

ПРИБОРЫ, ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

УДК 534.23:534.8:62-868.8

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО ТИПА КОНЦЕНТРАТОРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ КОЛЬЦЕВЫХ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Д. А. СТЕПАНЕНКО⁺, В. Т. МИНЧЕНЯ, В. П. ЛУГОВОЙ, И. В. ЛУГОВОЙ

УО «Белорусский национальный технический университет», пр. Независимости, 65, 220013 г. Минск, Беларусь.

В статье приводится теоретическое обоснование возможности применения кольцевых упругих элементов в качестве нового типа концентраторов ультразвуковых колебаний. Преимуществами предлагаемых концентраторов являются простота конструкции и изготовления, малые габаритные размеры и масса. Показано, что кольцевые концентраторы обеспечивают значительные по величине коэффициенты усиления колебаний при большой ширине резонанса. Их резонансная частота может быть согласована с рабочей частотой ультразвукового генератора путем изменения статической нагрузки на связанный с концентратором рабочий инструмент. Использование кольцевых концентраторов также дает возможность реализации виброударных режимов взаимодействия инструмента с технологической нагрузкой.

Введение

Стержневые концентраторы широко используются в ультразвуковой технике и технологии для усиления ультразвуковых колебаний по амплитуде и обычно выполняются в виде стержней переменного сечения с экспоненциальным, катеноидальным, коническим, ступенчатым или ампульно-цилиндрическим профилем продольного сечения, либо профилем, состоящим из нескольких участков различной геометрической формы (составные концентраторы). Традиционно применяемые стержневые концентраторы обладают рядом недостатков:

1. Стержневые концентраторы со сложным профилем продольного сечения, например, экспоненциальные, нетехнологичны в изготовлении.

2. Максимальный коэффициент усиления стержневых концентраторов ограничен отношением N их входного и выходного диаметров. При заданном значении N наибольший коэффициент усиления достигается для концентратора со ступенчатым профилем продольного сечения и составляет N^2 . Получение больших по величине коэффициентов усиления требует применения многоступенчатых концентраторов, состоящих из нескольких последовательно соединенных участков (ступеней) полуволновой длины. При этом ре-

зультатирующий коэффициент усиления определяется как произведение коэффициентов усиления всех ступеней, однако увеличиваются габаритные размеры и масса концентратора.

3. В области низких ультразвуковых частот (20–40 кГц) стержневые концентраторы имеют значительные габаритные размеры, которые определяются половиной длины волны ультразвука, соответствующей их рабочей (резонансной) частоте. Например, для стальных концентраторов при скорости звука в материале концентратора 5200 м/с резонансная длина в указанном диапазоне частот изменяется от 130 до 65 мм.

4. Многие стержневые концентраторы, например, ступенчатый, имеют малую ширину резонанса, что приводит к значительному снижению амплитуды колебаний при взаимодействии концентратора с технологической нагрузкой в результате смещения резонансной кривой. Для стабилизации амплитуды приходится использовать датчики обратной связи, выходной сигнал которых используется для согласования рабочей частоты ультразвукового генератора с зависящей от нагрузки резонансной частотой концентратора. Это приводит к усложнению конструкции ультразвуковой технологической системы.

При проведении теоретических исследований

⁺ Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: stepd@tut.by.

вынужденных колебаний волноводов с кольцевыми рабочими окончаниями для ультразвуковой терапии опухолей [1, 2], а также экспериментальных исследований процесса ультразвуковой прошивки отверстий волноводами с промежуточными кольцевыми упругими элементами [3] установлено, что кольцевые упругие элементы обеспечивают значительное усиление колебаний по амплитуде. В работе приводится теоретическое обоснование возможности применения кольцевых упругих элементов в качестве нового типа концентраторов ультразвуковых колебаний, которые по своим техническим характеристикам превосходят традиционные стержневые концентраторы. Преимуществами кольцевых концентраторов являются простота (технологичность) изготовления, малые габаритные размеры и масса. Кроме того, кольцевые концентраторы обеспечивают значительные по величине коэффициенты усиления колебаний при большой ширине резонанса, а также позволяют осуществлять согласование их резонансной частоты с рабочей частотой ультразвукового генератора путем изменения статической нагрузки на рабочий инструмент. Возможность подстройки резонансной частоты объясняется тем, что, в отличие от стержневых концентраторов, кольцевые концентраторы являются нежесткими элементами, резонансная частота которых зависит от величины их статической деформации, которая определяется величиной статической нагрузки. Так как кольцевой концентратор выполняет функцию упругой связи между рабочим инструментом и ультразвуковым преобразователем, использование кольцевых концентраторов позволяет реализовать виброударный режим взаимодействия инструмента с технологической нагрузкой, который будет характеризоваться наличием низкочастотных составляющих в спектре колебаний инструмента и позволяет усилить влияние ультразвука на протекающие технологические процессы [4].

Конструкция концентраторов и методика их моделирования. Возможные варианты применения промежуточных упругих элементов в качестве концентраторов колебаний в ультразвуковых технологических установках изображены на рис. 1.

Упругий элемент 3 в виде кольца, плоскоооальной пружины или мембранной коробки с закрепленным на нем рабочим инструментом 4, например, иглой для прошивки отверстий, крепится с помощью резьбового соединения к стержневому концентратору 2 ультразвука, который служит для предварительного усиления колебаний, создаваемых с помощью пьезоэлектрического ультразвукового преобразователя 1 типа преобразователя Ланжевена. Возможно использование и других типов упругих элементов, например, неравнотолщинных (эксцентричных) колец, сильфонов и т.п. Во всех случаях экспериментально наблюдается эффект увеличения амплитуды колебаний по сравнению со случаем использования стержневого

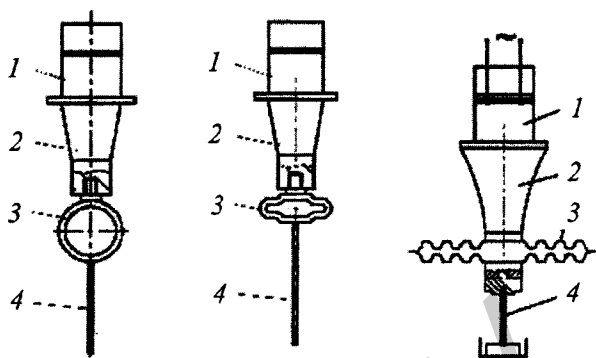


Рис. 1. Ультразвуковые технологические системы с промежуточными упругими элементами: 1 – пьезоэлектрический ультразвуковой преобразователь типа преобразователя Ланжевена; 2 – стержневой концентратор; 3 – упругий элемент; 4 – рабочий инструмент

концентратора, связанного с рабочим инструментом без применения промежуточного упругого элемента. Использование упругих элементов в виде мембранных коробок и сильфонов позволяет управлять резонансными частотами этих элементов за счет изменения давления среды, заполняющей упругий элемент.

С целью теоретического подтверждения эффекта усиления колебаний кольцевыми упругими элементами был проведен гармонический анализ их вынужденных колебаний с помощью метода конечных элементов с использованием программы ANSYS и языка программирования APDL. Исследовали двумерную геометрическую модель концентратора со следующими геометрическими параметрами: внутренний диаметр $d_i = 10...30$ мм, толщина (в радиальном направлении) $h = 0,5...2,5$ мм. Шаг изменения внутреннего диаметра составлял $\Delta d_i = 1$ мм, шаг изменения толщины – $\Delta h = 0,1$ мм. Рассматривали половину геометрической модели концентратора с наложением симметричных граничных условий на узлы, лежащие в плоскости разреза. Для разбиения модели на конечные элементы использовали плоские 4-узловые элементы типа PLANE42 треугольной формы (с двумя совпадающими узлами). При расчете были приняты следующие свойства материала концентратора: модуль упругости $E = 210$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,28$, плотность $\rho = 7800$ кг/м³. Геометрический центр концентратора был совмещен с точкой (0, 0) рабочей системы координат. К узлу с координатами $(-0,5d_i - h, 0)$ (точка крепления кольца к стержневому концентратору) была приложена гармоническая нагрузка в виде перемещения по оси x (ось симметрии) с амплитудой $\xi_0 = 1$ мкм. Коэффициент K усиления колебаний по амплитуде определялся как модуль отношения амплитуды ξ_1 перемещений по оси x узла с координатами $(0,5d_i + h, 0)$ (точка крепления кольца к рабочему инструменту) к амплитуде ξ_0 :

$$K = |\xi_1 / \xi_0|.$$

Частота вынуждающей нагрузки изменялась в диапазоне $f = 20,4 \dots 40$ кГц с шагом $\Delta f = 400$ Гц.

Значения коэффициента усиления сохраняли в виде трехмерного массива (два индекса соответствуют геометрическим параметрам, а третий – частоте) и записывали в текстовый файл.

Полученные данные использовали для исследования влияния геометрических параметров концентратора на ширину резонанса и коэффициент усиления. За оптимальные принимали значения геометрических параметров, обеспечивающие максимальную ширину резонансной кривой $K(f)$ на заданном пороговом уровне коэффициента усиления $K_{\text{пор}}$ (при анализе был принят уровень $K_{\text{пор}} = 10$).

Анализ результатов моделирования. Для графического представления и анализа полученных в результате моделирования данных использовали программу MathCad. Для каждой из анализируемых частот матрица, описывающая зависимость коэффициента усиления от геометрических параметров и представляющая собой плоскость исходного трехмерного массива, представлялась в виде точечного графика в трехмерном пространстве (scatter plot). При этом координаты x и y точек соответствовали номерам строк и столбцов матрицы, то есть определенным значениям геометрических параметров, а координату z определяли по следующему правилу: в случае превышения коэффициентом усиления K порогового значения $K_{\text{пор}}$ координату z принимали равной рассматриваемой частоте, а в противном случае координате z присваивали значение 20 кГц (может быть использовано любое другое произвольное значение, не принадлежащее рассматриваемому диапазону частот). При использовании описанного способа графического представления данных для каждого значения геометрических параметров в пространстве xyz формируются цепочки («кластеры») точек, длина которых в направлении оси z (число точек кластера) соответствует ширине резонанса. Таким образом, задача определения оптимальных значений геометрических параметров сводится к визуальному поиску кластеров максимальной длины. Для осуществления поиска необходимо рассматривать два проекционно-связанных вида графика, один из которых, соответствующий проекции на плоскость, параллельную оси z , используется для определения длины кластеров, а другой, соответствующий проекции на плоскость, перпендикулярную оси z , служит для определения соответствующих кластерам значений геометрических параметров. Ориентация трехмерных графиков в MathCad описывается с помощью углов Эйлера α (rotation – вращение), β (tilt – наклон) и γ (twist – поворот). Угол α соответствует вращению используемой по умолчанию системы координат $x_2y_2z_2$ вокруг оси z , угол β – наклону повернутой системы координат $x_1y_1z_1$ относительно оси y_1 , а угол γ – повороту повернутой и

наклоненной системы координат $x_2y_2z_2$ относительно оси z_2 . Для отображения данных использовали значения $\alpha = 300^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\gamma = 0^\circ$ для первого вида и $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 90^\circ$, $\gamma = 300^\circ$ – для второй проекции. Выбор угла $\alpha = 300^\circ$ для первого вида позволяет избежать объединения нескольких кластеров, соответствующих различным значениям геометрических параметров, что исключает возможность неправильного определения длины кластеров (суммарной длины нескольких пересекающихся кластеров вместо длин индивидуальных кластеров). При других значениях угла α , например, кратных 45° , вероятность пересечения кластеров значительно возрастает. Графическое представление результатов расчета в пространстве (h, d_i, f) приведено на рис. 2.

Кластеру № 1, состоящему из 7 точек, соответствуют геометрические параметры $h = 2,5$ мм, $d_i = 10$ мм. Ширина резонанса при этих значениях параметров составляет 2500 Гц. Кластеру № 2, состоящему из 5 точек, соответствуют геометрические параметры $h = 2$ мм, $d_i = 14$ мм. Ширина резонанса для этих параметров составляет 1600 Гц. Кластеры № 3 и № 4, состоящие из 5 точек, представляют собой результат объединения нескольких кластеров, соответствующих геометрическим параметрам $h = 1$ мм, $d_i = 11$ мм и $h = 2,1$ мм, $d_i = 30$ мм для кластера № 3 и $h = 0,8$ мм, $d_i = 10$ мм и $h = 1,9$ мм, $d_i = 29$ мм для кластера № 4. Ширина резонанса для геометрических параметров $h = 1$ мм, $d_i = 11$ мм и $h = 0,8$ мм, $d_i = 10$ мм составляет 1600 Гц, а для геометрических параметров $h = 2,1$ мм, $d_i = 30$ мм и $h = 1,9$ мм, $d_i = 29$ мм – 700 Гц. При этом кластеры, соответствующие геометрическим параметрам $h = 2,1$ мм, $d_i = 30$ мм и $h = 1,9$ мм, $d_i = 29$ мм, содержатся в кластерах, соответствующих геометрическим параметрам $h = 1$ мм, $d_i = 11$ мм и $h = 0,8$ мм, $d_i = 10$ мм, т.е. представляют собой их подмножества (субкластеры).

Большие значения коэффициента усиления, достигаемые с помощью кольцевых концентраторов, можно объяснить сложением (интерференцией) одновременно возбуждаемых в концентраторе круговых мод изгибных колебаний различных порядков (т.е. собственных форм колебаний с косинусоидальной зависимостью амплитуды колебательных смещений от угловой координаты, под порядком которых понимается число периодов косинусоидальной функции, укладываемых в окружность). Одновременное существование в концентраторе нескольких круговых мод изгибных колебаний различных порядков можно объяснить тем, что зависимость сосредоточенной вынуждающей нагрузки от угловой координаты описывается δ -функцией Дирака, разложение которой в ряд Фурье по угловой координате содержит бесконечное множество гармонических (по угловой координате) составляющих, соответствующих круговым модам различных порядков. В зависимости от частоты

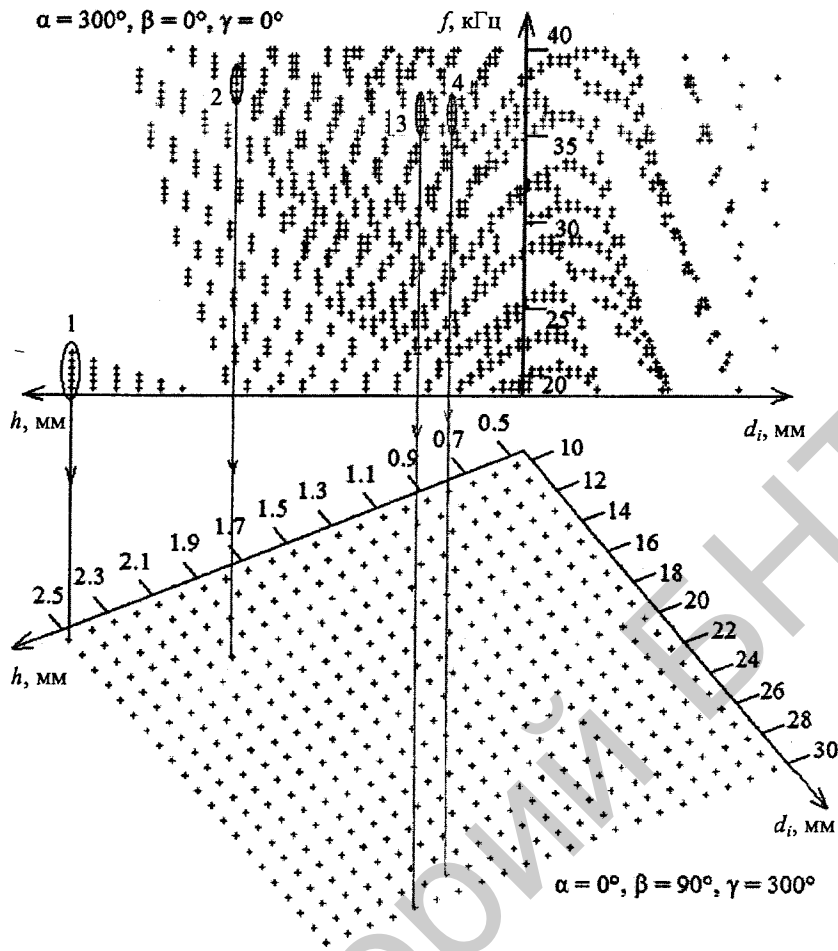


Рис. 2. Графическое представление зависимости ширины резонанса от геометрических параметров концентратора

вынуждающей нагрузки будут доминировать моды определенного порядка. При этом на определенных частотах возбуждаемые в концентраторе моды колебаний будут интерферировать в его входном радиальном сечении деструктивным образом с уменьшением амплитуды колебаний, а в выходном сечении – конструктивным образом с увеличением амплитуды колебаний. В этом случае отношение амплитуд колебаний в выходном и входном сечениях (коэффициент усиления) будет принимать большие по величине значения.

Пример расчетной резонансной кривой кольцевого концентратора приведен на рис. 3.

Резонансная кривая соответствует следующим значениям геометрических параметров: внутренний диаметр $d_i = 38$ мм, толщина $h = 1$ мм. Путем модального анализа концентратора (анализа собственных форм и частот колебаний) установлено, что частоты, на которых наблюдаются максимальные значения коэффициента усиления (пики резонансной кривой), совпадают с собственными частотами, соответствующими жесткому закреплению узлов конечно-элементной модели с координатами $-0,5d_i - h \leq x \leq -0,5d_i$, $y = 0$ (узлы, принадлежащие входному радиальному сечению концентратора, к которому приложена вынуждающая нагрузка). Линейчатый спектр собствен-

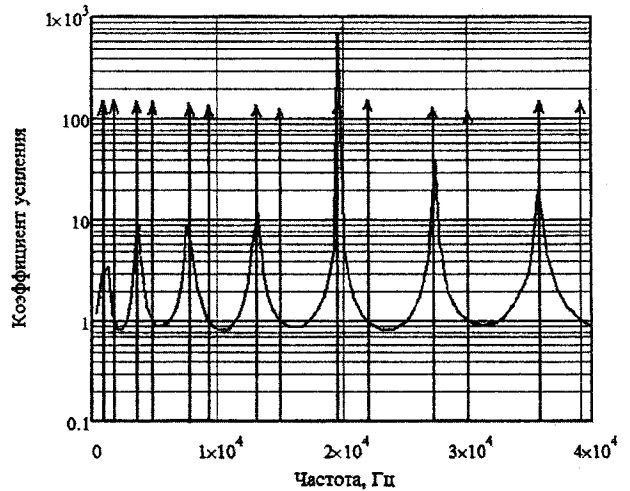


Рис. 3. Резонансная кривая кольцевого концентратора

ных частот колебаний концентратора изображен на рис. 3 в виде совокупности вертикальных линий со стрелками. На собственных частотах, соответствующих жесткому закреплению входного сечения концентратора, во входном сечении находится узел колебательных смещений. В диаметрально противоположном выходном радиальном сечении, к которому крепится рабочий инструмент, находится пучность колебательных смеще-

ний, что в итоге дает бесконечный коэффициент усиления (деление отличной от нуля амплитуды колебаний в пучности на нулевую амплитуду колебаний в узле). При вынужденных колебаниях бесконечное значение коэффициента усиления не реализуется, так как амплитуда колебаний во входном сечении всегда остается постоянной величиной. Она может быть мала по сравнению с амплитудой колебаний выходного сечения, что дает большой по величине коэффициент усиления, но всегда остается отличной от нуля. При этом входное сечение является пучностью колебательных смещений, а амплитуда колебательных смещений в пучностях возрастает по мере возрастания их угловой координаты относительно входного сечения.

На собственных частотах, соответствующих симметричным граничным условиям во входном и выходном сечениях при отсутствии жесткого закрепления входного сечения, распределение амплитуды в пучностях колебательных смещений является равномерным по всей длине окружности, что соответствует единичному коэффициенту усиления. При совпадении частоты вынуждающей нагрузки с этими собственными частотами в концентраторе возникает одна единственная круговая мода колебаний с равными значениями амплитуд во всех пучностях колебательных смещений, включая входное и выходное сечения.

Предложенный тип концентраторов в связи с отмеченными выше преимуществами может найти широкое применение в ультразвуковых аппаратах и системах технологического и медицинского назначения. При этом вследствие большого коэффициента усиления, обеспечиваемого кольцевыми концентраторами, возможно создание ультразвуковых колебательных систем, в которых усиление амплитуды колебаний до требуемого значения будет достигаться без применения стержневых концентраторов, что позволит миниатюризировать и конструктивно упростить колебательную систему. При использовании пьезоэлектрического ультразвукового преобразователя типа преобразователя Ланжевена, в котором рабочая накладка и кольцевой концентратор выполнены в виде единого конструктивного элемента, будут исключены потери энергии и возникновение низкочастотных составляющих колебаний в результате несовершенства крепления концентратора к преобразователю.

Выводы

Таким образом, на основе моделирования с помощью метода конечных элементов теоретически обоснована возможность создания нового типа концентраторов ультразвуковых колебаний, отличающихся применением для усиления колебаний по амплитуде кольцевых упругих элементов и обеспечивающих, по сравнению с традиционными стержневыми концентраторами, упрощение конструкции, повышение технологичности изготовления, снижение габаритных размеров, увеличение коэффициента усиления и ширины резонанса. Благодаря указанным преимуществам предложенные концентраторы могут найти применение в широком спектре ультразвуковых аппаратов и систем, используемых в технике и медицине.

Обозначения

d_i – внутренний диаметр концентратора, мм;
 h – толщина концентратора в радиальном направлении, мм; E – модуль упругости материала концентратора, ГПа; ν – коэффициент Пуассона материала концентратора; ρ – плотность материала концентратора, кг/м³; ξ_0 – амплитуда вынуждающей нагрузки, мкм; ξ_1 – амплитуда колебательных смещений выходного сечения концентратора, мкм; K – коэффициент усиления колебаний по амплитуде; f – частота вынуждающей нагрузки, кГц; $K_{\text{пор}}$ – пороговый уровень коэффициента усиления; α, β, γ – углы Эйлера, град.

Литература

1. Минченя, В.Т. Моделирование ультразвуковых волноводов-инструментов для контроля механических свойств и терапевтического воздействия на биологические ткани / В.Т. Минченя, Д.А. Степаненко, А.И. Бобровская // Приборы и методы измерений. – 2011. – № 2. – С. 77–84.
2. Stepanenko, D.A. Theoretical and experimental studies of combined therapy of tumours with application of ultrasound / D.A. Stepanenko [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2011. – Vol. 1433. – P. 597–602.
3. Луговой, И.В. Динамика колебаний стержня, прикрепленного к упругому элементу / И.В. Луговой, В.П. Луговой // Наука и техника. – 2013. – № 1. – С. 13–18.
4. Артемьев, В.В. Ультразвуковые виброударные процессы / В.В. Артемьев, В.В. Клубович, В.Н. Сакевич. – Мн., 2004. – 258 с.

Stepanenko D. A., Minchenya V. T., Lugovoy V. P., and Lugovoy I. V.

Development and study of novel type of ultrasonic concentrators based on ring-shaped elastic elements.

The article provides theoretical validation of possible application of ring-shaped elastic elements as a new type of ultrasonic concentrators. Preferences of the suggested concentrators consist in simplicity of their design and manufacturing, small dimensions and weight. It is shown that ring-shaped concentrators provide sufficient values of gain and large width of resonance. Their resonant frequency can be matched to the operating frequency of ultrasonic generator by varying static load applied to working tool attached to the concentrator. Application of ring-shaped concentrators also provides possibility of realization of vibroimpact modes of interaction between working tool and technological load.

Поступила в редакцию 24.05.2013.

© Д. А. Степаненко, В. Т. Минченя, В. П. Луговой, И. В. Луговой, 2013.