

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-3-209–215

УДК 621.79 (075.8)

Влияние формы кольцевого концентратора ультразвуковой системы на коэффициент усиления амплитуды колебаний

Канд. техн. наук, доц. Д. А. Степаненко¹⁾, асп. И. В. Луговой¹⁾, канд. техн. наук, доц. В. П. Луговой¹⁾¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. В статье дано теоретическое обоснование создания концентраторов ультразвуковых колебаний на основе кольцевых упругих элементов с некруглым (эллипсообразным) эксцентричным профилем внутреннего контура. Форма внутреннего контура в полярных координатах описывается рядом Фурье по угловой координате, состоящим из постоянного члена и первой и второй гармоник. С помощью метода конечных элементов исследовано влияние геометрических параметров концентратора на коэффициент усиления и собственные частоты колебаний. Показана возможность управления коэффициентом усиления кольцевых концентраторов путем изменения эксцентриситета внутреннего контура и среднего значения толщины поперечного сечения. Коэффициент усиления удовлетворяет условию $K < N$, где N – отношение толщин входного и выходного сечений концентратора, и снижается с увеличением порядка моды колебаний. Аналогичное условие выполняется для стержневого конического концентратора, с той разницей, что в случае стержневых концентраторов усиление обеспечивается за счет изменения диаметра, а N представляет собой отношение диаметров. Показано, что изменение формы внутреннего контура позволяет регулировать собственные частоты колебаний концентратора в широком диапазоне без изменения габаритных размеров и существенного изменения коэффициента усиления, что важно для частотного согласования концентратора с ультразвуковой колебательной системой. Преимуществами предложенных концентраторов являются простота конструкции и изготовления, малые габаритные размеры, возможность регулировки собственной частоты колебаний путем изменения статической нагрузки. Разработанные концентраторы могут найти применение в ультразвуковых установках и приборах технологического и медицинского назначения.

Ключевые слова: ультразвуковой концентратор, метод конечных элементов, изгибные колебания, коэффициент колебания, собственные частоты

Для цитирования: 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

Shape Effect of Annular Concentrator in Ultrasonic System on Amplification Factor of Vibration Amplitude

D. A. Stepanenko¹⁾, I. V. Lugovoy¹⁾, V. P. Lugovoy¹⁾¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper contains a theoretical underpinning on creation of ultrasonic vibration concentrators based on annular elastic elements with non-circular (ellipse-like) eccentric shape of internal contour. Shape of internal contour in polar coordinates is described by Fourier series relative to angular coordinate that consists of a constant term and first and second harmonics. An effect of geometric parameters of the concentrator on amplification factor and natural vibration frequencies has been investigated with the help of a finite element method. The paper reveals the possibility to control an amplification factor of annular concentrators while varying eccentricity of internal contour and mean value of cross-section thickness. The amplification factor satisfies a condition $K < N$, where N is thickness ratio of amplifier input and output sections, and it is decreasing

Адрес для переписки

Степаненко Дмитрий Александрович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-40-81
kipp@bntu.by

Address for correspondence

Stepanenko Dmitri A.
Belarusian National Technical University
22 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-40-81
kipp@bntu.by

with increase of vibration mode order. The similar condition has been satisfied for conical bar concentrator with the difference that in the case of bar concentrators an amplification is ensured due to variation of diameter and N will represent ratio of diameters. It has been proved that modification of internal contour shape makes it possible to carry out a wide-band tuning of natural frequencies of concentrator vibrations without alteration of its overall dimensions and substantial change of amplification factor, which is important for frequency matching of the concentrator and ultrasonic vibratory system. Advantages of the proposed concentrators include simplicity of design and manufacturing, small overall dimensions, possibility for natural frequency tuning by means of static load variation. The developed concentrators can find their application in ultrasonic devices and instruments for technological and medical purposes.

Keywords: ultrasonic concentrator, finite element method, flexural vibrations, amplification factor, natural frequencies

For citation: Stepanenko D. A., Lugovoy I. V., Lugovoy V. P. (2016) Shape Effect of Annular Concentrator in Ultrasonic System on Amplification Factor of Vibration Amplitude. *Science & Technique*. 15 (3), 209–215 (in Russian)

Введение

Благодаря свойству упругих тел накапливать потенциальную энергию их можно применять в различных устройствах в качестве аккумуляторов механической энергии, чувствительных элементов измерительных приборов, упругих опор, амортизаторов [1]. Способность воспринимать действие вынужденных колебаний в широком диапазоне частот позволила также использовать их в различных вибрационных устройствах.

Одной из сфер применения упругих элементов являются ультразвуковые техника и технология [2–6]. В частности, теоретически описана и экспериментально обоснована возможность создания концентраторов ультразвуковых колебаний на основе кольцевых упругих элементов [7]. Основные преимущества концентраторов на базе кольцевых упругих элементов по сравнению со стержневыми концентраторами – технологичность, малые габаритные размеры и масса.

Деформация кольцевого упругого концентратора складывается из двух составляющих: статической деформации $u_{\text{ст}}$ от действия статической нагрузки $P_{\text{ст}}$ и динамической деформации $u_{\text{дин}}$, вызванной действием вынужденных колебаний:

$$u = u_{\text{ст}} + u_{\text{дин}}.$$

Наличие упругой статической деформации в кольцевом концентраторе экспериментально установлено в [8], где предложены два вида кольцевых концентраторов, отличающихся формой поперечного сечения: с постоянной и переменной толщинами сечения. Важная особенность применения кольцевых концентраторов – возможность согласования резонансных частот концентратора и ультразвуковой колебательной

системы, являющейся источником колебаний, при изменении величины статической нагрузки $P_{\text{ст}}$ на связанный с концентратором рабочий инструмент. Эта особенность обусловлена тем, что в отличие от стержневых кольцевые концентраторы – нежесткие элементы. Потому резонансная частота последних зависит от их статической деформации $u_{\text{ст}}$ и как следствие от величины приложенной к ним нагрузки.

Анализ и расчет кольцевых упругих элементов с постоянной толщиной поперечного сечения показал, что в режиме вынужденных колебаний они могут обеспечить значительный коэффициент усиления колебаний по амплитуде ($K > 100$) при большой ширине резонанса (более 10 % от номинального значения резонансной частоты на уровне коэффициента усиления $K = 10$), чего достигнуть с помощью ультразвуковых систем с традиционными стержневыми концентраторами не удастся [9]. Другой положительной чертой предлагаемых кольцевых концентраторов является возможность реализации благодаря упругой связи между рабочим инструментом и ультразвуковой колебательной системой виброударных режимов взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом, характеризующихся одновременным действием высокочастотных ультразвуковых и низкочастотных колебаний. Это способствует повышению производительности обработки материалов. С таких позиций особый интерес представляет вопрос о влиянии формы кольцевых концентраторов на коэффициент усиления амплитуды ультразвуковых колебаний. В связи с этим в статье дается теоретическое обоснование возможности использования кольцевых концентраторов с переменной толщиной поперечного сечения, имеющих некруглый эксцентричный профиль.

Методика и результаты исследований

В основу исследования положена гипотеза о том, что изменение толщины поперечного сечения кольцевого упругого элемента позволит усилить колебания по амплитуде, подобно стержневым концентраторам, в которых уменьшение диаметра поперечного сечения обеспечивает усиление амплитуды колебаний [10]. Простейшей формой кольцевого упругого элемента с переменной по длине толщиной поперечного сечения является кольцо с эксцентриситетом внутреннего кругового контура относительно наружного. Зависимость радиальной координаты r_1 точек внутреннего контура от угловой координаты φ_1 в системе координат с полюсом, расположенным в центре кривизны наружного контура, в этом случае описывается уравнением [11]

$$r_1(\varphi_1) = \sqrt{r_0^2 + e^2 + 2r_0e \cos\left(\varphi_1 + \arcsin\left(\frac{e \sin(\varphi_1)}{r_0}\right)\right)}, \quad (1)$$

где r_0 – радиус внутреннего контура; e – величина эксцентриситета.

С учетом периодичности зависимости толщины поперечного сечения от угловой координаты $h(\varphi_1) = R - r_1(\varphi_1)$ (где R – радиус наружного контура) функция $h(\varphi_1)$ может быть разложена в ряд Фурье. Расчеты и данные [11] показывают, что в этом ряде амплитуды гармоник с порядком, выше второго, становятся пре-

небрежимо малыми. Это позволяет приближенно записать ряд в виде

$$h(\varphi_1) = \frac{1}{2}a_0 - e \cos(\varphi_1) + \left(R - r_0 - \frac{1}{2}a_0\right) \cos(2\varphi_1), \quad (2)$$

где первый член ряда представляет собой среднее значение толщины поперечного сечения.

Некруглую эллипсовидную форму внутреннего контура кольцевого элемента можно получить, варьируя значение параметра a_0 при соблюдении условия

$$2(R - r_0) - 0,5e \leq a_0 \leq 2(R - r_0) + 0,5e. \quad (3)$$

В этом случае толщина поперечного сечения будет монотонно возрастать в диапазоне $0 \leq \varphi_1 \leq \pi$, а толщина кольцевого элемента во входном и выходном поперечных сечениях сохранит постоянные значения $h(\pi) = R - r_0 + e$ и $h(0) = R - r_0 - e$. Примеры изменения толщины поперечного сечения в зависимости от параметра a_0 в случае $R = 25$ мм, $r_0 = 20$ мм, $e = 3$ мм приведены на рис. 1.

Изображенным на рис. 1 различным вариантам формы профиля кольцевого концентратора будут соответствовать различные собственные частоты колебаний, что, в свою очередь, повлияет на коэффициент усиления амплитуды колебаний.

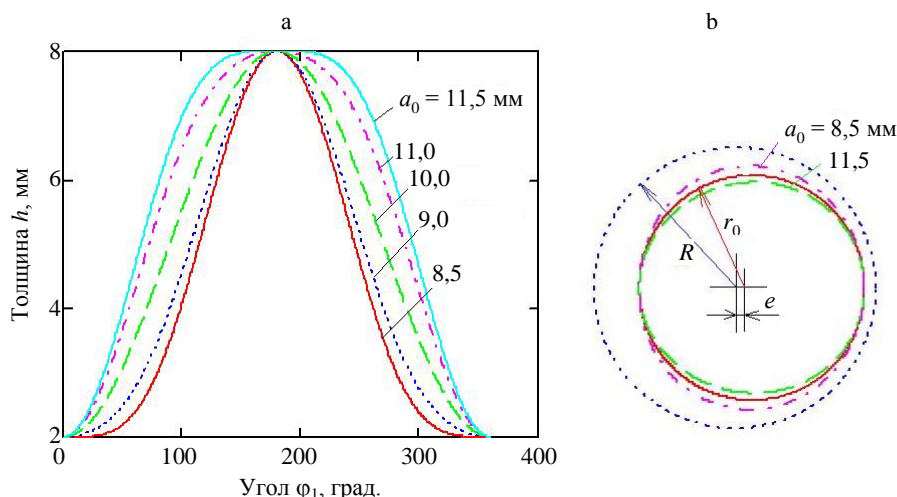


Рис. 1. Изменение толщины поперечного сечения кольцевого элемента в зависимости от параметра a_0 : а – зависимость от угловой координаты; б – вид контура в полярных координатах

Fig. 1. Variations in cross-section thickness annular element according to parameter a_0 : а – dependence on angular coordinate; б – contour shape in polar coordinates

Для изучения данного вопроса использовался модальный анализ с помощью метода конечных элементов с применением программы ANSYS и параметрического языка программирования APDL. Достоинство такого анализа – возможность автоматизировать процесс многократного повторения расчетов для различных значений параметров a_0 и e . При расчете приняты физико-механические свойства стали с модулем упругости $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0,28$ и плотностью $\rho = 7800$ кг/м³. Внутренний контур кольцевого элемента задавался в виде В-сплайна по 19 ключевым точкам, соответствующим изменению полярного угла φ_1 с шагом 10° . Эксцентриситет e варьировался в диапазоне от 0 до 3,0 мм с шагом 0,5 мм, а параметр a_0 – в диапазоне, определяемом неравенством (3), с шагом 0,5 мм. Отдельно рассматривалось значение параметра a_0 , соответствующее круглой форме внутреннего контура кольцевого элемента. Это значение определяли по формуле

$$a_0 = 2R - \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} r_1(\varphi_1) d\varphi_1, \quad (4)$$

где $r_1(\varphi_1)$ – определяется уравнением (1).

Модель разбивали на 10-узловые тетраэдрические конечные элементы типа SOLID92. Использовали автоматическое задание размера конечных элементов с помощью команды SMRTSIZE со средним размером конечных

элементов (SIZLVL = 6) и последующим улучшением сетки с помощью команды EREFINE с уровнем улучшения LEVEL = 3 (разбиение каждого из элементов на новые элементы с размером 1/8 от размера исходного элемента). С учетом геометрической симметрии модели и для исключения внеплоскостных мод изгибных колебаний рассматривали четверть кольцевого элемента, для которой $0 \leq \varphi_1 \leq \pi$ и $0 \leq z \leq 0,5H$, где $H = 5$ мм – высота кольцевого элемента, с наложением симметричных граничных условий на плоскости разреза. Модальный анализ производили с помощью блочного метода Ланцоша. Коэффициент усиления рассчитывали по формуле

$$K = |u_{r1}(0, R) / u_{r1}(\pi, R)|,$$

где $u_{r1}(\varphi_1, r_1)$ – амплитуда радиального смещения точки кольцевого элемента с координатами (φ_1, r_1) .

Для упрощения определения радиальной составляющей смещений узлов результаты анализа рассматривали в глобальной цилиндрической системе координат с осевой координатой, отсчитываемой вдоль оси z (RSYS, 1). В качестве примера на рис. 2 приведены графики зависимости коэффициента усиления для 2-й и 4-й мод изгибных колебаний (имеющих 4 и 8 узловых точек) от параметра a_0 при различных значениях эксцентриситета e .

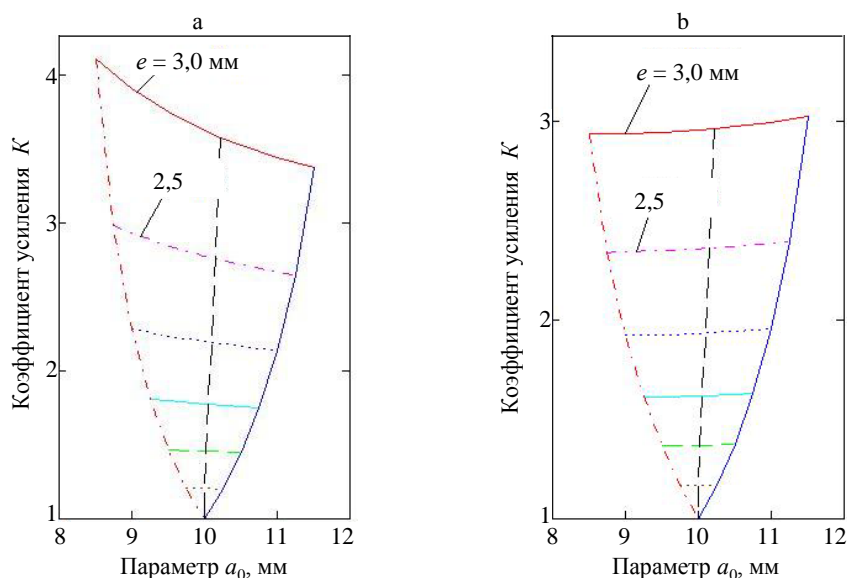


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления K от параметра a_0 :
а – для 2-й моды изгибных колебаний; б – для 4-й моды изгибных колебаний

Fig. 2. Dependence of amplification factor K on parameter a_0 :
а – for 2nd mode of flexural vibrations; б – for 4th mode of flexural vibrations

Вертикальные кривые, ограничивающие кривые $K(a_0)$ слева и справа, соответствуют значениям коэффициента усиления для предельных значений параметра a_0 , определяемых неравенством (3), а вертикальная кривая, делящая кривые $K(a_0)$ на две части, – значениям коэффициента усиления для параметра a_0 , определяемого равенством (4) и соответствующего круглой форме внутреннего контура кольцевого элемента.

При $e = 0$ (круглый внутренний контур без эксцентриситета) кривая $K(a_0)$ вырождается в точку, в которой сходятся три упомянутые выше кривые. Изменение собственных частот изгибных колебаний сопровождается изменением формы и порядка мод колебаний, а также числа узловых точек по периметру кольцевого концентратора, что показано на рис. 3.

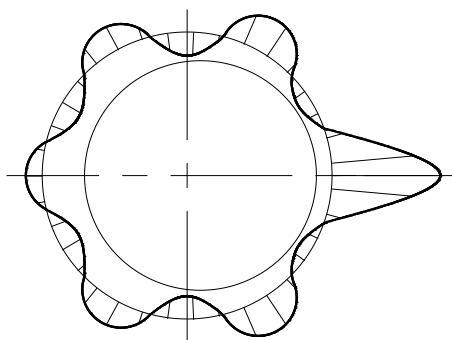


Рис. 3. Узловые точки и эпюра распределения амплитуды для 6-й моды изгибных колебаний

Fig. 3. Nodal points and orthographic epure of amplitude distribution for 6th mode of flexural vibrations

Графики, демонстрирующие влияние параметра a_0 на собственную частоту 2-й и 4-й мод изгибных колебаний в зависимости от эксцентриситета e , приведены на рис. 4. Как видно из графиков, с увеличением эксцентриситета коэффициент усиления возрастает, а собственные частоты уменьшаются. Собственные частоты возрастают с увеличением параметра a_0 независимо от порядка моды колебаний. Причем изменение собственной частоты по отношению к ее минимальному значению может превышать 40 %. Коэффициент усиления в зависимости от порядка моды колебаний может как убывать, так и возрастать с увеличением параметра a_0 , причем изменение коэффициента усиления по отношению к его минимальному значению не превышает 20 %.

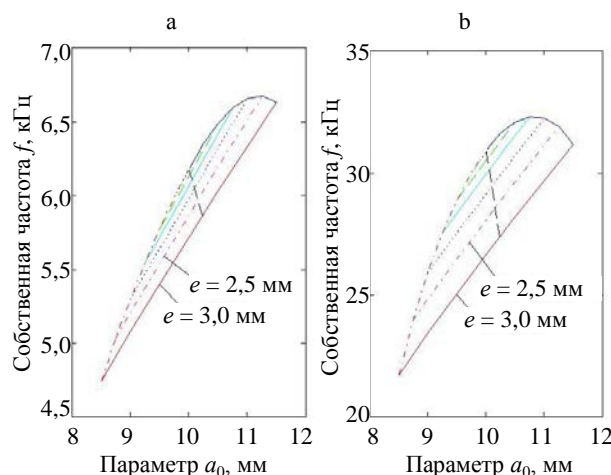


Рис. 4. Зависимость собственной частоты от параметра a_0 :
а – для 2-й моды изгибных колебаний;
б – для 4-й моды изгибных колебаний

Fig. 4. Dependence of natural frequency on parameter a_0 :
а – for 2nd mode of flexural vibrations;
б – for 4th mode of flexural vibrations

Результаты расчетов коэффициента усиления K для кольцевых концентраторов с параметром a_0 , определяемым равенством (4), представлены на рис. 5 в виде графиков, которые показывают изменение коэффициента K для мод различных порядков n в зависимости от отношения толщин $N = h(\pi)/h(0)$.

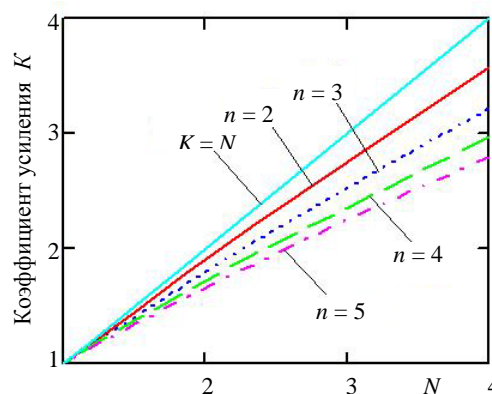


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления K от отношения толщин N

Fig. 5. Dependence of amplification factor K on thickness ratio N

Полученные результаты позволяют сделать заключение о том, что коэффициент усиления амплитуды колебаний K в кольцевых концентраторах с переменной толщиной сечения зависит от отношения толщин входного и выходно-

го сечений N . Причем он всегда меньше величины этого отношения, т. е. $K < N$. Кроме того, из рис. 5 видно, что на коэффициент усиления K влияет на порядок моды колебаний n : с ростом порядка n величина коэффициента K при заданном отношении толщин N уменьшается.

Таким образом, можно сделать вывод, что изменение формы внутреннего контура кольцевого элемента позволяет варьировать частоту его собственных колебаний в широком диапазоне. При этом при заданных отношении толщин N и порядке моды n изменение собственной частоты колебаний путем варьирования формы внутреннего контура кольцевого элемента не вызывает существенного изменения коэффициента усиления K . Практическое значение этого факта состоит в возможности согласования собственной частоты колебаний кольцевого элемента с рабочей частотой ультразвуковой колебательной системы при сохранении высокого значения коэффициента усиления.

ВЫВОДЫ

1. Теоретически обоснована возможность создания концентраторов ультразвуковых колебаний на основе кольцевых упругих элементов с некруглым эксцентричным профилем внутреннего контура.

2. Показана возможность управления коэффициентом усиления кольцевых концентраторов путем изменения эксцентриситета внутреннего контура и среднего значения толщины поперечного сечения.

3. Показано, что изменение формы внутреннего контура кольцевого упругого элемента позволяет регулировать собственные частоты его колебаний в широком диапазоне без изменения габаритных размеров и существенного изменения коэффициента усиления, что важно для частотного согласования концентратора с ультразвуковой колебательной системой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева, Л. Е. Упругие элементы приборов / Л. Е. Андреева. М.: Машиностроение, 1981. 392 с.

2. Попов, Э. А. Упругие накопители энергии в текстильных машинах / Э. А. Попов, Ф. Б. Караев, Л. М. Квартин. М.: МТИ, 1984. 25 с.
3. Излучатель изгибных колебаний: а. с. 657868 СССР, МКИ В 06 В1/00 / Ю. С. Андреев, В. Н. Бокановский; дата публ. 25.04.1979.
4. Ультразвуковой инструмент: а. с. 382439 СССР, МКИ В 06 В3/00 / А. А. Горбунов [и др.]; дата публ. 23.05.1973.
5. Устройство для ультразвукового полирования: а. с. 854685 СССР, МКИ В 24 В1/04 / В. Ф. Зимовец [и др.]; дата публ. 15.08.1981.
6. Ультразвуковая колебательная система с промежуточным резонатором: пат. 2106205 Рос. Федерации, МКИ В 06 В3/00 / В. Н. Аленичев, Л. О. Макаров, А. А. Рухман; дата публ. 10.03.1998.
7. Луговой, И. В. Применение упругих концентраторов-волноводов при ультразвуковой обработке отверстий / И. В. Луговой, В. Т. Минченя // Влияние внешних энергетических воздействий на структуру, фазовый состав и свойства материалов: материалы междунар. конф. «Электрон-фононные и спиновые взаимодействия, инициированные быстрыми заряженными частицами, электромагнитными полями, электрическими токами и СВЧ-излучением в макроскопических проявлениях на обычных и наноматериалах». Новокузнецк: Изд-во Сиб. гос. индустр. ун-та, 2012. С. 150–153.
8. Луговой, И. В. Упругие характеристики кольцевых концентраторов ультразвуковых систем / И. В. Луговой, В. П. Луговой // Наука и техника. 2014. № 3. С. 24–27.
9. 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.
10. Ультразвуковой инструмент для обработки или измерения детали: пат. на изобретение РФ № 19219, МПК В 06В 1/00 / И. В. Луговой, В. Т. Минченя, В. П. Луговой; № а20120353; заявл. 12.03.2012; опубл. 30.06.2015 // Бюл. № 3. С. 65.
11. Бржозовский, Б. М. Гармонический анализ в исследовании процессов формообразования и измерения прецизионных деталей / Б. М. Бржозовский // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2004. № 1 (1). С. 46–53.

Поступила 16.11.2015

Подписана в печать 20.01.2016

Опубликована онлайн 24.05.2016

REFERENCES

1. Andreeva L. E. (1981) *Elastic Elements of Devices*. Moscow, Mashinostroenie. 392 (in Russian).
2. Popov E. A., Karaev F. B., Kvartin L. M. (1984) *Elastic Energy Storage in Textile Machinery*. Moscow: Moscow Technological Institute. 25 (in Russian).

3. Andreev Yu. S., Bokanovsky V. N. (1979) Emitter of Bending Vibrations. Author's Certificate USSR No 657868 (in Russian).
4. Gorbunov A. A., Saltanov V. M., Moiseev V. G., Savenkov N. V., Kalinin E. P. (1973) Ultrasound Tool. Author's Certificate USSR No 382439 (in Russian).
5. Zimovets V. F., Gerasimchuk P. M., Struchkov S. N. (1981) Device for Ultrasound Polishing. Author's Certificate USSR No 854685 (in Russian).
6. Alenichev V. N., Makarov L. O., Rukhman A. A. (1998) Ultrasound Vibration System with Intermediate Resonator. Patent Russian Federation No 2106205 (in Russian).
7. Lugovoy I. V., Minchenya V. T. (2012) Application of Elastic Wave-Guide Concentrators During Ultrasonic Treatment of Openings. Influence of External Energy Influence on Structure, Phase Composition and Material Properties: Proceedings of International Conference – Electron-Phonon and Spin-Based Interactions Initiated by Fast Charged Particles, Electromagnetic Fields, Electric Currents and Microwave Radiation in Macroscopic Manifestations in Conventional and Nano-Materials. Novokuznetsk, Publishing House of the Siberian State Industrial University, 150–153 (in Russian).
8. Lugovoy I. V., Lugovoy V. P. (2014) Elastic Characteristics of Ring Concentrators in Ultrasound Systems. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], (3), 24–27 (in Russian).
9. Stepanenko D. A., Minchenia V. T., Lugovoy V. P., Lugovoy I. V. (2013) Development and Investigation of Ultrasound Vibration Concentrators of New Type on the Basis of Ring Elastic Elements. *Materialy. Tekhnologii. Instrumenty* [Materials. Technologies. Tools.], 18 (2), 90–94 (in Russian).
10. Lugovoy I. V., Minchenya V. T., Lugovoy V. P. (2015) Ultrasound Tool for Treatment and Measurement of Workpiece. Patent Republic of Belarus No 19219 (in Russian).
11. Brzhozovsky B. M. (2004) Harmonic Analysis while Executing Investigations on Shaping Processes and Measurement of Precision Parts. *Vestnik Saratovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Bulletin of Saratov State Technical University], 1 (1), 46–53 (in Russian).

Received: 16.11.2015

Accepted: 20.01.2016

Published online: 24.05.2016