

ВЛИЯНИЕ СТЯГИВАЮЩИХ И СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ШПИЛЕК НА ПАРАМЕТРЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛАНЖЕВЕНА

В.Н. Хмелев, С.Н. Цыганок, М.В. Демьяненко, С.В. Левин

Бийский технологический институт АлтГТУ, г. Бийск

В работе исследован ультразвуковой преобразователь Ланжевена. Представленные расчёты методом компьютерного моделирования позволяют оценить влияние резьбовых шпилек, входящих в состав преобразователя, на его резонансную частоту и коэффициент усиления.

Ключевые слова: пьезоэлемент, резонанс, коэффициент усиления.

ВВЕДЕНИЕ

В состав ультразвукового оборудования входит ультразвуковой генератор и ультразвуковая колебательная система.

Ультразвуковая колебательная система, как правило, строится по полуволновой конструктивной схеме, сочетающей в себя электроакустический преобразователь и акустический трансформатор колебания (концентратор).

Электронный генератор преобразует энергию промышленной сети в электрические колебания ультразвуковой частоты, затем электрическая энергия при помощи электроакустического преобразователя (в качестве возбудителя ультразвуковых колебаний применяется пьезоэлектрик или магнитостриктор) преобразуется в механические ультразвуковые колебания, которые передаются на рабочий инструмент, причем амплитуда колебаний рабочего инструмента зависит от качества электроакустического преобразователя.

В ультразвуковой технологии на частотах до 60 кГц используется пьезоэлектрический преобразователь с частотно-понижающими металлическими накладками, между которыми расположены пьезоэлектрические элементы – преобразователь Ланжевена. Изготовление сплошного пьезоэлектрического полуволнового преобразователя нецелесообразно из-за технологических трудностей, сильного разогрева пьезоэлемента в рабочем режиме, поскольку он имеет низкую теплопроводность, и необходимости высоких рабочих напряжений при большой толщине пьезоэлемента [1,2].

Таким образом, комбинируя геометрические размеры металлических накладок, их материалы, количество пьезоэлементов, их способ подключения, задают основные характеристики преобразователя Ланжевена – резонансную частоту и коэффициент усиления.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В статье рассматривается преобразователь Ланжевена на частоту $20 \pm 1,5$ кГц, построенный на базе четырех пьезоэлектрических элементов кольцевого типа

(50x20x6 мм) из пьезокермического материала АРС-844 [3,4]. Общий вид преобразователя приведен на рисунке 1.

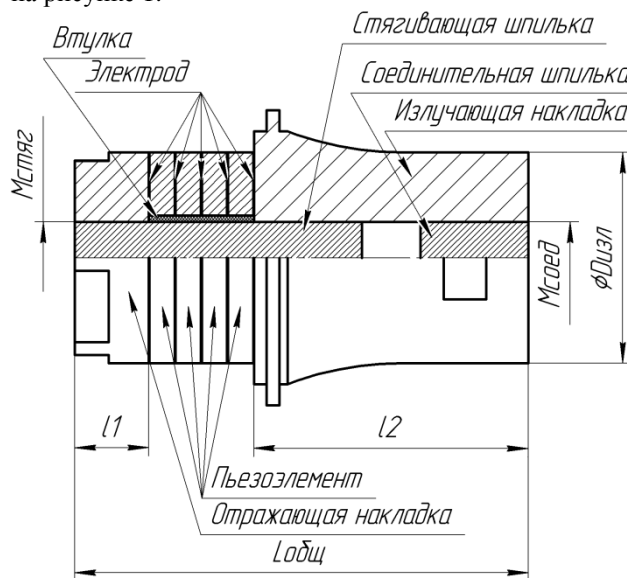


Рис. 1. Общий вид преобразователя

Активными элементами такого преобразователя Ланжевена являются четыре пьезоэлемента, пассивными – две металлические накладки: отражающая и излучающая.

Излучающая накладка посредством резьбового соединения шпилькой соединяется с очередным звеном ультразвуковой колебательной системы (например, концентратором) и сообщает механические колебания. В качестве материала излучающей накладки используется алюминиевый сплав Д16 или В95.

Отражающая накладка, изготовленная из стали 45, накручивается на стягивающую шпильку, следовательно, величина резьбового отверстия в отражающей накладке равна диаметру стягивающей шпильки.

Фторопластовая изолирующая втулка, разделяющая пьезоэлементы и стягивающую шпильку, служит для электроизоляции. Диаметр стягивающей шпильки должен быть меньше на удвоенную толщину изоли-

рующей втулки, при этом минимальная толщина изолирующей втулки является 1 мм. Если возникает необходимость в увеличении диаметра шпильки, то диаметр внутреннего отверстия в пьезоэлементе необходимо увеличить соответственно.

Классический расчет учитывает влияние длин отражающей (11), излучающей (12) частотопонижающих накладок, толщину пьезоэлементов на резонансную частоту и коэффициент усиления преобразователя Ланжевена [5,6], но не учитывает влияние стягивающей и соединительной шпилек.

Таким образом, задачей работы является оценка влияния стягивающей и соединительной шпилек на резонансную частоту и коэффициент усиления преобразователя Ланжевена.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В качестве инструментария для решения поставленной задачи был выбран способ моделирования при помощи системы автоматизированного инженерного расчета (CAE-системы). Основой большинства современных CAE-систем является метод конечных элементов.

Наиболее предпочтительным являются пакет ANSYS Workbench, т.к. он показывает однозначную адекватность результатов [7,8].

Входными данными для пакета ANSYS Workbench являются 3D модели преобразователя Ланжевена. Поэтому от адекватности их соответствия реальным конструкциям зависят получаемые результаты моделирования.

Как было указано ранее, пьезоэлементы, поляризованные по толщине, зажимаются между металлическими накладками с помощью резьбовой стягивающей шпильки.

Свинчиваемость соединительной шпильки с рабочей частотно-понижающей излучающей накладки цилиндрической формы, а также свинчиваемость тыльной отражающей частотно-понижающей накладки со стягивающей шпилькой производится по среднему диаметру. Средний диаметр – это диаметр воображаемого соосного с резьбой цилиндра, который делит профиль резьбы так, что толщина витка равна ширине впадины и равна половине шага.

Номинальный средний диаметр резьбы для метрической резьбы вычисляют по следующей формуле [9]:

$$d_{cp} = d - 0,6495 * P, \quad (1)$$

где d_{cp} – средний диаметр резьбы; d – диаметр резьбы, P – шаг резьбы.

Именно значения диаметра d_{cp} использовалось при построении 3D моделей, которые подвергались последующему анализу.

Применяя ANSYS Workbench, при различных геометрических размерах стягивающей и соединительной шпильки был проведен модальный анализ для

определения резонансных мод собственных колебаний преобразователя Ланжевена.

На первом этапе проводилось моделирование преобразователя Ланжевена при одинаковом диаметре соединительной и стягивающей шпильки, но сам диаметр изменялся. Результаты показаны в таблице 1.

Табл. 1. Зависимость параметров преобразователя Ланжевена от геометрических размеров стягивающей и соединительной шпильки

Диаметр соединительной шпильки, мм	Диаметр стягивающей шпильки, мм	Диаметр внутреннего отверстия пьезоэлемента, мм	Резонансная частота, Гц	Коэффициент усиления
28	28	30	18854	2,06
26	26	28	19058	2,00
24	24	26	19198	1,96
22	22	24	19321	1,91
20	20	22	19415	1,88
18	18	20	19481	1,84
16	16	20	19448	1,74
14	14	20	19378	1,65
12	12	20	19293	1,58
10	10	20	19185	1,51

Максимальный коэффициент усиления, которого можно достичь без увеличения внутреннего диаметра пьезоэлемента, составило 1,84 при диаметре стягивающей шпильки 18 мм и данное значение является оптимальным диаметром для стягивающей шпильки.

По полученной таблице 1 построен график зависимости коэффициента усиления от диаметра стягивающей и соединительной шпилек (рис.2).

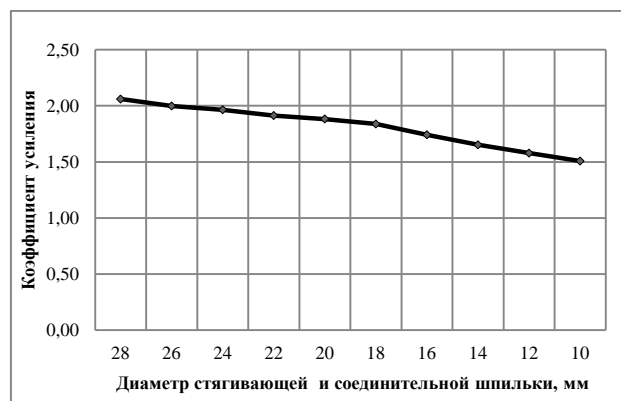


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления от геометрических размеров стягивающей и соединительной шпильки

Из зависимости на рисунке 2 следует, что при одинаковом диаметре стягивающей и соединительной шпильки можно варьировать коэффициентом усиления, причем тем меньше сам диаметр, тем меньше коэффициент усиления. Таким образом, изменяя диаметр шпилек, коэффициент усиления был увеличен на 12,1% и уменьшен на 18%.

На втором этапе устанавливалась зависимость коэффициента усиления и резонансной частоты при из-

менении только диаметра стягивающей шпильки. Результаты приведены в таблице 2.

Табл. 2. Зависимость параметров преобразователя Ланжевена от геометрических размеров преобразователя при постоянных геометрических параметрах соединительной шпильки

Диаметр соединительной шпильки, мм	Диаметр стягивающей шпильки, мм	Диаметр внутреннего отверстия пьезоэлемента, мм	Резонансная частота, Гц	Коэффициент усиления
18	28	30	19284	2,13
18	26	28	19376	2,05
18	24	26	19432	2,00
18	22	24	19462	1,93
18	20	22	19484	1,89
18	18	20	19481	1,84
18	16	20	19393	1,73
18	14	20	19277	1,64
18	12	20	19156	1,57
18	10	20	19018	1,50

Из таблицы 2 следует, что изменения диаметра стягивающей шпильки существенно влияет на коэффициент усиления, был увеличен на 16,1 % и уменьшен на 18,5 %.

Анализируя результаты, в таблице 1, сделан вывод, что максимальный коэффициент усиления получен при максимальном диаметре стягивающей шпильки (28 мм). При этом диаметр внутреннего отверстия в пьезоэлементе равен 30 мм. Поэтому на третьем этапе проводилось моделирование, аналогичное второму, но при этом брался максимальный диаметр соединительной шпильки. Результаты приведены в таблице 3.

Табл. 3. Зависимость параметров преобразователя Ланжевена от геометрических размеров преобразователя при постоянных геометрических параметрах соединительной шпильки

Диаметр соединительной шпильки, мм	Диаметр стягивающей шпильки, мм	Диаметр внутреннего отверстия пьезоэлемента, мм	Резонансная частота, Гц	Коэффициент усиления
28	28	30	18854	2,06
28	26	28	18980	1,97
28	24	26	19057	1,92
28	22	24	19106	1,86
28	20	22	19139	1,82
28	18	20	19144	1,78
28	16	20	19064	1,68
28	14	20	18959	1,60
28	12	20	18847	1,53
28	10	20	18718	1,46

По результатам, приведенным в таблицах 2 и 3, построены графики зависимости коэффициента усиления от геометрических размеров преобразователя Ланжевена при постоянных геометрических параметрах соединительной шпильки, показанные на рисунке 3.

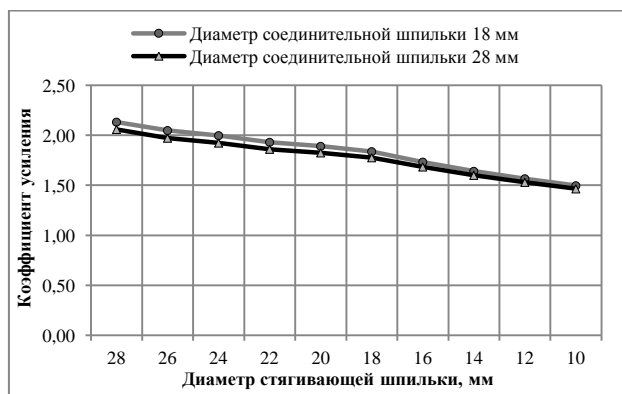


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления от геометрических размеров преобразователя Ланжевена при постоянных геометрических параметрах соединительной шпильки

Из зависимости на рисунке 3 следует, что изменение диаметра стягивающей шпильки при постоянном диаметре соединительной шпильки влияет на коэффициент усиления. Однако, увеличение оптимального диаметра соединительной шпильки (18 мм) на максимальное значение практически не влияет на коэффициент усиления. Следовательно, для того чтобы подобрать необходимое значение коэффициента усиления достаточно изменять только геометрические параметры стягивающей шпильки.

На четвертом этапе устанавливалась зависимость коэффициента усиления и резонансной частоты от диаметра соединительной шпильки. Результаты приведены в таблице 4.

Табл. 4. Зависимость параметров преобразователя Ланжевена от геометрических размеров преобразователя при постоянных геометрических параметрах стягивающей шпильки

Диаметр соединительной шпильки, мм	Диаметр стягивающей шпильки, мм	Диаметр внутреннего отверстия пьезоэлемента, мм	Резонансная частота, Гц	Коэффициент усиления
28	18	20	19144	1,78
26	18	20	19223	1,79
24	18	20	19287	1,80
22	18	20	19360	1,81
20	18	20	19418	1,82
18	18	20	19481	1,84
16	18	20	19544	1,84
14	18	20	19608	1,85
12	18	20	19652	1,85
10	18	20	19698	1,85

Из таблицы 4 следует, что изменения коэффициента усиления минимальны (увеличение всего на 1%, уменьшение на 3,5%)

Пятый этап аналогичен четвертому, но при этом брался максимальный диаметр стягивающей шпильки. Результаты приведены в таблице 5.

Табл.5. Зависимость параметров преобразователя Ланжевена от геометрических размеров преобразователя при постоянных геометрических параметрах стягивающей шпильки

Диаметр соединительной шпильки, мм	Диаметр стягивающей шпильки, мм	Диаметр внутреннего отверстия пьезоэлемента, мм	Резонансная частота, Гц	Коэффициент усиления
28	28	30	18854	2,06
26	28	30	18947	2,08
24	28	30	19026	2,10
22	28	30	19121	2,11
20	28	30	19198	2,12
18	28	30	19284	2,13
16	28	30	19369	2,14
14	28	30	19444	2,14
12	28	30	19507	2,14
10	28	30	19566	2,14

По результатам, приведенным в таблицах 4 и 5, построены графики зависимости коэффициента усиления от геометрических размеров преобразователя Ланжевена при постоянных геометрических параметрах стягивающей шпильки, показанные на рисунке 4.

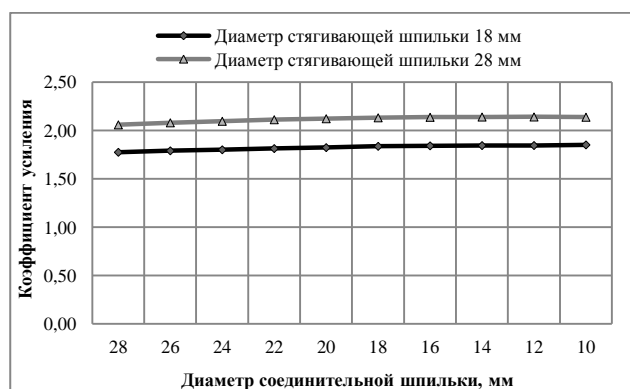


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления от геометрических размеров преобразователя Ланжевена при постоянных геометрических параметрах стягивающей шпильки

Поскольку на графике получены две параллельные прямые, то можно сделать вывод, что параметры стягивающей шпильки оказывают существенный эффект на значение коэффициента усиления, причем увеличение диаметра стягивающей шпильки увеличивает на некоторый постоянный коэффициент само значение коэффициента усиления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведения работы исследован преобразователь Ланжевена с точки зрения влияния резьбовых шпилек (стягивающей и соединительной) на резонансную частоту и коэффициент усиления излучателя. Получены следующие результаты.

1. Максимальный коэффициент усиления для преобразователя Ланжевена на частоте 20 кГц при применении пьезоэлементов кольцевого типа с размерами 50x20x6 мм составляет 1,84. После увеличения

диаметра внутреннего отверстия пьезоэлемента до 30 мм коэффициент усиления увеличен на 12,1 % до значения 2,06.

2. Изменение геометрических параметров стягивающей шпильки оказывает существенное влияние на коэффициент усиления (установлено максимальное увеличение коэффициента усиления на 16,1%, а максимальное уменьшение на 18,5%).

3. Изменение только геометрических параметров соединительной шпильки при постоянных параметрах стягивающей шпильки практически не влияет на коэффициент усиления.

4. Влияние на резонансную частоту изменения диаметра соединительной и стягивающей шпилек незначительно (установлено максимальное увеличение резонансной частоты на 1,1%, а максимальное уменьшение на 3,2%). Поэтому резонансную частоту следует корректировать линейными размерами отражающей и излучающей накладок (l_1 и l_2), а необходимый коэффициент усиления следует подбирать путем изменения геометрических размеров стягивающей шпильки.

Дальнейший интерес представляю аналогичные исследования преобразователя Ланжевена с резонансными частотами 30 кГц и 40 кГц, построенных на базе пьезоэлементов различных типоразмеров (например, 50x20x6 мм, 38x16x5 мм, 30x12x4 мм и т.д.). Их целью является установление общих зависимостей и выработка практических рекомендаций по проектированию различных по мощности преобразователей Ланжевена.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Агранат, Б.А. Основы физики и техники ультразвука: Учеб. пособие для вузов [Текст] / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский [и др.] – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.: ил.
- Хмелев, В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности [Текст] / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков [и др.] – Алтайский государственный технический университет, БТИ. – Бийск: Издательство Алтайского государственного технического, 2010. – 203 с.
- Physical and Piezoelectric Properties of APC Materials [Электронный ресурс] // American Piezo Ceramics International, Ltd. – Режим доступа: <http://www.americanpiezo.com/apc-materials/piezoelectric-properties.html>.
- Hyeoungwoo, K. Impedance Adaptation Methods of the Piezoelectric Energy Harvesting [Электронный ресурс] // Graduate School section of the eTD database. – 2006. – Режим доступа: <https://etda.libraries.psu.edu/paper/6979/2279>.
- Китайгородский, Ю.И. Инженерный расчет ультразвуковых колебательных систем [Текст] / Ю.И. Китайгородский, Д.Ф. Яхимович. М.: Машиностроение, 1988. – 56 с.
- Казанцев, В.Ф. Расчет ультразвуковых преобразователей для технологических установок. Учеб. пособие для слушателей заочных курсов повышения квалификации ИТР по применению ультразвука в машиностроении [Текст] / В.Ф. Казанцев. – М.: Машиностроение, 1980. – 44 с.
- Хмелев, В.Н. Разработка пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов в газовых средах [Текст] / В.Н. Хмелев, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов [и др.] // Известия Тульского Государственного университета, серия: технические науки, – 2010, – Вып.1 – С.148–157.

8. Khmelev, V.N. Ultrasonic coagulation on the basis of piezoelectric vibrating system with focusing radiator in the form of step-variable plate [Текст] / V.N. Khmelev, A.N. Galakhov, S.N. Tsyganok [and other] // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM 2010: Conference Publications. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P.376-379.

9. Кольшкин, Б.Н. Метрологическое обеспечение производства Лабораторный практикум [Текст] / Б.Н. Кольшкин, С.А. Любомудров, С.Б. Тарасов – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2009. – 152 с.

Хмелев Владимир Николаевич – д.т.н., профессор, заместитель директора по научной работе, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854)432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru

Цыганок Сергей Николаевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: grey@bti.secna.ru

Демьяненко Максим Васильевич – аспирант кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: mcsidrom@gmail.com

Левин Сергей Викторович – инженер кафедры технической графики, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: lsv@bti.secna.ru