

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ ОДНОВОЛНОВЫХ СОСТАВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВИБРАТОРОВ НА БАЗЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА БАЗЕ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

КОЛОСОВА Е.П., ассистент

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Оптимизацию конструкции одноволновых составных ультразвуковых вибраторов на основе пьезоэлектрических преобразователей проводили на базе структурно-параметрического моделирования при исследовании блока дозирования пропиточно-сушильной установки.

Источником УЗ-колебаний (УЗК) являлся составной пьезоэлектрический преобразователь, собранный из двух установленных последовательно пьезоколец 6, подключенных параллельно к УЗ-генератору 7 (см. рис.1).

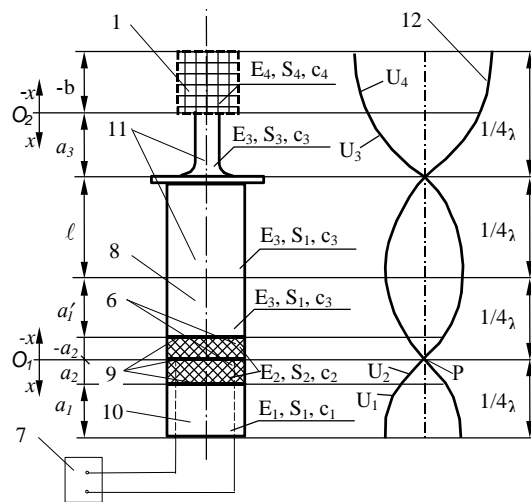


Рис.1. Расчетная схема одноволнового УЗ-диспергатора с симметричным пьезоэлектрическим пакетным преобразователем:

- 1 — излучающий цилиндр эквивалентного сечения;
- 6 — пьезокерамические преобразователи;
- 7 — УЗ-генератор;
- 8, 10 — понижающие частоту накладки;
- 9 — электроды толщиной 0,2—0,3 мм;
- 11 — концентратор УЗК (трансформатор скорости);
- 12 — волна продольных колебаний длиной λ .

Необходимое значение резонансной частоты колебаний пьезоэлектрического преобразователя достигается выбором акустических размеров и свойств материала демпфера 10 и трансформатора скорости 11.

Принятые обозначения: f — частота УЗК; U — продольное перемещение колебаний пьезоэлектрического преобразователя; c — скорость звука в материале пьезоэлектрического преобразователя; c_1 и c_2 — скорость звука в материале понижающей частоту накладки 10 и пьезокерамической шайбы 6 соответственно; c_4 — скорость звука в материале цилиндра 1, эквивалентного по массе элементу с поверхностью излучающей пластины 1; S — площадь поперечного сечения пьезоэлектрического преобразователя; S_1 и S_3 — площади поперечного сечения первой (большого диаметра) и второй (меньшего диаметра) ступеней составного УЗ-концентратора; S_4 — площадь поперечного сечения эквивалентного цилиндра 1; b — высота эквивалентного цилиндра, т.е. цилиндра, эквивалентного по массе секции излучающей

пластины 1; t — время; E — модуль упругости материала стержня при растяжении; E_4 — модуль упругости на растяжение материала излучающей пластины 1; a_3 — длина ступени концентратора 11 меньшего диаметра; a_1, E_1, S_1 и a_2, E_2, S_2 — толщина, модуль упругости на растяжение и площадь торцевой поверхности понижающей частоту накладки 10 и пьезокерамической шайбы 6 соответственно,

Методика расчета одноволнового составного уз-диспергатора с излучающей пластиной.

Методика расчета одноволнового составного уз-диспергатора с излучающей пластиной сводится к расчету трех размеров составного одноволнового УЗ-излучателя a_1, a_3, ℓ). Для этого:

1. Задаются желаемой резонансной частотой УЗК $f_{ст}$, характерной для конкретного технологического процесса, и определяющей интенсивность УЗ-кавитации (например, это может быть частота УЗК УЗ-генератора: 16000 Гц (16 кГц), 18000 Гц (18 кГц), 20000 Гц (20 кГц), 22000 Гц (22 кГц), 24000 Гц (24 кГц))

2. Выбирают материал (скорость звука $c_{пл} = c_4$, модуль упругости $E_{пл} = E_4$) и толщину $H_{пл}$ излучающей пластины, исходя из конструктивно-технологических особенностей реализации конкретного технологического процесса. При этом:

$H_{пл}$ излучающей пластины = 8 - 12 мм (с шагом 1 мм),

скорость звука в излучающей пластине $c_{пл} = c_4 = 5,2 \cdot 10^3$ м/с;

модуль упругости при растяжении излучающей пластины $E_4 = 20,5 \cdot 10^4$ МПа.

3. Для выбранной резонансной частоты УЗК $f_{ст}$ определяют по формуле длину волны $\ell_{ст}$ изгибных колебаний излучающей пластины с учетом желаемой моды колебаний n_k (или порядка частоты $\lambda_{ст}$):

$$\ell_{ст} = \frac{\lambda_{ст}}{2} \sqrt{\frac{c_{ст} \cdot H_{ст}}{\pi \cdot \sqrt{3} \cdot f_{ст}}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{ст}$ — так называемый порядок частоты является безразмерной величиной, и который для случая УЗК низкочастотного диапазона выбирается в зависимости от порядка колебаний (моды колебаний) n_k из следующего ряда:

$$\lambda_{ст} = \{4,750 (n_k = 1); 7,853 (n_k = 2); 10,996 (n_k = 3); 14,137 (n_k = 4); 17,279 (n_k = 5)\}.$$

4. Общие размеры излучающей пластины, т.е. ее длину $L_{пл}$ и ширину $B_{пл}$ выбирают кратными величине длины волны $\ell_{ст}$, т.е. $L_{пл} = N_L \ell_{ст}$, $B_{пл} = M_B \ell_{ст}$.

5. В зависимости от полученного количества пучностей, образующихся при изгибных колебаниях с длиной волны $\ell_{ст}$, по длине и ширине излучающей пластины, определяют количество УЗ-излучателей, устанавливаемых по длине и ширине пластины. При этом количество УЗ-излучателей, устанавливаемых по длине пластины $L_{пл}$ для получения равномерной интенсивности излучающей поверхности равно: $N = 2N_L - 1$, а количество УЗ-излучателей, устанавливаемых по ширине излучающей пластины $B_{пл}$, равно: $M = 2M_B - 1$.

6. Рассчитывают массу элементов крепления УЗ-излучателя с учетом присоединенной массы отдельного участка (секции) излучающей пластины, т.е. характеристики эквивалентного цилиндра.

7. Под резонансную частоту $f_{ст} = f_{пл}$ излучающей пластины 1 рассчитывают по формулам (2 – 4) акустические размеры элементов составного УЗ-излучателя (a_1, a_3, ℓ) [5]:

$$a_1 = \frac{c_1}{\omega} \arctg \frac{E_2 S_2 c_1 ctg \frac{\omega}{c_2} a_2 + E_1 S_1 c_2 tg \frac{\omega}{c_1} a_2}{E_1 S_1 c_2 - E_2 S_2 c_1 ctg \frac{\omega}{c_2} a_2 tg \frac{\omega}{c_1} a_2} - a_2, \quad (2)$$

$$a_3 = \frac{c_3}{\omega} \arctg \frac{E_3 S_3 c_4}{E_4 S_4 c_3 tg \frac{\omega}{c_4} b}, \quad (3)$$

$$\ell = \frac{c_3 \pi}{\omega 2} = \frac{c_3}{4f}, \quad (4)$$

$$\omega = 2\pi f, \quad (5)$$

где a_1 , a_3 , ℓ – соответственно толщина понижающей частоту накладки составного пьезоэлектрического преобразователя, длина ступени участка концентратора меньшего диаметра и длина ступени участка концентратора большего диаметра.

Причем исходными данными для расчета акустических размеров УЗ-излучателя являются геометрические размеры и физические параметры применяемого пьезоматериала (a_2 , c_2, E_2, S_2), трансформатора скорости (c_3, E_3, S_3), частотопонижающих накладок (c_1, E_1, S_1), а также удельная акустическая мощность.

Пример расчета размеров составного УЗ-излучателя a_1 , a_3 , ℓ .

В табл. 1 приведены (для справки) некоторые свойства материалов ультразвуковых концентраторов.

Таблица 1. Свойства материалов ультразвуковых концентраторов

материал	плотность, *10 ⁸ кг/м ³ (или *1 г/см ³)	скорость звука С, *10 ⁴ см/с	Модуль упругости, Е, *10 ⁴ , МПа	прочность при разрыве, σ _в , МПа
алюминий	2,8	51,0	7,2	100
Дюралюминий Д16Т	2,8	51,0	7,2	100
титан	4,5	49,2	10,9	500
Углеродистая сталь	7,9	52	21	400-500
Никель	8,9	49,7	19,6-21	
Латунь	8,6	33	10	320-500
медь	8,9	36,7	12	210-280

Частота УЗК $f_{УЗ} = f_{ст} = 18—22$ кГц (для расчета примем $f_{УЗ} = 22$ кГц = 22000 Гц); амплитуда УЗК 3—5 мкм; интенсивность $I = 2—4$ Вт/см².

Выбранная толщина излучающей пластины составляет $H_{пл} = 10$ мм = 0,01 м; материал излучающей пластины — нержавеющая сталь марки 1ХН18Н9Т с такими характеристиками:

скорость звука $c_{пл} = c_4 = 5,2 \cdot 10^3$ м/с;

модуль упругости при растяжении $E_4 = 20,5 \cdot 10^4$ МПа.

Вычисленная по формуле (1) длина изгибных колебаний пластины при порядок частоты $\lambda_{ст} = 4,750$ ($n_k = 1$) составит: $\ell_{ст} = 50$ мм = 0,05 м.

(это далее для справки) Количество преобразователей, которое необходимо установить по длине излучающей пластины $L_{пл} = 600$ мм = 0,6 м, равно: $N = 2N_L - 1 = 2 \cdot 12 - 1 = 23$, а количество преобразователей M , которое необходимо установить по ширине излучающей пластины $B_{пл} = 150$ мм = 0,15 м, равно: $M = 2M_B - 1 = 2 \cdot 3 - 1 = 5$.

Для материала частотопонижающих накладок (демпферов - поз.8,10) на базе стали 40Х13 имеем:

скорость звука $c_1 = 5,2 \cdot 10^3$ м/с;

модуль упругости $E_1 = 2,05 \cdot 10^5$ МПа;

выбранный наружный диаметр (кольцеобразных) частотопонижающих накладок (поз. 8, 10) составляет 40,2 мм = 0,042 м; их внутренний диаметр – 0,012 м.

Зададим конструктивно необходимое значение размера толщины a_2 пьезокерамических колец для случая сборки на базе четырех пьезокерамических колец марки 841 наружным диаметром $d_6 = 38$ мм, а именно:

$$a_2 = 25,6 \text{ мм} = 0,0256 \text{ м.}$$

Скорость распространения звука в материале пьезокерамического кольца равна:
 $c_2 = 2,5 \cdot 10^3 \text{ м/с};$

модуль упругости в материале пьезокерамического кольца $E_2 = 6,3 \cdot 10^4 \text{ МПа.}$

Удельную акустическую мощность для пьезокерамики, используемой в диапазоне 18 — 22 кГц, обычно принимают равной 1—3 Вт/см².

Результаты расчета.

Значение толщины a_1 частотопонижающих накладок (поз. 8, 10), найденное по формуле (2), составило 15,73 мм, значение длины ступени a_3 участка концентратора меньшего диаметра, найденное по формуле (3), составило 55,9 мм, а длина ступени ℓ большего диаметра концентратора согласно (4) составила 55,91 мм.

7. Строят графические трехмерные зависимости (графические или параметрические модели. Например, для рабочего УЗ-инструмента блока дозирования рассматриваемом упорядоченное множество

$$D = (D_1, D_6, D_8, D_9, D_{10}, D_{11}) \quad (6)$$

определяет порядок объединения частей рабочего УЗ-инструмента (см.рис.1), который в свою очередь состоит из последовательно соединенных и контактирующих элементов (начиная снизу вверх): D_{10} — понижающая частоту накладка; D_9 — электрод толщиной 0,2—0,3 мм; D_6 — пьезокерамический преобразователь; D_9 — электрод толщиной 0,2—0,3 мм; D_6 — пьезокерамический преобразователь; D_9 — электрод толщиной 0,2—0,3 мм; D_8 — электроды толщиной 0,2—0,3 мм; D_{11} — составной в виде двух разновеликих цилиндров концентратор УЗ-колебаний (трансформатор скорости); D_1 — излучающий цилиндр эквивалентного сечения, моделирующий излучающую пластину.

Взаимосвязь между вариантами поверхностей характеризуют матрицами смежности, где единицами обозначают разрешение, а нулями - запрет на сочетание соответствующих элементов.

Выражение (6) и приведены матрицы смежности позволяют определить множество вариантов пары рабочих инструментов блока дозирования «Д», которые проектируются:

$$D = (\partial_i)_1^{N_d} = (\partial_i)_1^{X_x}, \quad (7)$$

и их состав.

8. Анализируют построенные графические трехмерные зависимости и делают выводы.

Литература

1. Колосов О.Є. Одержання волокнистонаповнених реактопластичних полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвуку: монографія / О.Є.Колосов, В.І. Сівецький, О.П. Колосова. – К.: ВПК «Політехніка», 2015. – 295 с.
2. Kolosov A.E. Procedure for analysis of ultrasonic cavitator with radiative plate / A.E. Kolosov, V.I. Sivetskii, E.P. Kolosova, E.A. Lugovskaya // Chemical and Petroleum Engineering. – 2013. – Vol. 48, Issue 11-12. – P. 662-672.
3. Ванін В.В. Визначення та основні положення структурно-параметричного геометричного моделювання / В.В. Ванін, Г.А. Вірченко // Геометричне та комп'ютерне моделювання: зб. наук. праць. – Вип. 23. – Харків: ХДУХТ, 2009. – С. 42-48.