

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-2-121-126>

УДК 621.79 (075.8)

## Сравнительный анализ колебаний ультразвуковых концентраторов кольцевой формы

Канд. техн. наук, доц. В. П. Луговой<sup>1)</sup>, инж. В. В. Луговой<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>ОАО «Минский часовой завод» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021  
Belarusian National Technical University, 2021

**Реферат.** Приведен сравнительный анализ влияния формы кольцевых концентраторов ультразвуковых систем на их амплитудно-частотные характеристики. Известны устройства, в которых упругие элементы используются либо в качестве резонаторов, либо как рабочие инструменты ультразвуковых технологических систем. Однако использование упругих элементов в качестве концентраторов ультразвуковых колебаний недостаточно изучено и требует проведения комплексных исследований и разработки рекомендаций для их практического применения. С этой целью в статье с помощью компьютерной программы ANSYS проведен теоретический анализ, позволивший выполнить модальный и гармонический анализ моделей кольца с различной формой. Кольцо круглой формы имеет номинальный наружный диаметр 50 мм и переменное сечение. Анализировались три модели колец: одно круглое и два овальной формы. Для осуществления сравнения и выявления частот, при которых возникает резонанс, характеристики колебаний колец рассматривались в диапазоне частот от 1 до 26 кГц. Результаты анализа показывают, что в зависимости от частоты вынужденных колебаний в кольцах образуются изгибные колебания, которые действуют в различных координатных плоскостях. При этом изменение формы колец сопровождается изменением амплитуды изгибных колебаний. Наиболее интенсивные колебания вдоль вертикальной оси были достигнуты в кольцах круглой формы. Установлено, что с повышением частоты вынужденных колебаний наблюдается увеличение числа периодов колебаний. Если в области низких частот колебаний в кольце образуется только однопериодная мода колебаний, то в области ультразвуковых колебаний число периодов колебаний увеличивается до двух и трех. Все рассматриваемые модели колец имеют несколько собственных частот колебаний с определенной периодичностью в разных координатных плоскостях в зависимости от формы колец. Интенсивность колебаний различна в разных направлениях и зависит от формы и частоты вынужденных колебаний. Демонстрируются примеры разновидностей моды колебаний для всяких форм колец.

**Ключевые слова:** геометрическая форма колец, концентратор колебаний, ультразвуковые системы, модальный и гармонический анализ, колебание колец

**Для цитирования:** Луговой, В. П. Сравнительный анализ колебаний ультразвуковых концентраторов кольцевой формы / В. П. Луговой, В. В. Луговой // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 2. С. 121–126. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-2-121-126>

## Comparative Analysis of Vibrations of Ring-Shaped Ultrasonic Concentrators

V. P. Lugovoi<sup>1)</sup>, V. V. Lugovoi<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Open Joint Stock Company “Minsk Watch Plant” (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper provides a comparative analysis of the influence of ring concentrator shape in ultrasonic systems on their amplitude-frequency characteristics. Devices are known in which elastic elements are used either as resonators or as working tools of ultrasonic technological systems. However, the use of elastic elements as concentrators of ultrasonic vibrations is insufficiently studied and requires comprehensive research and development of recommendations for their practical application. For this purpose, a theoretical analysis has been carried out in the paper while using the ANSYS computer program, which made it possible to perform modal and harmonic analysis of ring models with various shapes. The round ring has a nominal outer diameter of 50 mm and a variable cross-section. Three ring models have been analyzed: one round model

### Адрес для переписки

Луговой Вячеслав Петрович  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 22,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-91-01  
Vlugovoj@bntu.by

### Address for correspondence

Lugovoi Vjacheslav P.  
Belarusian National Technical University  
22, Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-91-01  
Vlugovoj@bntu.by

and two models of oval shape. To conduct a comparative analysis and identify frequencies at which resonance occurs, the vibration characteristics of the rings have been considered in the frequency range from 1 to 26 kHz. Results of the analysis show that, depending on the frequency of forced vibrations, bending vibrations are formed in the rings, which act in different coordinate planes. In this case, a change in the shape of the rings is accompanied by a change in the amplitude of the bending vibrations. The most intense ring vibrations along the vertical axis have been achieved in circular rings. It has been found that with an increase in the frequency of forced oscillations, an increase in the number of oscillation periods is observed. If in the region of low vibration frequencies only a one-period vibration mode is formed in the ring, then in the region of ultrasonic vibrations the number of vibration periods increases to two and three. All the considered ring models have several natural vibration frequencies with a certain periodicity in different coordinate planes depending on the shape of the rings. The intensity of the vibrations is different in different directions and depends on the shape and frequency of the forced vibrations. Examples of vibration mode variations for various ring shapes are demonstrated in the paper.

**Keywords:** geometric shape of rings, vibration concentrator, ultrasonic systems, modal and harmonic analysis, rings vibrations

**For citation:** Lugovoi V. P., Lugovoi V. V. (2021) Comparative Analysis of Vibrations of Ring-Shaped Ultrasonic Concentrators. *Science and Technique*. 20 (2), 121–126. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-2-121-126> (in Russian)

## Введение

Упругие элементы обладают рядом механических свойств, которые позволяют эффективно применять их в различных устройствах, механизмах и приборах [1, 2]. К числу таких свойств относится способность усиливать или, наоборот, демпфировать колебания. В области ультразвуковой технологии их применяют в качестве резонаторов, рабочих инструментов или концентраторов колебаний для осуществления всевозможных технологических операций: для обработки резанием и пластического деформирования материалов, в качестве чувствительных элементов в измерительных приборах и т. д. Теоретическое обоснование применения упругих элементов дано в [1, 3]. Однако их практическое использование в ультразвуковой технике ограничено из-за недостаточности сведений о влиянии колебаний разных частот на их акустические характеристики, влиянии геометрической формы и размеров, что требует дальнейшего изучения с целью выработки практических рекомендаций.

Важнейшее свойство упругих элементов – способность накопления потенциальной энергии и передачи ее рабочему инструменту, выполняющему механическую работу. Эти возможности использованы, например, в акустических системах, содержащих упругие элементы в виде кольца с переменной жесткостью [4–8]. Показано, что упругое кольцо является при этом и резонатором ультразвуковой системы, согласовывая частоты колебаний источника с элементами акустической системы. Можно привести другие технические решения по совершенствованию ультразвуковых систем, в которых использованы упругие свойства таких элементов, как проволока, металлическая

лента, пружина и пр. Более полные исследования по кольцам переменного сечения представлены в [9, 10], где их применяли в качестве концентраторов ультразвуковых систем для прошивания отверстий в хрупких материалах, что дало положительный результат.

Очевидно, дальнейшее исследование данного вопроса открывает новые возможности и в области ультразвуковой технологии. В связи с этим авторами выполнены теоретические обоснования геометрической формы упругих колец с переменным сечением, которые позволят повысить эффективность работы ультразвуковых систем.

## Анализ влияния формы кольцевых волноводов на их частотные характеристики

Для сравнения результатов исследований за основу были приняты модели колец круглой и овальной форм, имеющих переменную и равную для всех форм толщину сечения (рис. 1).

Номинальный наружный диаметр кольца, принятого в качестве основной модели (рис. 1а), 50 мм, толщина в поперечном сечении 10 мм. Геометрическая форма профиля двух остальных моделей колец представляла собой овалы, образованные из основной модели путем изменения соотношения размеров полуосей овала. При этом соблюдалась обратная пропорциональность в соотношении размеров полуосей вдоль осей координат. Их соотношение составляло соответственно 75/37 и 37/75 мм.

В качестве материала для моделей колец была принята сталь 45. Переменная жесткость колец достигалась изменением толщины сечения в плоскости чертежа в самой верхней и самой нижней точках в направлении вертикальной оси.

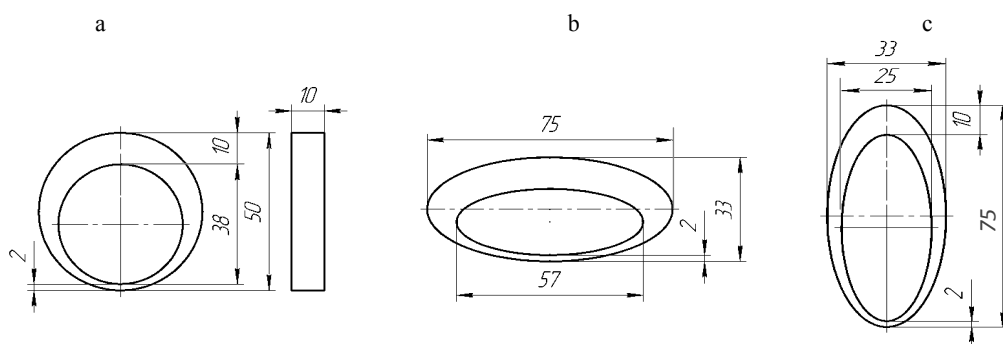


Рис. 1. Варианты геометрической формы и размеры моделей колец

Fig. 1. Options for geometric shapes and sizes of ring models

Все модели колец имели одинаковое соотношение толщин в этих точках, определяемое коэффициентом

$$K_T = \frac{h_1}{h_2} = \frac{10}{2} = 5,$$

где  $h_1$ ,  $h_2$  – толщина сечения в верхней и нижней частях кольца.

Полученные результаты численных расчетов для всех трех вариантов колец, выполненных с использованием компьютерной программы ANSYS, представлены на рис. 2. Результаты расчетов показали, что при изменении частоты вынужденных колебаний в кольцах попеременно возбуждаются резонансные колебания в одном из координатных направлений:  $Y$ ,  $X$ ,  $Z$  ( $Y$  – вертикальная ось симметрии кольца;  $X$  – горизонтальная ось кольца;  $Z$  – горизонтальная ось, направленная перпендикулярно плоскости кольца).

Гармонический анализ исследуемых моделей колец показал, что существуют несколько повторяющихся пиков частот собственных колебаний, при которых возникают резонансные явления по направлению одной из осей координат. При этом в условиях резонанса возбуждается наибольшая амплитуда колебаний в направлении одной из осей координат. В промежутках между пиковыми значениями в кольце образуются сложные колебания, действующие по двум или трем координатам, представляющие изгибные или крутильные колебания.

При совпадении частот вынужденных колебаний с частотами собственных колебаний в кольце образуется резонанс всей системы, который на графиках выражен характерным пиком, отображенным на рисунках цветными линиями. Анализ полученных результатов, представленных в диаграмме, позволил сделать следующие выводы:

– наибольшие значения амплитуды колебаний возникают в кольцах всех форм в области низких частот в пределах 2–4 кГц;

– в кольцах первой и третьей форм (круглом и удлиненного овала) наблюдается закономерная периодичность пиков резонансных колебаний по всем координатным направлениям. Кольцо второго типа не имеет явной выраженной закономерности периодичности образования резонансных колебаний;

– интенсивность колебаний в моделях первой и третьей форм понижается по мере повышения частоты вынужденных колебаний. Вторая модель кольца позволяет получить существенное возрастание амплитуды боковых колебаний в направлении оси  $X$  на частоте 13 кГц. При этом боковые колебания по направлению оси  $X$  в диапазоне частот 8–16 кГц убывают до минимума, а затем образуются вновь в области ультразвуковых частот (16,8 кГц);

– у модели третьей формы наблюдается нарастающий характер амплитуды продольных колебаний вдоль оси  $Y$  до частоты 11 кГц, при которой достигаются наибольшие значения, после чего происходит постепенное уменьшение интенсивности колебаний;

– в области ультразвуковых колебаний (с частотой более 16 кГц) наиболее интенсивные колебания достигаются: в кольце круглой формы – в продольном направлении вдоль оси  $Y$ ; в кольце второй формы – поперечные колебания вдоль оси  $Z$ ; в кольце третьей формы – боковые колебания в направлении  $X$ .

Анализ колебаний исследуемых колец дополняет модальный анализ, который позволяет качественно оценить вид моды колебаний и визуально рассмотреть и представить характер колебаний в каждом интервале частот. При проведении гармонического и модального анализа цветовая окраска модели помогает выявить и рассмотреть области с различной интенсивностью колебаний.

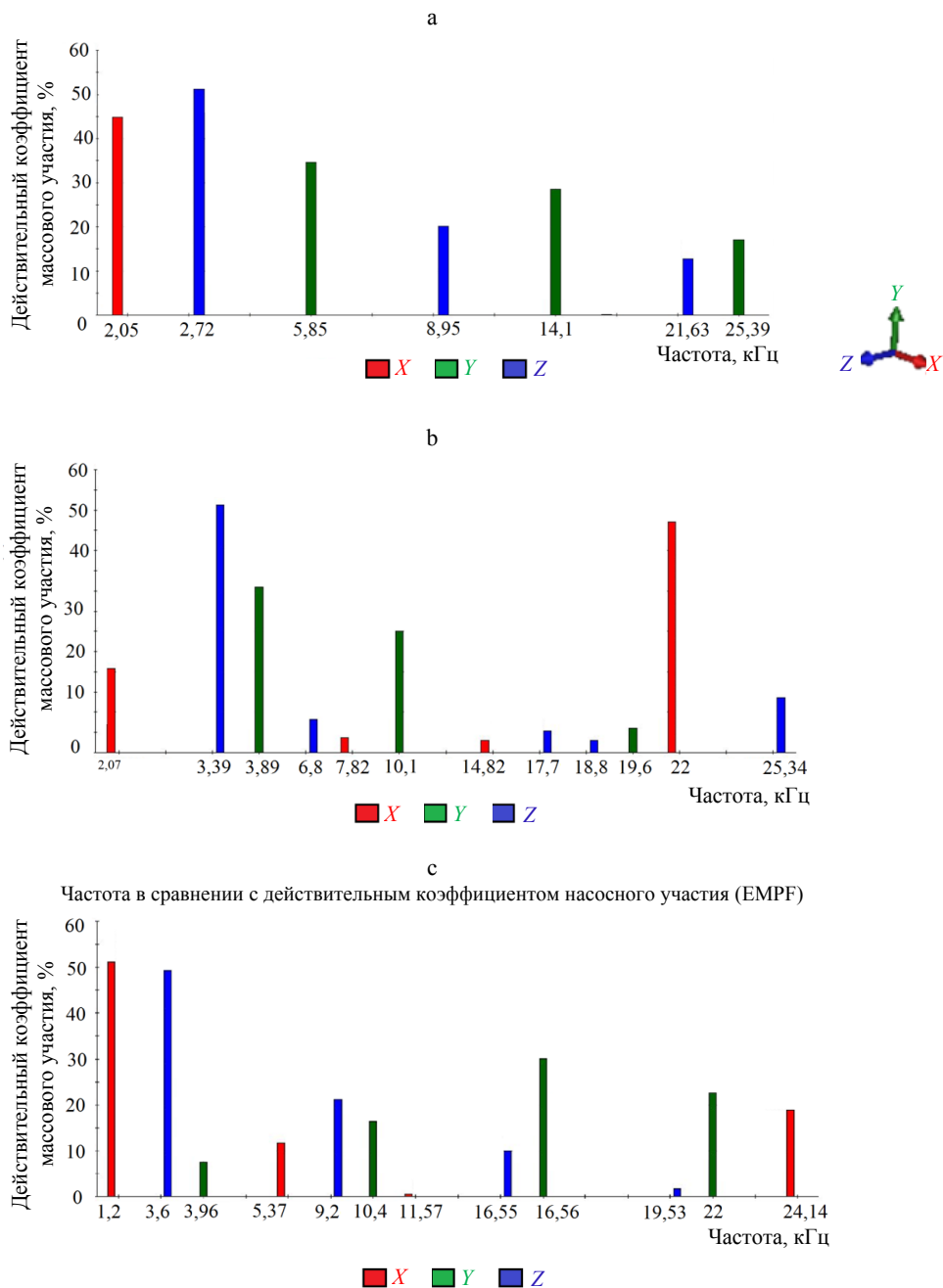


Рис. 2. Диаграммы частотных характеристик упругих колец

Fig. 2. Frequency response diagrams of elastic rings

**Модальный анализ  
кольцевых волноводов  
ультразвуковых колебательных систем**

Результаты численных расчетов частот и амплитуды колебаний, а также моды колебаний при различных значениях частоты вынужденных колебаний, полученных для разных вариантов моделей кольцевых концентраторов, представлены на рис. 3.

Сравнение результатов модального анализа показывает, что общим свойством колец независимо от геометрической формы является изменение в сторону увеличения числа узловых линий при повышении частоты вынужденных колебаний и изменение формы колебаний. В области низкочастотных колебаний все кольца имеют один полупериод колебаний и визуально идентифицируются как упруго сжатые кольца при действии статической силы.

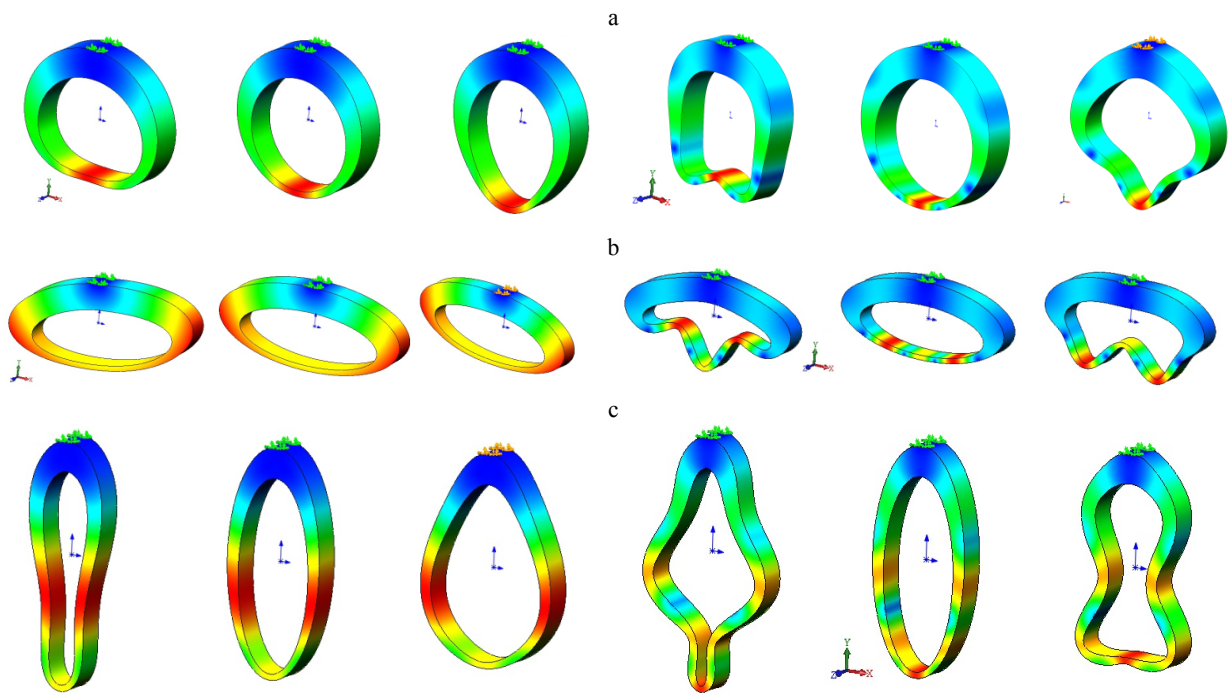


Рис. 3. Форма колебаний различных моделей колец

Fig. 3. Vibration form of various ring models

Колебания в области высоких частот, в том числе в области ультразвуковых колебаний, сопровождаются образованием в кольцах двух и более узловых линий, что характеризует появление в кольцах изгибных колебаний, направленных по образующей линии. Участок с наибольшей амплитудой колебаний в этих случаях может располагаться в различных зонах в зависимости от формы колец. В кольцах круглой формы (первый тип модели) наиболее интенсивные колебания возникают в самой узкой части переменного профиля. При этом в условиях резонанса образуется симметричная форма колебаний относительно продольной оси  $Y$  (рис. 3). В промежуточных областях между пиками резонансов возникают комбини-

рованные колебания или колебания с модой асимметричной формы (рис. 4) относительно других осей координат.

На рис. 4а показана мода асимметричных колебаний кольца круглой формы, при которой зона наиболее интенсивных колебаний смещается попеременно, в результате чего одна половина кольца находится в области сжатия, а вторая – в области растяжения. На рис. 4б демонстрируется другой пример периодических колебаний, когда кольцо колеблется вокруг вертикальной оси.

Дальнейший анализ для моделей второго и третьего типов показал, что наиболее интенсивные колебания в этих случаях возникают у боковых стенок.

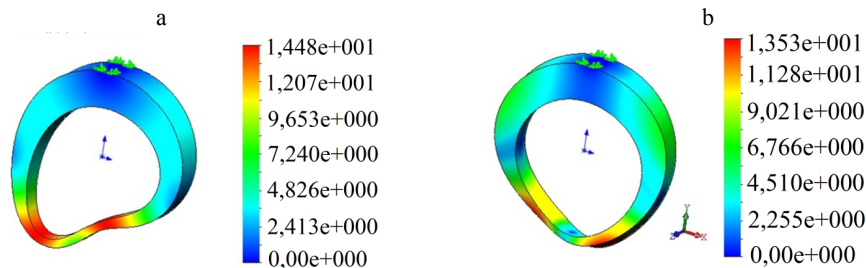


Рис. 4. Примеры действия асимметричных и комбинированных колебаний кольца круглой формы

Fig. 4. Examples of the action of asymmetric and combined oscillations of a ring having a round shape

## ВЫВОДЫ

1. Сравнительный анализ полученных теоретических расчетов дает возможность установить моды колебаний кольцевых волноводов, определить направления их действия, количественно оценить их величину и обосновать оптимальную форму для ультразвуковых систем.

2. Проведен сравнительный гармонический и модальный анализ кольцевых волноводов круглых и овальных форм в диапазоне колебаний частотой от 1 до 16 кГц, позволивший установить области образования резонансов в направлении трех осей координат.

3. Кольцевые волноводы обладают периодичностью образования резонансных колебаний в широком диапазоне частот колебаний.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева, Л. Е. Упругие элементы приборов / Л. Е. Андреева. М.: Машиностроение, 1981. 392 с.
2. Ананьев, И. В. Колебания упругих систем в авиационных конструкциях и их демпфирование / И. В. Ананьев, П. Г. Тимофеев. М.: Машиностроение, 1965. 240 с.
3. Пфейффер, П. Колебания упругих тел / П. Пфейффер, пер. с нем. А. И. Лурье. Л.: ОНТИ, Гос. техн.-теор. изд-во, 1934. 154 с.
4. Компьютерное моделирование и анализ колебаний кольцевого концентратора ультразвуковой системы / В. П. Луговой [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 3. С. 220–227. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-220-227>.
5. Степаненко, Д. А. Влияние формы кольцевого концентратора ультразвуковой системы на коэффициент усиления амплитуды колебаний / Д. А. Степаненко, И. В. Луговой, В. П. Луговой // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 3. С. 209–215. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-3-209-215>.
6. Босаков, С. В. К определению перемещений в упругом эллиптическом кольце / С. В. Босаков, И. В. Луговой // Наука и техника. 2013. № 3. С. 59–62.
7. Разработка и исследование нового типа концентраторов ультразвуковых колебаний на основе кольцевых упругих элементов / Д. А. Степаненко [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. 2013. Т. 18, № 2. С. 90–94.
8. Increase of Productivity in Brittle Material Processing by the Application of Intermediate Elastic Elements in Tool Structure / I. Lugovoi [et al.] // *Vibroengineering PROCEDIA*. 2014. Vol. 3. P. 175–179.
9. Ультразвуковой инструмент для обработки отверстий: пат. Респ. Беларусь № 8169, МПК В24 В1/04 / И. В. Луговой, В. Т. Минченя, В. П. Луговой. Опубл. 30.04.2012.

10. Ультразвуковой инструмент для обработки или измерения детали: пат. Респ. Беларусь № 19219, МПК В 06В 1/00 / И. В. Луговой, В. Т. Минченя, В. П. Луговой. Опубл. 30.06.2015.

Поступила 15.06.2020

Подписана в печать 24.08.2020

Опубликована онлайн 30.03.2021

## REFERENCES

1. Andreeva L. E. (1981) *Elastic Elements of Devices*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 392 (in Russian).
2. Ananiev I. V., Timofeev P. G. (1965) *Oscillations of Elastic Systems in Aircraft Structures and their Damping*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 240 (in Russian).
3. Pfeiffer F. (1928) *Handbuch der Physik. Band VI. Mechanik der Elastischen Korper* [Vibrations of Elastic Bodies]. Berlin, Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48543-5> (in German).
4. Lugovoi V. P., Pronkevich S. A., Lugovoi I. V., Dovernar S. S. (2018) Computer Modeling and Analysis of Vibrations in Annular Concentrator of Ultrasonic System. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 17 (3), 220–227. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-220-227> (in Russian).
5. Stepanenko D. A., Lugovoi I. V., Lugovoi V. P. (2016) Shape Effect of Annular Concentrator in Ultrasonic System on Amplification Factor of Vibrations Amplitude. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 15 (3), 209–215. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-3-209-215> (in Russian).
6. Bosakov S. V., Lugovoi I. V. (2013) To Determination of Movements in Elastic Elliptical Ring. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (3), 59–62 (in Russian).
7. Stepanenko D. A., Minchenya V. T., Lugovoy V. P., Lugovoy I. V. (2013) Development and Study of Novel Type of Ultrasonic Concentrators Based on Ring-Shaped Elastic Element. *Materialy, Tekhnologii, Instrumenty* [Materials, Technologies, Tools], 18 (2), 90–94 (in Russian).
8. Lugovoj I., Minchenya V., Baurienė G., Bubulis A., Pilkauskas K. (2014) Increase of Productivity in Brittle Material Processing by the Application of Intermediate Elastic Elements in Tool Structure. *Vibroengineering PROCEDIA*, 3, 175–179.
9. Lugovoi I. V., Minchenya V. T., Lugovoi V. P. (2012) *Ultrasonic Tool for Hole Processing*. Patent of the Republic of Belarus No 8169 (in Russian).
10. Lugovoi I. V., Minchenya V. T., Lugovoi V. P. (2015) *Ultrasonic Tool for Processing or Measuring Parts*. Patent of the Republic of Belarus No 19219 (in Russian).

Received: 15.06.2020

Accepted: 24.08.2020

Published online: 30.03.2021