

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

```
WismoStart:
:
:
WISMOTurnON();           //процедура включения модуля

:
:
if( GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_12)== TRUE ) //анализ состояния модема(включен/выключен)
{
:
:
// цикл запуска TCP/IP стека
while (status== false)
{
:
:
SendAT(START_IP);      // отправка команды включения TCP/IP стека
:
:
delay(1000);
:
:
status = CheckResponse (OK); // проверка ответа от модуля
:
:
if (GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_12)!= TRUE) //анализ состояния модема(включен/выключен)
{
:
:
WISMOTurnOFF();       // программное выключение модуля
:
:
goto WismoStart;     // переход на метку запуска модуля
:
:
}
:
:
}
```

Рисунок 3 - Пример программного кода для управляющего микроконтроллера.

изготовлению мобильного многофункционального аппаратно - программного комплекса длительного кардиомониторирования и эргометрии" по постановлению правительства №218 от 09.04.2010 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мир беспроводных решений [Электронный ресурс] /Режим доступа: <http://www.wless.ru/> (дата обращения: 18.02.2013).
2. SIMCom Wireless Solutions Co., Ltd [Электронный ресурс]/ Режим доступа: <http://wm.sim.com/producten.aspx?id=1019> (дата обращения: 18.02.2013).
3. Sierra Wireless [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.sierrawireless.com/en/productsandservices/AirPrime/Wireless_Modules/Compact/WISMO228.aspx (дата обращения: 18.02.2013).
4. Sierra Wireless[Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.sierrawireless.com/en/productsandservices/AirPrime/Wireless_Modules/Integrated/WMP150.aspx (дата обращения: 18.02.2013).

Инженер Бурняшов А.Р. тел. 8 (8634) 311-143, albrbum@gmail.com - Научно-технический центр "Техноцентр" ФГАОУ ВПО Южный федеральный университет

УДК: 534.6

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, К.А. Карзакова, Г.А. Боброва

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 финансовые затраты на разработку и проектирование составных элементов пьезоэлектрических систем.

Ключевые слова: инженерный расчет, метод конечных элементов, ультразвуковая колебательная система.

Введение

В настоящее время большое распространение получили ультразвуковые технологии, реализуемые в различных отраслях про-

мышленности при помощи специализированных аппаратов.

В состав ультразвукового технологического аппарата входят источник энергии (ге-

РАЗДЕЛ 3. КОМПОНЕНТЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

нератор электрических колебаний) и ультразвуковая (УЗ) 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 УЗ колебательной системы (УЗКС) показан на рисунке 1.

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

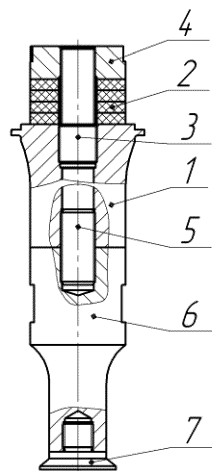


Рисунок 1 – Внешний вид УЗКС

При этом в колебательной системе всегда имеются резьбовые соединения, обеспечивающие акустическую и механическую связь её элементов. Важнейшей характеристикой УЗКС является резонансная частота. Обусловлено это тем, что эффективность технологических процессов определяется амплитудой колебаний (значений колебательных смещений), а максимальные значения амплитуд достигаются при возбуждении УЗКС на резонансной частоте. При этом значения резонансных частот отдельных составляющих должны совпадать, а всей УЗКС

должны быть в пределах разрешенных диапазонов (для УЗ аппаратов эти 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.

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, имеющего резьбовое соединение М18х1,5

для соединения с другими элементами колебательной системы. Для целей моделирования необходимо, чтобы соединительная шпилька 5 (см. рисунок 1) не выступала за излучающую накладку 1, чем достигается кратность пьезоэлектрического преобразователя половине длины волны. Внешний вид модели пьезоэлектрического преобразователя представлен на рисунке 2.

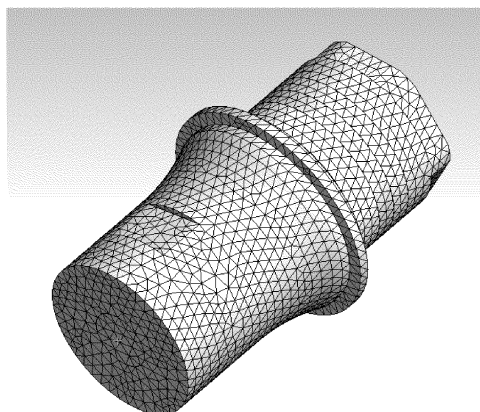


Рисунок 2 – Внешний вид модели пьезоэлектрического преобразователя

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 0,5 мм. Расчет был произведен при помощи МКЭ. Количество элементов в каждом расчете задавалось одинаковым и составляло 6000 ± 100 .

В качестве материала шпильки был выбран титановый сплав. Расчеты представлены в таблице 1.

Таблица 1. 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 со шпилькой из стали. Расчеты представлены в таблице 2.

Для оценки адекватности модели были проведены сравнения результатов значений частоты, полученных при помощи расчета

МКЭ, и значений собственных резонансных частот, измеренных на изготовленных и собранных пьезоэлектрических преобразователях.

Таблица 2. 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 измерения значений собственных резонансных частот была взята выборка из 10 изготовленных и собранных пьезоэлектрических преобразователей. Измерение собственной резонансной частоты производили при помощи запитанного от низковольтного генератора и подключенного к осциллографу пьезоэлектрического приемного преобразователя с сухим точечным контактом [5]. Резонансная частота определялась по максимальному значению амплитуды колебаний, наблюдаемых на экране осциллографа.

По результатам измерений значения резонансной частоты пьезоэлектрических преобразователей составили 19070 ± 90 Гц для преобразователей с титановой шпилькой и $18950 \text{ Гц} \pm 80$ 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 соответствовала минимальному диаметру шпильки.

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 внутреннему диаметру резьбы.

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 [6] было показано, что

РАЗДЕЛ 3. КОМПОНЕНТЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

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 рисунке 3.

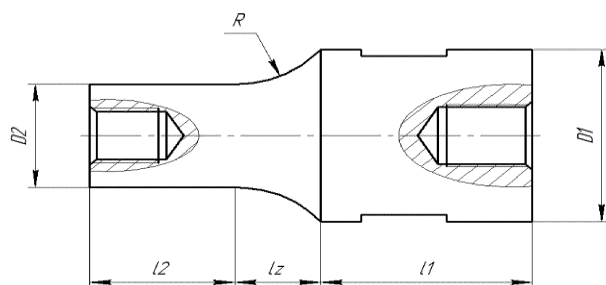


Рисунок 3– Общий вид составного ступенчато-радиального концентратора

Для расчета ступенчатых концентраторов в [6] была предложена методика расчета с использованием графических зависимостей и номограмм, которая основывается на следующих расчетных формулах:

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

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

$$\begin{aligned} N &= \frac{D_1}{D_2}, \\ D_z &= D_1 e^{-\beta z}, \\ \beta &= \frac{\ln N}{l_z}, \end{aligned} \quad (3)$$

где все обозначения взяты из [6] и рисунка 3.

В расчетах принималась скорость распространения УЗ колебаний c , равная 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 и сведенные в таблицу 3.

Из полученных данных 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 мо-

дели экспоненциальный переход брался с некоторым приближением к истинной форме.

Таблица 3. 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

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 его расчета, на основании анализа модельных данных, необходимо внести соответствующие поправки в виде коэффициентов в методику расчета концентраторов с экспоненциальным переходом.

Для определения этих коэффициентов были проведены исследования по их подбору 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 4. 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 таблице 5.

Таблица 5. 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, рассчитанных и изготовленных при помощи доработанной методики инженерного расчета, приведены на рисунке 4.

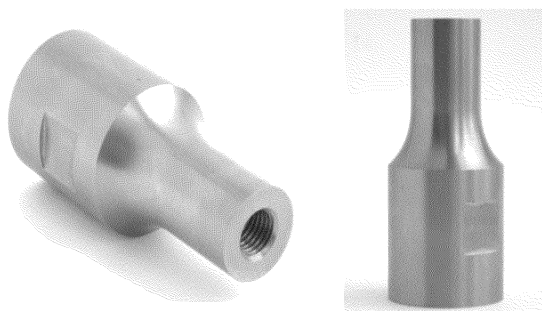


Рисунок 4 – Внешний вид концентраторов с радиальным переходом

Погрешность между расчетами МКЭ и опытными результатами обуславливается различием между задаваемой и реальной скоростью распространения колебаний в материале и неточностью изготовления 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.

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 расчетным путем получить требуемые значения по частоте изготавливаемых элементов УЗКС, что значительно сократило временные и финансовые затраты на разработку и подгонку составных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Китайгородский, Ю.И. Инженерный расчет ультразвуковых колебательных систем / Ю.И. Китайгородский, Д.Я. Яхимович. – М.: Машиностроение, 1982. – 56 с.
2. Казанцев, В.Ф. Расчет ультразвуковых преобразователей для технологических установок / В.Ф. Казанцев. – М.: Машиностроение, 1980. – 44 с.
3. Гальперина, А.Н. К конструктивному расчету пакетных пьезокерамических преобразователей / 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 / А.В. Наседкин [и др.] // Известия ТрТУ. – 1988. – №4(10). – с. 144-147.
5. Хмелев В.Н. Стенд для контроля параметров пьезоэлектрических колебательных систем с многополуволновыми излучателями / В.Н. Хмелев, С.В. Левин, С.Н. Цыганок, С.С. Хмелев, Д.С. Абраменко // Ползуновский вестник. – 2012. - №2. – с. 151-153.
6. Меркулов, Л.Г. Теория и расчет составных концентраторов / Л.Г. Меркулов, А.В. Харитонов // «Акустический журнал», 1959, т.5, №2.

Д.т.н., профессор, В.Н. Хмелев - заместитель директора по научной работе, тел. (3854) 432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru, к.т.н. С.С. Хмелев тел. (3854) 43-25-70, К.А. Карзакова – студент, тел. (3854) 43-25-70, Г.А. Боброва – студент тел. (3854) 43-25-70; Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».