

Проектирование Пьезоэлектрических Ультразвуковых Колебательных Систем

Владимир Н.Хмелев, Сергей С. Хмелев, Ксения А. Карзакова, Галина А. Боброва

Центр ультразвуковых технологий, Бийск, Россия

Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета и. И.И. Ползунова, Бийск, Россия

Аннотация – Статья посвящена анализу влияния конструктивных особенностей пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем на точность расчета резонансной частоты. Проведенные при помощи метода конечных элементов исследования и сравнение этих результатов с практическими измерениями резонансной частоты показали необходимость учета влияния резьбовых соединений, соединительных шпилек и плавных переходов при расчете узлов колебательных систем, состоящих из последовательно установленных и акустически связанных пьезоэлектрического преобразователя, концентратора и рабочих инструментов. Полученные данные позволяют сократить временные и экономические затраты на разработку и проектирование составных элементов пьезоэлектрических систем.

Ключевые слова - Инженерный расчет, метод конечных элементов, ультразвуковая колебательная система

I. ВВЕДЕНИЕ

В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ большое распространение получили ультразвуковые технологии, реализуемые в различных отраслях промышленности при помощи специализированных аппаратов.

В состав ультразвукового технологического аппарата входят источник энергии (генератор электрических колебаний) и ультразвуковая колебательная система.

УЗ колебательная система состоит из преобразователя, согласующего элемента и рабочего излучающего инструмента. В преобразователе (активном элементе) колебательной системы происходит преобразование энергии электрических колебаний в энергию упругих колебаний ультразвуковой частоты, и создается знакопеременная механическая сила.

Согласующий элемент системы (пассивный концентратор) осуществляет трансформацию скоростей и обеспечивает согласование внешней нагрузки и активного внутреннего элемента.

Рабочий инструмент создает ультразвуковое поле в обрабатываемом объекте или непосредственно воздействует на него.

Внешний вид типичной ультразвуковой колебательной системы показан на Рис.1.

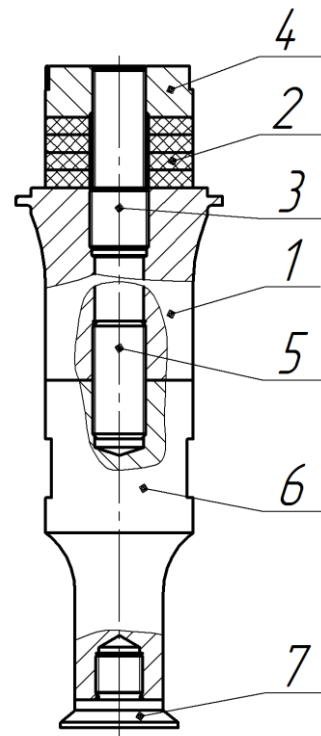


Рис. 1. Внешний вид УЗКС

Она состоит из излучающей накладки – 1, пьезоэлектрических элементов – 2, шпильки преобразователя – 3, отражающей накладки – 4, соединительной шпильки – 5, концентратора – 6, рабочего инструмента – 7.

При этом в колебательной системе всегда имеются резьбовые соединения, обеспечивающие акустическую и механическую связь её элементов. Важнейшей характеристикой УЗ колебательных систем является резонансная частота. Обусловлено это тем, что эффективность технологических процессов определяется амплитудой колебаний (значений колебательных смещений), а максимальные значения амплитуд достигаются при возбуждении УЗ колебательной системы на резонансной частоте. При этом значения резонансных частот отдельных составляющих должны совпадать, а всей УЗ колебательной системы должны быть в пределах разрешенных диапазонов (для УЗ аппаратов это частоты соответствуют 18, 22, 44 кГц).

Предварительный расчет всех узлов УЗКС ведется по методикам инженерного расчета, предложенных в работах [1–3]. В результате последовательного выполнения всех этапов расчета определяются основные конструктивные размеры элементов колебательной системы в зависимости от заданной резонансной частоты и мощности ультразвукового воздействия.

Для более точного расчета пользуются прямыми численными методами. Лидирующее положение среди численных методов, применяемых при расчете составных пьезоэлектрических преобразователей, занимает метод конечных элементов (МКЭ) [4].

При этом, по результатам расчета с использованием МКЭ можно внести необходимые корректировки в методики инженерного расчета для более точного задания размеров элементов УЗКС при их производстве. Однако, даже применение МКЭ не позволяет достичь необходимой точности расчетов, когда рассчитанные и изготовленные элементы УЗКС будут иметь одинаковую (в пределах допустимой для согласования ошибки ± 100 Гц), расчетную резонансную частоту.

Это связано с тем, что при расчете МКЭ возникает несколько достаточно сложных моментов, влияющих на точность расчета:

- наличие резьбовых соединений на границах элементов;
- использование в реальном производстве переходов между цилиндрическими участками, отличающихся по форме от тех, что используются в методиках инженерного расчета.

Таким образом, целью работы является выявление особенностей расчета методом конечных элементов составных узлов УЗКС с резьбовыми соединениями и на основе их анализа введение необходимых поправок в методики инженерного расчета.

II. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Из-за наличия резьбовых соединений на границах элементов была поставлена задача нахождения оптимального значения размеров этих составляющих при расчете МКЭ, дающих наименьшую погрешность.

Расчет методом МКЭ был произведен для пьезоэлектрического преобразователя с четырьмя пьезокерамическими элементами и имеющий резьбовое соединение М18х1,5 для соединения с другими элементами колебательной системы. Для целей моделирования необходимо, чтобы соединительная шпилька 5 (см. Рис.1) не выступала за излучающую накладку 1, чем достигается кратность пьезоэлектрического преобразователя полдлины волны. Внешний вид модели пьезоэлектрического преобразователя представлен на Рис.2.

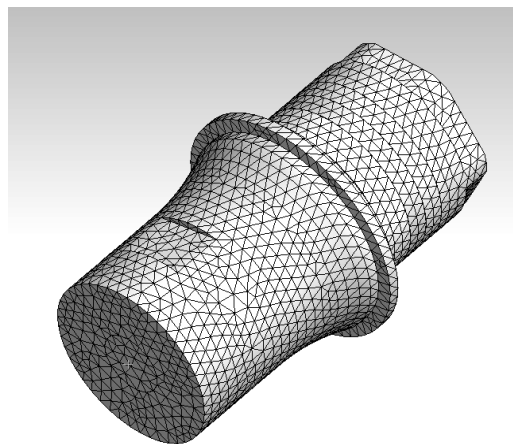


Рис. 2. Внешний вид модели пьезоэлектрического преобразователя

Максимальное значение диаметра укороченной шпильки было принято равным 18 мм, что соответствует максимальному диаметру соединительной резьбы. Минимальное значение диаметра шпильки было принято равным 16,5 мм, что соответствует минимальному диаметру резьбы. Значение диаметра менялось с шагом равным 0,5 мм. Расчет был произведен при помощи метода конечных элементов. Количество элементов в каждом расчете принималось одинаковым, и составляло 6000 ± 100 .

В качестве материала шпильки был выбран титановый сплав. Расчеты представлены в Табл. I.

ТАБЛИЦА I
 РАСЧЕТ ЧАСТОТЫ СОСТАВНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Диаметр укороченной шпильки, мм	Частота, Гц
16.5	19052
17	19044
17.5	19020
18	18530

Аналогично были произведены расчеты частот составного пьезоэлектрического преобразователя с шпилькой из стали. Расчеты представлены в Табл. II.

ТАБЛИЦА II
 РАСЧЕТ ЧАСТОТЫ СОСТАВНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СО ШПИЛЬКОЙ ИЗ СТАЛИ

Диаметр укороченной шпильки, мм	Частота, Гц
16.5	18879
17	18835
17.5	18796
18	18750

Для выявления правильных значений были проведены сравнения результатов значений частоты, полученных при помощи расчета МКЭ и значений собственных резонансных частот, измеренных на изготовленных и собранных пьезоэлектрических преобразователях.

Для измерения значений собственных резонансных частот была взята выборка из 10 изготовленных и собранных пьезоэлектрических преобразователей. Измерение собственной резонансной частоты производили при помощи пьезоэлек-

трического приемного преобразователя с сухим точечным контактом, подключенного к осциллографу, при питании пьезоэлектрического преобразователя от низковольтного генератора. Резонансная частота определялась по максимальному значению амплитуды колебаний, наблюдаемого на экране осциллографа.

По результатам измерений, значения резонансной частоты пьезоэлектрических преобразователей составили 19070 ± 90 Гц для преобразователей с титановой шпилькой и 18950 ± 80 Гц для преобразователей со стальной шпилькой. Разница по частоте между преобразователями объясняется наличием погрешностей при изготовлении отдельных составных частей пьезоэлектрического преобразователя.

Как следует из сравнения результатов расчета МКЭ с результатами измерений, минимальная разница между значениями резонансной частоты получены при диаметре шпильки, равной минимальному диаметру резьбы.

По полученным результатам можно сделать вывод, что при расчете МКЭ узлов УЗКС, содержащих резьбовые соединения, отверстия под резьбу в модели должны быть заглушены шпилькой, не выходящей за габариты звена, и шпилька должна быть взята диаметром, равным минимальному диаметру резьбы.

III. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ НА ПАРАМЕТРЫ КОНЦЕНТРАТОРОВ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Концентраторы ультразвуковых колебаний являются обязательной частью колебательных систем в различных ультразвуковых установках. Их основное назначение – увеличение амплитуды смещений ультразвуковых колебаний, получаемых с помощью преобразователей. В работе [5] было показано, что более совершенными конструктивными формами обладают составные концентраторы. Особенно перспективными из них являются ступенчатые концентраторы с плавными переходами (например, переходным экспоненциальным или радиальным участком).

Общий вид составного ступенчато-радиального концентратора представлен на Рис.3.

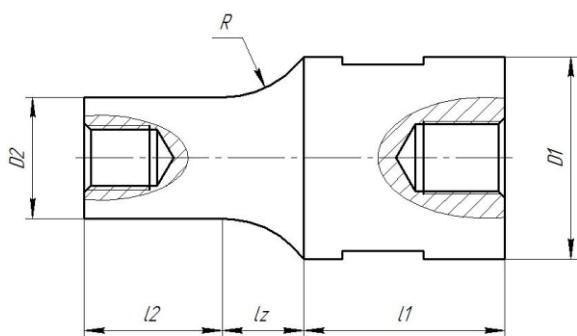


Рис. 3. Общий вид составного ступенчато-радиального концентратора

Для расчета ступенчатых концентраторов Носковым Н.С. [5] была предложена методика расчета с использованием графических зависимостей и номограмм, которая основывается на следующих расчетных формулах:

$$l_1 = l_2 = \frac{c}{2\pi f} n_1 \quad (1)$$

$$l_z = \frac{c}{2\pi f} \ln N \quad (2)$$

$$N = \frac{D1}{D2} \quad (3)$$

$$D_z = D_1 e^{-\beta z}$$

$$\beta = \frac{\ln N}{l_z}$$

В расчетах принималась скорость распространения УЗ колебаний, равной $c=4950$ м/с (для титанового сплава), расчетная резонансная частота равной $f=22000$ Гц.

Методика расчета использовалась для построения твердотельных моделей, которые затем рассчитывались методом конечных элементов. В одном эксперименте экспоненциальный переход строился при помощи формулы 3, в другом экспоненциальный переход заменялся радиальным. Для резьбовых соединений применялись подходы и значения полученные выше.

Полученные значения приведены в Табл. III.

ТАБЛИЦА III
 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ И РАДИАЛЬНОЙ ФОРМЕ ПЕРЕХОДОВ

Отношение диаметров	Частота (экспоненциальная форма, кГц)	Частота (радиальная форма, кГц)
1,5	21939	21105
1,7	21864	21096
2	21813	20863
2,5	21815	20584

Из полученных данным можно сделать вывод о том, что экспоненциальная форма перехода дает результаты расчета резонансной частоты, близкие к расчетам по формулам. Ошибка в расчетах обуславливается тем, что при построении твердотельной модели экспоненциальный переход брался с некоторым приближением к истинной форме.

При использовании радиальной формы перехода ошибка расчета составляет около 900 Гц и растет по мере увеличения коэффициента усиления.

Однако на практике, при достаточно большой номенклатуре используемых концентраторов, использование переходного экспоненциального участка требует больших производственных затрат за счет необходимости точного изготовления профиля перехода. Поэтому, при решении различных производственных задач использование экспоненциальных переходов считается необоснованным.

Таким образом, целесообразным является отказ от экспоненциальной формы перехода в пользу радиального перехода. Для этого, на основе анализа модельных данных необходимо внести соответствующие поправки в виде коэффициентов в методику расчета концентраторов с экспоненциальным переходом.

Для решения данной проблемы были проведены исследования по поиску требуемых коэффициентов к размерам l_1 и l_2 для каждого из коэффициентов усиления. Размер l_z оставляли без изменений, поскольку его изменение влияет на коэффициент усиления.

ТАБЛИЦА IV
 РАСЧЕТ ЧАСТОТЫ ПРИ РАДИАЛЬНОЙ ФОРМЕ ПЕРЕХОДА

Отношение диаметров	Коэффициент	Частота (радиальная форма, кГц)
1,5	0,993	22017
1,7	0,926	22000
2	0,916	22009
2,5	0,898	21902

Формула с поправочным коэффициентом будет иметь вид:

$$l_1 = l_2 = \frac{c}{2\pi f} n_1 * k \quad (4)$$

где, k – поправочный коэффициент.

По полученной формуле (4) для разных коэффициентов усиления были изготовлены опытные партии концентраторов из титанового сплава. Измерения собственной резонансной частоты проводились с помощью пьезоэлектрического приемного преобразователя с сухим точечным контактом при присоединении концентратора к пьезоэлектрическому преобразователю.

Результаты измерений приведены в Табл. V.

ТАБЛИЦА V
 ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ КОНЦЕНТРАТОРОВ

Отношение диаметров	Резонансная частота Преобразователь+концентратор
1,5	21950
1,7	21980
2	22060
2,5	21895

Внешний вид концентраторов с радиальным переходом, разработанных при помощи доработанной методики инженерного расчета приведены на Рис.4.



Рис.4. Внешний вид концентраторов с радиальным переходом

Погрешность между расчетами МКЭ и опытными результатами обуславливается различием между задаваемой и реальной скоростью распространения колебаний в материале и погрешностью при изготовлении концентраторов.

Таким образом, можно сделать вывод, что при разработке концентраторов ультразвуковых колебаний с радиальным переходом для расчета можно использовать существующую методику для экспоненциального перехода, применяя полученные поправочные коэффициенты.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований было выявлено влияние конструктивных особенностей соединительных элементов и формы переходного участка концентратора на резонансные характеристики составных узлов УЗ колебательных систем и введены необходимые поправки в этапы инженерного расчета.

При расчете МКЭ элементов УЗКС, содержащих резьбовые соединения выявлено, что для более точного расчета необходимо диаметр соединительной шпильки брать равным внутреннему диаметру резьбы.

При исследовании концентраторов с радиальным переходом были получены необходимые поправочные коэффициенты для методики расчета концентраторов с экспоненциальным переходом.

Проведенная работа позволила получить требуемые значения по частоте изготавливаемых элементов УЗКС, что значительно сократило временные и экономические затраты на разработку и подгонку составных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Китайгородский, Ю.И. Инженерный расчет ультразвуковых колебательных систем [Текст] / Ю.И.Китайгородский, Д.Я. Яхимович. – М.:Машиностроение, 1982. – 56 с.
- [2] Казанцев, В.Ф. Расчет ультразвуковых преобразователей для технологических установок [Текст] / В.Ф. Казанцев. – М.: Машиностроение, 1980. – 44 с.
- [3] Гальперина, А.Н. К конструктивному расчету пакетных пьезокерамических преобразователей [Текст] / А.Н. Гальперина // Промышленное применение токов высокой частоты: сб. трудов ВНИИТВЧ. – 1966. – №7. – с. 197-216.
- [4] Наседкин, А.В. К расчету по МКЭ пьезопреобразователей, нагруженных на акустическую среду [Текст] / А.В. Наседкин [и др.] // Известия ТрГУ. – 1988. – №4(10). – с. 144-147.
- [5] Меркулов, Л.Г. Теория и расчет составных концентраторов [Текст] / Л.Г. Меркулов, А.В. Харитонов // «Акустический журнал», 1959, т.5, №2.