

тата можно отметить очень низкое значение плотности материала для согласующего слоя (около  $60 \text{ кг/м}^3$ ). Из известных сегодня твердых материалов с низкой плотностью можно рассматривать пенопласт, пенополиуретан, пенополистирол. Возможным решением для снижения жестких требований к материалам является использование нескольких слоев согласования или получение активного элемента с низким акустическим сопротивлением путем использования композитных материалов. При этом описанный выше подход к расчету, моделированию и оптимизации конструктивных элементов позволяет сократить затраты при проектировании сложных устройств.

УДК 681.586.48

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Дедович Н. Н., Романов А. Ф.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Представлены результаты расчета элементов пьезоэлектрического преобразователя с учетом реальных условий эксплуатации в газовой среде. Моделирование пьезоэлектрического элемента методом конечных элементов показало хорошее совпадение с результатами натуральных измерений.

**Ключевые слова:** конструкция, пьезоэлектрический преобразователь, пьезокерамический элемент, метод конечных элементов.

### MODELING OF STRUCTURAL ELEMENTS OF A PIEZOELECTRIC TRANSDUCER BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Dedovich N., Romanov A.

*Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** The results of calculation of piezoelectric transducer elements are presented taking into account real operating conditions in a gas environment. Modeling of a piezoelectric element by the finite element method showed good agreement with the results of natural measurements.

**Key words:** design, piezoelectric transducer, piezoceramic element, finite element method.

*Адрес для переписки: Романов А. Ф., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь  
e-mail: ramanau@bsu.by*

Как правило пьезоэлектрические преобразователи (ПП) содержат пьезокерамический элемент (ПЭ), который обеспечивает обратимость преобразований и позволяет использовать преобразователь как в качестве излучателя, так и в качестве приемника ультразвуковых волн. Для эффективного излучения и приема ультразвуковых волн требуется наличие слоев с промежуточным значением акустического импеданса. В то же время на другой стороне ПЭ для устранения эффекта реверберации необходимо установить слой с акустическим импедансом близким к акустическому импедансу ПЭ (демпфер). Материал корпуса ПП должен обеспечить механическую и электромагнитную защиту многослойного преобразователя. Общая конструкция ПП показана на рисунке 1 [1].

Широкий диапазон избыточного давления (от 0,2 МПа до 2,5 МПа) и температур (от минус

### Литература

1. Богуш, М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электроупругих моделей. М.: Техносфера, 2014. – 312 с.
2. APC International, Ltd. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.americanpiezo.com>. – Data of access: 2.12.2023.
3. COMSOL Multiphysics® version 6.1 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.comsol.com>. – Data of access: 11.09.2023.
4. Голямина, И. П. Ультразвук: Маленькая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
5. Исакович, М. А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. – 496 с.

50 °С до 100 °С) измеряемой среды приводит к тому, что наилучшее согласование обеспечивается только в ограниченной области диапазонов, так как расчетное значение акустического импеданса газа меняется в 10 раз (от  $689 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$  до  $6560 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$ ) [2, 3]. Следовательно, диапазон акустического импеданса согласующего слоя должен быть от  $1,04 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$  до  $3,22 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$  [4, 5].

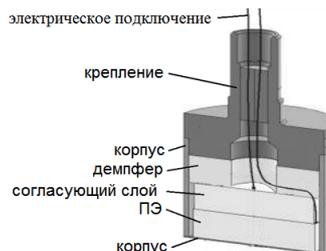


Рисунок 1 – Конструкция ультразвукового ПП

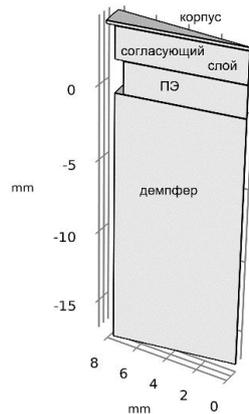


Рисунок 2 – Геометрия модели ПП

На первом этапе с помощью пакета программного обеспечения COMSOL Multiphysics [6] моделировался ПЭ и проводилась оценка ошибки моделирования. Для снижения вычислительных требований использована возможность построения симметричной 3D модели (рисунок 2). Кроме того, моделирование одиночного ПЭ проведено с дополнительной продольной симметрией, что привело к снижению количества элементов в 100 раз без потери качества сетки. Решение задачи поиска собственных частот выполнено в области низких частот (рисунок 3).

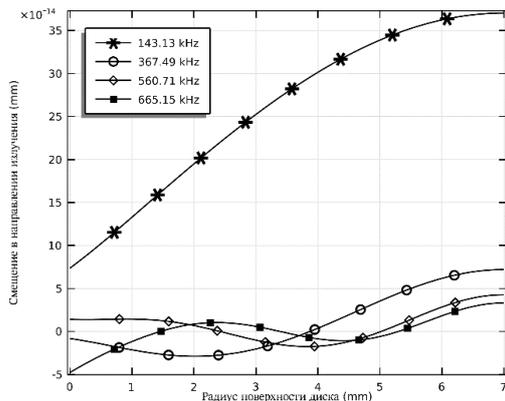


Рисунок 3 – Смещение поверхности ПЭ

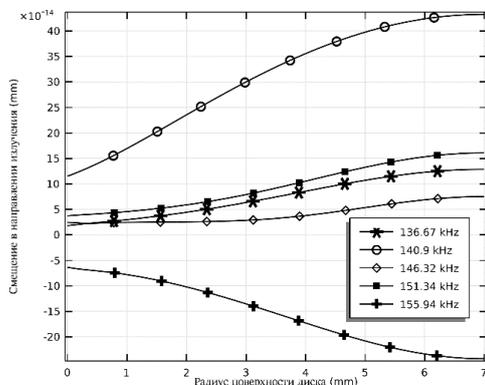


Рисунок 4 – Смещение поверхности ПЭ для полной конструкции ПП

Аналитический расчет резонансной частоты, соответствует радиальной моде колебаний 148571 Гц. Значение частоты резонанса в результате моделирования получилось равным 143129 Гц. Значение частоты резонанса по результатам измерений – 147399 Гц. Относительная ошибка моделирования составила 2,9 %.

Модель полной конструкции ПП содержит близко расположенные собственные частоты (рисунки 4 и 5). Дополнительные слои оказывают влияние на значение рабочей частоты ПП и амплитуду смещения поверхности ПЭ в направлении излучения.

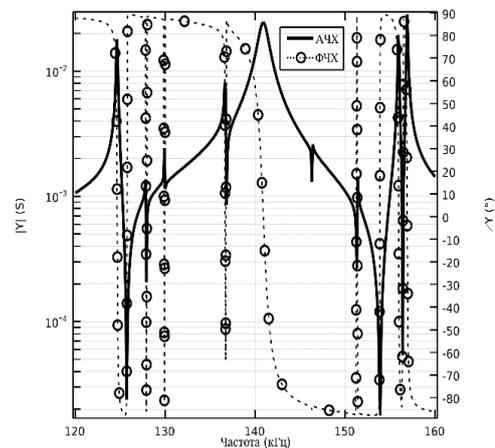


Рисунок 5 – Зависимость проводимости от частоты

Геометрические характеристики пьезоэлектрического элемента дополнительно к эффективности преобразований [7] определяют частотные свойства преобразователя и диаграмму направленности. Условия эксплуатации ультразвуковых преобразователей и импульсный метод измерений определяют конструктивные требования и решения. Применение ПП в газообразной среде накладывает наиболее жесткие условия эксплуатации из-за большой разницы акустических сопротивлений среды и ПЭ. Для повышения эффективности излучения ПП необходимо дополнительно проводить оптимизацию элементов конструкции. Оптимизация позволяет управлять значениями собственных частот и получать одночастотную гладкую амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и фазо-частотную характеристику (ФЧХ). Процесс оптимизации сводится к коррекции свойств материалов и/или геометрических размеров слоев многослойного ПП.

### Литература

1. Богуш, М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей. М.: Техносфера, 2014. – 312 с.
2. Газ природный. Методы расчета физических свойств, его компонентов и продуктов его переработки: ГОСТ 30319.1–2015. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 12 с.

3. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости. ГОСТ 30319.2–2015. – Москва: Стандартинформ, 2016.– 16 с.

4. Голямина, И. П. Ультразвук: Маленькая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.

5. Исакович, М. А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. – 496 с.

6. COMSOL Multiphysics® version 6.1 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.comsol.com>. – Data of access: 11.09.2023.

7. APC International, Ltd. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.americanpiezo.com>. – Data of access: 2.12.2023.

УДК 620.179.14

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФЕРРОЗОНДОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Добрыднев А. В., Безкоровайный В. С.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Луганский государственный университет имени Владимира Даля»  
Луганск, Луганская Народная Республика*

**Аннотация:** Данная работа посвящена разработке и применению феррозондовых датчиков для мониторинга состояния железнодорожного транспорта. В работе подчеркивается необходимость повышения уровня безопасности транспортировки людей и грузооборота, снижение эксплуатационных затрат и повышение срока службы железнодорожной инфраструктуры.

**Ключевые слова:** Феррозондовый датчик, железнодорожный транспорт, мониторинг состояния.

## THE USE OF FERROSONDES FOR MONITORING THE CONDITION OF RAILWAY TRANSPORT

Dobrydnev A., Beskorovayny V.

*Federal State Budgetary educational Institution of higher Education  
«Lugansk State University named after Vladimir Dahl»  
Lugansk, People's Republic of Lugansk*

**Abstract:** This work is devoted to the development and application of ferroconde sensors for monitoring the condition of railway transport. The paper emphasizes the need to improve the safety of transportation of people and cargo turnover, reduce operating costs and increase the service life of the railway infrastructure.

**Keywords:** Ferrosonde sensor, railway transport, condition monitoring.

*Адрес для переписки: Добрыднев А. В., квартал Молодежный, 20А, г. Луганск291034, Луганская Народная Республика, e-mail: mushroomrace@yandex.ru*

ЖД транспорт – это сектор экономического снабжения регионов, занимающийся перевозкой людей и различных грузов [1].

На долю ЖД транспорта приходится 80 % общего объема перевозок грузов и пассажиров, осуществляется наземным транспортом.

ЖД транспорт имеет множество преимуществ и с уверенностью можно сказать, что у него есть неоспоримые основания существовать и в будущем. Однако существует множество проблем, связанных с состоянием ЖД транспорта:

**Износ и повреждение деталей** – износ деталей до критических показателей отказа или нарушение сплошности слоя в результате трения, коррозионных разрушений, усталости материала и механической деформации конструкции (рисунок 1).

**Отказ технических средств** – частичное или полное разрушение объектов инфраструктуры, оборудования и нарушение технологических рекомендаций, ведущих к отказу технических средств.

**Устаревшая инфраструктура** – железнодорожные пути и станции нуждаются в модернизации. Старые и изношенные рельсы могут влиять на безопасность и скорость движения поездов (рисунок 2).



Рисунок 1 – повреждение критических деталей железнодорожного транспорта



Рисунок 2 – устаревшая инфраструктура

**Безопасность** – вопросы безопасности, как на уровне пассажирских перевозок, так и на уровне грузовых операций, остаются важной проблемой. Есть необходимость улучшения технологий управления движением и систем сигнализации.

**Технологические изменения** – внедрение новых технологий, таких как автоматизация и цифровизация, требует значительных инвестиций и подготовку кадров.