



УДК 534.114

А. А. Вьюгинова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Исследование частотных свойств трансформатора направления ультразвуковых колебаний

Исследуются частотные свойства крестообразной твердотельной волноводной конструкции, позволяющей получать продольные колебания рабочей поверхности в направлении, перпендикулярном направлению возбуждения. Анализируется изменение рабочей собственной частоты при добавлении круглого или эллиптического отверстия в области центра масс конструкции и влияние геометрии отверстия.

### Ультразвуковой волновод, колебания стержней, ультразвук

Для осуществления некоторых ультразвуковых технологий необходимо получать продольные колебания волновода в направлении, перпендикулярном направлению возбуждения. В качестве примера можно привести ультразвуковые волноводы *Branson Ultrasonics* (рис. 1, а) или *Krell Engineering* (рис. 1, б) [1]. Вариант крестообразного волновода также применен в патенте [2]. В некоторых случаях данный тип волновода предлагается использовать в технологических областях применения, но важным в данном случае является не конкретное применение, а принципиальная возможность передавать ультразвуковые колебания под углом  $90^\circ$ .

Особенностью волноводов этого типа является то, что для данной формы весьма ограничены

или вовсе отсутствуют возможности настройки и доработки внешних поверхностей после изготовления, так как, во-первых, часто необходимо обеспечить полную симметричность формы, во-вторых, часто они предназначены для размещения и передвижения внутри полого изделия, что требует фиксированного размера. Последнее обстоятельство связано, кроме того, с необходимостью изготовления волновода, у которого предварительно задано два параметра: внешние размеры и рабочая частота, в отличие от обычных случаев, когда необходимо получить волновод с определенной рабочей частотой, но имеется возможность варьирования внешних размеров, что значительно усложняет задачу. Таким образом, необходимо ис-

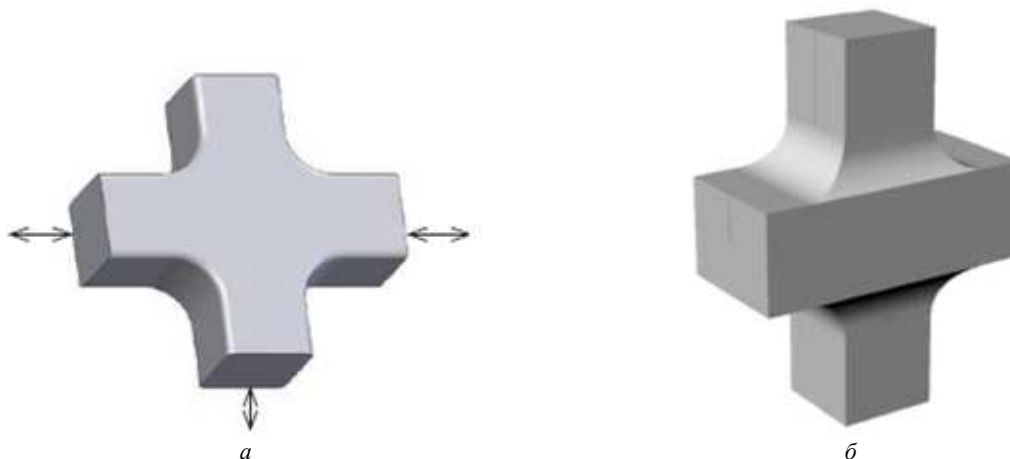


Рис. 1

следовать частотные свойства данного типа конструкций и проанализировать возможности их настройки на необходимую рабочую частоту.

Для обеспечения возможности настройки на необходимую рабочую частоту крестообразного ультразвукового волновода предлагается ввести в области центра масс конструкции один из вариантов отверстия – круглое или эллиптическое – что, как показано в работе, позволяет в широких пределах изменять собственную частоту при фиксированных внешних размерах.

Очевидно, что не представляется возможным описать колебания крестообразного волновода аналитически с использованием уравнения Вебстера, описывающего колебания стержней переменного сечения [3]:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial x} + k^2 U = 0,$$

где  $U$  – колебательное смещение;  $S$  – закон изменения сечения по длине стержня;  $x$  – координата, совпадающая с осью стержня;  $k$  – волновое число, или с помощью иного дифференциального уравнения из-за сложности формы. Поэтому исследование частотных свойств может быть проведено или на основе некоторой эквивалентной геометрической модели, или с помощью метода конечных элементов (МКЭ), примененного в данной работе, который в отличие от аналитического описания не позволяет получить полную картину физической сущности процесса колебаний, но дает возможность исследовать самые общие зависимости собственных частот волноводной конструкции от особенностей геометрии, важные для инженерной практики, что в дальнейшем также может стать основой для проверки работоспособности предлагаемых для такой конструкции математических моделей.

Для моделирования по МКЭ был использован элемент объемных задач механики деформируемого твердого тела (МДТТ) с десятью узлами (тетраэдр), каждый из которых имеет три степени свободы: перемещения в направлении осей  $x$ ,  $y$  и  $z$  узловой системы координат. Помимо узлов элемент определяется свойствами ортотропного материала, причем направления осей данного материала соответствуют направлениям системы координат элемента. В этом случае свойства материала определялись заданием модуля Юнга, коэффициента Пуассона и плотности, соответствующих титану:  $E = 112$  ГПа,  $\rho = 4500$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu = 0.3$ .

Уравнение свободных колебаний для конечно-элементной модели волновода, используемое для определения частотных свойств, имеет следующий вид [4]:

$$M\ddot{u} + Ku = 0,$$

где  $M$  и  $K$  – матрицы масс и жесткостей;  $\ddot{u}$  и  $u$  – векторы ускорения и смещения узлов элементов. Собственные частоты волновода определяются из выражения

$$(K - \omega_i^2 M)\varphi_i = 0,$$

где  $\omega_i$  – частота  $i$ -й моды;  $\varphi_i$  – собственный  $i$ -й вектор (форма моды).

Были рассмотрены три типоразмера крестообразного волновода с поперечным размером ( $L$ ) 50, 80 и 100 мм, выбранные из практических соображений. Для каждого варианта исследовались зависимости собственной частоты от диаметра отверстия  $D$ , изменение которого задавалось следующим рядом: 0, 5, 10, 15, 25 мм (максимальный диаметр связан с прочностными требованиями). Размеры эллиптических отверстий задавались в виде ряда длин больших осей  $H$ : 0, 10, 15, 25 при соотношении большой и малой осей 2:1. Толщина волноводов была фиксированной и во всех случаях не превышала половины длины волны ( $\lambda/2$ ) в материале. Примеры вариантов волновода с круглым и эллиптическим отверстиями и примеры их разбиения на элементы приведены на рис. 2.

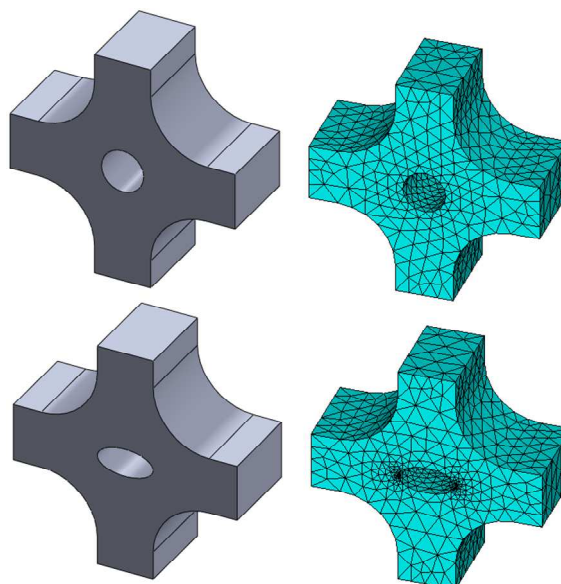


Рис. 2

Для рассматриваемых конструкций волновода с различными вариантами отверстий был проведен модальный анализ в представляющем интерес диапазоне частот с определением частоты

основной моды, позволяющей трансформировать направление колебаний, при которой перпендикулярные друг другу участки совершают продольные колебания. На рис. 3 представлена форма основной моды в виде изменения геометрии волновода на собственной частоте: закрашенным показан волновод, не совершающий колебаний, пунктирными линиями – изменение формы волновода, колеблющегося в основной моде.

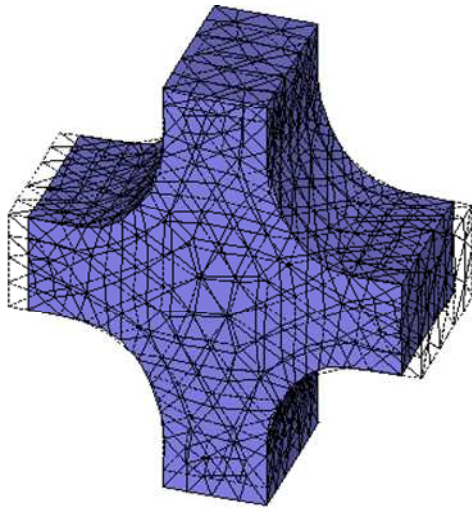


Рис. 3

Обратимся к результатам. На рис. 4 представлены графики зависимости собственной частоты основной моды от диаметра круглого отверстия для трех типоразмеров волновода.

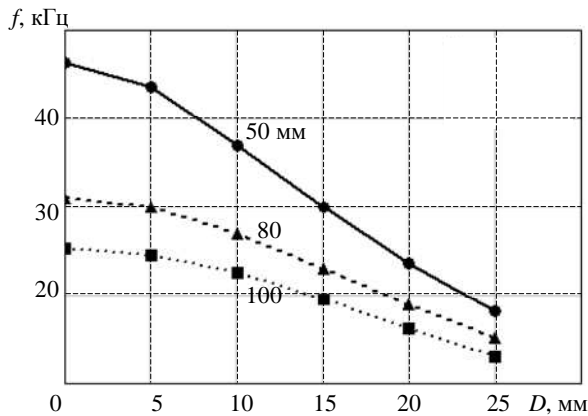


Рис. 4

Как видно из представленных зависимостей, добавление отверстия даже малого диаметра значительно понижает собственную частоту во всех трех вариантах, при этом кривые демонстрируют достаточно резкое снижение частоты при увеличении диаметра отверстия – во всех трех случаях при максимальном рассматриваемом размере отверстия (25 мм) частота приблизительно в 2 раза ниже исходной частоты волновода без отверстия.

Рассмотрим теперь аналогичные зависимости для вариантов с эллиптическим отверстием. На рис. 5 представлены зависимости собственной частоты волноводов от длины большой оси эллипса.

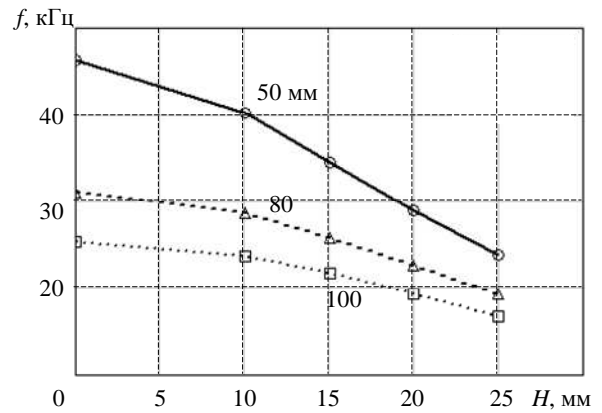


Рис. 5

Полученные в этом случае зависимости имеют более плавный характер – с увеличением размера эллиптического отверстия частота уменьшается медленнее, чем при увеличении диаметра круглого отверстия.

В некоторых случаях более удобным при проектировании волноводных конструкций является использование зависимости относительного изменения (в данном случае, уменьшения) частоты (по отношению к собственной частоте без отверстия) от относительного размера отверстия (по отношению к поперечному размеру) – данные зависимости для всех рассматриваемых вариантов приведены на рис. 6.

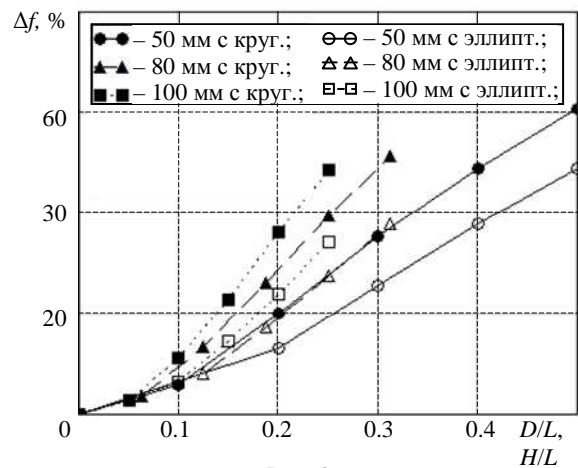


Рис. 6

Используя полученные зависимости, можно эффективно регулировать собственную частоту крестообразного волновода, добавляя в конструкцию отверстие необходимых размера и формы.

На основе полученных данных был спроектирован и изготовлен ультразвуковой волновод, предназначенный для трансформации направления колебаний, с поперечным размером 50 мм (рис. 7).



Рис. 7

Достоинством данного способа настройки является простота осуществления, так как исполне-

ние отверстия не связано с технологическими сложностями, однако необходимо учитывать резкий характер изменения собственной частоты при изменении геометрии отверстия. Таким образом, решается задача получения необходимой собственной частоты волновода при фиксированных внешних размерах, кроме того, появляется возможность проектирования значительно более компактных конструкций только за счет добавления отверстия соответствующей геометрии.

Работа выполнена в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № 02.G25.31.0058 от 12.02.2013 г.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krell Engineering. Industrial resonators. URL: [http://www.krell-engineering.com/fea/industr/industrial\\_resonators.htm](http://www.krell-engineering.com/fea/industr/industrial_resonators.htm).

2. US patent 20130345384 A1. Ultrasonic-assisted molding of precisely-shaped articles and methods / S. Rendon, D. E. Ferguson, D. L. Pochardt, J. S. Warner, T. J. Rowell, P. T. Benson, S. K. Nayar. 2013.

3. Меркулов Л. Г., Харитонов А. В. Теория и расчет составных концентраторов // Акуст. журн. 1959. Т. 5, вып. 2. С. 183–190.

4. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / пер. с англ. М.: Мир, 1984. 428 с., ил.

---

A. A. Vjuginova

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

### ANALYSIS OF FREQUENCY CHARACTERISTICS FOR DIRECTION TRANSFORMER OF ULTRASONIC OSCILLATIONS

*In the present paper frequency characteristics of cross-shaped solid horn construction, which allows deriving longitudinal oscillations of working surface in direction perpendicular to excitation direction, are considered. Changing of eigenfrequency under addition of circular and elliptic hole in the construction's center of mass and influence of hole geometry are analyzed.*

**Ultrasonic horn, rod oscillation, ultrasound**

---