коэффициентов отражения — величину 0.6 %, а ошибки определения  $Z_x$  — величину 0.2 %. При этом ошибками величин  $Z_0$  импедансов эталонов можно пренебречь. С момента опубликования цитируемой статьи прошло несколько десятков лет, в течение которых измерительная аппаратура существенно усовершенствовалась. И хотя высокочастотные ультразвуковые рефлектоимпедансометры по-прежнему не созданы, точность стандартной измерительной аппаратуры общего назначения для амплитудных импульсных измерений существенно возросла. Так, например, современные прецизионные калибраторы серии 3000 фирмы Transmille в режиме измерения амплитуд высокочастотных импульсов обеспечивают погрешность 0.01 %, т. е.  $10^{-4}$  отн. ед. Рассуждая по аналогии, можно сделать вывод, что наименьшая погрешность величины  $\gamma$  должна составлять порядок  $10^{-4}$  отн. ед. Поэтому точность расчетов для величины  $\gamma$  не должна, видимо, превышать 4 знака после запятой.

Таблица. Результаты реализации метода АРИ для разных условий компьютерного эксперимента. Везде  $\alpha$  тест = 0,3;  $Z'_0 = 37.7$ ;  $Z''_0 = 2.42$ ;  $Z'''_0 = 99.7$

$Z_x$ тест	$Z_y$ тест	$\gamma$	$Z_x$ расчет	$Z_y$ расчет	$\alpha$ расчет
1.33	1.67	0.0018155674	1.346213891	1.678371867	0.29999994
1.33	1.34	1.9446564 E-6	1.330061347	1.340135467	0.30839479
1.333	1.334	2.99917525 E-8	известно	известно	0.29989764
1.48	3.23	0.024064716	1.48011326	3.23006932	0.300208116
1.20	1.48	0.0014430961	1.18498547	1.47351998	0.300000001
0	1.48	0.078211311	0.00064444	1.4804605	0.299999999
1.67	1.68	1.371499 E-6	1.67053086	1.6799953	0.30000515
0	0.01	6.4267768 E-4	0.000299176	0.01023437	0.29995014

Результаты для  $Z_x = 0$  относятся к случаю, когда в однородной среде образуются поры, заполненные воздухом («пузырьковая среда»). Здесь метод и программа также работоспособны.

## Список литературы

- Бутырин П. А., Васильковская Т. А., Каратаева В. В., Материкин С. В. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7. — М.: ДМК Пресс, 2005. — 264 с.
- Капустин А. П., Капустина О. А. Акустика жидких кристаллов. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — 248 с.
- Липовко П. О. Применение методики измерения характеристического импеданса для акустического контроля // Всесоюзное совещание по неразрушающим методам контроля: тезисы докладов. — Кишинёв: ВНИИНК, 1971. — С. 103–104.
- Липовко П. О. Метрологические аспекты разработки ультразвуковых медицинских рефлексометров и импедансометров // Известия Сев.-Кавказск. научн. центра высш. школы. Техн. науки. — 1987. — № 2. — С. 16–20.
- А.с. СССР № 1534392. МКИ G01N29/04. Опубл. 07.01.90. Бюл. № 1. Способ определения акустического сопротивления одного из компонентов композиционного материала / Липовко-Половинец П. О.
- А.с. СССР № 1677610. МКИ G01N29/00. Опубл. 15.09.91. Бюл. № 34. Способ определения акустического сопротивления двухкомпонентных композиционных материалов / Липовко-Половинец П. О.

- 
- Липовко-Половинец П. О.* Теория и применение акустической рефлектоимпедансометрии в биологии и медицине. Дис... д. ф.-м. н. Специальность 03.00.02 – биофизика. — М.: МГУ, 1994.
- Пат. № 2362160 РФ. МКИ G01N29/04. Оpubл. 20.07.2009. Бюл. № 20. Способ определения показателя неоднородности акустических свойств материалов / *Липовко-Половинец П. О.*
- Потапов А. И., Пеккер Ф. П.* Неразрушающий контроль конструкций из композиционных материалов. — Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1977. — 192 с.
- Ферри Дж.* Вязкоупругие свойства полимеров. — М.: Мир, 1963. — 385 с.
- Mason W. P., Baker M. O., McSkimin H. J., Heiss J. H.* Measurement of shear elasticity and viscosity of liquids at ultrasonic frequencies / *Phys. Rev.* — 1949. — Vol. 75. — no. 5. — P. 936–946.