

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ИНТЕГРАЛЬНЫМ МЕТОДОМ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

¹Степаненко Д. А., ²Бунчук К. А.

¹Белорусский национальный технический университет
²РИУП «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

С учетом широкого применения ультразвуковой техники и технологии в инженерии, медицине, научных исследованиях и других сферах деятельности человека важными научно-практическими задачами являются разработка и совершенствование экспериментальных и теоретических методов определения эксплуатационных параметров ультразвуковых колебательных систем (УЗКС). Основными характеристиками УЗКС, которые необходимо учитывать при разработке и эксплуатации, являются собственные частоты колебаний и механическая добротность. Собственные частоты выбираются с учетом области применения УЗКС и требований к габаритным размерам, в частности, при разработке УЗКС для применения в хирургии правильный выбор рабочей частоты позволяет обеспечить селективность рассеяния биологических тканей в ходе операции, например, обеспечить рассеяние костной ткани при сохранении целостности нервных и сосудистых структур [1]. Повышение собственных частот позволяет снизить габаритные размеры УЗКС, что важно для практических приложений, требующих миниатюризации инструмента, таких как микрохирургия и сварка компонентов изделий микроэлектронной техники [2, 3]. Механическая добротность характеризует потери энергии в УЗКС, в частности, потери, связанные с тепловыделением в результате внутреннего трения: для достижения максимального КПД УЗКС должна обладать высокой механической добротностью. Механическая добротность связана с шириной резонансных пиков амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) УЗКС, что позволяет определять ее путем анализа АЧХ, полученной экспериментальным или расчетным путем. Увеличение механической добротности приводит к обратно-пропорциональному уменьшению ширины пиков АЧХ.

Собственные частоты колебаний и механическая добротность УЗКС обычно определяются путем анализа ее частотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) и круговой диаграммы проводимости с помощью анализаторов электрического импеданса, однако такой метод, несмотря на свою точность, быстродействие и простоту реализации, требует использования дорогостоящего оборудования и применим только для УЗКС, содержащих активные пьезоэлектрические или магнитострикционные элементы, осуществляющие преобразование электрической энергии в энергию механических колебаний. В качестве альтернативного метода, который является применимым для пассивных элементов УЗКС, в частности, волноводов и концентраторов, в данной статье рассматривается интегральный метод свободных колебаний (ИМСК). Данный метод является простым в реализации и не требует применения дорогостоящих измерительных приборов.

Основной областью применения ИМСК является неразрушающий контроль, где он используется для выявления внутренних дефектов технических объектов по изменениям собственных частот их колебаний [4, с. 125]. Суть метода состоит в возбуждении колебаний контролируемого объекта путем кратковременного ударного воздействия с широкой спектральной полосой частот, регистрации этих колебаний и их последующем

спектральном анализе. Частотные составляющие спектра ударного воздействия, соответствующие собственным частотам колебаний объекта, будут подвергаться резонансному усилению, что позволяет по зарегистрированной АЧХ колебаний объекта определить совокупность его собственных частот. Ударное воздействие может создаваться с помощью специальных инструментальных молотков для модального анализа, оснащенных встроенным датчиком силы, либо с помощью свободно падающих или приводимых в движение сжатым воздухом сферических ударных элементов [5–7].

Для оценки эффективности применения ИМСК для оценки эксплуатационных параметров УЗКС была рассмотрена задача определения собственных частот колебаний и механической добротности УЗКС с пьезоэлектрическим активным элементом, используемой для ультразвуковой микросварки (рисунок 1).



Рис. 1. УЗКС для ультразвуковой микросварки

Для проведения измерений УЗКС закреплялась на стойке в вертикальном положении с помощью предусмотренного в ее конструкции крепежного фланца. Ударная нагрузка прикладывалась к выходному сечению концентратора УЗКС с помощью шарика из закаленной хромистой стали ШХ15 радиусом 1,6 мм, свободно падающего по вертикальной направляющей, выполненной из стеклянного капилляра. Колебания УЗКС, возникающие в результате ударного воздействия, преобразовывались в электрический сигнал с помощью являющихся частью конструкции УЗКС пьезоэлектрических элементов, а электрический сигнал записывался с помощью запоминающего цифрового осциллографа. Форма зарегистрированного сигнала представлена на рисунке 2.

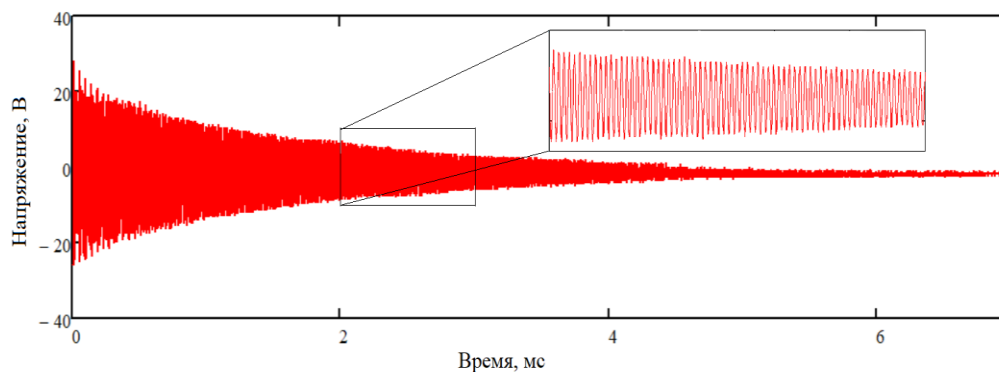


Рис. 2. Форма сигнала, генерируемого пьезоэлектрическим элементом УЗКС

Сигнал характеризуется экспоненциальным затуханием, скорость которого зависит от механической добротности УЗКС. На АЧХ сигнала (рисунок 3) наблюдается резонансный пик на частоте 71,7 кГц, соответствующей первой собственной частоте продольных колебаний УЗКС. Пики, соответствующие собственным частотам продольных колебаний высших порядков, не наблюдаются вследствие ограниченного частотного диапазона ударного воздействия.

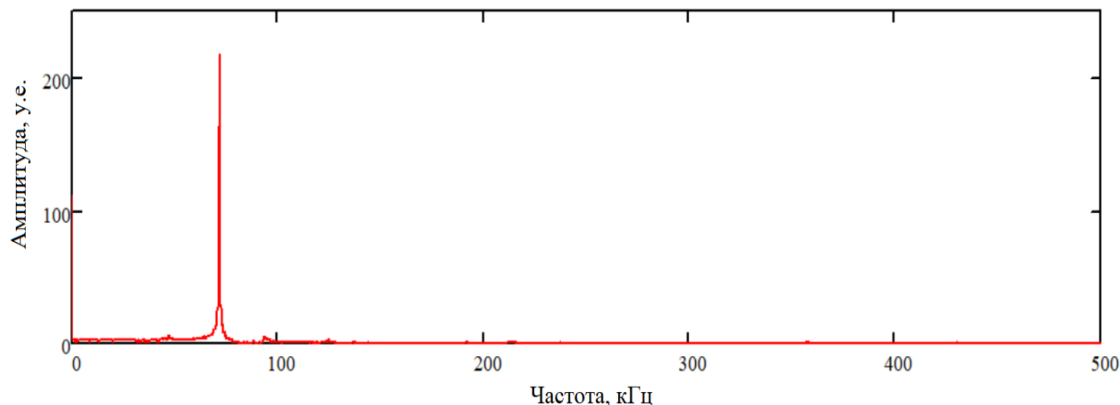


Рис. 3. АЧХ сигнала, генерируемого пьезоэлектрическим элементом УЗКС

Добротность УЗКС определялась путем выделения огибающей сигнала, генерируемого пьезоэлектрическим элементом, с последующей аппроксимацией ее формы экспоненциальной функцией: более подробное объяснение алгоритма расчета приводится далее при описании методики применения ИМСК для исследования кольцевых ультразвуковых концентраторов. Расчетное значение добротности УЗКС составило около 440.

Для проведения сравнительного анализа полученных результатов были определены АЧХ и ФЧХ той же УЗКС с помощью анализатора электрического импеданса PV80A (Wuxi MQ Ultrasonic Electrics, Китай) (рисунок 4).

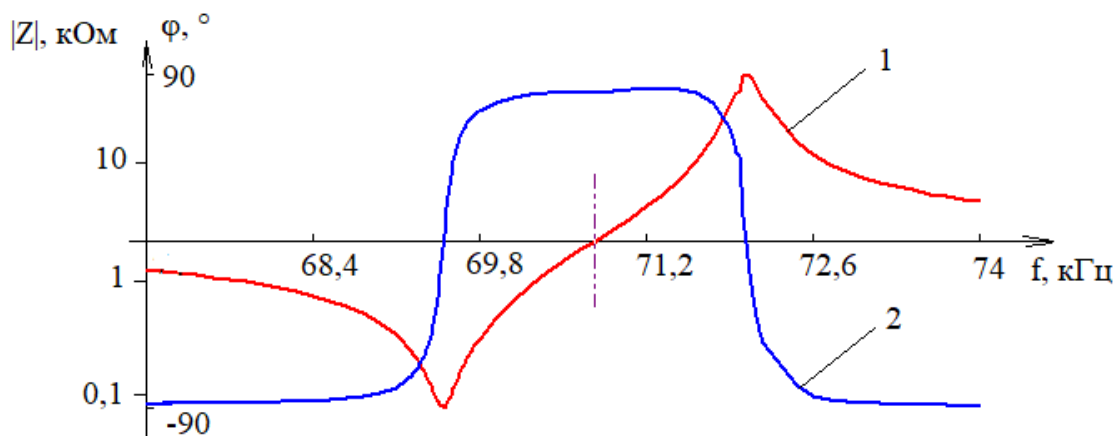


Рис. 4. АЧХ (кривая 1) и ФЧХ (кривая 2) УЗКС, зарегистрированные с помощью анализатора импеданса

Значение добротности, определенное с помощью анализатора импеданса, составило около 400, то есть отклоняется от значения добротности, определенного с помощью ИМСК, на 10 %. Значение собственной частоты колебаний 71,7 кГц, определенное

с помощью ИМСК, с высокой точностью (с погрешностью, не превышающей 0,5 %) соответствует частоте антирезонанса, определенной с помощью анализатора импеданса и составившей 72,0 кГц. Таким образом, из сравнительного анализа результатов измерений, проведенных двумя методами, можно сделать вывод, что ИМСК позволяет получать достаточно точные оценки эксплуатационных параметров УЗКС.

Так как, согласно полученным экспериментальным данным, ИМСК позволяет определять ограниченный набор собственных частот УЗКС, зависящий от частотного диапазона ударного воздействия, то была рассмотрена задача определения параметров ударного воздействия, обеспечивающих возбуждение колебаний УЗКС в заданном частотном диапазоне. Согласно разработанном Герцем теории соударения упругих тел длительность контакта при соударении сферического ударного элемента с упругим полупространством определяется выражением [8]

$$t_c = \frac{4,53r}{v_0^{0,2}} \left(\frac{4\rho(\delta_1 + \delta_2)}{3} \right)^{0,4}, \quad (1)$$

где r – радиус ударного элемента, ρ – плотность материала ударного элемента, v_0 – скорость ударного элемента в момент соударения, δ_1 и δ_2 – упругие параметры материалов ударного элемента и полупространства, связанные с их модулями упругости E_i и коэффициентами Пуассона μ_i выражением

$$\delta_i = \frac{1 - \mu_i^2}{E_i}. \quad (2)$$

Выражение (1) может быть использовано для приближенной оценки длительности контакта в случае, когда масса и радиус кривизны поверхности объекта измерения значительно больше соответствующих параметров ударного элемента.

Основным параметром, влияющим на длительность контакта, является радиус r ударного элемента: длительность контакта менее чувствительна к модулю упругости E_1 (твердости ударного элемента) и имеет малую чувствительность к скорости v_0 . На практике возбуждение колебаний в широкой полосе частот обеспечивают путем использования ударных элементов малого радиуса из твердых материалов, например, закаленной стали или рубина [5]. Временной профиль возникающей при ударе импульсной силы хорошо описывается полуволновой синусоидальной функцией [8]

$$F(t) = F_0 \sin\left(\frac{\pi t}{t_c}\right) \text{rect}\left(\frac{2t - t_c}{2t_c}\right), \quad (3)$$

где F_0 – амплитудное значение силы, $\text{rect}(\cdot)$ – прямоугольная функция.

Модуль спектральной плотности функции (3) (АЧХ ударного импульса) будет определяться выражением

$$|\tilde{F}(f)| = \frac{F_0}{\pi f_0} y\left(\frac{f}{f_0}\right), \quad (4)$$

где $f_0 = 1 / 2t_c$, а функция $y(x)$ определяется формулой

$$y(x) = \frac{1}{1-x^2} \cos\left(\frac{\pi x}{2}\right). \quad (5)$$

Путем построения графика функции $y(x)$ можно убедиться, что полуширина АЧХ ударного импульса на уровне -3 дБ составляет

$$\Delta f = 1,189f_0 = 1,189 / 2t_c. \quad (6)$$

Выражение (6) может быть использовано для оценки частотного диапазона ударного воздействия.

Одним из актуальных направлений развития ультразвуковой техники и технологии является разработка новых типов УЗКС. В частности, усиление колебаний по амплитуде может осуществляться как с помощью стержневых концентраторов в виде стержней с изменяющейся по длине продольной жесткостью, так и с помощью кольцевых концентраторов с изменяющейся по длине окружности изгибной жесткостью, преимуществами которых по сравнению со стержневыми концентраторами являются малые габаритные размеры и простота изготовления [9]. В заключительной части статьи рассматриваются особенности применения ИМСК для определения эксплуатационных параметров кольцевых концентраторов.

В отличие от УЗКС, представленной на рисунке 1, кольцевые концентраторы не имеют крепежных элементов, расположенных в узловой плоскости колебаний, в связи с чем при их испытаниях необходимо имитировать свободные граничные условия путем установки концентратора на подвесе в виде горизонтальной нити. Ударное воздействие создавалось с помощью шарика из стали ШХ15 радиусом 1,6 мм, свободно падающего с высоты 50 мм, что согласно формуле (6) обеспечивает возбуждение колебаний в частотном диапазоне $\Delta f = 53,6$ кГц. Для регистрации отклика концентратора при ударном воздействии использовался пленочный пьезоэлектрический датчик на основе поливинилиденфторида (ПВДФ) модели FDT1-052K (TE Connectivity, США), крепление которого обеспечивалось с помощью цианакрилатного клея. Общая толщина датчика составляет 85 мкм, что обеспечивает гибкость и возможность конформной установки датчика на поверхностях сложной формы. Основным достоинством датчиков на основе ПВДФ является широкий частотный диапазон, достигающий десятков МГц. Так как датчик измеряет усредненное по длине значение деформаций, то при их распределении по косинусоидальному закону разрешимыми будут являться только собственные формы колебаний, длина волны λ которых удовлетворяет условию $\lambda \geq 2L$, где L – длина активной части датчика, откуда можно определить порядок n собственных форм:

$$n \leq \left\lfloor \frac{\pi R}{L} \right\rfloor, \quad (7)$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ – целая часть числа, R – радиус цилиндрической поверхности концентратора, на которой закреплен датчик.

При $R = 22,75$ мм и $L = 30$ мм (стандартная длина датчика) получим $n \leq 2$, то есть датчик стандартной длины не способен к разрешению собственных форм колебаний высших порядков. В связи с этим стандартный датчик был укорочен до длины 5 мм, обеспечивающей разрешение собственных форм до 14-го порядка.

Схема конструкции опытного образца кольцевого концентратора, использованного при проведении исследований, представлена на рисунке 5.

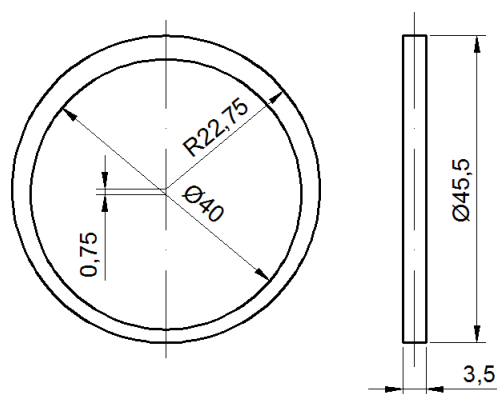


Рис. 5. Схема конструкции кольцевого концентратора

Вследствие эксцентричного взаимного расположения внешней и внутренней цилиндрических поверхностей концентратор имеет изменяющуюся по длине окружности изгибную жесткость и благодаря этому обеспечивает усиление колебаний по амплитуде.

АЧХ сигнала, генерируемого пьезоэлектрическим датчиком в ответ на вызванные ударным воздействием колебания концентратора, представлена на рисунке 6.

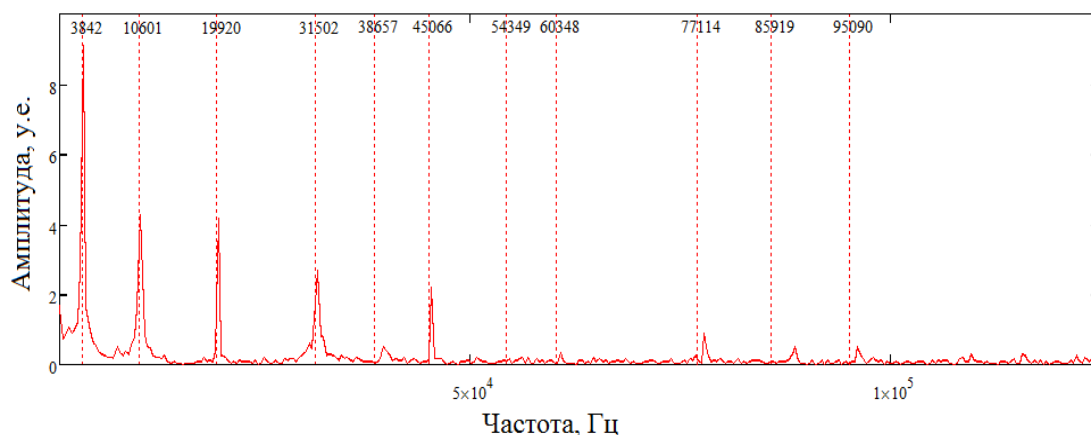


Рис. 6. АЧХ сигнала, генерируемого пьезоэлектрическим датчиком

Значения частот, указанные на рисунке и отмеченные вертикальными линиями, представляют собой теоретические значения собственных частот колебаний, определенные с помощью метода гармонического баланса. Относительное отклонение экспериментальных значений собственных частот от их теоретических значений составляет от 0,04 до 2,2 %.

В отличие от колебаний УЗКС, представленной на рисунке 1, колебания кольцевого концентратора имеют многомодовый характер, что проявляется в виде множества резонансных пиков на АЧХ. Каждая из собственных форм колебаний характеризуется своим собственным значением механической добротности, в связи с чем огибающая генерируемого датчиком сигнала не может быть описана с помощью единой экспоненциальной функции и имеет место так называемое мультиэкспоненциальное затухание колебаний. Для определения механической добротности для каждой из собственных форм колебаний использовался метод синхронной демодуляции, схема реализации которого представлена на рисунке 7.

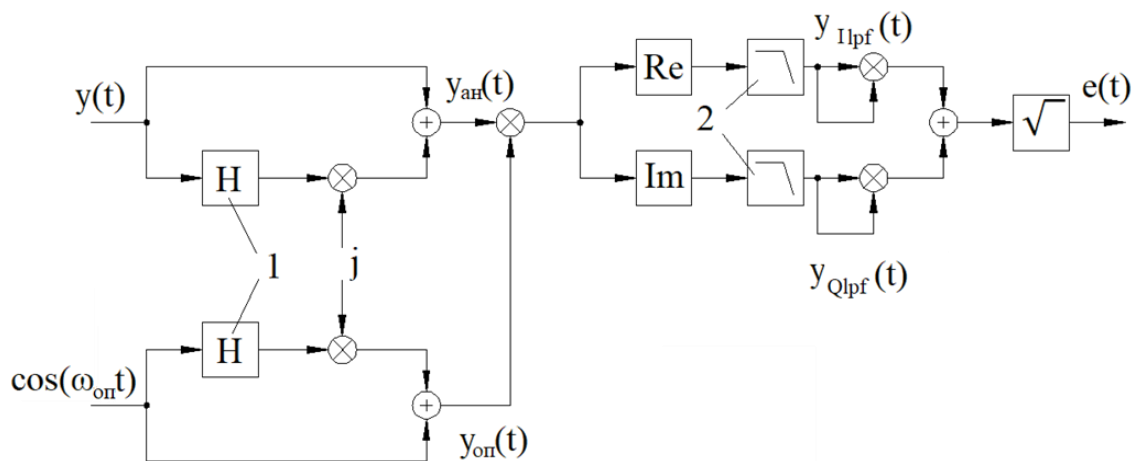


Рис. 7. Схема реализации метода синхронной демодуляции

Из сигнала $y(t)$, генерируемого пьезоэлектрическим датчиком, с помощью фильтра Гильберта 1 формируется комплексный аналитический сигнал

$$y_{\text{ан}}(t) = y(t) + \frac{j}{\pi} \text{p.v.} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{y(\tau)}{t - \tau} d\tau, \quad (8)$$

где интеграл понимается в смысле главного значения Коши, j – мнимая единица.

Затем аналитический сигнал умножается на комплексный опорный сигнал, мнимая часть которого является преобразованием Гильберта косинусоидального сигнала $\cos(\omega_{\text{оп}}t)$, круговая частота $\omega_{\text{оп}}$ которого должна быть как можно ближе по величине к одной из круговых собственных частот колебаний концентратора ω_k :

$$y_{\text{оп}}(t) = \cos(\omega_{\text{оп}}t) - j \sin(\omega_{\text{оп}}t). \quad (9)$$

Медленно меняющаяся составляющая произведения $y_{\text{ан}}(t) y_{\text{оп}}(t)$ определяется с помощью фильтров 2 нижних частот и позволяет рассчитать огибающую $e_k(t)$ частотной составляющей сигнала, соответствующей собственной частоте ω_k .

Для каждой собственной частоты колебаний определялась постоянная времени τ_k , характеризующая скорость затухания соответствующей ей составляющей сигнала, для чего производилась аппроксимация расчетной огибающей $e_k(t)$ экспоненциальной функцией

$$e_{\text{app } k}(t) = e_{0k} \exp(-t / \tau_k), \quad (10)$$

что равносильно линейной аппроксимации зависимости $\ln(e_k(t))$.

Добротность для k -й собственной формы рассчитывалась по формуле

$$Q_k \approx 0,5 \omega_k \tau_k, \quad (11)$$

справедливой при условии $\tau_k \gg T$, где $T = 2\pi / \omega_k$ – период колебаний.

Описанный алгоритм обработки сигнала был реализован в программе MathCad, а полученные с его помощью результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета эксплуатационных параметров концентратора

Порядок моды колебаний	Собственная частота, кГц	Постоянная времени, мс	Добротность
1	3,86	64,4	780
2	10,61	15,3	510
3	19,96	11,1	700
4	31,61	12,6	1250

Как видно из таблицы, концентратор обладает высокими значениями добротности во всем исследованном диапазоне собственных частот.

На основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. ИМСК позволяет достаточно точно определять основные эксплуатационные параметры УЗКС без использования сложных и дорогостоящих измерительных приборов.

2. Показана возможность контроля диапазона регистрируемых с помощью ИМСК собственных частот колебаний путем изменения параметров ударного воздействия, в первую очередь радиуса используемого для возбуждения колебаний ударного элемента.

3. Разработана методика определения значений добротности, соответствующих каждой из собственных частот колебаний, при возбуждении многомодовых колебаний УЗКС, основанная на применении метода синхронной демодуляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hoigne, D. J. Piezoelectric osteotomy in hand surgery: first experiences with a new technique / D. J. Hoigne [et al.] // *Biomedcentral Musculoskeletal Disorders*. – 2006. – Vol. 7. – Article 36.

2. Lal, A. Silicon microfabricated horns for power ultrasonics / A. Lal, R. M. White // *Sensors and Actuators A*. – 1996. – Vol. 54. – P. 542–546.

3. Ланин, В. Л. Повышение качества микросварных соединений в интегральных схемах с использованием ультразвуковых систем повышенной частоты / В. Л. Ланин, И. Б. Петухов, Д. Мордвинцев // *Технологии в электронной промышленности*. – 2010. – № 1. – С. 48–50.

4. Алешин, Н. П. Методы акустического контроля металлов / Н. П. Алешин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с.

5. McLaskey, G. C. Acoustic emission sensor calibration for absolute source measurements / G. C. McLaskey, S. D. Glaser // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2012. – Vol. 31. – P. 157–168.

6. Hosoya, N. Spherical projectile impact using compressed air for frequency response function measurements in vibration tests / N. Hosoya, J. Kato, I. Kajiwara // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2019. – Vol. 134. – Article 106295.

7. Liou, H. C. Investigation of polyvinylidene fluoride (PVDF) films in identifying high-frequency vibration modes of flexible plates / H. C. Liou, K. C. Chuang, C. C. Ma // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. – 2014. – Vol. 6, No. 6. – P. 1047–1058.

8. McLaskey, G. C. Hertzian impact: Experimental study of the force pulse and resulting stress waves / G. C. McLaskey, S. D. Glaser // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 2010. – Vol. 128, No. 3. – P. 1087–1096.

9. Степаненко, Д. А. Физико-математические и инженерные аспекты разработки новых типов ультразвуковых колебательных систем для применения в технике и медицине / Д. А. Степаненко, К. А. Бунчук // Приборостроение-2021: материалы Четырнадцатой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–19 ноября 2021 г. / Редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Мн., 2021. – С. 13–15.

Поступила: 27.02.2022