

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ КОЛЬЦЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Степаненко Д. А.

Белорусский национальный технический университет

Традиционным способом усиления колебаний по амплитуде, используемым в ультразвуковой технике и технологии, является применение стержневых концентраторов, представляющих собой металлические стержни с изменяющейся по длине продольной жесткостью ES , где E – модуль продольной упругости материала стержня, S – площадь поперечного сечения [1]. Изменение жесткости обычно достигается за счет уменьшения площади S в направлении от входного к выходному сечению концентратора. Недостатками стержневых концентраторов являются значительные габаритные размеры и масса, возрастающие с уменьшением рабочей частоты концентратора. В качестве альтернативы стержневых концентраторов могут применяться кольцевые концентраторы, представляющие собой упругие элементы кольцевой формы с изменяющейся по длине окружности изгибной жесткостью EI , где I – осевой момент инерции поперечного сечения [2, 3]. Осевой момент инерции может изменяться за счет эксцентрического взаимного расположения наружной и внутренней цилиндрических поверхностей концентратора, либо за счет придания концентратору клиновидной формы с непараллельным взаимным расположением плоских торцовых поверхностей. Принцип действия кольцевого концентратора основан на преобразовании продольных колебаний связанного с его входным сечением возбудителя в изгибные колебания, происходящие в плоскости кольца, усилении изгибных колебаний по амплитуде и их трансформации обратно в продольные колебания связанного с выходным сечением концентратора рабочего инструмента. Аналогичная схема усиления продольных колебаний по амплитуде была ранее описана в работе [4], однако она является более сложной в реализации с конструктивной и технологической точек зрения. Кольцевые концентраторы имеют более низкие габаритные размеры и массу по сравнению со стержневыми и просты в изготовлении. Недостатком является то, что коэффициент усиления колебаний по амплитуде кольцевыми концентраторами имеет сравнительно низкие значения. Например, для концентратора с радиусом внутренней цилиндрической поверхности 20 мм, радиусом наружной поверхности 22,75 мм и эксцентриситетом 0,75 мм коэффициент усиления изменяется в диапазоне 1,48–1,69 [5]. Повышение коэффициента усиления может быть достигнуто путем увеличения отношения толщин входного и выходного сечений концентратора, однако это приводит к снижению его статической жесткости, что в свою очередь усложняет механическую обработку концентратора. Альтернативным вариантом, рассматриваемым в данной статье, является использование многоступенчатых концентраторов.

В случае стержневых концентраторов для получения больших по величине коэффициентов усиления колебаний по амплитуде обычно используют последовательное соединение нескольких концентраторов [6], однако такое решение не является оптимальным с точки зрения габаритных размеров колебательной системы. В случае кольцевых концентраторов построение многоступенчатой колебательной системы может быть реализовано по принципу «матрешки», то есть путем вложения $(n + 1)$ -й ступени в

n -ю ступень, что позволяет сократить габаритные размеры, но это представляется нерациональным по нескольким причинам:

1. Необходимость согласования собственных частот колебаний ступеней, имеющих неодинаковые геометрические размеры.

2. Сложность отвода усиленных по амплитуде колебаний от внутренней ступени при введении колебаний в наружную ступень концентратора.

3. Необходимость механического соединения ступеней между собой, приводящая к потерям энергии в местах соединения.

Анализ указанных недостатков позволяет сформулировать следующие требования к «идеальному» многоступенчатому кольцевому концентратору:

1. Концентратор должен иметь малые габаритные размеры.

2. Концентратор должен состоять из одинаковых по размерам ступеней.

3. Конструкция концентратора должна обеспечивать возможность всестороннего доступа к любой из его ступеней.

4. Концентратор должен иметь монолитную конструкцию без механических соединений между ступенями.

Примером технического объекта, состоящего из кольцевых сегментов и отвечающего перечисленным выше требованиям, является цилиндрическая прорезная пружина, которая была принята в качестве прототипа для разработки конструкции многоступенчатого кольцевого концентратора, представленной на рисунке 1.

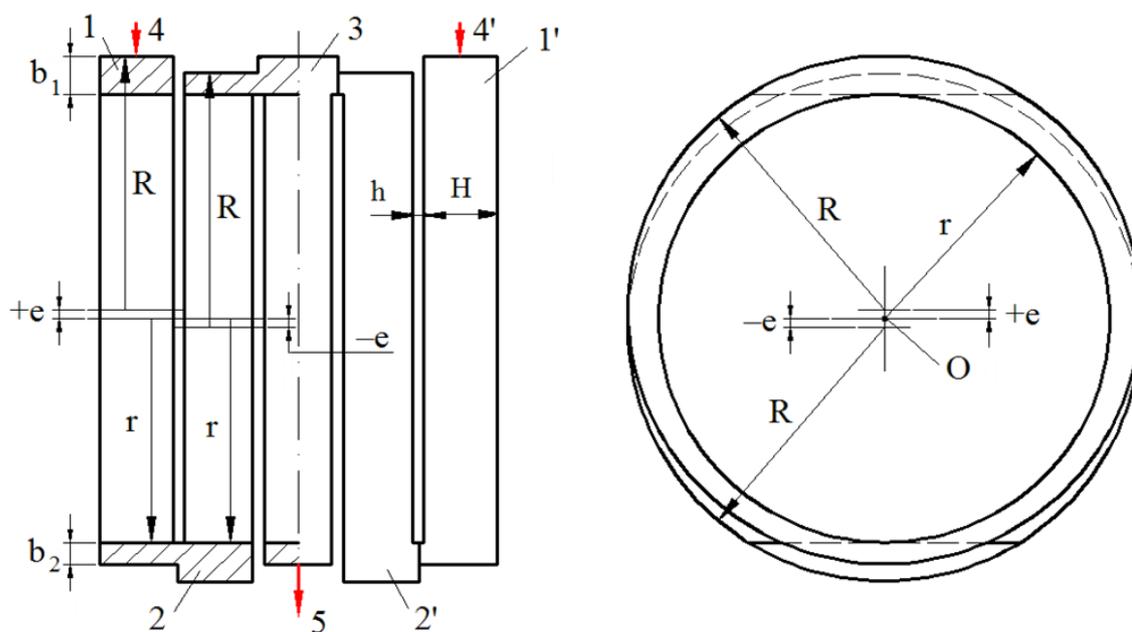


Рис. 1. Конструкция многоступенчатого кольцевого концентратора

В отличие от цилиндрической прорезной пружины, имеющей равнотолщинную стенку, многоступенчатый кольцевой концентратор имеет неравнотолщинную стенку, благодаря чему обеспечивается усиление колебаний по амплитуде. Неравнотолщинность реализуется за счет расположения наружных цилиндрических поверхностей ступеней концентратора, имеющих радиус R , с эксцентриситетом по отношению к внутренней цилиндрической поверхности радиусом r : нечетные ступени 1, 1' и 3 выполняются с положительным эксцентриситетом $+e$, а четные 2 и 2' – с отрицательным эксцентриситетом $-e$. Продольные колебания 4 и 4' вводятся в крайние ступени 1 и 1' концентратора, а усиленные по амплитуде колебания 5 отводятся от центральной ступени.

пени 3. Ступени разделяются между собой пазами, прорезанными таким образом, что участок n -й ступени с наименьшей изгибной жесткостью оказывается связанным с участком $(n + 1)$ -й ступени, имеющим наибольшую изгибную жесткость.

Для компьютерного моделирования многоступенчатых кольцевых концентраторов использовался метод конечных элементов (МКЭ), реализованный с помощью программы Comsol Multiphysics. Рассматривалась геометрическая модель в виде четверти концентратора с наложением симметричных граничных условий на плоскости разреза, выделенные на рисунке 2 заливкой.

Колебательное смещение линии $L1$, принадлежащей входному сечению концентратора, в направлении оси z было задано равным нулю, что имитирует соединение концентратора с источником продольных (по отношению к оси x) колебаний. При моделировании были использованы те же значения геометрических параметров, для которых ранее производился расчет единичной ступени [5]: радиус внутренней поверхности $r = 20$ мм; максимальное и минимальное значения толщины в радиальном направлении $b_1 = 3,5$ мм и $b_2 = 2$ мм; радиус наружной поверхности $R = 22,75$ мм; эксцентриситет $e = 0,75$ мм. Ширина пазов была принята равной $h = 1$ мм, а толщина ступеней в осевом направлении варьировалась в диапазоне $H = 3,5$ – 7 мм.

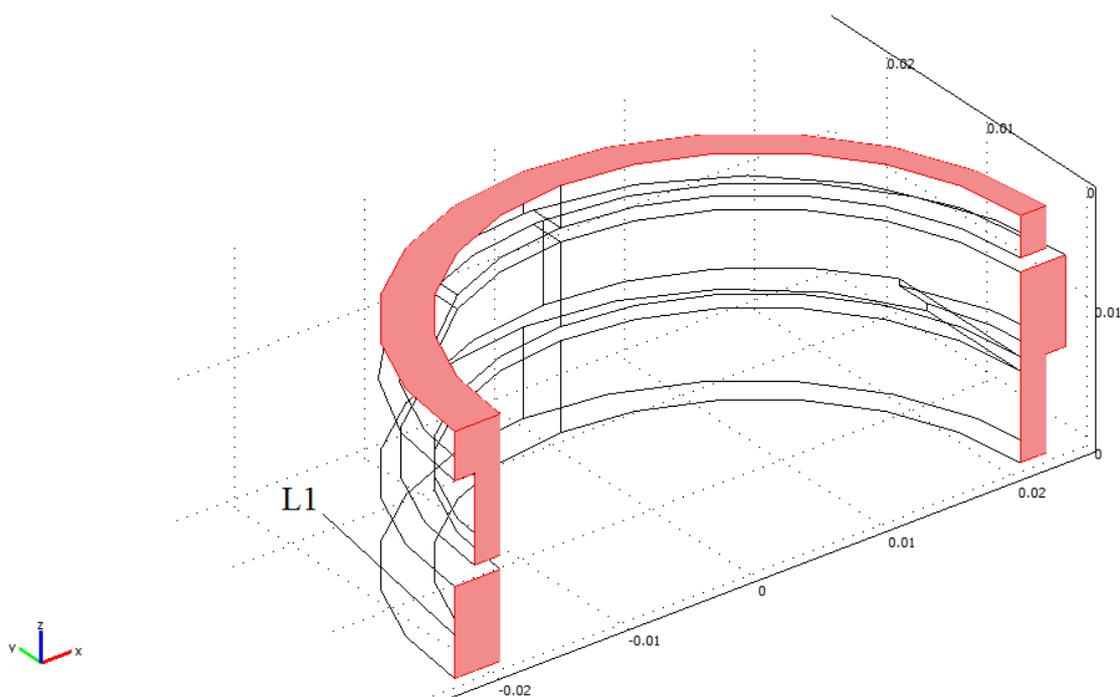


Рис. 2. Геометрическая модель концентратора

На рисунке 3 представлена одна из расчетных собственных форм колебаний многоступенчатого концентратора с толщиной ступени $H = 3,5$ мм, соответствующая частоте 19,9 кГц.

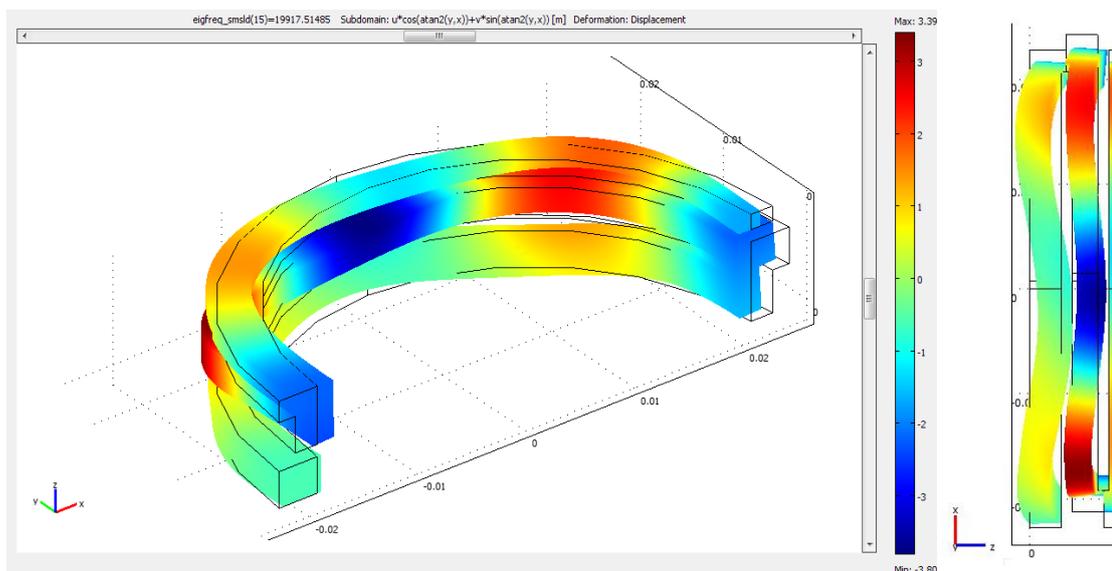


Рис. 3. Расчетная собственная форма колебаний многоступенчатого концентратора с толщиной ступеней 3,5 мм

Расчетная собственная частота 19,92 кГц совпадает с расчетной собственной частотой колебаний единичной ступени. Как видно из проекции на плоскость $x-z$, в ступенях концентратора возникают паразитные внеплоскостные изгибные колебания, ограничивающие амплитуду полезной радиальной составляющей колебательного смещения. Коэффициент усиления составляет $K = 3,17$. Очевидным способом снижения амплитуды паразитных внеплоскостных колебаний является увеличение толщины H ступеней концентратора. В качестве примера на рисунке 4 представлена та же собственная форма колебаний для концентратора с толщиной ступеней $H = 7$ мм.

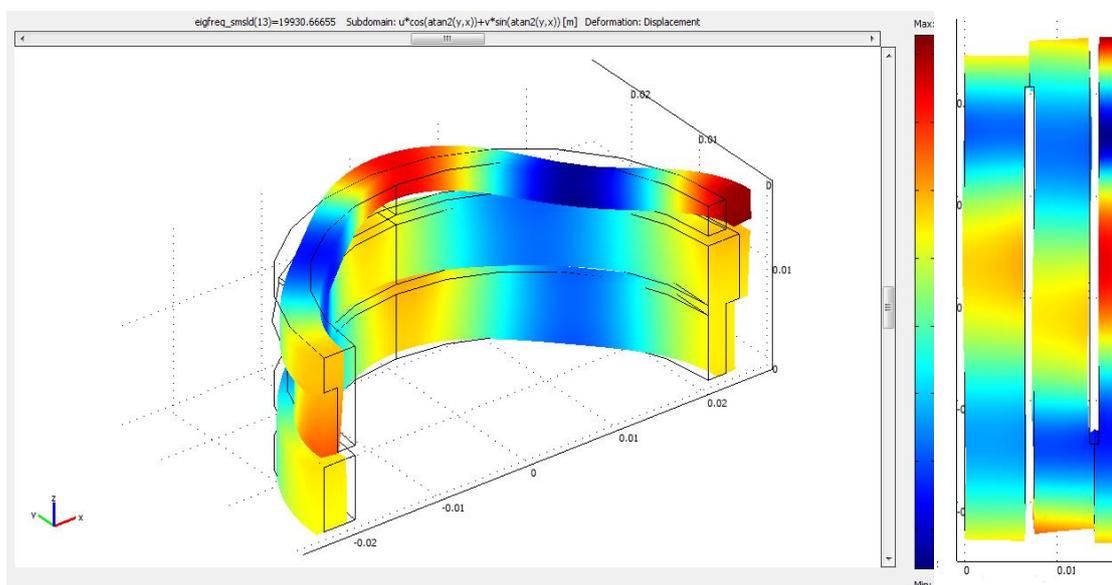


Рис. 4. Расчетная собственная форма колебаний многоступенчатого концентратора с толщиной ступеней 7 мм

Как видно из проекции на плоскость $x-z$, амплитуда паразитных внеплоскостных колебаний значительно снижается. Коэффициент усиления возрастает при этом до величины $K = 3,22$ при максимальном теоретически возможном значении $K_{\max} = K_1^3 = 3,76$, где $K_1 = 1,56$ – расчетный коэффициент усиления для единичной ступени. Собственная частота колебаний 19,93 кГц практически не изменяется по сравнению с собственной частотой колебаний концентратора с толщиной ступеней 3,5 мм, составляющей 19,92 кГц.

На основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Моделирование с помощью МКЭ показывает, что применение многоступенчатых кольцевых концентраторов позволяет повысить коэффициент усиления колебаний по амплитуде по сравнению с коэффициентом усиления для единичной ступени при сохранении малых габаритных размеров колебательной системы.

2. Наиболее рациональным является конструктивное исполнение многоступенчатых кольцевых концентраторов, основанное на использовании в качестве прототипа цилиндрической прорезной пружины. Такой концентратор имеет монолитную конструкцию, состоящую из ступеней с одинаковыми геометрическими параметрами и обеспечивающую возможность всестороннего доступа к каждой из ступеней.

3. Изменение толщины ступеней концентратора практически не влияет на собственную частоту его изгибных колебаний, однако при увеличении толщины снижается амплитуда паразитных внеплоскостных колебаний, что позволяет повысить коэффициент усиления колебаний по амплитуде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ultrasonics: Data, Equations and their Practical Uses / Ed. by D. Ensminger and F. V. Stulen. – Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009. – 496 p.

2. Луговой, И. В. Разработка кольцевых концентраторов с переменной жесткостью для ультразвукового прошивания отверстий в хрупких материалах: автореф. дисс. канд. техн. наук / И. В. Луговой. – Мн., 2017. – 27 с.

3. Степаненко, Д. А. Расчет и проектирование ультразвуковых акустических систем для использования в медицине и технике: дисс. д-ра техн. наук / Д. А. Степаненко. – Мн., 2020. – 323 с.

4. Iula, A. A high displacement ultrasonic actuator based on a flexural mechanical amplifier / A. Iula [et al.] // Sensors and Actuators A. – 2006. – Vol. 125. – P. 118–123.

5. Степаненко, Д. А. Применение метода гармонического баланса для расчета и проектирования кольцевых усилителей упругих колебаний / Д. А. Степаненко, К. А. Бунчук, В. И. Жуков, А. С. Роговцова // Приборостроение – 2021: материалы Четырнадцатой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–19 ноября 2021 г. / Редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Мн., 2021. – С. 343–344.

6. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И. П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.

Поступила: 30.01.2022