

К вопросу о расчете ультразвукового ступенчатого трансформатора колебательной скорости с развитой поверхностью излучения

А.В. Мовчанюк • А.Ф. Луговской • В.П. Фесич

КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина

Received: 15 March 2019 / Accepted: 25 March 2019

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы расчета акустических размеров ультразвуковых ступенчатых составных трансформаторов колебательной скорости с развитой поверхностью излучения. Представлен анализ влияния на коэффициент трансформации особенностей колебаний плоской развитой дисковой поверхности излучения. Показано, что геометрические размеры дисковой поверхности излучения задают определенную моду колебаний поверхности и связаны с требованиями конкретных технологических процессов. Это требует корректировки расчетного значения коэффициента трансформации и акустических размеров ступени меньшего диаметра составного трансформатора скорости с целью сохранения резонансной частоты. Показано, что при коэффициентах трансформации более 4 одномерная расчетная модель дает существенную ошибку, т.к. не учитывает изгибные колебания дисковой поверхности излучения.

Ключевые слова: ультразвуковые трансформаторы колебательной скорости, расчет ступенчатого концентратора, дисковая излучающая поверхность, ультразвуковое распыление в тонком слое, производительность ультразвукового распыления

В ультразвуковой технологической аппаратуре с целью увеличения амплитуды колебаний рабочей поверхности часто используют трансформаторы колебательной скорости, среди которых, вследствие высокой технологичности, наиболее популярны цилиндрические стержневые ступенчатые концентраторы продольных колебаний [1-3]. Ступенчатый ультразвуковой концентратор представляет собой резонансную систему и имеет продольный размер, кратный половине длины акустической волны в материале концентратора. При этом поперечный размер ступени большего диаметра концентратора должен быть меньше половины длины волны в материале концентратора. Входным торцом такого концентратора является торец ступени большего диаметра, а выходным или излучающим – торец ступени меньшего диаметра (рис.1).

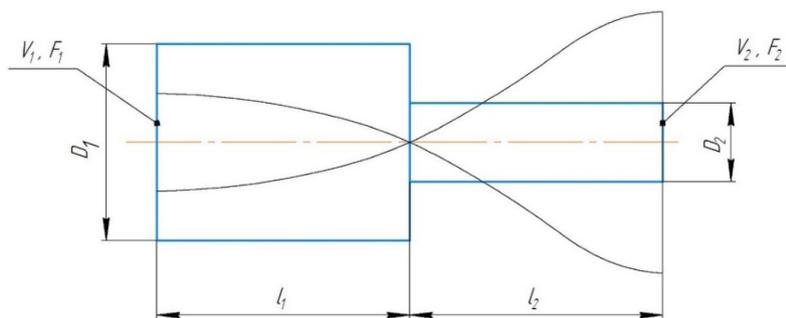


Рис. 1. Полуволновой ступенчатый ультразвуковой концентратор

Для такого концентратора коэффициент трансформации колебательной скорости определяется зависимостью

$$N_{\max} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 = \frac{V_2}{V_1}.$$

Как видим, отношение амплитуд колебательной скорости на торцах концентратора определяется отношением площадей торцов составных частей. Часто возникает технологическая необходимость развития излучающей поверхности, т.е. увеличения площади выходного торца, что связано, например, с проблемами согласования с гидравлической нагрузкой при излучении ультразвука в жидкость или достижения заданной производительности при ультразвуковом распылении в тонком слое [4-9]. В этом случае на ступени малого диаметра выполняют дополнительную накладку толщиной h_H и диаметром D_H . Для h_H должно выполняться условие $h_H \ll \lambda/14$ [10] (рис.2). При этом можно считать, что концентратор нагружен дополнительной массой

$$m = \rho \cdot h_H \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_H^2 - D_2^2),$$

где ρ - плотность материала концентратора.

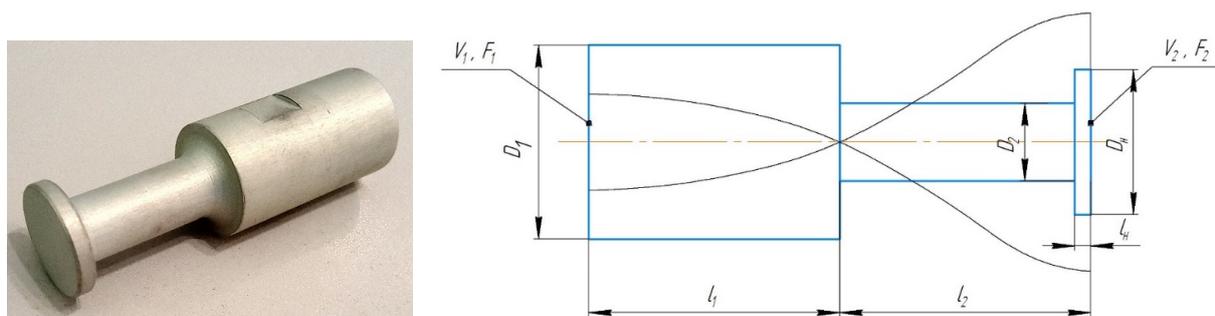


Рис. 2. Ступенчатый ультразвуковой концентратор с развитой поверхностью излучения

Для сохранения рабочей частоты и расположения пучности колебательной скорости величину l_2 необходимо уменьшить относительно первоначального значения.

Целью данного исследования является получение расчетных соотношений для определения рациональных геометрических размеров ступенчатого концентратора с грибовидным окончанием.

Задачу о колебаниях ультразвукового концентратора можно рассматривать как одномерную, если составляющие части могут быть представлены моделями тонких стержней. При этом считаем, что фронт ультразвуковой волны является плоским. В таком случае очень удобным способом описания работы концентраторов является метод электромеханических аналогий [2]. При этом электрические и механические величины ставятся в однозначное соответствие (табл.1). Отметим, что при такой системе аналогий электрическое короткое замыкание будет соответствовать механическому холостому ходу. Электромеханические аналогии позволяют для расчета механических систем использовать хорошо разработанные методы анализа и расчета электрических цепей [11].

Таблица 1

Соответствие электрических и механических параметров	
Электрический параметр	Механический параметр
U - напряжение	F - сила
I - ток	V - колебательная скорость
L - индуктивность	m - масса
C - емкость	C_m - гибкость
R - сопротивление	r_m - сопротивление потерь

Так, составные части концентратора могут рассматриваться как эквивалентные отрезки длинных линий, описываемых А-матрицами. Если пренебречь сопротивлением потерь, то постоянная распространения ультразвуковых колебаний (волновое число), может быть рассчитано как

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c},$$

где ω - круговая частота, c - скорость звука в материале стержня, f - частота.

Эквивалентная $|A|$ - матрица замещения стержня длиной l , площадью сечения S и волновым сопротивлением $Z_o = \rho \cdot c \cdot S$ имеет вид

$$\begin{vmatrix} F_1 \\ V_1 \end{vmatrix} = |A| \times \begin{vmatrix} F_2 \\ V_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} F_2 \\ V_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(k \cdot l) & j \cdot Z_o \cdot \sin(k \cdot l) \\ j \cdot \frac{\sin(k \cdot l)}{Z_o} & \cos(k \cdot l) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} F_2 \\ V_2 \end{vmatrix}.$$

Входной импеданс стержня, нагруженного на импеданс Z_H , может быть найден по выражению

$$Z_{BX} = \frac{a_{11} \cdot Z_H + a_{12}}{a_{21} \cdot Z_H + a_{22}}.$$

Отношение колебательных скоростей на торцевых поверхностях стержня:

$$N = \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{a_{21} \cdot Z_H + a_{22}}.$$

Резонансную длину стержня четвертьволновой длины можно найти из предположения, что его входной импеданс бесконечно большой, решив уравнение

$$a_{21} \cdot Z_H + a_{22} = 0.$$

Так как импеданс нагрузки в виде массы равен

$$Z_H = j \cdot \omega \cdot m = j \cdot \omega \cdot \rho \cdot h_H \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot (D_H^2 - D_2^2),$$

получаем уравнение для нахождения резонансной длины четвертьволнового стержня, нагруженного массой:

$$\frac{j \cdot \sin(k \cdot l_2)}{\rho \cdot c \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot D_2^2} \cdot j \cdot \omega \cdot \rho \cdot h_H \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot (D_H^2 - D_2^2) + \cos(k \cdot l_2) = 0.$$

В результате решения этого уравнения можно найти выражение для расчета длины ступени меньшего диаметра концентратора:

$$l_2 = l_1 - \frac{1}{k} \cdot \arctg \left(k \cdot h_H \cdot \frac{D_H^2 - D_2^2}{D_2^2} \right).$$

Обозначив через $|A|$ матрицу ступени большего диаметра концентратора, а через $|\bar{A}|$ - матрицу ступени меньшего диаметра концентратора, путем их умножения получим результирующую матрицу концентратора:

$$|A_K| = |A| \times |\bar{A}| = \begin{vmatrix} a_{11} \cdot \bar{a}_{11} + a_{12} \cdot \bar{a}_{21} & a_{11} \cdot \bar{a}_{12} + a_{12} \cdot \bar{a}_{22} \\ a_{21} \cdot \bar{a}_{11} + a_{22} \cdot \bar{a}_{21} & a_{21} \cdot \bar{a}_{12} + a_{22} \cdot \bar{a}_{22} \end{vmatrix}.$$

Так как длина ступени большего диаметра концентратора равняется четверти длины волны, то на резонансной частоте указанное произведение равно

$$k \cdot l_1 = \pi/2.$$

На резонансной частоте $|A|$ матрица ступени большего диаметра примет вид:

$$|A| = \begin{vmatrix} 0 & j \cdot Z_1 \\ \frac{j}{Z_1} & 0 \end{vmatrix}.$$

В результате на резонансной частоте матрица $|A_K|$ концентратора имеет вид:

$$|A_K| = \begin{vmatrix} -\frac{Z_1}{Z_2} \cdot \sin(k \cdot l_2) & \frac{j \cdot \cos(k \cdot l_2)}{Z_1} \\ \frac{j \cdot \cos(k \cdot l_2)}{Z_1} & -\frac{Z_2}{Z_1} \cdot \sin(k \cdot l_2) \end{vmatrix}.$$

Для холостого хода и ненагруженного массой концентратора длина ступени меньшего диаметра концентратора равна

$$l_2 = \lambda/4.$$

В результате коэффициент трансформации скорости равен

$$\frac{V_2}{V_1} = N_{\max} = \frac{1}{a_{21} \cdot Z_H + a_{22}} = \frac{1}{a_{22}} = -\frac{Z_1}{Z_2} = -\frac{D_1^2}{D_2^2}.$$

Такой результат совпадает с известным, а знак « \leftarrow » говорит о том, что колебательные скорости на торцах концентратора находятся в противофазе.

В случае нагружения трансформатора скорости массой, коэффициент трансформации приобретает вид:

$$N = \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\frac{j \cdot \cos(k \cdot l_2)}{Z_1} \cdot j \cdot \omega \cdot m - \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \sin(k \cdot l_2)}$$

После преобразований получаем следующее выражение для коэффициента трансформации скорости:

$$N = \frac{V_2}{V_1} = - \frac{1}{\left[\left(\frac{D_H^2 - D_2^2}{D_1^2} \cdot k \cdot h_H \right) \cdot \cos(k \cdot l_2) + \frac{D_2^2}{D_1^2} \cdot \sin(k \cdot l_2) \right]}$$

Полученное выражение позволяет оптимизировать коэффициент трансформации концентратора и его геометрические размеры при заданных размерах грибовидного окончания рабочей части концентратора.

Проиллюстрируем применение полученного выражения на примере расчета концентратора со следующими параметрами: материал концентратора Д16Т (2024Т4) с плотностью 2780 кг/м³, скоростью звука 6320 м/с, рабочая частота 22кГц, диаметр толстой части концентратора 50мм. Расчет по полученному выражению проводился для диаметра грибовидного окончания 35мм, 40мм и 45мм. При этом толщины грибовидного окончания варьировались от 2,5мм до 10мм, с шагом 2,5мм. В результате расчетов (рис.3) видно, что эффективность трансформатора с увеличением толщины и диаметра грибовидного окончания снижается.

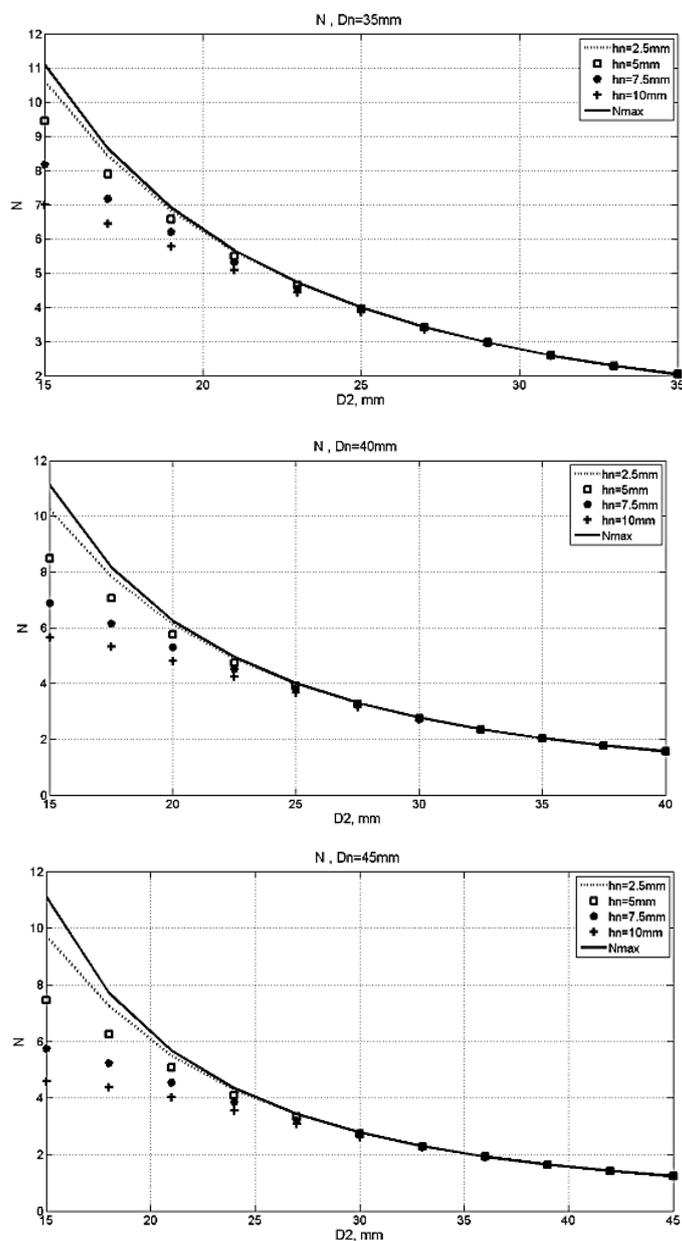


Рис. 3. Результаты теоретического расчета коэффициента трансформации для различных размеров грибовидного окончания

Для проверки теоретических расчетов была построена модель трансформатора скорости с грибовидным окончанием и рассчитаны ее параметры методом конечных элементов. При этом было замечено, что грибовидное окончание совершает изгибные колебания на различных модах, в зависимости от соотношения размеров (рис.4 – рис.6).

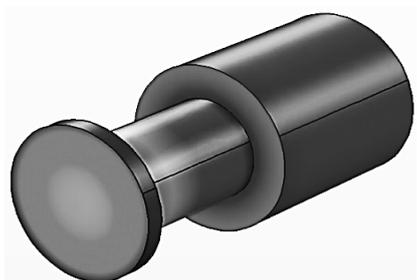


Рис. 4. Мода колебаний для $h_H = 5\text{мм}$, $D_H = 45\text{мм}$, $D_2 = 30\text{мм}$

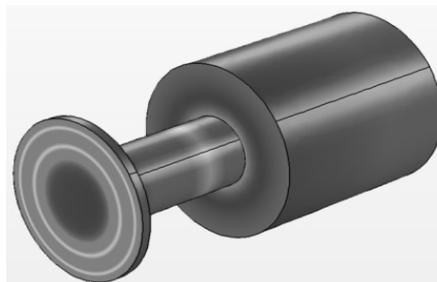


Рис. 5. Мода колебаний для $h_H = 2,5\text{мм}$, $D_H = 45\text{мм}$, $D_2 = 20\text{мм}$

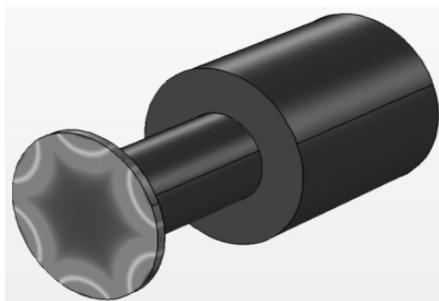
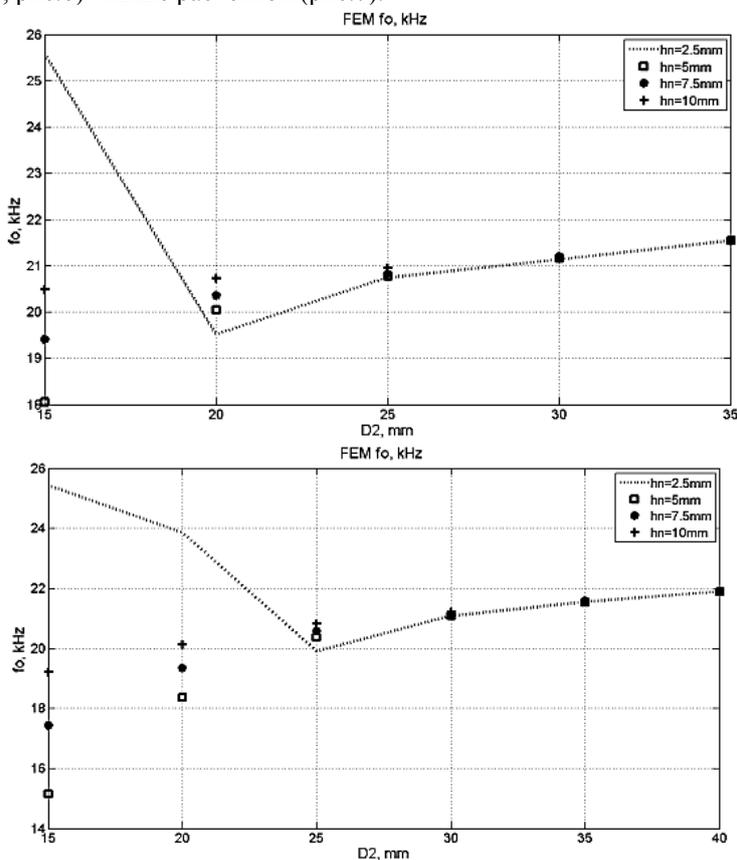


Рис. 6. Мода колебаний для $h_H = 2,5\text{мм}$, $D_H = 45\text{мм}$, $D_2 = 20\text{мм}$

Следует отметить, что при моде (рис.4) фактическая резонансная частота оказывалась ниже, а при модах высших порядков (рис.5, рис.6) - выше расчетной (рис.7).



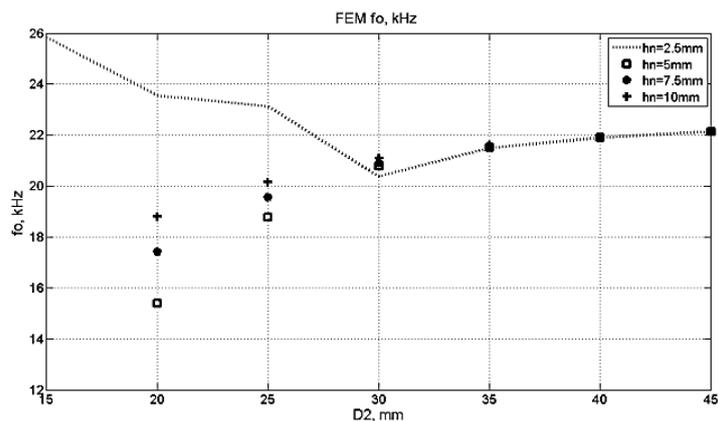
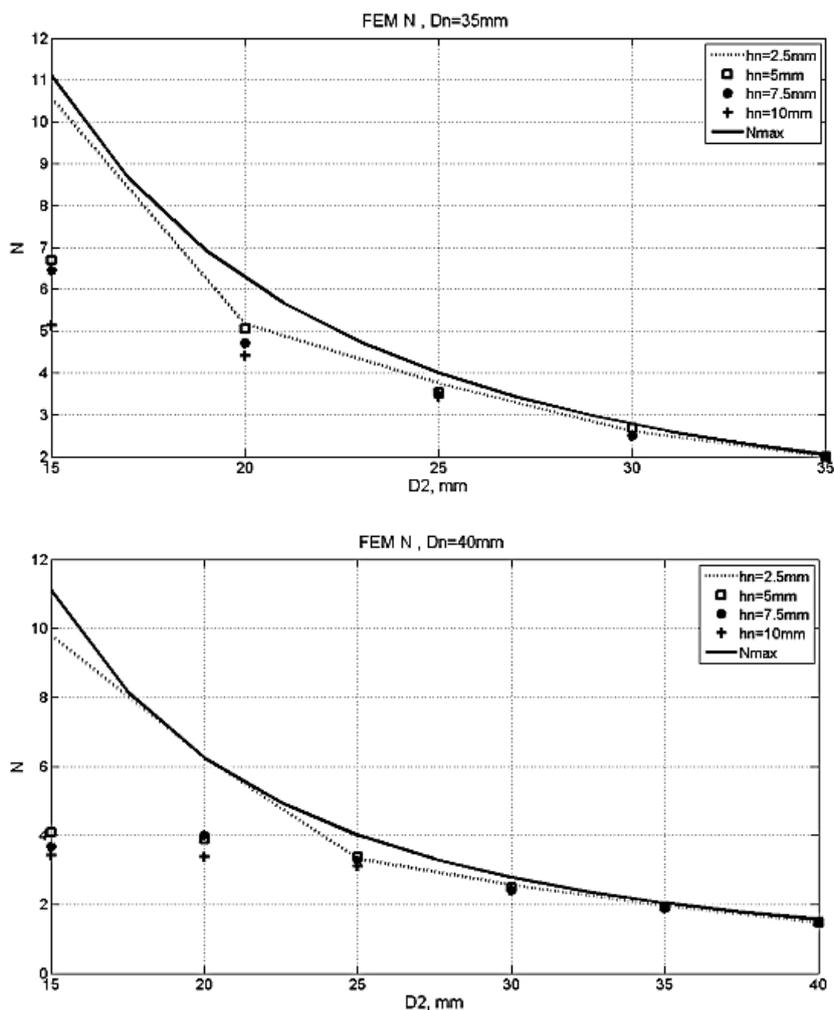


Рис. 7. Резонансные частоты трансформатора скорости, при различных размерах грибовидного окончания полученные методом конечных элементов

Как видим, при толщине грибовидного окончания 2,5 мм при разнице диаметров более 30 мм в обязательном порядке возникают изгибные колебания высших порядков. Так же можно отметить, что изгибные колебания в грибовидном окончании оказывают существенное влияние на резонансную частоту, что говорит о существенной погрешности расчетной модели, не учитывающей изгибные колебания в грибовидном окончании.

В результате моделирования методом конечных элементов было установлено, что при увеличении коэффициента трансформации наблюдается существенное расхождение с результатами теоретических расчетов (рис.8). Исключением являются результаты, полученные для толщины грибовидного окончания 2,5 мм. Однако при этом в грибовидном окончании возникают изгибные колебания высших порядков, сопровождающиеся возникновением на излучающей поверхности узловых окружностей.



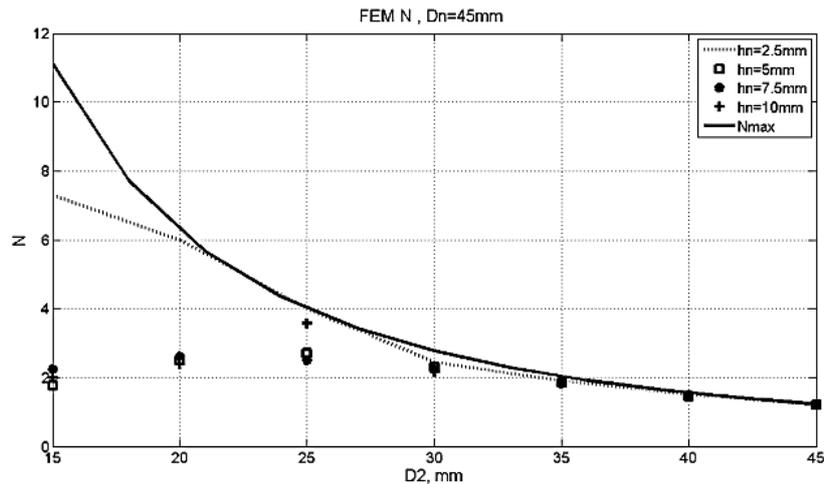


Рис. 8. Результаты моделирования методом конечных элементов коэффициента трансформации для различных размеров грибовидного окончания

Выводы

Грибовидное окончание позволяет эффективно увеличивать рабочую поверхность стержневых ультразвуковых трансформаторов скорости. Изгибные колебания, возникающие в грибовидном окончании, существенно влияют на значение резонансной частоты, которая в зависимости от порядка изгибных волн, может быть как выше, так и ниже расчетной. Фактически коэффициент трансформации может достигать значения 4 при существенном увеличении площади излучающей поверхности. Геометрические размеры грибовидного окончания определяют порядок изгибной волны, выбор которой определяется требованиями технологического процесса. Поэтому по выбранным геометрическим размерам грибовидного окончания и необходимого коэффициента трансформации, полученного расчетным путем, должна подбираться длина тонкой части трансформатора для сохранения расчетного значения резонансной частоты. При коэффициентах трансформации больше 4 одномерная расчетная модель дает существенную погрешность, так как не учитывает изгибных колебаний в грибовидном окончании, которое ведет себя как колеблющийся диск.

Стосовно розрахунку ультразвукового ступінчастого трансформатора коливальної швидкості з розвинутою поверхнею випромінювання

А.В. Мовчанюк, О.Ф. Луговський, В.П. Фесіч

Анотація. В роботі розглянуто питання розрахунку акустичних розмірів ультразвукових ступінчастих складених трансформаторів коливальної швидкості з розвинутою поверхнею випромінювання. Представлено аналіз впливу на коефіцієнт трансформації особливостей коливань плоскої розвинутої дискової поверхні випромінювання. Показано, що геометричні розміри дискової поверхні випромінювання задають певну моду коливань поверхні і пов'язані з вимогами конкретних технологічних процесів. Це вимагає корегування розрахункового коефіцієнта трансформації та акустичних розмірів ступеню меншого діаметра складеного трансформатора швидкості з метою збереження резонансної частоти. Показано, що при коефіцієнтах трансформації більше 4 одновимірною розрахунковою моделлю дає суттєву похибку, оскільки не враховує згинальних коливань дискової поверхні випромінювання.

Ключові слова: ультразвукові трансформатори коливальної швидкості, розрахунок ступінчастого концентратора, дискова випромінююча поверхня, ультразвукове розширення в тонкому шарі, продуктивність ультразвукового розширення.

To the question about the calculation of the ultrasonic step-up transformer of vibrating speed with the developed radiance surface

Andrii Movchanyuk, Oleksandr Luhovskyi, Volodymyr Fesich

Abstract. The paper considers the issues of calculating the acoustic dimensions of ultrasonic stepwise composite transformers of oscillatory velocity with a developed radiation surface. The analysis of the effect on the transformation ratio of the features of oscillations of a flat developed disk surface radiation is presented. It is shown that the geometrical dimensions of the disk surface of

radiation set a certain mode of surface oscillations and are associated with the requirements of specific technological processes. This requires an adjustment of the calculated value of the transformation ratio and the acoustic dimensions of the step of a smaller diameter of the composite speed transformer in order to preserve the resonant frequency. It is shown that with transformation ratios of more than 4, the one-dimensional computational model gives a significant error, since does not take into account bending vibrations of the disk surface radiation.

Keywords: ultrasonic transformers of vibrational speed, calculation of a step concentrator, disk radiating surface, ultrasonic spraying in a thin layer, performance of ultrasonic spraying

References

1. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев. – К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2007. – 244 с.
2. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И. П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
3. Кумабэ Д. Вибрационное резание / Пер. с яп. Л.Масленникова / Под ред. И.И.Портнова, В.В.Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
4. Хмелев В.Н. Ультразвуковое распыление жидкостей: монография / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.В. Шалунова; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 250 с.
5. Луговской А.Ф. Повышение производительности ультразвуковых распылителей / А.Ф. Луговской, В.П. Фесич., А.И. Зилинский, А.Д. Лавриненков. – Mechanics and Advanced Technologies, 2 (80), 2017, С. 113-121 <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.111878>
6. Луговський О.Ф. Ультразвукове розпилення рідини у мехатронних системах штучного мікроклімату / О.Ф. Луговський, А.В. Ляшок. – Промислова гідравліка і пневматика, № 4 (34), –Вінниця, 2011, С. 20-25.
7. Экнадиосянц О.К. Получение аэрозолей.: Физические основы ультразвуковой технологии. Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – С. 339-392.
8. Feng H., Barbosa-Cánovas G.V., Weiss J. (Eds.) Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing / Food Engineering Series. – Springer Science+Business Media, 2011. – 665 p.
9. S. Gao, G. D. Lewis, M. Ashokkumar and Y. Nemat, "Inactivation of microorganisms by low-frequency high-power ultrasound: 2. A simple model for the inactivation mechanism," Ultrason. Sonochem. 2014. vol. 21. – P. 454 -460.
10. Лепендин Л.Ф. Акустика / Учебн. Пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1978. – 448 с.
11. Зелях Э.В. Основы общей теории линейных электрических схем. – М.:Изд-во АН СССР, 1951. – 335с.