

О рациональном подходе к расчету демпфера пьезопреобразователя. Часть 2. Выбор оптимальной формы демпфера*

М. С. Вечёра^{1,2}, С. И. Коновалов¹, Р. С. Коновалов^{1,3✉},
В. В. Шеметова^{1,4}, В. М. Цаплев¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² ООО «Константа УЗК», Санкт-Петербург, Россия

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

⁴ ООО «Системы неразрушающего контроля», Санкт-Петербург, Россия

✉ rskonovalov.eut@gmail.com

Аннотация.

Цель работы: Проведение комплексного исследования по определению оптимальной (в отношении минимума паразитных сигналов) формы демпфера пьезопреобразователя.

Материалы и методы: Эффективность применения демпферов различных форм оценена посредством расчетов путем на основе использования метода конечных элементов с последующим сравнением с экспериментальными данными.

Результаты: Представлено исследование эффективности различных форм демпфера в виде усеченного до оси цилиндра и полностью усеченного цилиндра. Для этого полученная в первой части исследования модель была доработана и применена для расчета отличных от усеченного конуса форм демпфера. Проведен анализ фронтов ультразвуковых волн в теле демпфера для определения источника незначительных флуктуаций сигнала для случая демпфера в виде полностью усеченного цилиндра.

Заключение: Предложенная в первой части статьи расчетная модель успешно применена для оценки эффективности демпферов различной формы. Анализ получаемых данных позволил установить наиболее эффективную форму демпфера с точки зрения минимума амплитуды паразитного сигнала. Отмечено удовлетворительное сходство результатов, полученных различными способами.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, пьезоэлектрический преобразователь, демпфер, моделирование, метод конечных элементов

Для цитирования: О рациональном подходе к расчету демпфера пьезопреобразователя. Часть 2. Выбор оптимальной формы демпфера / М. С. Вечёра, С. И. Коновалов, Р. С. Коновалов, В. В. Шеметова, В. М. Цаплев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 2. С. 5–13. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-2-5-13.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

* Окончание. Начало в Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 1.

On a Rational Approach to Calculating the Piezoelectric Transducer Damper. Part 2. Selection of the Optimal Shape of the Damper

M. S. Vechera^{1,2}, S. I. Konovalov¹, R. S. Konovalov^{1,3}✉,
V. V. Shemetova^{1,4}, V. M. Tsaplev¹

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² LLC «Constanta US», Saint Petersburg, Russia

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

⁴ LLC «Ndt Systems», Saint Petersburg, Russia

✉ rskonovalov.eut@gmail.com

Abstract.

Purpose of the work. Conducting a comprehensive study to determine the optimal shape of the piezoelectric transducer damper, from the point of view of minimizing parasitic signals.

Materials and methods. The efficiency of employing dampers with diverse geometries was assessed through computational analysis employing the finite element method, which was then validated against experimental findings.

Results. A research on the efficiency of different types of dampers, including a truncated cylinder and a fully truncated cylinder, is presented. To achieve this, the model developed in the initial phase of the study was further refined and applied to calculate the shapes of the dampers other than the truncated cone. The analysis of ultrasonic wavefronts within the body of the damper is performed to identify the source of minor signal fluctuations in the case of a fully truncated cylinder-shaped damper.

Conclusion. The theoretical framework outlined in the initial section of this paper has been successfully implemented to assess the performance of different shapes of dampers. The analysis of the data yielded insights into the most efficient design for minimizing the amplitude of the unwanted signal. A satisfactory degree of consistency was observed across the various approaches employed.

Keywords: non-destructive testing, piezoelectric transducer, damper, modeling, finite element method

For citation: On a Rational Approach to Calculating the Piezoelectric Transducer Damper. Part 2. Selection of the Optimal Shape of the Damper / M. S. Vechera, S. I. Konovalov, R. S. Konovalov, V. V. Shemetova, V. M. Tsaplev // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 2. P. 5–13. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-2-5-13.

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

Введение. В первой части статьи [1] был описан процесс создания расчетной 3D-модели пьезопреобразователя с демпфером. Существенное внимание было уделено вопросу, связанному с максимальным размером элементов сетки, состоящей из конечных элементов, и достоверности получаемых при этом расчетных результатов. Установлено, что при максимальном размере элементов сетки 0.25 мм удается достичь компромисса между скоростью и принципиальной возможностью расчета и физической корректностью получаемых результатов. Следует обратить внимание на то, что достигнутый результат отличен от традиционного представления о количестве элементов сетки на одну длину волны, упомяну-

тых, например, в [1]–[3]. Тем не менее, результаты, изложенные в первой части работы, свидетельствуют о том, что при указанном размере элементов сетки наблюдается хорошее соответствие с результатами, полученными при 2D-моделировании с корректно выбранной сеткой (соответствующей [2]–[4]), а также и с результатами натуральных экспериментов. Описанный факт положен в основу предлагаемого далее материала, поскольку все представленные расчеты выполнены для случая, соответствующего максимальному размеру элементов сетки, равному 0.25 мм.

Следует подчеркнуть, что вопрос зависимости эффективности демпфера от его формы весьма ограниченно рассмотрен в научно-технической

литературе. Общие технологические соображения о конструировании демпферов приведены в [5]–[7]. Нельзя не отметить, что поглощающие свойства демпфера во многом зависят от его состава. Так, в серийном производстве применяются демпферы на основе компаунда и порошковых наполнителей. Возможно, этим объясняется тот факт, что значительная часть исследований [1] посвящена вопросам технологии изготовления демпфера и его состава. Вопросам же исследования формы демпфера на длительность зондирующих сигналов уделено внимание в очень ограниченном количестве публикаций. Так, например, в [7] приведен пример профилированного демпфера сложной формы, однако для достижения максимальной эффективности такого демпфера требуется отдельно определять его геометрические параметры для каждого размера пьезоэлемента. В [8], [9] отмечается, что для предотвращения отражений от тыльной поверхности демпфера на ее плоскости изготавливаются рассеивающие канавки, борозды, выемки. Частично влияние формы тыльной стороны демпфера на его эффективность уже было рассмотрено авторами в [10].

Представленные в настоящей статье исследуемые формы демпферов выбраны не случайно. Формы, представляющие собой видоизмененный цилиндр, технологически относительно просты в изготовлении, особенно при использовании специальных оснасток. Так, при выполнении всех исследований, проведенных в рамках настоящей работы, применялась водорастворимая оснастка, изготавливаемая при помощи технологии 3D-печати. Однако следует отметить, что количество подобных форм ограничено. Тем не менее, выбор наиболее эффективной формы представляет особый практический интерес.

Исследование демпфера в виде усеченного цилиндра. Разработанная расчетная модель позволяет исследовать демпферы любой формы. С практической точки зрения интерес представляет демпфер в виде усеченного цилиндра, поскольку изготовление такого демпфера – технологически более простая задача, чем изготовление конусного демпфера, который был рассмотрен в [10].

Данное исследование, в отличие от предыдущего [10], выполнялось в два этапа: натурное моделирование и 3D-расчет. В этом случае 2D-расчет неприменим, поскольку геометрия такой модели изменяется в объеме, и подобный способ моделирования не обеспечивает физической корректности расчета. Натурные эксперименты вы-

полнялись по методике, описанной в [10], при этом тип пьезокерамики и геометрические размеры пьезоэлемента оставались такими же, как в [10]. Это же относилось и к составу, а также способу изготовления демпфера. Расчет в 3D-модели проводился при помощи разработанной и описанной в [1] компьютерной методики.

Поставленная задача решалась в два этапа, первый из которых – моделирование демпфера в виде усеченного до оси цилиндра. Иначе говоря, «срез» демпфера проводился не через всю его толщину, а только до оси симметрии. На рис. 1 приведен внешний вид такого демпфера. При этом усечение цилиндрического демпфера происходит под некоторым углом β – двугранным углом между плоскостью «среза» и горизонтальной плоскостью пьезопластины.

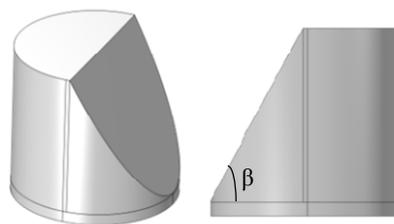


Рис. 1. Внешний вид демпфера в виде усеченного до оси цилиндра
Fig. 1. The appearance of the damper in the form of a cylinder truncated to the axis

На рис. 1 изображен предельный случай, при котором угол β равняется 60° . При расчете данный угол изменялся от 90° до 60° с шагом 5° . Максимальный размер элементов сетки равнялся 0.25 мм. Результаты моделирования приведены на рис. 2.

На рис. 2 видно, что изменение угла среза приводит к монотонному уменьшению амплитуды паразитного сигнала. Следует также отметить, что минимально достижимая амплитуда паразитного сигнала при использовании данного демпфера оказывается большей, чем при использовании демпфера в виде усеченного конуса с углом наклона образующей $\alpha = 65^\circ$. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что демпфер в виде усеченного до оси цилиндра по своей эффективности уступает демпферу в виде усеченного конуса.

Натурный эксперимент был, в сущности, идентичен расчету. При этом следует отметить, что представленные в [1] материалы позволяют утверждать, что результаты, получаемые моделированием, физически корректны и соответствуют действительности. Исходя из этих соображений, при натурном моделировании для дополнитель-

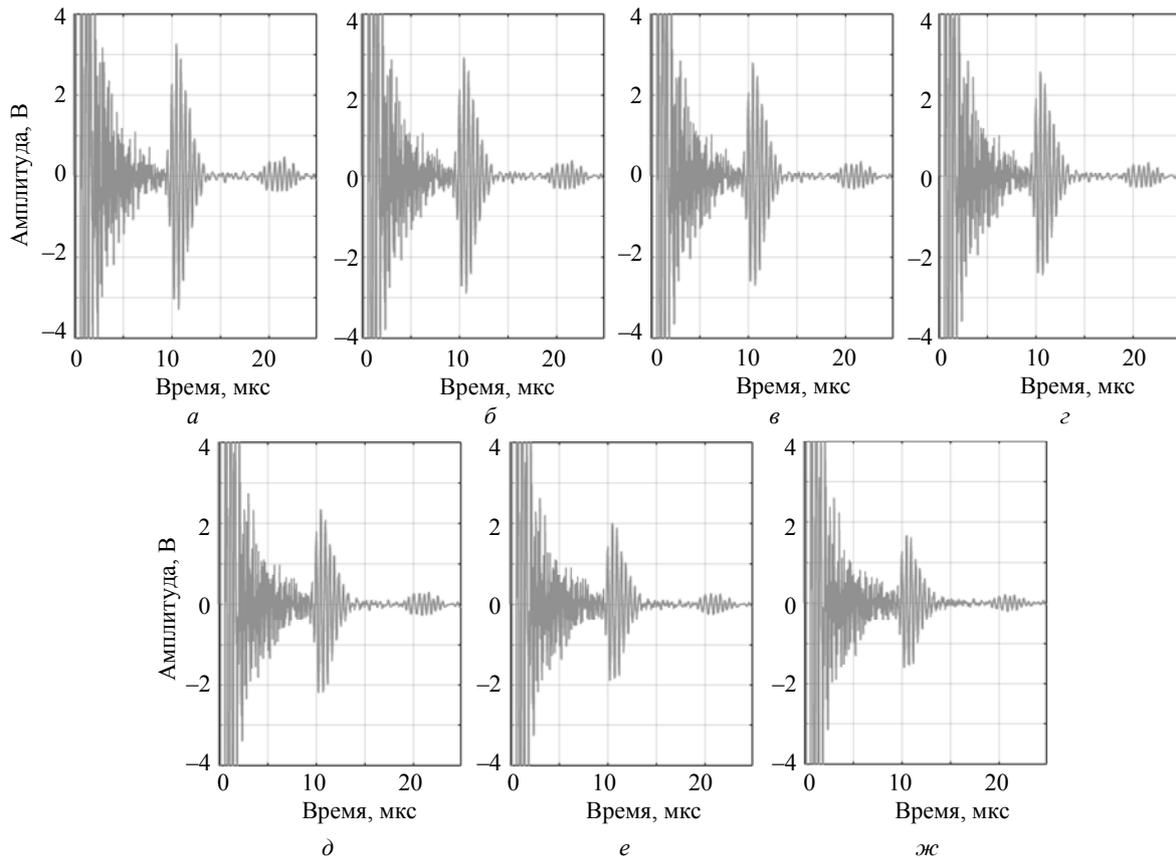


Рис. 2. Расчетное выходное напряжение на пьезоэлементе для случая демпфера в виде усеченного до оси цилиндра с углом β : а – 90° ; б – 85° ; в – 80° ; г – 75° ; д – 70° ; е – 65° ; ж – 60°

Fig. 2. The calculated output voltage on the piezoelectric element for the case of a damper in the form of a cylinder truncated to the axis with an angles β : а – 90° ; б – 85° ; в – 80° ; г – 75° ; д – 70° ; е – 65° ; ж – 60°

ной проверки были выбраны не все рассчитываемые значения угла β , а только 90° , 75° , 65° и 60° . Получаемые в натуральных образцах сигналы, как и ранее, были оцифрованы и восстановлены в MatLab. Результаты сравнения полученных данных для указанных выше значений угла β приведены на рис. 3. Осциллограммы, нанесенные штриховой линией 2 – данные, полученные при экспериментальном моделировании, а сплошной 1 – 3D-моделировании.

Представленные на рис. 3 результаты позволяют утверждать, что 3D-моделирование демпфера иной формы согласуются с результатами натурального моделирования. При этом нельзя не отметить, что наблюдается различие, связанное с длительностью реверберационных шумов и длительностью паразитного сигнала. Причиной этого, вероятно, служит выбранный для моделирования максимальный размер элементов сетки, однако, как было уже отмечено ранее, при таком размере сетки обеспечивается удовлетворительное сходство амплитуд расчетного и реального сигналов, что первостепенно при изучении эффективности ра-

боты демпфера. Относительно минимума амплитуды паразитного сигнала оптимален максимальный угол β , равный 60° .

Вторым этапом исследования были моделирование и экспериментальное исследование полностью усеченного цилиндра. В данном случае линия среза проходила через все тело демпфера. Внешний вид описанного демпфера приведен на рис. 4.

Следует при этом отметить, что плоскость среза образует некий угол γ с плоскостью пьезопластины. При этом максимальное значение угла γ для рассматриваемого типа демпфера составляет 40° . При расчете и эксперименте угол γ изменялся от 10° до 40° с шагом 10° . Результаты расчетного моделирования и натурального эксперимента представлены на рис. 5. Осциллограммы, нанесенные штриховой линией 2 – данные, полученные при экспериментальном моделировании, а сплошной 1 – 3D-моделировании.

Данные, приведенные на рис. 5, свидетельствуют о том, что в случае демпфера в виде усеченного цилиндра оптимален угол среза γ , равный 30° . При иных значениях γ наблюдается

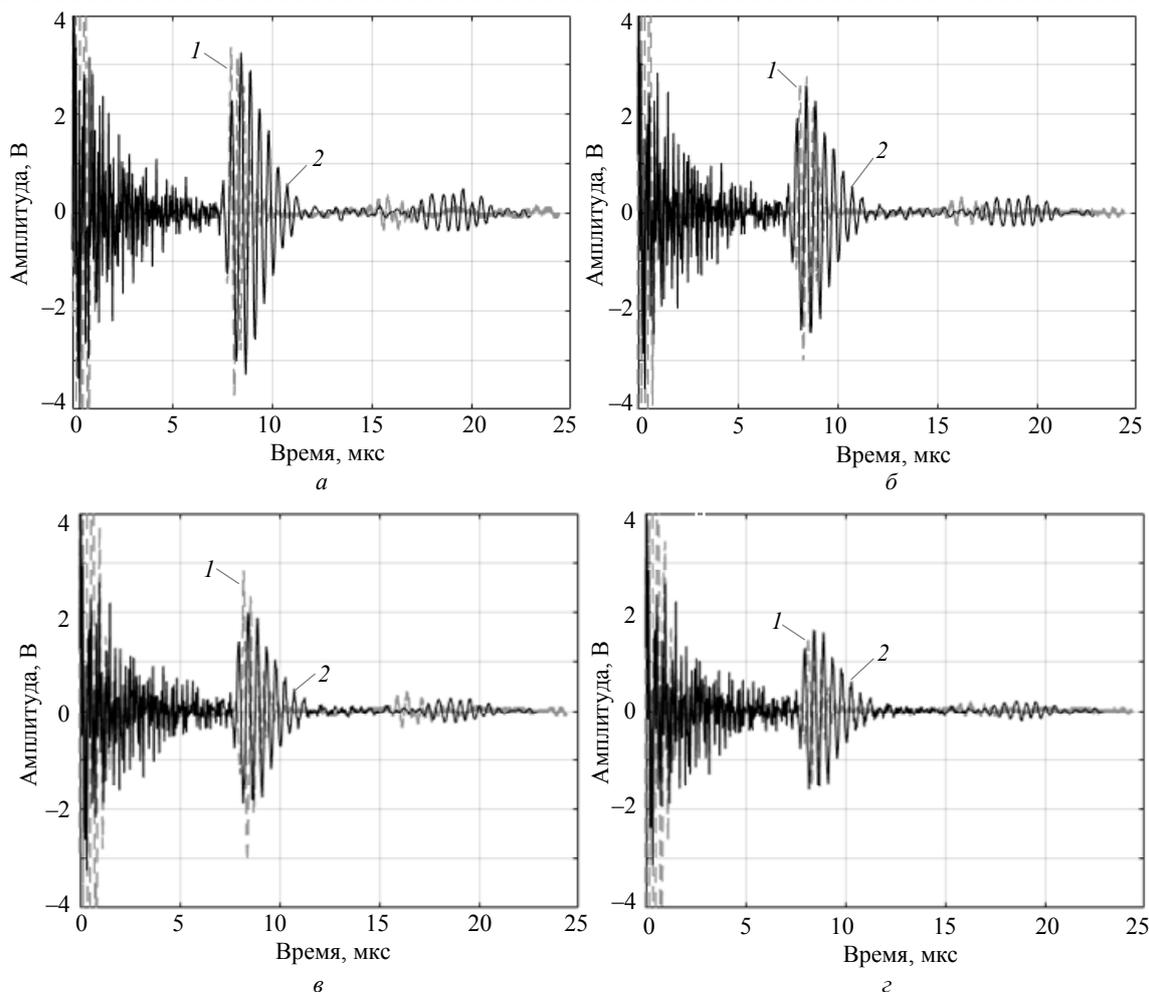


Рис. 3. Сопоставление выходного напряжения на пьезоэлементе для случая демпфера в виде усеченного до оси цилиндра, полученного расчетным путем (1) и экспериментально (2) при углах β :

$a - 90^\circ$; $b - 75^\circ$; $c - 65^\circ$; $d - 60^\circ$

Fig. 3. Comparison of the output voltage on the piezoelectric element for the case of a damper in the form of a cylinder truncated to the axis, obtained by calculated (1) and experimentally (2) at angles β :

$a - 90^\circ$; $b - 75^\circ$; $c - 65^\circ$; $d - 60^\circ$

паразитный сигнал, однако следует отметить, что его амплитуда значительно меньше, чем при использовании демпфера любой другой исследованной формы. В случае $\gamma = 30^\circ$, вероятно, паразитный сигнал по амплитуде меньше уровня шумов или равен им. Стоит также отметить удовлетворительное сходство экспериментальных и расчетных данных, что в очередной раз позволяет констатировать работоспособность полученной модели и корректность получаемых с ее помощью результатов.

Интерес также представляет анализ фронтов волн, распространяющихся в теле демпфера. Подобный анализ уже проводился в [10]. На рис. 6 приведена динамика распространения волн в демпфере в виде усеченного цилиндра. Оценить и пронаблюдать распространение паразитного сигнала можно по возникающим возмущениям среды. Для удобства анализа направление распространения волны отмечено стрелками.

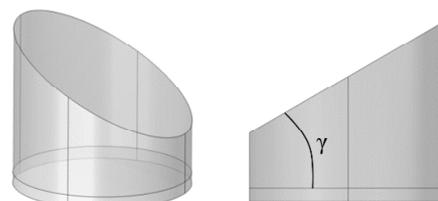


Рис. 4. Внешний вид демпфера в виде усеченного цилиндра

Fig. 4. The appearance of the damper having the form of a truncated cylinder

На рис. 6 видно, что в демпфере, выполненном в форме усеченного цилиндра, не возникает отражений от тыльной поверхности. Вместо этого при достижении поверхности среза волна начинает «скользить» вдоль нее, а затем вдоль боковой стенки демпфера. Именно это приводит к возмущениям небольшой амплитуды, заметным на рис. 5, особенно при углах γ , отличных от 30° . Следует также отметить, что «рябь», наблюдаемая при угле $\gamma = 40^\circ$, по всей видимости,

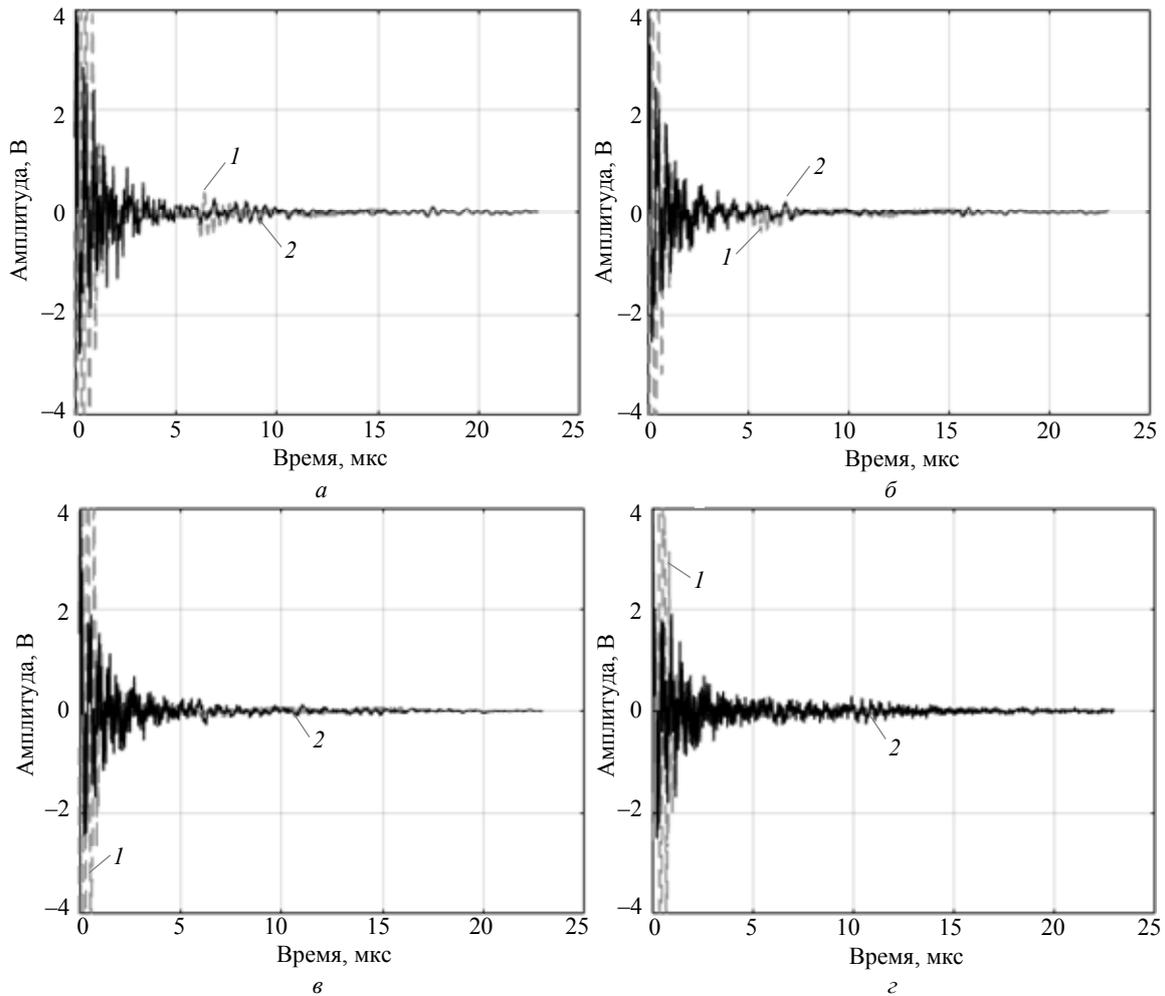


Рис. 5. Сопоставление выходного напряжения на пьезоэлементе, полученного расчетным путем (1) и экспериментально (2) при углах γ : а – 10° ; б – 20° ; в – 30° ; г – 40°
 Fig. 5. Comparison of the calculated (1) and measured (2) output voltage on the piezoelectric element at angles γ : а – 10° ; б – 20° ; в – 30° ; г – 40°

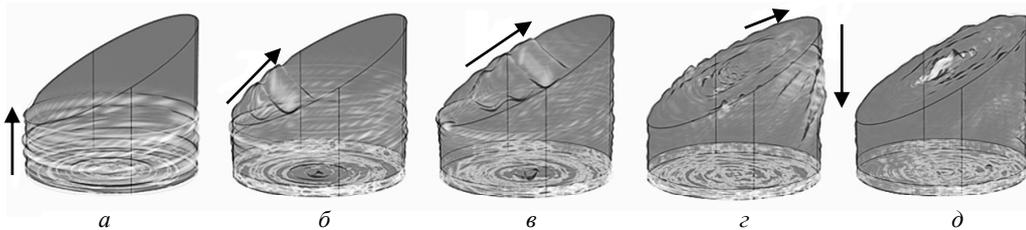


Рис. 6. Динамика изменения фронта сигнала в демпфере в виде усеченного цилиндра с углами среза $\gamma = 30^\circ$ в зависимости от времени, мкс: а – 2.08; б – 3.12; в – 4.0; г – 6.28; д – 9.36
 Fig. 6. Dynamics of the signal front change in the damper having the form of a truncated cylinder with cutoff angles $\gamma = 30^\circ$ depending on time, mks: а – 2.08; б – 3.12; в – 4.0; г – 6.28; д – 9.36

также следует из описанного выше «скольжения» сигнала по боковой стенке. При этом данное явление приводит к отсутствию явного отражения от тыльной стороны демпфера, который наблюдался во всех предыдущих случаях. Все вышеописанные факты позволяют утверждать, что в отношении достижения минимума паразитных сигналов демпфер в виде усеченного цилиндра с углом среза $\gamma = 30^\circ$ оптимален по сравнению со всеми исследованными формами. Нельзя также не отметить, что изготовление данного демпфера –

наименее трудоемкая задача, поскольку для его изготовления не требуется оснастка сложной формы, а достаточно лишь цилиндрических станочников и угловой оснастки. Данный факт имеет немаловажное значение при серийном производстве пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП).

Для удобства оценки полученных результатов на рис. 7 приведены сводные данные исследования различных форм демпфера. По оси абсцисс отложен угол α для случая демпферов, выполненных в виде усеченного конуса, угол β для случая

усеченного до оси цилиндра и угол γ для случая полностью усеченного цилиндра. По оси ординат отложен размах паразитного сигнала V . Линии, соединяющие точки, получены аппроксимацией полиномом третьей степени. На рисунке видно, что наиболее эффективна в отношении минимума отражений форма демпфера в виде усеченного цилиндра (линия 3). Следует отметить, что при угле $\gamma = 30^\circ$ размах паразитного сигнала всего на 0.1 В меньше, чем при $\gamma = 40^\circ$.

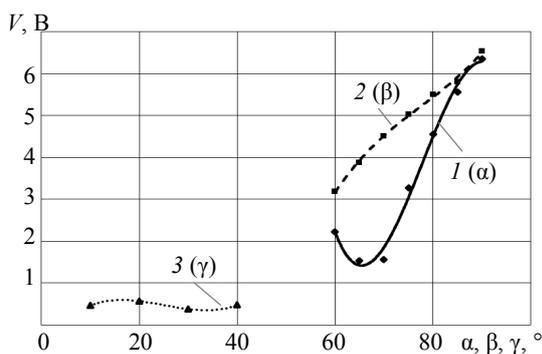


Рис. 7. Зависимость размаха паразитного сигнала от углов α и γ : 1 – случай усеченного конуса (α); 2 – случай усеченного до оси цилиндра (β); 3 – случай полностью усеченного цилиндра (γ)

Fig. 7. Dependence of the amplitude of the parasitic signal on the angles α and γ : 1 – case of a truncated cone (α); 2 – case of a cylinder truncated to the axis (β); 3 – case of a completely truncated cylinder (γ)

Однако следует также подчеркнуть, что угол $\gamma = 30^\circ$ наиболее эффективен лишь для демпфера с указанной в [1] высотой (10.3 мм) и диаметром (12 мм). Иные конфигурации геометрических параметров демпфера могут привести к иному эффективному значению угла γ . В связи с этим нельзя однозначно утверждать, что демпфер с приведенными параметрами универсален и одинаково эффективно будет работать при ином,

например, диаметре пьезоэлемента. Данный вопрос требует дополнительной проработки, выходящей за рамки настоящей работы.

Заключение. В статье приведены результаты натурного и расчетного моделирования различных форм демпфера. В результате настоящего исследования:

1. Применена расчетная модель для оценки эффективности демпферов различных форм, отличных от усеченного конуса, подробно описанная в [1]. Подтверждена корректность получаемых с помощью данной модели результатов посредством их сравнения с результатами экспериментов.

2. Определена форма демпфера в виде усеченного цилиндра, оптимальная с точки зрения минимума амплитуды паразитного сигнала. Показано, что минимум амплитуды достигается при угле среза цилиндра γ , равном 30° . Достигнутый расчетным моделированием результат сходится с результатом натурного моделирования.

3. Используемая модель применена для наглядного анализа распространения фронтов ультразвуковых волн в теле демпфера, позволяющего оценить и определить причины возникновения паразитных сигналов.

Достигнутые результаты в очередной раз свидетельствуют о физической корректности полученной модели. Продемонстрированные выше результаты позволяют утверждать, что предложенная модель может быть использована для оценки эффективности демпферов любой сложности и геометрии, что может способствовать снижению производственных затрат на многочисленные натурные эксперименты при производстве и конструировании ПЭП.

Список литературы

1. О рациональном подходе к расчету демпфера пьезопреобразователя. Часть 1. Численное моделирование / М. С. Вечёра, С. И. Коновалов, Р. С. Коновалов, В. В. Шеметова, В. М. Цаплев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 1. С. 5–14.

2. Marburg S., Nolte B. Discretization requirements: How many elements per wavelength are necessary? Computational acoustics of noise propagation in fluids – finite and boundary element methods. 2002. Berlin, Heidelberg: Springer. P. 309–332.

3. More than six elements per wavelength: The practical use of structural finite element models and their accuracy in comparison with experimental results / P. Langer, M. Maeder, C. Guist, M. Krause, S. Marburg // J. of

Computational Acoustics. 2017. Vol. 25, no. 04. Art. 1750025. P. 1–23.

4. Two dimensional FEM simulation of ultrasonic wave propagation in isotropic solid media using COMSOL / B. Ghose, K. Balasubramaniam, Ch. V. Krishnamurthy, A. S. Rao // COMSOL Conf. Bengaluru, India: COMSOL Inc., 2010. URL: https://www.comsol.com/paper/download/62310/ghose_paper.pdf (дата обращения: 12.08.2025).

5. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под общ. ред. И. Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.

6. Гитис М. Б. Преобразователи для импульсной ультразвуковой дефектоскопии. Основные теоретические положения // Дефектоскопия. 1981. № 2. С. 65–84.

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

8. Кретов Е. Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. Изд. 4-е, перераб. СПб.: СВЕН, 2014. 312 с.

9. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль: в 7 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль / под ред. В. В. Ключева; М.: Машиностроение, 2004. 864 с.

10. Исследование эффективности работы ультразвукового пьезоэлектрического преобразователя эхоскопа в зависимости от геометрической формы демпфера / М. С. Вечёра, С. И. Коновалов, Р. С. Коновалов, В. М. Цаплев, З. М. Юлдашев // Медицинская техника. 2024. № 6. С. 25–27.

Информация об авторах

Вечёра Михаил Сергеевич – аспирант кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; инженер ООО «Константа УЗК», Огородный переулок, 21, Санкт-Петербург, 198097, Россия.

E-mail: vechiora.mihail@yandex.ru; vms@constant.ru

<https://orcid.org/0009-0003-0018-6810>

Коновалов Сергей Ильич – д-р техн. наук, профессор 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»; доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Московский пр., 9, Санкт-Петербург, 190031, Россия.

E-mail: rskonovlov.eut@gmail.com

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

Шеметова Валентина Владимировна – студент гр. 0582 кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; инженер, ООО «Системы неразрушающего контроля», ул. Мельничная, 8, лит. Л, Санкт-Петербург, 192019, Россия.

E-mail: valentin.shemo@gmail.com

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>

Вклад авторов:

Вечёра М. С. – концепция исследования; подготовка и проведение исследований; подготовка рукописи.

Коновалов С. И. – методология исследования; подготовка и редактирование рукописи.

Коновалов Р. С. – анализ данных; коррекция рукописи.

Шеметова В. В. – проведение численных исследований; анализ данных; подготовка рукописи.

Цаплев В. М. – анализ данных; коррекция и редактирование рукописи.

References

1. O ratsionalnom podhode k raschetu dempfera pezipreobrazovatelja. Chast 1. Chislennoe modelirovanie / M. S. Vechyora, S. I. Konovlov, R. S. Konovlov, V. V. Shemetova, V. M. Tsaplev // Izv. SPbGjeTU «LjeTI». 2026. T. 19, № 1. S. 5–14. (In Russ.).

2. Marburg S., Nolte B. Discretization requirements: How many elements per wavelength are necessary? Computational acoustics of noise propagation in fluids –

finite and boundary element methods. 2002. Berlin, Heidelberg: Springer. P. 309–332.

3. More than six elements per wavelength: The practical use of structural finite element models and their accuracy in comparison with experimental results / P. Langer, M. Maeder, C. Guist, M. Krause, S. Marburg // J. of Computational Acoustics. 2017. Vol. 25, no. 04. Art. 1750025. P. 1–23.

4. Two dimensional FEM simulation of ultrasonic wave propagation in isotropic solid media using COMSOL / B. Ghose, K. Balasubramaniam, Ch. V. Krishnamurthy, A. S. Rao // COMSOL Conf. Bengaluru, India: COMSOL Inc., 2010. URL: https://www.comsol.com/paper/download/62310/ghose_paper.pdf (data obrashhenija: 12.08.2025).

5. Ultrazvukovye preobrazovateli dlja nerazrushajushhego kontrolja / pod obshh. red. I. N. Ermolova. M.: Mashinostroenie, 1986. 280 s. (In Russ.).

6. Gitis M. B. Preobrazovateli dlja impulsnoj ultrazvukovoj defektoskopii. Osnovnye teoreticheskie polozhenija // Defektoskopija. 1981. № 2. S. 65–84. (In Russ.).

7. Domarkas V. I., Kazhis R.-I. Yu. Kontrolno-izmeritelnye pezoelektricheskie preobrazovateli. Vilnyus: Mintis, 1974. 256 s. (In Russ.).

8. Kretov E. F. Ultrazvukovaja defektoskopija v energo-mashinostroenii. Izd. 4-e, pererab. SPb.: SVEN, 2014. 312 s. (In Russ.).

9. Nerazrushajushhij kontrol. V 7 t. / pod red. V. V. Kljueva. T. 3: Ultrazvukovoj kontrol / I. N. Ermolov, Yu. V. Lange. M.: Mashinostroenie, 2004. 864 s. (In Russ.).

10. Issledovanie effektivnosti raboty ultrazvukovogo pezoelektricheskogo preobrazovatelja ehoskopa v zavisimosti ot geometricheskoy formy dempfera / M. S. Vechyora, S. I. Konovalov, R. S. Konovalov, V. M. Tsaplev, Z. M. Yuldashev // Meditsinskaja tehnika. 2024. № 6. S. 25–27. (In Russ.).

Information about the authors

Mikhail S. Vechera – postgraduate student of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University; engineer of LLC «Constanta US», Ogorodny Lane, 21, Saint Petersburg, 198097, Russia.

E-mail: vechiora.mihail@yandex.ru; vms@constanta.ru

<https://orcid.org/0009-0003-0018-6810>

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

E-mail: sikonovalov.eut@gmail.com

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

Roman S. Konovalov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, the Head of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University; Associate Professor of the Department Ground Transport and Technological Complexes, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Moskovsky Pr., 9, Saint Petersburg, 190031, Russia.

E-mail: rskonovalov.eut@gmail.com

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

Valentina V. Shemetova – student gr. 0582, Saint Petersburg Electrotechnical University; engineer, LLC «NDT Systems», Melnichnaya St., 8, Lit. L, Saint Petersburg, 192019, Russia.

E-mail: valentin.shemo@gmail.com

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

E-mail: valery@convergences-fr.ru

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

Author Contributions:

Vechera M. S. – research concept; preparation and conduct of research; text preparation.

Konovalov S. I. – research methodology; preparation and editing of the text.

Konovalov R. S. – data analysis; correction of the text.

Shemetova V. V. – numerical calculation and data analysis, text preparation.

Tsaplev V. M. – data analysis; correction and editing of the text.

Статья поступила в редакцию 27.11.2025; принята к публикации после рецензирования 23.12.2025; опубликована онлайн 26.02.2026.

Submitted 27.11.2025; accepted 23.12.2025; published online 26.02.2026.