

Влияние геометрической формы демпфера на эффективность работы ультразвукового пьезоэлектрического преобразователя

М. С. Вечёра¹, С. И. Коновалов^{2✉}, Р. С. Коновалов^{2,3},
Б. И.⁴, В. М. Цаплев², А. Д. Соловьёва²

¹ ООО «Константа УЗК», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

³ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Чангвонский национальный университет, Чангвон, Республика Корея

✉ sikonovalov.eut@gmail.com

Аннотация.

Цель работы: Оценить влияние геометрической формы демпфера в виде усеченного конуса на эффективность работы ультразвукового пьезоэлектрического преобразователя.

Материалы и методы: Использовано численное и экспериментальное моделирование процессов распространения ультразвуковых сигналов в демпфере ультразвукового преобразователя.

Результаты: Рассмотрен демпфер в виде усеченного конуса, образующая которого имеет угол наклона α по отношению к диаметру пьезокерамической пластины. Форма демпфера в виде усеченного конуса выбирается исходя из априорного предположения о том, что это способствует увеличению пути прохождения волны в материале демпфера вследствие многочисленных отражений в нем. Предложен критерий эффективности работы демпфера. Теоретически и экспериментально определено оптимальное (с точки зрения эффективности работы демпфера) значение угла α . Описана технология изготовления демпфера. Отмечено удовлетворительное совпадение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Заключение: Эффективность конусного демпфера с наполнителем в виде смеси вольфрамового порошка со смолой КДА в соотношении 1:1 выше по сравнению с демпфером цилиндрической формы. Демпфер, изготовленный из такой смеси, можно эффективно применять при изготовлении преобразователей с частотой не менее 2.5 МГц. Для меньших частот требуется подбирать другой демпфирующий состав с другим наполнителем или с другим соотношением входящих в его состав компонентов. Максимальная эффективность конусного демпфера достигается при наклоне образующей конуса $\alpha = 64...66^\circ$.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, пьезоэлектрический преобразователь, демпфер

Для цитирования: Влияние геометрической формы демпфера на эффективность работы ультразвукового пьезоэлектрического преобразователя / М. С. Вечёра, С. И. Коновалов, Р. С. Коновалов, Б. И., В. М. Цаплев, А. Д. Соловьёва // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 2. С. 5–14. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-2-5-14.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-22-20014) и Санкт-Петербургского научного фонда (соглашение № 16/2022 от 14.04.2022).

Influence of the Geometric Shape of the Damper on the Efficiency of the Ultrasonic Piezoelectric Transducer

M. S. Vechera¹, S. I. Konovalov^{2✉}, R. S. Konovalov^{2,3},
B. I.⁴, V. M. Tsaplev², A. D. Soloveva²

¹ LLC «Constanta US», Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

³ Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia

⁴ Changwon National University, Changwon, Republic of Korea

✉ sikonovalov.eut@gmail.com

Abstract.

Purpose of the work: To evaluate the influence of the geometric shape of the damper in the form of a truncated cone on the efficiency of the ultrasonic piezoelectric transducer.

Materials and methods: Numerical and experimental modeling of the processes of propagation of ultrasonic signals in the damper of an ultrasonic transducer was used.

Results: A damper in the form of a truncated cone is considered, the generatrix of which has an angle of inclination α with respect to the diameter of the piezoceramic plate. The shape of the damper in the form of a truncated cone is chosen based on the a priori assumption that this contributes to an increase in the path of the wave in the damper material due to numerous reflections inside it. A criterion for the efficiency of the damper is proposed. Theoretically and experimentally, the optimal (from the point of view of the efficiency of the damper) value of the angle α was determined. The technology of its manufacture is described. A satisfactory agreement between the results of theoretical and experimental studies was noted.

Conclusion: The efficiency of a conical damper filled with a mixture of tungsten powder and KDA resin in a 1:1 ratio is higher than that of a cylindrical damper. A damper made from such a mixture can be effectively used in the manufacture of converters with a frequency of at least 2.5 MHz. For lower frequencies, it is required to select a different damping composition with a different filler or with a different ratio of its constituent components. The maximum efficiency of a cone damper is achieved when the cone generatrix is tilted $\alpha = 64...66^\circ$.

Keywords: non-destructive testing, piezoelectric transducer, damper

For citation: Influence of the geometric shape of the damper on the efficiency of the ultrasonic piezoelectric transducer / M. S. Vechera, S. I. Konovalov, R. S. Konovalov, B. I., V. M. Tsaplev, A. D. Soloveva // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 2. P. 5–14. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-2-5-14.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Funding: The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (grant No. 22-22-20014) and the St. Petersburg Science Foundation (agreement No. 16/2022 dated 14.04.2022).

Введение. Демпфер, один из важнейших конструктивных элементов ультразвукового пьезопреобразователя (ПЭП), предназначен для расширения полосы пропускания ПЭП и снижения длительности переходных процессов в нем. Именно механическое демпфирование активного элемента ПЭП наиболее часто применяется для достижения данной цели. Это универсальное средство для подавления инерционных свойств ПЭП [1]–[3]. Демпфер вносит в колебательную систему активные потери. Присутствие реактив-

ной составляющей нарушает эффективность его работы. Чисто активное входное акустическое сопротивление демпфера достигается лишь в том случае, когда исключается влияние ультразвуковых волн, отраженных от его тыльной стороны. Отсюда вытекает требование к материалу демпфера, состоящее в том, что он должен иметь большой коэффициент затухания ультразвука. Это важно, поскольку демпфер должен иметь весьма ограниченные размеры. Помимо сказанного, материал демпфера должен обладать высоким

удельным акустическим импедансом, в идеале – таким же, какой имеет пьезокерамика. Тыльная сторона демпфера зачастую имеет рассеиватели, от которых волны отражаются в различных направлениях, в результате чего существенно увеличивается длина их пути в материале. Это приводит к большему затуханию сигнала и не позволяет отраженным волнам напрямую попадать на пьезоэлемент после отражения от тыльного торца.

Анализ литературы показывает, что в настоящее время наибольшее распространение получили демпферы с порошковыми наполнителями. В этом случае в основную (связующую) массу (эпоксидная смола, герметик, полиуретан) вводится мелкодисперсный порошок материала с большим удельным акустическим импедансом (например, вольфрам). В [1], [3] приведены конкретные материалы, применяемые в таких конструкциях демпферов, соотношения между компонентами и др. Вероятно, широкому распространению указанных типов демпферов способствовало то обстоятельство, что технология их изготовления хорошо отработана, вследствие чего достигается высокая степень идентичности свойств преобразователей. Кроме того, технология изготовления такого типа демпферов не требует существенных временных или трудовых затрат, что имеет особое значение при серийном производстве ПЭП.

По данным [3] наиболее эффективной работа демпфера указанного типа становится при размерах частиц поглотителя порядка длины волны, особенно в случае применения составных наполнителей. Так, помимо порошкового наполнителя с высоким удельным акустическим сопротивлением, для обеспечения рассеяния ультразвуковых волн в материал демпфера также может вводиться материал с резко отличающимся значением акустического сопротивления, к примеру резиновая крошка. Торцевая часть демпфера может выполняться, например, сферической формы, причем с центром, смещенным относительно оси демпфера, что способствует увеличению рассеяния и устранению влияния отраженных волн. В [3] представлены также демпферы профилированного типа, имеющие различные формы торцевой поверхности, а также демпферы сложной формы, сочетающей в себе, например, рупорную часть и шар с выборкой в верхней части. Обычно такие демпферы выполняются из металлов с удельным акустическим импедансом, близким к его значе-

нию у керамики. С точки зрения авторов данной работы, недостаток ПЭП, имеющих такие демпферы, заключается в их способности эффективно работать лишь с пластинами конкретного диаметра. Для пластин, имеющих другой диаметр, необходимо вновь подбирать форму образующей конуса.

Можно упомянуть и демпфер [4] ультразвукового преобразователя, изготовление которого состоит в том, что пьезопластина помещается в литевую форму, которую затем заполняют расплавленным демпфирующим материалом с наполнителем и охлаждают его до отверждения. Недостатком такого способа служит невозможность получить демпфер с характеристическим импедансом, близким к волновому сопротивлению пьезоэлемента. Это объясняется тем, что повышение процентного содержания наполнителя с целью увеличения импеданса демпфера приводит к увеличению вязкости и неоднородности всей массы. Данное обстоятельство осложняет ее заливку и приклеивание к пьезоэлементу. Недостаточное затухание ультразвуковых волн в таких демпферах приводит к необходимости увеличения размеров всего преобразователя. Помимо сказанного, некоторые сомнения вызывает повторяемость параметров ПЭП, снабженных демпфером подобного типа. Аналогичный недостаток можно отнести и к демпферу, описанному в [5]. Способ его изготовления заключается в том, что на тыльную сторону пьезоэлемента, обезжиренного и прокаленного в модифицированной смоле, нагретой выше температуры кипения воды, насыпают наполнитель на высоту не менее полутолщины на резонансной частоте преобразователя, заливают связующим составом и отверждают.

Влияние указанного недостатка на свойства демпфера существенно снижено в его конструкции, представленной в [6], где описан двухслойный демпфер, который выполняется в два этапа. Сначала на поверхность пьезоэлемента наносится тонкий подслои демпфирующего состава (эпоксидная смола с мелкодисперсным вольфрамовым порошком). Далее после полимеризации указанный подслои заливается слоем полиуретана с порошком вольфрама. После этого применяется центрифугирование, что в итоге позволяет добиваться плавного снижения импеданса демпфера по мере удаления от поверхности пьезоэлемента. Указанное обстоятельство способствует снижению влияния отражений от тыльной поверхности демпфера. Однако наличие второго слоя влечет за собой увеличение его высоты.

В [7] изложен способ изготовления демпфера, который состоит в следующем. На поверхность закрепленного в форме пьезоэлемента наносят слой демпфирующего материала в виде сплавов-припоев Розе или Вуда. Их удельный акустический импеданс близок к импедансу пьезоэлемента. Далее осуществляется его нагрев до температуры плавления демпфирующего материала. При этом на поверхности пьезоэлемента образуется слой расплава, формируя демпфер без промежуточных слоев склейки. Затем снижают температуру нагрева, вводят в форму порошок того же демпфирующего материала и спрессовывают его под давлением. За счет постепенного снижения температуры расплава часть порошка расплавляется, часть спрессовывается и формируется демпфер с неоднородной по высоте макроструктурой с высоким затуханием ультразвука. Недостаток описанного демпфера состоит в трудности получения идентичности параметров ПЭП.

Известны технологии изготовления демпфера [6], [8], повышающие его демпфирующие свойства, состоящие в том, что корпус с демпфирующей массой помещают на вибростенд или центрифугу и подвергают виброобработке, способствующей уплотнению демпфирующей массы. В результате тяжелые частицы наполнителя сосредотачиваются вблизи той области демпфера, которая примыкает к пьезоэлементу.

Постановка задачи. Анализ литературных данных позволяет утверждать, что при разработке демпферов основные усилия авторов направлены

на исследование их конкретных технологических особенностей. Влияние же формы демпфера на эффективность его работы изучено в значительно меньшей мере. Так, например, известно, что часто демпферы имеют форму усеченного конуса, однако неисследованными остаются вопросы, связанные с определением оптимальных геометрических параметров демпферов такого типа. В данной статье рассмотрены некоторые вопросы, посвященные этой проблеме. Постановку задачи можно сформулировать следующим образом. На рис. 1, *a* представлена пьезоэлектрическая пластина, тыльная сторона которой контактирует с демпфером. На рисунке приняты следующие обозначения: 1 – пьезопластина; 2 – демпфер, имеющий форму усеченного конуса. Образующая этого конуса имеет угол наклона α по отношению к линии, соответствующей диаметру пластины. Форма демпфера в виде усеченного конуса выбирается, исходя из априорного предположения о том, что это способствует увеличению пути прохождения волны в материале демпфера вследствие многочисленных отражений ее в материале демпфера. Совершенно очевидно, что эффективность работы демпфера будет зависеть от значения угла α . Задача состоит в определении оптимального значения α , при котором сигнал, поступающий на пластину 1 вследствие отражений от стенок демпфера, будет минимальным.

Решение поставленной задачи осуществлялось в два этапа – теоретически, проведением численного эксперимента в программе COMSOL

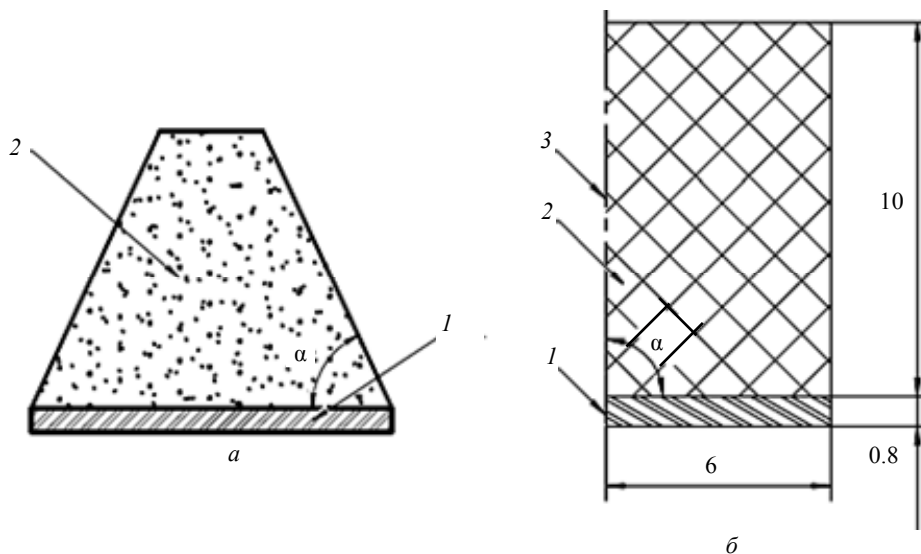


Рис. 1. Схемы, поясняющие постановку задачи: эскиз (а) и геометрия задачи (б):

1 – круглая пьезопластина; 2 – демпфер; 3 – ось симметрии
Fig. 1. Diagrams explaining the problem statement: sketch (a) and the transducer geometry (b): 1 – round piezo plate; 2 – damper; 3 – axis of symmetry

Multiphysics, и натурным моделированием с последующим сравнением результатов, полученных на каждом этапе.

При проведении теоретических и экспериментальных исследований в качестве материала пьезопластины была выбрана керамика ЦТС-19. Ее параметры приведены в [9]. Материал демпфера представляет собой смесь модифицированной эпоксидной смолы КДА с отвердителем ЭТАЛ-45М и наполнителем. В качестве наполнителя использован мелкодисперсный порошок вольфрама ПВ-1 со средним размером частиц 0.8–1.7 мкм, изготовленный по ТУ 14-22-143-2000 (1:1 по массе, причем массовая доля смолы указана с учетом отвердителя).

Параметры демпфера, знание которых необходимо для проведения расчета, определялись экспериментально. Для этого применен прецизионный измеритель скорости распространения и затухания продольных и поперечных волн производства МГНИВП «Акустика», использующий пьезопреобразователи на основе активного элемента из ниобата лития с резонансными частотами 1.25 и 2.5 МГц. Система излучения-приема осесимметрична, а сама установка включает генератор импульсов и осциллограф. Затухание измерялось на основе определения соотношения амплитуд максимумов импульсных сигналов с двух сторон плоскопараллельных образцов демпфера, скорость продольных и поперечных волн – измерением времени прохождения импульсного сигнала через образцы.

Результатом этого эксперимента стало получение параметров демпфера, приведенных в таблице.

В процессе проведения теоретических и экспериментальных исследований пластина возбуждалась сигналом в виде однопериодного меандра с амплитудой $V_{вх} = 200$ В с длительностью $\tau = 1/f_0$, где f_0 – резонансная частота пьезопластины.

Численное моделирование. На рис. 1, б показана исходная геометрическая схема, принятая для теоретического решения поставленной задачи в программе COMSOL Multiphysics. Конкретные

геометрические размеры пластины и высота демпфера приведены на рисунке. Необходимо отметить, что геометрия рассматриваемой задачи осесимметрична. Вследствие этого показана лишь половина модели. Стоит отметить, что усеченный конус с углом $\alpha = 90^\circ$ вырождается в цилиндр. Именно этот вариант демпфера показан на рисунке.

Задача решается методом конечных элементов с использованием программы COMSOL Multiphysics версии 6.1.

Для моделирования работы пьезопреобразователя использовались модули Solid Mechanics, Electrostatic и мультифизический модуль Piezoelectric effect для описания распространения упругих волн в пьезопластине. Для описания электрической цепи, подключенной к пьезоэлементу, использован модуль Electrical circuit. Размер сетки выбирался из критерия Куранта–Фридрихса–Леви [10], который устанавливает зависимость между Δx и Δt – пространственным и временным шагами, и скоростями распространения продольных c_l или поперечных c_t волн:

$$KFL = \frac{\Delta t}{\Delta x} c_{l,t}.$$

В данной модели пространственный шаг равен одной двенадцатой длины волны на центральной частоте, коэффициент $KFL = 0.1$, а в качестве скорости волны выбрана скорость поперечной волны, так как на одной и той же частоте длина поперечной волны меньше, чем у продольной. Сетка состоит из 7800 элементов (меняется в зависимости от угла) и 74 396 степеней свободы, а временной шаг из вышеуказанного выражения составляет 7 мкс. Угол α при расчете варьировался от 60 до 90° с шагом 2°.

Для оценки эффективности работы демпфера можно предложить критерий, заключающийся в следующем: если возбудить пластину электрическим сигналом с заданными амплитудой и длительностью, то в толщу демпфера будет излучен акустический сигнал. Отражение данного сигнала может быть зарегистрировано этой же пластиной. Соотношение амплитуд двух указанных сигналов

Параметры демпфера
Damper parameters

Скорость продольной волны c_l , м/с	Скорость поперечной волны c_t , м/с	Плотность ρ , кг/м ³	Затухание продольных волн δ_l , дБ/мм	Затухание поперечных волн δ_t , дБ/мм
2083 ± 36	950 ± 25	2218 ± 45	на частоте 1.25 МГц 0.7 ± 0.05	На частоте 1.25 МГц 1.0 ± 0.06
			на частоте 2.5 МГц 0.75 ± 0.03	На частоте 2.5 МГц 2.5 ± 0.08

для различных значений угла α позволит определить интересующую нас зависимость.

В результате численного моделирования получена зависимость, представленная на рис. 2. Она показывает отношение амплитуд электрических напряжений на пьезоэлементе для отраженной от тыльной стороны демпфера волны $V_{\text{отр}}$ к поданному на пьезоэлемент $V_{\text{вх}}$ в зависимости от угла наклона боковой стенки демпфера α (образующей усеченного конуса). По оси абсцисс отложен в градусах наклон образующей, а по оси ординат – отношение $A = V_{\text{отр}}/V_{\text{вх}}$. Данные, представленные на рисунке, свидетельствуют о том, что наилучшего результата можно добиться при $\alpha = 64...66^\circ$ на частоте 2.5 МГц. Действительно, при этом значении угла α параметр A достигает значения 0.0001. Для сравнения можно привести данные из этого же рис. 2, а: при $\alpha = 60^\circ$ и $\alpha = 70^\circ$ значения A составляют 0.33 и 0.14 соответственно. В случае возбуждения пьезоэлемента на частоте 1.25 МГц (рис. 2, б) оптимальным значением становится $\alpha = 66^\circ$, при котором $A = 0.36$.

Анализ данных, приведенных на рис. 2, позволяет утверждать, что при $\alpha = 64...66^\circ$ можно получить наилучший результат с точки зрения достижения минимума амплитуд отраженных сигналов.

Для более детального изучения процессов, происходящих в демпфере, представляет интерес рассмотрение выходного электрического напряжения на пьезоэлементе в зависимости от време-

ни. На рис. 3 представлены временные зависимости формы электрического напряжения V на выходе пьезопластины при различных значениях угла наклона образующей усеченного конуса α .

Если рассматривать динамику изменения амплитуд отраженных сигналов, снимаемых с электрического выхода пьезопластины, в зависимости от угла α на частоте 2.5 МГц (рис. 3, а–д), то можно сделать вывод о существовании некоторого значения угла α , при котором демпфер работает наиболее эффективно. Изменение α от 60 до 66° приводит к тому, что сигналы 1 и 2 при достижении $\alpha = 64...66^\circ$ практически исчезают. Уровень переотраженных сигналов также снижается до значения, близкого к нулю. Дальнейший рост α в диапазоне от 66 до 90° влечет за собой повышение амплитуд сигналов, возникающих вследствие многократных переотражений внутри демпфера. На частоте 1.25 МГц (рис. 3, е–к) наблюдаются сходные процессы. При этом амплитуды сигналов выше, чем в случае возбуждения на частоте 2.5 МГц, хотя и уровень шума выше, что может свидетельствовать о более слабом затухании переотраженных и трансформированных в демпфере волн.

Экспериментальные исследования. Для экспериментальной проверки расчетных значений была использована пьезокерамика ЦТС-19 с номинальными частотами 2.5 и 1.25 МГц диаметром 12 мм. С целью минимизации погрешностей, связанных с отличием параметров каждого отдельного пьезоэлемента в партии, все пьезоэлементы, используемые для изготовления опытных

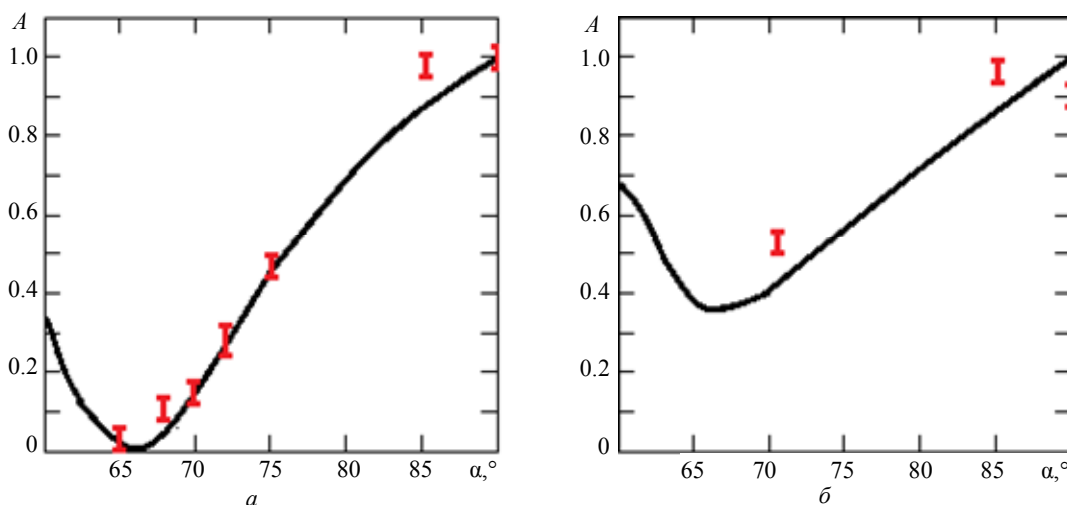


Рис. 2. Изменение коэффициента A в зависимости от угла наклона α для частоты возбуждения: а – 2.5 МГц; б – 1.25 МГц
Fig. 2. Change in the coefficient A as the function of the angle of inclination α for the excitation frequency: а – 2.5 MHz; б – 1.25 MHz

образцов, были отобраны в группы по значениям резонансной частоты и емкости. Девиация резонансных частот в эксперименте была не более ± 10 кГц от средней в группе, а емкости – не более 30 % от средней.

Опытные образцы изготавливались с использованием оснастки по технологии 3D-печати из водорастворимого пластика PVA. Оснастка представляла собой литьевую форму в виде усеченного конуса с отверстием сверху для заливки демпфирующей массы. Основанием формы служила окружность с радиусом, равным радиусу используемых пьезопластин. К преимуществам подобной технологии изготовления можно отнести дешевизну, скорость изготовления форм, отсутствие технологических затрат на изготовление форм, возможность печати в автоматическом режиме и отсутствие требований к постоянству контроля. Кроме того, при помощи 3D-принтера можно изготовить форму любого размера и конфигурации. Для фиксации пьезокерамики и формы использован двухсторонний вспененный скотч.

Демпфирующий состав, изготовленный по описанной ранее технологии (смесь модифицированной эпоксидной смолы КДА с отвердителем

ЭТАЛ-45М и наполнителем), после дегазации разливался в формы. С этой целью использовался шприц без иглки. По истечении 48 ч формы с полимеризованным демпфером снимались со скотча и помещались в воду для растворения оснастки. Для размягчения и частичного растворения оснастки требовалось около 3...4 ч. Остатки формы, не успевшие раствориться за это время, удалялись механически.

По описанной технологии было изготовлено 30 образцов с применением пьезопластин с частотой 2.5 МГц и 9 образцов с частотой 1.25 МГц.

На основе использования пластин с рабочей частотой 2.5 МГц были изготовлены образцы с наклоном образующей конуса 90, 85, 75, 72, 70, 68, 66°. Образцы с каждым отдельным углом наклона стенки изготавливались по три экземпляра. Это делалось для предотвращения случайных ошибок при изготовлении.

На основе использования пьезопластин с рабочей частотой 1.25 МГц были изготовлены образцы с наклоном образующей конуса 90, 85, 70°. Образцы также были изготовлены в трех экземплярах.

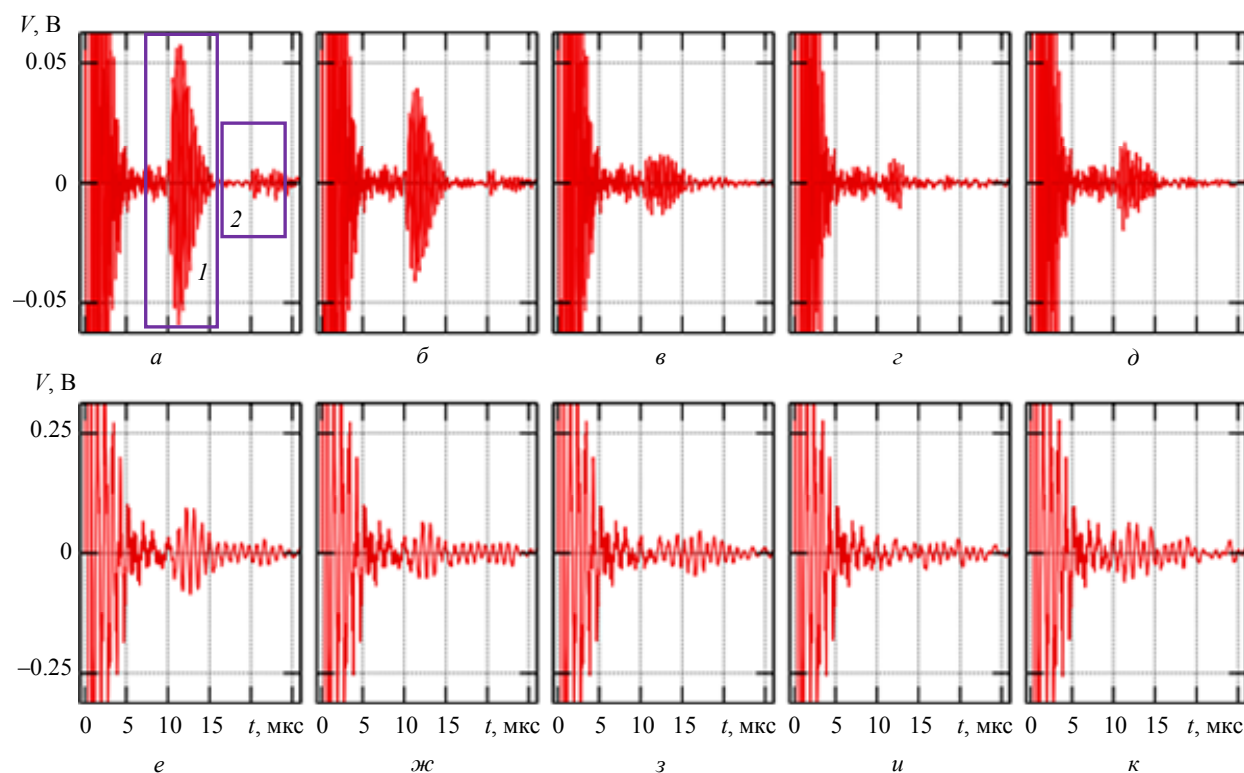


Рис. 3. Выходное напряжение на пьезоэлементе на частоте возбуждения 2.5 МГц при углах наклона α равных: $a - 60^\circ$; $b - 62^\circ$; $b - 64^\circ$; $z - 66^\circ$; $d - 68^\circ$ и на частоте возбуждения 1.25 МГц при углах наклона α , равных: $e - 60^\circ$; $ж - 62^\circ$; $з - 64^\circ$; $и - 66^\circ$; $к - 68^\circ$

1 – сигнал, отраженный от тыльной части демпфера, 2 – сигнал, вызванный переотражением внутри демпфера
 Fig. 3. Piezoelement output voltage at 1.25 MHz at the angles of inclination α : $a - 60^\circ$; $b - 62^\circ$; $b - 64^\circ$; $z - 66^\circ$; $d - 68^\circ$ and at 2.5 MHz at the angles of inclination α : $e - 60^\circ$; $ж - 62^\circ$; $з - 64^\circ$; $и - 66^\circ$; $к - 68^\circ$

1 – signal reflected from the back side of the damper, 2 – signal caused by re-reflections inside the damper

Изготовленные пьезопреобразователи, аналогично тому, как это делалось в теоретических исследованиях, возбуждались сигналом в виде одно-периодного меандра на частоте резонанса пьезопластин с амплитудой 200 В с применением дефектоскопа общего назначения UCD-50. С цифрового выхода дефектоскопа фиксировались осциллограммы сигналов от задней свободной стенки демпфера при помощи программного обеспечения UdOscill. Изменение отношения максимальной амплитуды сигнала, отраженного от тыльной стенки демпфера, к амплитуде зондирующего сигнала, в зависимости от угла наклона образующей конуса, приведено на рис. 2 (см. метки).

Наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных наблюдается для случая, когда резонансная частота составляет 2.5 МГц. Из рис. 2, а видно, что точки, соответствующие экспериментальным данным, расходятся с расчетными не более, чем на 8%. Для случая использования пьезопластин с резонансной частотой 1.25 МГц подобное расхождение составляет до 15%.

Выводы. В статье проведено экспериментальное и расчетное исследование влияния гео-

метрической формы демпфера на эффективность его работы. Можно сделать следующие выводы:

1. Предложен критерий оценки эффективности демпфера в виде отношения амплитуд сигналов, отраженных от свободного торца демпфера, и зондирующего импульса.

2. Разработана и экспериментально подтверждена расчетная модель ПЭП с конусным демпфером.

3. Разработана и опробована технология изготовления демпфера с применением жертвенной водорастворимой оснастки.

Можно заключить, что эффективность конусного демпфера с наполнителем в виде смеси вольфрамового порошка со смолой КДА в соотношении 1:1 оказалась выше по сравнению с демпфером цилиндрической формы. Демпфер, изготовленный именно из такой смеси, можно эффективно применять при изготовлении преобразователей с частотой не менее 2.5 МГц. Для меньших частот требуется подбирать другой демпфирующий состав с другим наполнителем или с иным его соотношением. Максимальная эффективность конусного демпфера достигается при наклоне образующей конуса $\alpha = 64 \dots 66^\circ$.

Список литературы

1. Ермолов И. Н., Гитис М. Б., Королев М. В. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под общ. ред. И. Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.

2. Королев М. В., Карпельсон А. Е. Широкополосные ультразвуковые пьезопреобразователи. М.: Машиностроение, 1982. 157 с.

3. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1974. 256 с.

4. Pat. № US4382201A (USA) / Trzaskos C. R. Ultrasonic transducer and process to obtain high acoustic attenuation in the backing. Заявл. 27.04.1981. General Electric Co.; опубл. 03.05.1983. 4 с.

5. Пат. 94025902A1 (RU). Марьин Н. С. Способ изготовления демпфера для ультразвукового преобразователя. Заявл. 07.12.1994; опубл. 10.05.1996. 4 с.

6. Пат. на изобретение 2150109 (RU) / Каширин В. А., Коновалов С. И., Степанов Б. Г. Ультразвуковой преобразователь. Заявл. 25.03.1998; опубл. 27.05.2000. 4 с.

7. Авт. свид. 888029 (USSR) / Белаш А. А., Волченко Т. Н. Способ изготовления демпфера ультразвукового преобразователя. Заявл. 14.12.1979; опубл. 07.12.1981. 2 с.

8. Пат. 2253191 (RU) / Алферов Ю. Е., Дронов А. Н., Сагателян Г. Р. Пьезоэлектрический преобразователь ультразвукового диагностического зонда. Заявл. 12.11.2003; опубл. 27.05.2005. 3 с.

9. Пьезоэлектрические преобразователи. Методы измерения и расчет параметров: справочник / В. В. Ганопольский, Б. А. Касаткин, Ф. Ф. Легуша, Н. И. Прудько, С. И. Пугачев; под ред. С. И. Пугачева. Л.: Судостроение, 1984. 256 с.

10. Courant R., Friedrichs K., Lewy H. Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik // Mathematische Annalen. 1928. Vol. 100(1). S. 32–74.

Информация об авторах

Вечёра Михаил Сергеевич – инженер ООО «Константа УЗК», Огородный переулок, 21, Санкт-Петербург, 198097, Россия.
E-mail: vms@constantaru

Коновалов Сергей Ильич – д-р техн. наук, доцент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: sikonovlov.eut@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5033-344X>

Коновалов Роман Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: rskonovalov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0155-2718>

И Борис – аспирант кафедры интеллектуального производства, Чангвонский национальный университет, Чангвон, 20 Чангвонде-ро Уичанг-гу Чангвон-си, Кенсаннам-до, 51140, Республика Корея.

E-mail: ee.boris@changwon.ac.kr

<https://orcid.org/0000-0002-6643-3920>

Цаплев Валерий Михайлович – д-р техн. наук, профессор кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: valery@convergences-fr.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7386-7233>

Соловьева Алина Дмитриевна – аспирант кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: adsoloveva@stud.etu.ru

Вклад авторов:

Вечёра М. С. – подготовка и проведение экспериментальных исследований; подготовка рукописи.

Коновалов С. И. – концепция и методология исследования; коррекция и редактирование рукописи.

Коновалов Р. С. – подготовка и проведение экспериментальных исследований; подготовка рукописи.

И Б. – численный расчет и анализ данных; подготовка рукописи.

Цаплев В. М. – численный расчет и анализ данных; подготовка рукописи.

Соловьева А. Д. – численный расчет и анализ данных; подготовка рукописи.

References

1. Ermolov I. N., Gitis M. B., Korolev M. V. Ul'trazvukovye preobrazovateli dlja nerazrushajushhego kontrolja / pod obshh. red. I. N. Ermolova. M.: Mashinostroenie, 1986. 280 s. (In Russ.).

2. Korolev M. V., Karpel'son A. E. Shirokopolosnye ul'trazvukovye p'ezopreobrazovateli. M.: Mashinostroenie, 1982. 157 s. (In Russ.).

3. Domarkas V. I., Kazhis R.-I. Ju. Kontrol'no-izmeritel'nye p'ezojelektricheskie preobrazovateli. Vil'njus: Mintis, 1974. 256 s. (In Russ.).

4. Pat. № US4382201A (US) / Trzaskos C. R. Ultrasonic transducer and process to obtain high acoustic attenuation in the backing / Zajavl. 27.04.1981. General Electric Co.; opubl. 03.05.1983. 4 s.

5. Pat. 94025902A1 (RU) / Mar'in N. S. Sposob izgotovlenija dempfera dlja ul'trazvukovogo preobrazovatelja. Zajavl. 07.12.1994; opubl. 10.05.1996. 4 s. (In Russ.).

6. Pat. na izobretenie 2150109 (RU) / Kashirin V. A., Konovalov S. I., Stepanov B. G. Ul'trazvukovoj preobrazovatel' / Zajavl. 25.03.1998; opubl. 27.05.2000. 4 s. (In Russ.).

7. Avt. svid. 888029 (USSR) / Belash A. A., Volchenok T. N. Sposob izgotovlenija dempfera ul'trazvukovogo preobrazovatelja. Zajavl. 14.12.1979; opubl. 07.12.1981. 2 s. (In Russ.).

8. Pat. 2253191 (RU) / Alferov Ju. E., Dronov A. N., Sagateljan G. R. P'ezojelektricheskiy preobrazovatel' ul'trazvukovogo diagnosticheskogo zonda. Zajavl. 12.11.2003; opubl. 27.05.2005. 3 s. (In Russ.).

9. P'ezokeramicheskie preobrazovateli. Metody izmerenija i raschet parametrov: spravocnik / V. V. Gaponol'skij, B. A. Kasatkin, F. F. Legusha, N. I. Prud'ko, S. I. Pugachev; pod red. S. I. Pugacheva. L.: Sudostroenie, 1984. 256 s. (In Russ.).

10. Courant R., Friedrichs K., Lewy H. Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik // Mathematische Annalen. 1928. Vol. 100(1). S. 32–74.

Information about the authors

Mikhail S. Vechera – engineer of LLC «Constanta US», Ogorodny Lane, 21, Saint Petersburg, 198097, Russia.

E-mail: vms@constantaru

Sergey I. Konovalov – Dr Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: sikonovalov.eut@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5033-344X>

Roman S. Kononov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, the Head of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: rskononov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0155-2718>

Boris I – postgraduate student of the Department of Smart Manufacturing, Changwon National University, 20 Changwondae-ro Uichang-gu Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 51140, Republic of Korea.

E-mail: ee.boris@changwon.ac.kr

<https://orcid.org/0000-0002-6643-3920>

Valery M. Tsaplev – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: valery@convergences-fr.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7386-7233>

Alina D. Soloveva – postgraduate student of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: adsoloveva@stud.etu.ru

Author Contributions:

Vechera M. S. – preparation and conduct of experimental studies; text preparation.

Kononov S. I. – conceptualization and methodology; writing – review and editing.

Kononov R. S. – preparation and conduct of experimental studies; text preparation.

I B. – numerical calculation and data analysis; text preparation.

Tsaplev V. M. – numerical calculation and data analysis; text preparation.

Soloveva A. D. – numerical calculation and data analysis, text preparation.

Статья поступила в редакцию 20.10.2023; принята к публикации после рецензирования 10.12.2023; опубликована онлайн 26.02.2024.

Submitted 20.10.2023; accepted 10.12.2023; published online 26.02.2024.
