

УДК 621.647.23

Рыбин А.И. д.т.н., проф., Мовчанюк А.В. к.т.н., доц., Луговской А.Ф. д.т.н., проф.
НТУУ «Киевский политехнический институт» г. Киев, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ ИМПЕДАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КАВИТАТОРАМИ

Rybin A., Movchanuk A., Lugovskoy A.

The National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, (atoll-sonic@rambler.ru)

APPLICATION OF IMPEDANCE TOMOGRAPHY IN MECHANOTRONIC SYSTEMS WITH ULTRASONIC CAVITATOR

В статье предлагается методика оценки наличия и степени развития кавитации жидкости в трубах методами импедансной томографии. Для реализации методики используются методы реконструкции образа с использованием метода конечных элементов и метода «зон» проводимости по электрической модели фантома (томографического сечения) в виде квадратов сопротивлений с двумя диагоналями и «зон», состоящих из этих квадратов. Наличие укрупнённых зон обеспечивает радикальное уменьшение порядков систем в системах уравнений итерационной процедуры Ньютона-Рафсона (при увеличении числа реконструированных фантомов). Разрешающая способность метода реконструкции остаётся такой же, как и для классического метода конечных элементов. При этом устраняется проблема обусловленности матрицы производных от передаточных сопротивлений по поверхностной проводимости фантома. Выбор формы «зон» проводимости определяет точность реконструкции при различном расположении неоднородности внутри фантома.

Ключевые слова: кавитация, импедансная томография, реконструкция образа, фантом, метод Ньютона-Рафсона, метод «зон» проводимости, производные от передаточных сопротивлений, обратная задача, конечный элемент, поверхностная проводимость.

Введение

Многие технологические процессы в машиностроении, сельском хозяйстве, в пищевой промышленности и медицине основаны на использовании процессов, сопровождающих явление ультразвуковой кавитации, возникающей при введении в жидкость ультразвуковой волны высокой интенсивности [1-6]. Это, прежде всего, технологические процессы кавитационной очистки деталей, диспергирования твердых тел, инактивации в жидкостях вредных для здоровья человека микроорганизмов, фильтрации жидких сред, получения стойких эмульсий, активирования жидкостей, экстрагирования из растительного сырья, получения водоугольного топлива, получения биотоплива и т.д. Современная реализация указанных технологий требует создания на их основе мехатронных систем. Эффективность кавитационных технологий в значительной степени зависит от возможности контроля и поддержания в заданных параметрах как уровня развития кавитации, так и размеров кавитационной области, которые меняются по мере изменения реологических свойств жидкости, что связано, например, с нестабильностью температуры, концентрации примесей, степени загрузки кавитационной камеры, нестабильностью частоты и формы ультразвуковых колебаний и т.д. Оценка параметров кавитационной области может быть осуществлена несколькими основными методами: методом эрозионных тестов, оптическим методом, химическим методом и акустическим методом [5-8]. Например, эрозионный тест очень нагляден, позволяет оценить размеры кавитационной области по ее сечениям, однако применим только в статических экспериментальных исследованиях [7]. Так, при исследовании кавитационной области внутри трубчатого вибратора, возбуждаемого на радиальной моде колебаний, тестовую фольгу размещают вдоль оси вибратора (рис.1).

В зависимости от различных факторов, например, мощности, подведенной к резонансным пьезоэлектрическим приводам, возбуждающим радиальные колебания кавитационной камеры, форма кавитационной области и интенсивность кавитационных процессов существенно меняются (рис.2). Для достижения максимальной эффективности технологического процесса обработки протекающей через камеру жидкости система автоматического регулирования должна поддерживать существование режима, представленного на рис.2б. При таком режиме обеспечивается интенсивная кавитационная обработка потока жидкости и исключается кавитационная эрозия внутренней поверхности кавитационной камеры, благодаря чему обеспечивается долговременный режим работы ультразвукового технологического оборудования.

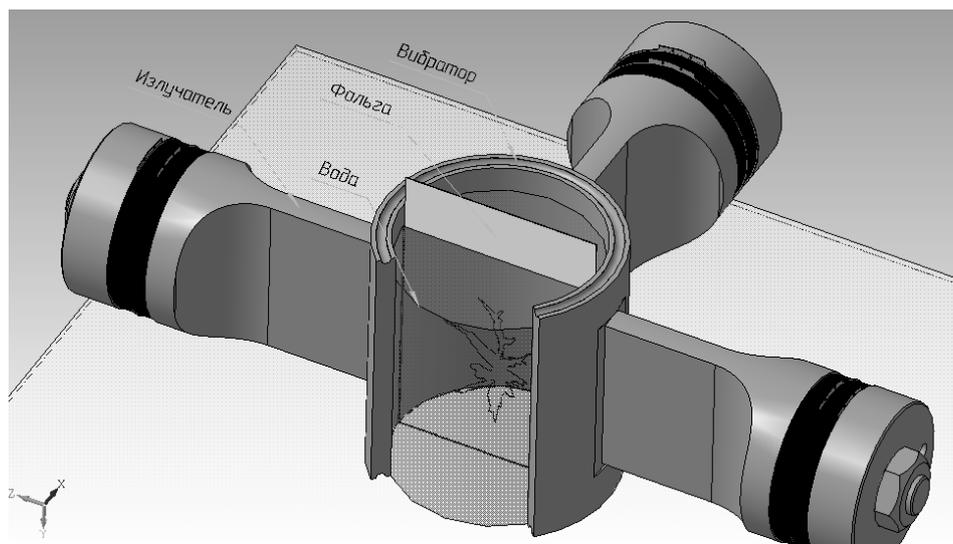


Рис. 1. Схема размещения тестовой фольги в трубчатой кавитационной камере

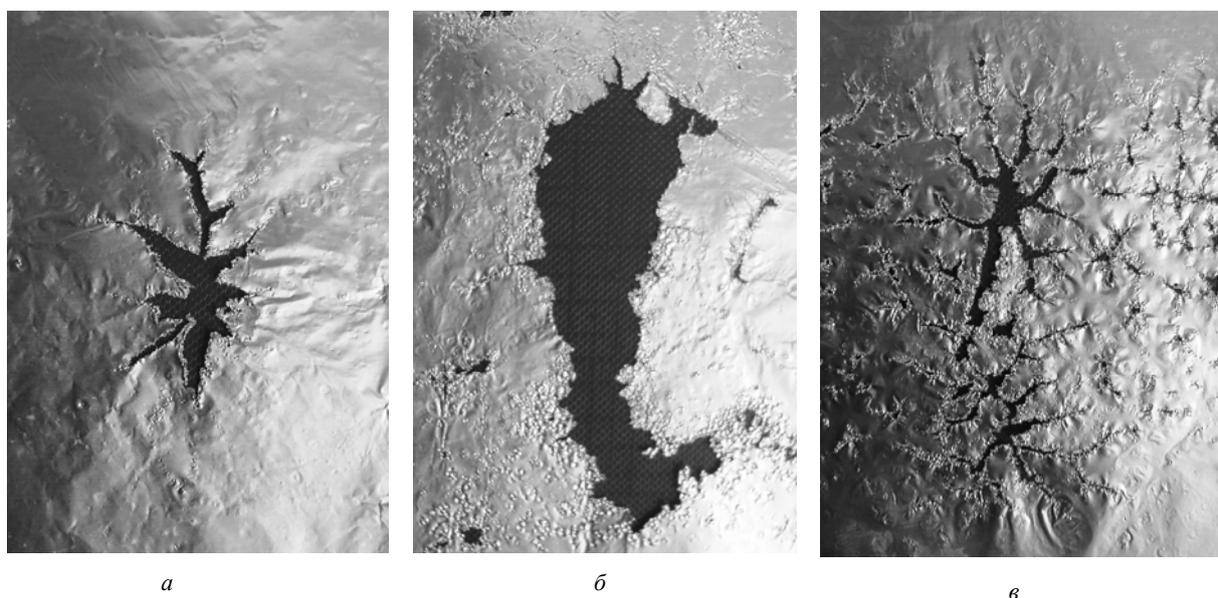


Рис. 2. Эрозионное разрушение контрольных образцов алюминиевой фольги в цилиндрической камере, совершающей радиальные колебания, при различных интенсивностях ультразвука

Однако построение на основе эрозионного метода датчика обратной связи для мехатронной системы весьма затруднительно. Для реализации мехатронной системы необходим быстродействующий датчик обратной связи с электрическим выходом.

Недостатками обладают и другие упомянутые методы контроля, например, акустический метод хоть и позволяет оценить интенсивность кавитационных процессов, однако для получения информации о конфигурации кавитационной области метод требует сканирования ультразвукового поля, что затруднено во многих практических случаях.

Поэтому задача поиска наиболее приемлемого метода определения параметров кавитационной области и построение на его основе датчика обратной связи для мехатронных систем остается весьма актуальной.

Цель

Целью предлагаемой статьи является рассмотрение возможности применения для анализа кавитационной области метода импедансной томографии [9, 10].

Основные теретические положения

Наличие кавитационной двухфазной области в жидкости сопровождается уменьшением плотности жидкости и скорости звука в ней на 30...40%, а это в свою очередь приводит к возрастанию электрического сопротивления жидкости. Изменение сопротивления жидкости во многих практических случаях достаточно легко измеряется аппаратными средствами. При использовании методов импедансной томографии можно не только обнаружить наличие в жидкости кавитационных пузырьков, но и оценить размеры кавитационной области, а также степень развитости кавитации.

Отображение внутренней структуры (сечения) исследуемого объекта в импедансной томографии заключается в измерениях напряжений (передаточных сопротивлений) на электродах по обводу контура сечения (считывание проекций) и в восстановлении по проекциям внутреннего распределения поверхностных проводимостей внутри сечения (фантома). При этом воздействие в виде гармонического тока источника подаётся на пару электродов, на которой измерение напряжений не производится. Таким образом, при использовании импедансной томографии для визуализации внутреннего строения исследуемого объекта необходимо решить две задачи: прямую, т.е. получение проекций (прямая задача или задача анализа — аппаратного или математического) и восстановление (реконструкцию) внутреннего распределения поверхностных сопротивлений (обратная задача или задача синтеза).

При решении обратной задачи существует два подхода: реконструкция методом обратной проекции и привлечение итерационных методов, заключающихся в вычислении такого распределения поверхностных сопротивлений в фантоме, при котором результаты измерений и вычислений проекций будут с заданной точностью совпадать.

Привлекательность метода обратной проекции заключается в его простоте. Так, для его реализации необходимо построить линии равного напряжения при известном (номинальном) распределении поверхностных сопротивлений фантома (например, при распределении равномерном). После этого измеренные передаточные сопротивления между источником тока и двумя измерительными электродами спроецировать на фантом на участке между каждыми двумя, соответствующими этим электродам, линиями равного напряжения (обратная проекция). На том же фантоме, но для разных пар узлов включения источника выполнить обратную проекцию, суммируя значения передаточных сопротивлений в областях пересечения обратных проекций. Видимая простота метода является его кажущимся достоинством, поскольку применение метода обратной проекции часто приводит к неверным результатам. Это объясняется тем, что траектории линий равного напряжения являются нелинейными, а внесение искомой дополнительной неоднородности в фантом очень сильно эти траектории искажает. Пример линий равного напряжения для фантома с равномерным распределением поверхностных проводимостей приведен на рис.3а. На рис.3б приведены линии равного напряжения для фантома с неоднородностью в центре (сопротивление неоднородного участка меньше сопротивления фантома рис.3а), а на рис.3в приведены линии равного напряжения, когда центральная неоднородность имеет большее поверхностное сопротивление. На рис.3г для сравнения приведены линии равного напряжения при двух неоднородностях (в центре фантома и внизу), причем поверхностные сопротивления неоднородностей больше сопротивлений равномерного фантома.

Из рис.3а видно, что даже для равномерного фантома траектории линий равного напряжения являются нелинейными, а для фантомов рис.3б — рис.3г такая нелинейность проявляется во всё большей степени.

Кроме того, следует напомнить, что при использовании метода обратной проекции проецируются не значения поверхностных проводимостей, а значения передаточных сопротивлений.

Поэтому даже при успешной реконструкции взаимные соотношения между неоднородностями будут сильно искажены.

Для решения задачи реконструкции образа с использованием итерационных процедур по измеренным проекциям необходимо математически решать как прямую, так и обратную задачи. При этом для заданного первоначального распределения поверхностных сопротивлений фантома (например, равномерного) следует вычислить напряжения (передаточные сопротивления) на измерительных электродах. Если вычисленные таким образом передаточные сопротивления с разумной точностью совпадают с измеренными, то распределение поверхностных проводимостей фантома соответствует действительности. При решении прямой задачи, как правило, используют метод конечных элементов. Поскольку частоты гармонического тока источника лежат в пределах 50...1000 кГц, наиболее удобным представляется для решения прямой задачи использовать методы теории цепей (в частности, метод модификаций [11 - 13]). При этом каждый квадратный конечный элемент заменяется эквивалентной электрической схемой, которая в случае плоского фантома имеет вид, представленный на рис.4а, а в случае объёмного фантома - схемой рис.4б [14, 15].

В случае, когда вычисленные по фантому и измеренные передаточные сопротивления не совпадают (с заданной погрешностью) Производят коррекцию значений поверхностных проводимостей фантома, для чего составляют систему уравнений:

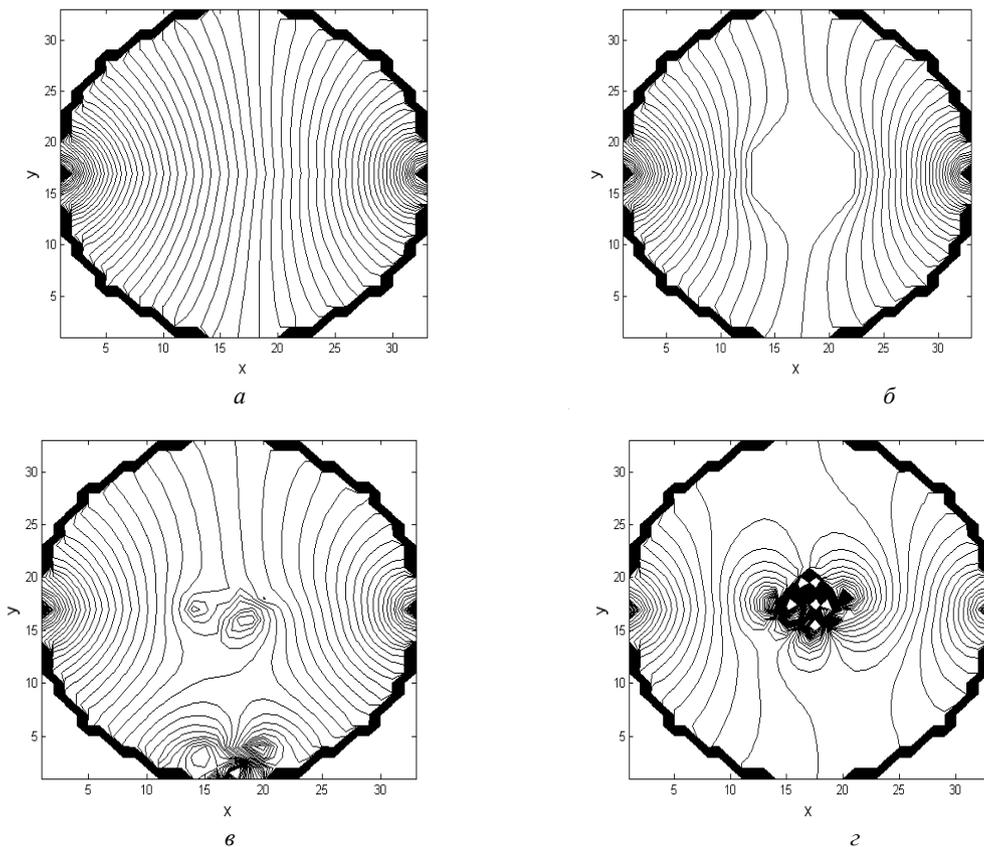


Рис. 3. Картины линий равного напряжения в фантомах

(а - равномерное распределение поверхностных проводимостей; б - наличие центральной неоднородности с меньшим, чем у фантома, поверхностным сопротивлением; в - наличие центральной неоднородности с большим, чем у фантома, поверхностным сопротивлением; г - наличие двух неоднородностей с большим, чем у фантома, поверхностным сопротивлением)

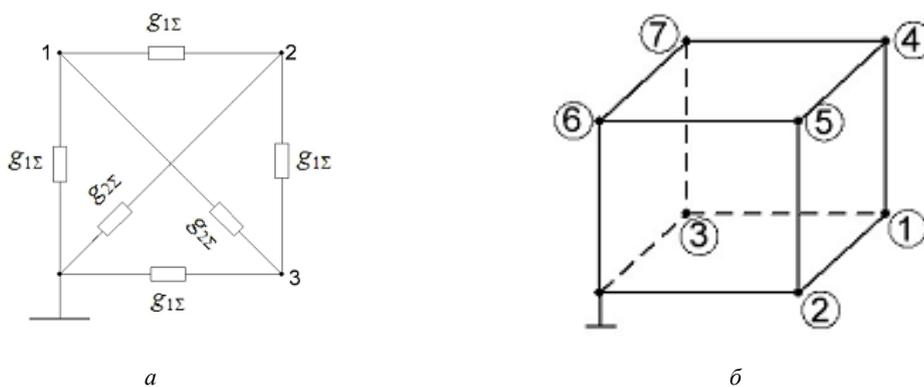


Рис. 4. Эквивалентные электрические схемы для квадратных конечных элементов (а – случай плоского фантома; б – случай объемного фантома)

$$\frac{\partial Z_{nep}^{(1)}}{\partial \sigma_1} \times \Delta \sigma_1 + \dots + \frac{\partial Z_{nep}^{(1)}}{\partial \sigma_M} \times \Delta \sigma_M = -\Delta Z_{nep}^{(1)}$$

.....

$$\frac{\partial Z_{nep}^{(M)}}{\partial \sigma_1} \times \Delta \sigma_1 + \dots + \frac{\partial Z_{nep}^{(M)}}{\partial \sigma_M} \times \Delta \sigma_M = -\Delta Z_{nep}^{(M)}$$

(1)

где $\Delta\sigma_i$ — приращение, корректирующее значение поверхностной проводимости i -го конечного элемента фантома; ∂Z_{nep}^k — разность между измеренным и вычисленным по фантому значением передаточного сопротивления; $\frac{\partial Z_{nep}^k}{\partial \sigma_i}$ — производная от k -го (рассчитанного по фантому) передаточного сопротивления; M — количество конечных элементов в фантоме.

Для вычисления корректирующих приращений необходимо решить систему уравнений (1) и после коррекции поверхностных проводимостей вновь решить прямую задачу. Процедуру повторяют до тех пор, пока погрешности не станут меньшими предварительно заданной погрешности.

Итерационный метод реконструкции даёт истинные значения поверхностных сопротивлений (проводимостей), однако это происходит за счёт усложнения вычислительной процедуры вследствие больших порядков [16] системы (1). Одним из способов уменьшения порядка системы (1) является использование метода «зон проводимости» [17,18], применение которого приводит к уменьшению порядков M без ухудшения геометрической разрешающей способности результата реконструкции. Ниже рассмотрим возможности импедансной томографии для оценки наличия и «степени» кавитации.

Практическая реализация

В качестве примера рассмотрим оценку уровня кавитации в трубчатом вибраторе (рис.1).

Сечение трубы (фантом) представляет собой круг, в центральной части которого при нулевой моде колебаний трубы за счёт кавитации сопротивление жидкости возрастает на 30...40%. Задачей исследования является вычисление зоны с кавитацией и «степени» кавитации (по величине полученных значений поверхностных сопротивлений в зоне кавитации).

В соответствии с методом «зон» проводимости фантом (круг) можно разбить на $N-1$ «зону», где N — количество электродов по обводу фантома. Так, при шести электродах одно из возможных разбиений на зоны представлено на рис.5а, что после перемещения источника тока из узлов (3,0) последовательно в узлы (2,5), (1,4), (0,3), (4,2), (5,1) даст картину наложения «зон», представленную на рис.5б.

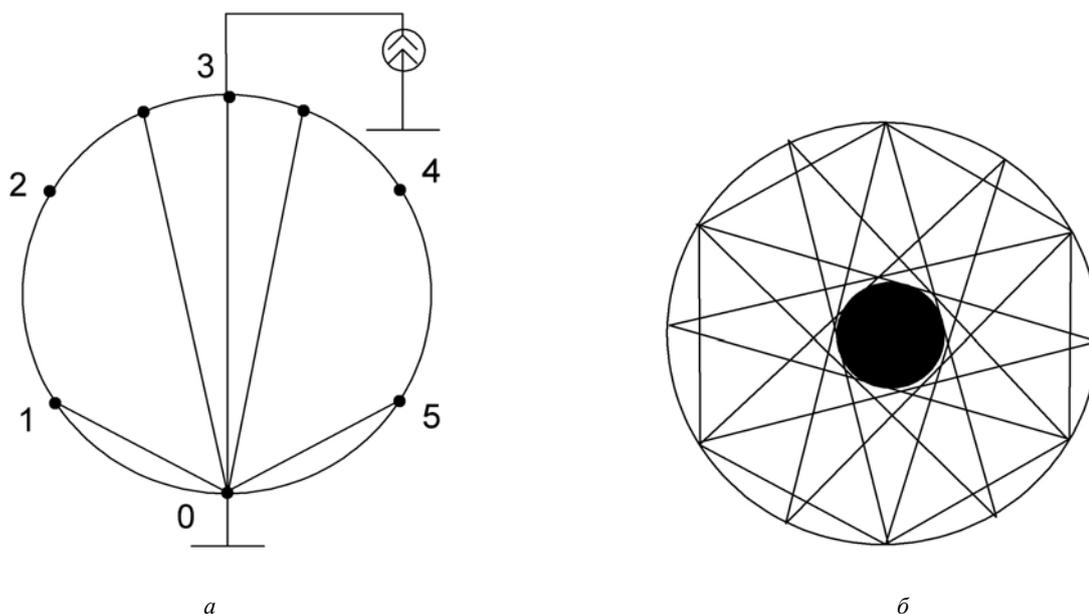


Рис. 5. Вариант схемы разбиения поперечного сечения трубчатого вибратора на зоны при использовании шести электродов (а – вариант разбиения фантома на зоны; б – картина наложения зон при последовательном перемещении источника тока по узлам)

В случае, когда «зоны» проводимости образованы соединением общего узла с электродами (что соответствует секторам обратных проекций при использовании метода обратной проекции), измерения и результаты наложения «зон» приведены на рис.6а и рис.6б для 6 и 16 электродов соответственно.

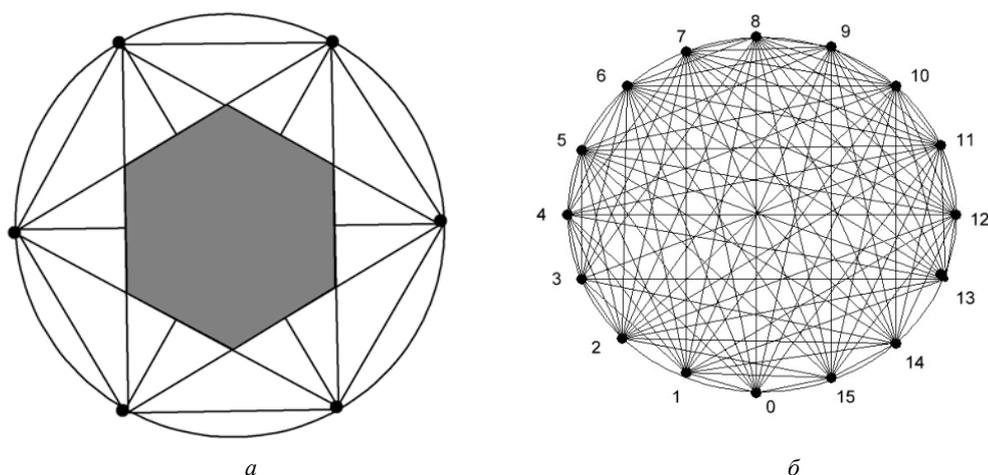


Рис. 6. Варианты разбиения фантома в случае общего узла и различного количества электродов (а – вариант с 6 электродами; б – вариант с 16 электродами)

При шести электродах, в случае использования метода обратной проекции, центральная зона реконструированного неоднородного фантома (зона кавитации) всегда будет иметь (при измерениях, например, «кросс» методом) одинаковую величину, как это показано на рис.6а, в то время как при использовании метода «зон» проводимости (при тех же измерениях) «зоны» могут иметь различную форму и точки излома фигур, образующих такую зону не обязательно должны совпадать с электродами на внешнем обводе контура фантома. Поэтому для метода «зон» проводимости при том же расположении электродов можно получить множество различных по размерам центральных «зон», которые соответствуют области кавитации. Следует также учесть, что ввиду симметрии относительно центра круга (фантома) вычисляемой области кавитации можно произвести измерения только для одного подключения источника тока (например, к узлам (3,0) на рис. 5а). Это позволяет упростить процедуру оценивания.

Алгоритм решения обратной задачи методом «зон проводимостей»

Исходными значениями для решения обратной задачи являются результаты измерения напряжений (передаточных сопротивлений) на измерительных электродах. При вычислениях напряжений на измерительных электродах получаем набор из 6 диаграмм напряжений (передаточных сопротивлений для 4 «зон»). Ввиду симметрии результата реставрации измерения можно выполнить только для одного подключения источника и считать остальные диаграммы равными измеренной (с учетом новой нумерации виртуальных подключений источника). Вычисления следует повторить для всех (различных по форме) «зон» проводимости.

Для решения задачи реконструкции методом «зон» необходимо иметь исходные данные, для чего следует:

- построить обратные матрицы $\overline{\overline{Z}}_{zk}$ для каждой k -й «зоны» отдельно при поверхностной проводимости σ всех «зон» равной 1;

- вычеркнуть все строки и столбцы полученных матриц, номера которых равны номерам «внутренних» узлов, т.е. таких узлов, к которым не подключены электроды и которые не участвуют в объединении подсхем «выращиванием» «коротких замыканий» между узлами разных зон (редукция порядка матриц $\overline{\overline{Z}}_{zkp}$);

- вычислить обратные матрицы для каждой редуцированной зоны $\overline{\overline{Y}}_{kr} = \overline{\overline{Z}}_{zkp}^{-1}$. (Примечание: нумерация узлов в редуцированной матрице $\overline{\overline{Y}}_{kr}$ должна быть не такой, как в матрице $\overline{\overline{Z}}_{zkp}$, а такой как в результирующей матрице $\overline{\overline{Z}}_{\Sigma p}$, образованной «выращиванием» «коротких замыканий» между узлами разных зон);

- для всех диаграмм напряжений считать номером общего («земляного») узла 0 и произвести перенумерацию всех электродов (узлов) в соответствии с нумерацией первого фантома.

Итерационный участок алгоритма имеет следующую последовательность:

- 1 - принять $\gamma = 1$;

- 2 - для поверхностной проводимости $\sigma = 1$ (или для других текущих в итерационной процедуре значений σ_k) матрицы $\overline{\overline{Z}}_{zkp}$ умножить на $\frac{1}{\sigma_k}$;

3 - «вырастить» «короткие замыкания» между объединяемыми узлами отдельных «зон» и получить обратную матрицу всего фантома $\bar{\bar{Z}}_\phi$;

4 - по обратной матрице фантома найти напряжения (передаточные сопротивления). $\bar{\sigma}_k = \Delta\sigma_k + \sigma_k$;

5 - найти погрешность (разность между вычисленными и «измеренными» значениями передаточных сопротивлений)

$$\Delta\bar{Z} = \bar{Z}_{пер.изм} - \bar{Z}_{пер.выч} = \left[\left(\bar{z}_{1пер.изм} - \bar{z}_{1пер.выч} \right) \left(\bar{z}_{2пер.изм} - \bar{z}_{2пер.выч} \right) \dots \left(\bar{z}_{14пер.изм} - \bar{z}_{14пер.выч} \right) \right]^T.$$

6 - посчитать норму погрешности $\|\Delta\bar{Z}\| \leq \varepsilon$, где ε — некоторое наперед заданное «малое» число. Если условие выполняется, то прекратить вычисления и перейти к п.13., иначе идти на п.6;

7 - принять $k=1$;

8 - построить матрицу $Y_{\Sigma k}$ (порядок этой матрицы равен порядку матрицы $\bar{\bar{Z}}_\phi$ в которую записать матрицу $\bar{Y}_{kr} = \bar{\bar{Z}}_{zkr}^{-1}$;

9 - найти произведение $\frac{\partial \bar{\bar{Z}}_\phi}{\partial \sigma_k} = \bar{\bar{Z}}_\phi \times Y_{\Sigma k} \times \bar{\bar{Z}}_\phi$ и по матрице $\frac{\partial \bar{\bar{Z}}_\phi}{\partial \sigma_k}$ найти производные $\frac{\partial z_{1пер.выч}}{\partial \sigma_k}$, $\frac{\partial z_{2пер.выч}}{\partial \sigma_k}$, $\frac{\partial z_{14пер.выч}}{\partial \sigma_k}$;

10 - если $k < 14$, то $k = k + 1$, перейти к п.7, иначе — к п.14;

11 - сформировать систему уравнений

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial z_{1пер.выч}}{\partial \sigma_1} & \frac{\partial z_{1пер.выч}}{\partial \sigma_2} & \dots & \frac{\partial z_{1пер.выч}}{\partial \sigma_{14}} \\ \frac{\partial z_{2пер.выч}}{\partial \sigma_1} & \frac{\partial z_{2пер.выч}}{\partial \sigma_2} & \dots & \frac{\partial z_{2пер.выч}}{\partial \sigma_{14}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial z_{14пер.выч}}{\partial \sigma_1} & \frac{\partial z_{14пер.выч}}{\partial \sigma_2} & \dots & \frac{\partial z_{14пер.выч}}{\partial \sigma_{14}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\sigma_1 \\ \Delta\sigma_2 \\ \dots \\ \Delta\sigma_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (z_{1пер.изм} - z_{1пер.выч}) \\ (z_{2пер.изм} - z_{2пер.выч}) \\ \dots \\ (z_{14пер.изм} - z_{14пер.выч}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \bar{\bar{Z}}_{пер.выч.m}}{\partial \sigma_k} \end{bmatrix} \times [\Delta\sigma_k] = -[\Delta Z_m].$$

12 - найти корректирующие значения $\Delta\sigma_k$:

$$[\Delta\sigma_k] = - \left[\frac{\partial \bar{\bar{Z}}_{пер.выч.m}}{\partial \sigma_k} \right]^{-1} \times [\Delta Z_m];$$

13 - вычислить новые значения поверхностных проводимостей.

Электронный блок томографа

Важнейшим блоком импедансного томографа является его электронная составляющая. В работе [19] предложена структурная и принципиальная схемы импедансного томографа, который позволяет проводить измерения как действительного, так и комплексного передаточного сопротивления по обводу фантома (модуля выходного напряжения и сдвига фаз между этим напряжением и током задающего источника). Это позволяет расширить возможности томографии для диагностики в биологии, медицине и технике. Проведено макетирование прибора, которое подтвердило как саму возможность, так и относительную простоту создания аппаратной части томографа. Опыт эксплуатации макета показал простоту и удовлетворительную (для задачи определения наличия кавитации и её области в сечении сосуда) точность. Трубочная камера для проведения натуральных испытаний изображена на рис.7.

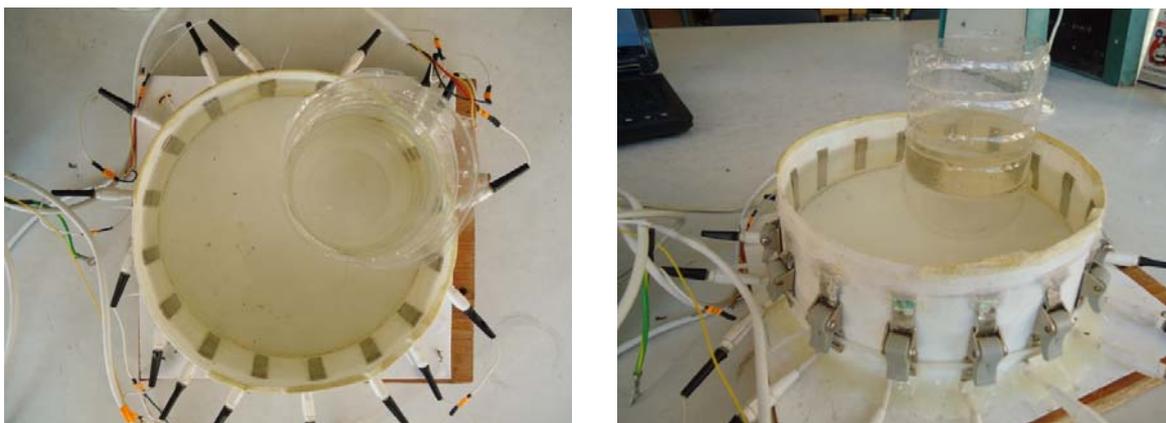


Рис. 7. Экспериментальная модель импедансного томографа

Выводы

Подтверждена возможность визуализации кавитационной области с помощью метода импедансной томографии. Показана схема реализации импедансного томографа для систем мехатроники.

Методы импедансной томографии открывают широкие перспективы для визуализации кавитационных явлений, что во многих случаях позволит повысить эффективность работы гидравлического и ультразвукового оборудования. Использование импедансной томографии позволит создать мехатронные системы, обеспечивающие управление кавитационной областью с целью повышения эффективности кавитационных технологических процессов.

Анотація. В статті запропоновано методику оцінки наявності і степені розвитку кавітації рідини в трубах методами імпедансної томографії. Для реалізації методики використовуються методи реконструкції образу з використанням методу кінцевих елементів та методу «зон» провідності по електричній моделі фантома (томографічного розтину) у вигляді квадратів опорів з двома діагоналями та «зон», які складаються з цих квадратів. Наявність укрупнених «зон» забезпечує радикальне зменшення порядків систем в системах рівнянь ітераційної процедури Ньютона-Рафсона (при збільшенні кількості реконструйованих фантомів). Геометрична роздільна здатність методу реконструкції залишається такою самою, як і для класичного методу кінцевих елементів. При цьому не виникає проблема зумовленості матриці похідних від передаточних опорів по поверхневим провідностям фантома. Вибір форми «зон» провідності визначає точність реконструкції при різному розташуванні неоднорідності усередині фантома.

Ключові слова: кавітація, імпеданс на томографія, реконструкція образу, фантом, метод Ньютона-Рафсона, метод «зон» провідності, похідні від передаточних опорів, зворотна задача, кінцевий елемент, поверхнева провідність.

Abstract. In article is offered the technique of an estimation of presence and development degree cavitations to a liquid in pipes methods of an impedance tomography. For technique realization are used methods of reconstruction of an image with use of a method of final elements and a method of "zones" of conductivity on electric model of the phantom (tomography slice) in the form of squares of resistance with two diagonals and the "zones" consisting of these squares. Presence of the integrated zones provides radical reduction of usages of systems in systems of iterative procedure of Newton-Rafsona (at number increase reconstruction phantoms). Resolution of a method of reconstruction remains same, as well as for classic a method of final elements. The problem of conditionality of a matrix derivative of transfer resistance on surface conductivity of the phantom is thus eliminated. The choice of the form of "zones" of conductivity defines accuracy of reconstruction at a various arrangement of heterogeneity in the phantom.

Keywords: cavitations, impedance tomography, reconstruction of an image, phantom, method of Newton-Rafsona, method of "zones" of conductivity, Derivatives of transfer resistance, the inverse problem, a finite element, on surface conductivity.

1. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А. Ф. Луговской, Н. В. Чухраев. – К.: ВПЦ «Київ. ун-т», 2007. – 244 с.
2. Падалка Е.С. Ультразвук в нефтяной промышленности / Е.С. Падалка – К.: Гос. изд. техн. лит., 1962. - 67с.
3. Келлер О.К. Ультразвуковая очистка / О.К. Келлер, Г.С. Кратыш, Т.Д. Лубяницкий. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд.), 1977. – 184 с.
4. Хмелев В.Н. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве / В.Н. Хмелев., О.В. Попова. // Труды Алт. гос. Техн. Ун-та. им. И.И. Ползунова. – Барнаул.: АлтГТУ, 1997. – 160с.
5. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – М.: Изд. Иностран. Лит., 1956. – 726 с.
6. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в Химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии) / Б.Г. Новицкий. – М.: Химия, 1983. – 192 с.

7. *Луговской А.Ф.* Исследование работы ультразвукового трубчатого кавитатора в режиме радиальных колебаний / А.Ф. Луговской, И.А. Гришко, А.В. Мовчанюк // *Вісник НТУУ»КПІ»*. Машинобудування, Вип. 59, – Київ, 2010, с.285-287
8. *Мовчанюк А.В.* Дослідження можливості вимірювання інтенсивності кавітації методом аналізу спектра акустичного сигналу / А.В. Мовчанюк, А.А. Новосад, В.П. Фесич, А.Ф. Луговской // *Промислова гідраліка і пневматика*, № 2 (28), – Вінниця, 2010, с.33-35.
9. *Brown B.H.* Electrical Impedance Tomography / В.Н. Brown, D.C. Barber // *Clinical Physics and Physiological Measurement*.—1992.—v.13.—Suppl. A, 207p.
10. *Пеккер Я.С.* Электроимпедансная томография / Я.С. Пеккер, К.С. Бразовский, В.Ю. Усов, М.П. Плотников, О.С. Уманский.— Томск: ООО «Издательство научно-технической литературы», – 2004.—190с.
11. *Рыбин А.И.* Решение задач моделирования обращением матрицы методом взаимных производных / А.И. Рыбин // *Радиоэлектроника*. — 1978.—№6.—С.35-47. (Изв. вузов).
12. *Рыбин А.И.* Численно-символьный метод анализа электрических цепей обобщенным методом модификаций / А.И. Рыбин // *Праці Інституту електродинаміки НАН України: Зб. наукових праць*.—2002.—№1(1).—С.26-30.
13. *Коваль Ю.О.* Основы теории кіл: Підручник для ВНЗ. Ч.2 / Ю.О. Коваль, Л.В. Гринченко, І.О. Милютченко, О.І. Рибін / За заг. ред. В.М. Шокала та В.І. Правди.—Харків: ХНУРЕ: Колегіум, 2006.—668с.
14. *Рибина І.О.* Моделювання кінцевого елемента в імпедансній томографії / О.І. Рибина, С.В. Гайдаєнко // *Вісник НТУУ «КПІ»*. Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування.—2010.—№41.—С.19-24.
15. *Рибина І. О.* Моделювання кінцевого елемента для об'ємного фантома в імпедансній томографії / І.О. Рибина // *Вісник НТУУ «КПІ»*. Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2011.—№46.— С.72-84.
16. *Murray T.* Electrical Impedance Computed Tomography Based on a Finite Elements Model / T. Murray, Y. Kagawa // *IEEE Trans. On Biomed. Eng.* —1985.— v.32.— P.177-184.
17. *Рибина І.О.* Розв'язання зворотної задачі імпедансної томографії методами зон провідностей та зворотної проєкції / І.О. Рибина, О.І. Рибін, О.Б. Шарпан // *Вісник НТУУ «КПІ»*. Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2011.— №45.—С.5-18.
18. *Рибина І.О.* Метод променів провідностей та моделювання фантома в імпедансній томографії / Рибина І.О. // *Вісник ЖДТУ*. – 2010. – № 2(53). – С.160 -161.
19. *Гайдаєнко С.В.* Розроблення та макетування імпедансного томографа для вимірювання розподілення комплексних опорів / С.В. Гайдаєнко, А.В. Мовчанюк, О.І. Рибін // *Вісник НТУУ»КПІ»*. Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2011.— №44.— С.148 - 157.

REFERENCES

1. *Lugovskoj A.F., Chuhraev N.V.* Ul'trazvukovaja kavitacija v sovremennyh tehnologijah [Ultrasonic cavitation in modern technology]. Kyiv: VPC «Kiyv. un-t», 2007, 244 p.
2. *Padalka E.S.* Ul'trazvuk v neftjanoj promyshlennosti (Ultrasound in oil industry) Kyiv: Gos. izd. tehn. lit., 1962, 67p.
3. *Keller O.K., Kratysh G.S., Lubjanickij T.D.* Ul'trazvukovaja oчитка [Ultrasonic cleaning] Leningrad: Mashinostroenie (Leningr.otd.), 1977, 184 p.
4. *Hmelev V.N., Popova O.V.* Mnogofunkcional'nye ul'trazvukovye apparaty i ih primenenie v uslovijah malyh proizvodstv, sel'skom i domashnem hozjajstve [Multifunctional ultrasonic devices and their application in small industries, agriculture and household] Trudy Alt. gos. Tehn. Un-ta. im. I.I. Polzunova. Barnaul.: AltGTU, 1997, 160p.
5. *Bergman L.* Ul'trazvuk i ego primenenie v nauke i tehnike [Ultrasound and its application in science and technology] Moscow: Izd. Inostr. Lit., 1956, 726 p.
6. *Novickij B.G.* Primenenie akusticheskikh kolebanij v Himiko-tehnologicheskikh processah (Processy i apparaty himicheskoj i neftjanoj tehnologii) [The use of acoustic oscillations in the chemical-technological processes (Processes and Apparatuses of Chemical and Petroleum Technology)] Moscow: Himija, 1983, 192 p.
7. *Lugovskoj A.F., Grishko I.A., Movchanjuk A.V.* Journal of Mechanical Engineering of NTUU «KPI», 2010, no 59, pp.285-287.
8. *Movchanjuk A.V., Novosad A.A., Fesich V.P., Lugovskoj A.F.* Doslidzhennja mozhlivosti vimirjuvannja intensivnosti kavitacii metodom analizu spektra akustichnogo signal. Promislova gidravlika i pnevmatika, no 2 (28), Vinnitsa, 2010, pp.33-35.
9. *Brown B.H., Barber D.C.* Electrical Impedance Tomography. Clinical Physics and Physiological Measurement. 1992, v.13.—Suppl. A, 207p.
10. *Pekker Ja.S., Brazovskij K.S., Usov V.Ju., Plotnikov M.P., Uman'skij O.S.* Jelektroiimpedansnaja tomografija [Electrical impedance tomography]. Tomsk: ООО «Izdatel'stvo nauchno-tehnicheskoi literatury», 2004, 190p.
11. *Rybin A.I.* BULLETIN of National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” Series RADIOTECHNIQUE RADIOAPPARATUS BUILDING, 1978, no 6, pp.35-47. (Izv. vuzov).
12. *Rybin A.I.* Chislenno-simvol'nyj metod analiza jelektricheskikh cepej obobwennym metodom modifikacij. Praci Institutu elektrodinamiki NAN Ukraina: Zb. naukovih prac' 2002, no 1 (1),pp.26-30.
13. *Koval Ju.O., Grinchenko L.V., Miljutchenko I.O., Ribin O.I.* Osnovi teorij kil: Pidruchnik dlja VNZ. Ch.2 [Basic theory circles: Textbook for High Schools. Part 2] Za zag. red. V.M. Shokala ta V.I. Pravdi.—Kharkov: HNURE: Kolegium, 2006, 668p.
14. *Ribina I.O.* BULLETIN of National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” Series RADIOTECHNIQUE RADIOAPPARATUS BUILDING, 2010, no 41, pp. 19-24.
15. *Ribina I. O.* BULLETIN of National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” Series RADIOTECHNIQUE RADIOAPPARATUS BUILDING, 2011, no 46, pp. 72-84.
16. *Murray T., Y. Kagawa.* Electrical Impedance Computed Tomography Based on a Finite Elements Model. IEEE Trans. On Biomed. Eng. 1985.v.32.pp.177-184.
17. *Ribina I.O., Ribin O.I., Sharpan O.B.* BULLETIN of National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” Series RADIOTECHNIQUE RADIOAPPARATUS BUILDING, 2011, no 45, pp. 5-18.
18. *Ribina I.O.* Metod promeniv providnostej ta modeljuvannja fantoma v impedansnij tomografi. Visnik ZhDTU. 2010, no 2(53). pp.160 -161.
19. *Gajdaenko C.V., Movchanjuk A.V., Ribin O.I.* BULLETIN of National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” Series RADIOTECHNIQUE RADIOAPPARATUS BUILDING, 2010, no 44, pp. 148-157.