

На правах рукописи



Дурукан Ясемин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ПОЛЯРИЗАЦИИ ОБЪЕМНЫХ  
АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ**

Специальность: 1.3.7 – Акустика

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург,

2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)» на кафедре электроакустики и ультразвуковой техники (ЭУТ).

**Научный руководитель: Шевелько Михаил Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)»

**Официальные оппоненты:**

**Комкин Александр Иванович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры экологии и промышленной безопасности Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), г. Москва.

**Ковалевский Михаил Васильевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Геологического института - обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ГИ КНЦ РАН), г. Апатиты.

**Ведущая организация:**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-петербургский государственный морской технический университет» (г. Санкт-Петербург)**

Защита состоится 9 декабря 2021 года в 14.00 на заседании диссертационного совета 24.2.387.02 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) и на сайте СПбГЭТУ: <https://etu.ru/>

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах), заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан 8 октября 2021 года.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.387.02

кандидат технических наук

/Л.Н. Подгорная /

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

Одной из важнейших задач авиационной и космической области науки и техники является задача определения положения объекта в пространстве, и в частности, задача измерения угловой скорости вращения. Существующие чувствительные элементы (ЧЭ) датчиков угловой скорости (ДУС): микромеханические гироскопы, динамически настраиваемые гироскопы, волоконно-оптические гироскопы, лазерные гироскопы, твердотельные волновые гироскопы не могут в полной мере удовлетворять требованию функционирования в условиях вибраций и перегрузок, обладать при этом широким динамическим диапазоном и иметь минимальные габариты. В связи с этим, в последние десятилетия существенно возрос интерес к разработке ЧЭ ДУС на базе объемных акустических волн (ОАВ) и поверхностных акустических волн (ПАВ). В конструкциях ЧЭ на ОАВ отсутствуют упругие массы и подвесы, динамический диапазон измеряемой величины ограничен с одной стороны уровнем тепловых шумов, а с другой стороны – механической прочностью конструкции. Технологические процессы изготовления ЧЭ на ОАВ проще, чем для ЧЭ на ПАВ. Исследования, представленные в данной работе, показывают, что габариты ЧЭ на ОАВ при этом могут быть сокращены до 10 мм<sup>3</sup>. Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной и отвечает существующим тенденциям миниатюризации и импортозамещения акустоэлектронных устройств.

### Степень проработанности проблемы

Анализ источников литературы показывает существующий в последние десятилетия интерес к созданию ЧЭ ДУС, информативным параметром которых является изменение характеристик ОАВ и ПАВ под воздействием вращения среды распространения. Однако, как в отечественной, так и в зарубежной литературе отсутствует информация о применимости особенностей распространения ОАВ для создания ЧЭ ДУС, за исключением работ коллектива авторов кафедры Электроакустики и ультразвуковой техники (ЭУТ) СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (Шевелько М.М., Перегудов А.Н., Попкова (Грибкова) Е.С., Лутовинов А.И.).

**Объект** исследования – чувствительные элементы датчиков угловой скорости, основанные на особенностях распространения объемных акустических волн во вращающихся твердотельных звукопроводах.

**Предметом** исследования являются функциональные характеристики чувствительных элементов датчиков угловой скорости на объемных акустических волнах.

**Цель работы** - расширение функциональных возможностей акустоэлектронных устройств на основе анализа параметров объемных акустических волн, распространяющихся во вращающихся твердотельных звукопроводах.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи**:

1. вывод аналитических выражений, описывающих параметры (скорости и характер поляризаций) объемных акустических волн, распространяющихся в монокристаллах, вдоль и перпендикулярно оси вращения звукопровода (среды);
2. исследование возможности построения и разработка макета чувствительного элемента, основанного на выявлении ортогональной компоненты вектора поляризации в излученной волне;
3. определение влияния перпендикулярно ориентированного вращения на информативный параметр чувствительного элемента, основанного на выявлении угла поворота вектора поляризации сдвиговой волны, для оценки степени одноосности;
4. расчетно-экспериментальные исследования процессов эффективного возбуждения и приёма объемных акустических волн в чувствительном элементе датчика угловой скорости;
5. экспериментальное исследование разработанного макета чувствительного элемента датчика угловой скорости, основанного на выявлении угла поворота вектора поляризации сдвиговой волны.

#### **Методологическая, теоретическая и эмпирическая база исследования**

В качестве **методологической базы** исследования использованы: системный подход, методы выдвижения и проверки гипотез, методы анализа.

В качестве **теоретической базы** исследования использованы: теория распространения ОАВ в анизотропных твердых телах, теория Грина-Кристоффеля, метод волновых уравнений.

В качестве **эмпирической базы** исследований применялись методы измерений и эксперимента.

**Научная новизна** заключается в том, что изучаемые явления, а также конструкция ЧЭ, созданная на основе открытых эффектов, ранее не описаны в литературе и определяется новыми **научными результатами**, полученными при выполнении диссертационной работы:

1. определены особенности изменения характера поляризаций и скоростей ОАВ, распространяющихся перпендикулярно оси вращения среды;

2. доказана возможность измерения угловой скорости вращения звукопровода при ортогональном соотношении направления распространения ОАВ и оси вращения среды, подтвержденная полученным патентом;
3. получены скорректированные аналитические выражения в рамках существующей теории по определению коэффициента передачи акустического тракта и экспериментально подтверждены для акустоэлектронных устройств, имеющих ограниченные размеры и преобразователи различного типа поляризации;
4. доказана возможность использования монокристаллов (при распространении волны вдоль акустической оси) в качестве материала звукопровода ЧЭ, основанного на выявлении угла поворота вектора поляризации сдвиговой волны.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. в монокристаллах, при распространении чисто сдвиговой волны вдоль оси вращения, являющейся их акустической осью, существует поворот вектора поляризации на угол, пропорциональный скорости вращения;
2. информативным параметром чувствительного элемента датчика угловой скорости, при распространении упругих волн в направлении, ортогональном оси вращения среды, служит соотношение осей эллиптически поляризованных волн, пропорциональное скорости вращения звукопровода и имеющее линейную связь с коэффициентом Пуассона материала среды распространения;
3. чувствительный элемент датчика угловой скорости на объемных акустических волнах, основанный на выявлении угла поворота вектора поляризации сдвиговой волны, реагирует на вращение, происходящее только вокруг оси, совпадающей с направлением распространения волны;
4. при построении акустоэлектронных устройств величина приращения скорости объемной акустической волны за счет наличия пьезоэффекта является информативным параметром при выборе среза пьезокристалла для возбуждения волн.

**Теоретическая значимость** полученных результатов заключается в следующем:

1. определены скорости и характер поляризаций ОАВ, распространяющихся перпендикулярно оси вращения среды;
2. показана справедливость теоретических соотношений, описывающих расчет коэффициента передачи акустического тракта, для трактов, имеющих ограниченные размеры и преобразователи различного типа поляризаций;
3. доказано существование эффекта поворота вектора поляризации сдвиговой волны в монокристаллах, когда направление распространения волны совпадает с акустической осью монокристалла и осью вращения среды.

**Практическая значимость** полученных результатов заключается в следующем:

1. разработана апробированная в лабораторных условиях конструкция ЧЭ ДУС, основанного на выявлении ортогональной компоненты вектора поляризации в излученной волне;
2. проведены экспериментальные исследования эффективности конструкции ЧЭ ДУС на основе анализа коэффициента передачи акустического тракта ограниченного размера с преобразователями различного типа поляризаций;
3. предложен новый способ определения срезов пьезопластин для возбуждения волн на основе анализа угловых зависимостей разницы скоростей распространения волн с учетом и без учета пьезосвойств материала.

**Личный вклад автора** заключается в том, что:

1. самостоятельно получены выражения, описывающие распространение ОАВ перпендикулярно оси вращения звукопровода и разработана концепция построения ЧЭ на основе выявленных особенностей;
2. доказано существование эффекта поворота вектора поляризации в монокристаллических средах при распространении волны вдоль акустической оси, когда ось вращения совпадает с направлением распространения ОАВ;
3. разработан способ определения срезов преобразователей для возбуждения ОАВ на основе построения угловых зависимостей скоростей распространения в пьезокристаллах с учетом и без учета пьезоэффекта.
4. все проведенные эксперименты выполнялись с непосредственным участием автора.

**Степень достоверности**

Достоверность научных положений и результатов диссертации подтверждается результатами проведенных экспериментальных исследований, их сравнением с полученными ранее результатами, непрерывной апробацией основных научных результатов на научно-технических конференциях разного уровня, публикацией статей, содержащих результаты работы в рецензируемых журналах, как отечественных, так и международных.

**Апробация результатов**

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. 68, 69, 70, 71, 72 научно – технические конференции профессорско – преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015-2019 гг, Санкт-Петербург, Россия
2. XI, XII научно-технические конференции молодых специалистов по радиоэлектронике, 2018-2019 гг, Санкт-Петербург, Россия

3. XVIII, XIX, XXI, XXIII конференции молодых ученых с международным участием «Навигация и управление движением», 2016, 2017, 2019, 2021 г, Санкт-Петербург, Россия
4. 2018,2020,2021 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), Санкт-Петербург, Россия
5. XXI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям, 2018 г, Санкт-Петербург, Россия
6. 2019 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» 2019, Сочи, Россия
7. 2nd International Conference on Sensors, Signal and Image Processing 2019 г, Прага, Чехия.
8. Стендовая сессия докладов молодых ученых Алферовского Форума СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020 г, Санкт-Петербург, Россия.
9. Шестая Всероссийская конференция «Акустика среды обитания», 2021 г, Москва, Россия.

#### **Публикации**

Основные результаты диссертации изложены в 23 публикациях, среди которых:

- 4 статьи в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных в действующем перечне ВАК,
- 2 статьи в издании, входящем в перечень Scopus,
- 1 статья в ведущем рецензируемом журнале,
- 1 патент на изобретение,
- 15 публикаций в научных сборниках и трудах российских и международных конференции (6 из которых индексируются в базе Scopus).

#### **Реализация и внедрение результатов исследования**

Полученные в ходе работы над диссертацией теоретические результаты, связанные с исследованием особенностей распространения ОАВ в условиях вращения среды распространения, внедрены в учебный процесс СПбГЭТУ «ЛЭТИ», при обучении студентов дисциплине «Акустоэлектроника».

Полученные в ходе работы над диссертацией результаты использованы в научно - технических отчетах в рамках реализации гранта Президента Российской Федерации НШ-4165.2018.8 и проведения научно-исследовательской работы НР/ЭУТ-52.

Полученные результаты отмечены грантом Американского акустического общества Acoustical Society of America (ASA) в 2021 году.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация содержит введение, четыре раздела с выводами, заключение, список использованных сокращений и обозначений, список использованных источников, содержащий 86 наименований, приложения. Текст диссертации изложен на 135 страницах машинописного текста, содержит 70 иллюстраций, 17 таблиц.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приводится обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы объект и предмет исследования, цели и задачи, описаны теоретическая и практическая значимость работы, раскрываются методологическая, теоретическая и эмпирическая базы исследований, научная новизна и положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** выполнен обзор источников литературы, посвященных изучению особенностей распространения объемных акустических волн во вращающихся средах, а также приведен сравнительный анализ параметров и перспектив развития ЧЭ ДУС. В результате показаны основные научные проблемы в исследуемой области научного знания и намечены пути их решения в данной диссертационной работе.

**Во втором разделе** приводятся основные теоретические положения, описывающие распространение ОАВ в анизотропных средах.

Выполнено определение скоростей и характера поляризаций ОАВ, распространяющихся в условиях вращения среды распространения, а также проведен анализ полученных параметров. Определение типов волн и скоростей их распространения в условиях вращения производится путем решения уравнение движения для равномерно вращающейся с угловой скоростью  $\Omega$  среды:

$$\rho \left( \frac{\partial^2 \xi_i}{\partial t^2} + 2(\epsilon_{ink} \Omega_n) \frac{\partial \xi_k}{\partial t} + (\Omega_i \Omega_k \xi_k - \Omega_k \Omega_i \xi_i) \right) = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность,

$\xi_i$  – смещение частиц в волне,

$$\vec{a}_{\text{лин}} = \frac{\partial^2 \vec{\xi}}{\partial t^2} - \text{линейное ускорение,}$$

$$\vec{a}_{\text{кор}} = 2\vec{\Omega} \times \frac{\partial \vec{\xi}}{\partial t} - \text{кориолисово ускорение,}$$

$$\vec{a}_{\text{ц.с}} = \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{\xi}) - \text{центростремительное ускорение,}$$

$t$  – время,

$\epsilon_{ink}$  – символ Леви-Чивиты. Тензор Леви-Чивиты для чётной перестановки равен 1 (для троек (1,2,3), (2,3,1), (3,1,2)), для нечётной перестановки равен -1 (для троек (3,2,1),



(1,3,2), (2,1,3)), в остальных же случаях, при повторении, он равен нулю.

$\sigma_{ik}$  – тензор механических напряжений,

$x_k$  – пространственная координата.

Решение (1) проводилось для плоских гармонических волн (ПГВ) для двух частных случаев:

1. направление распространения ПГВ совпадает с осью вращения среды. Для этого случая впервые рассмотрено распространение ОАВ в монокристаллах вдоль акустических осей. В результате было определено, что в этих направлениях распространяются две чисто сдвиговые волны с одинаковыми скоростями. Таким образом, показано, что в монокристаллах, при распространении сдвиговых волн вдоль акустических осей, так же, как и для изотропных сред, наблюдается эффект поворота вектора поляризации, а, значит, они могут использоваться в качестве звукопровода ЧЭ ДУС.
2. направление распространения ПГВ перпендикулярно оси вращения среды, при распространении ОАВ вдоль кристаллографических осей. Показано, что в данном случае распространяются следующие типы волн:

- сдвиговая волна с вектором смещения  $p_3$ , совпадающим с осью вращения.

Скорость распространения  $V_t = \sqrt{C_{44}/\rho}$  (рисунок 1, а);

- квазипродольная волна эллиптической поляризации с векторами смещения  $p_1, p_2$ .

Скорость распространения  $V_{ql}$  (рисунок 1, б);

- квазисдвиговая волна эллиптической поляризации с векторами смещения  $p_1, p_2$ .

Скорость распространения  $V_{qt}$  (рисунок 1, в);

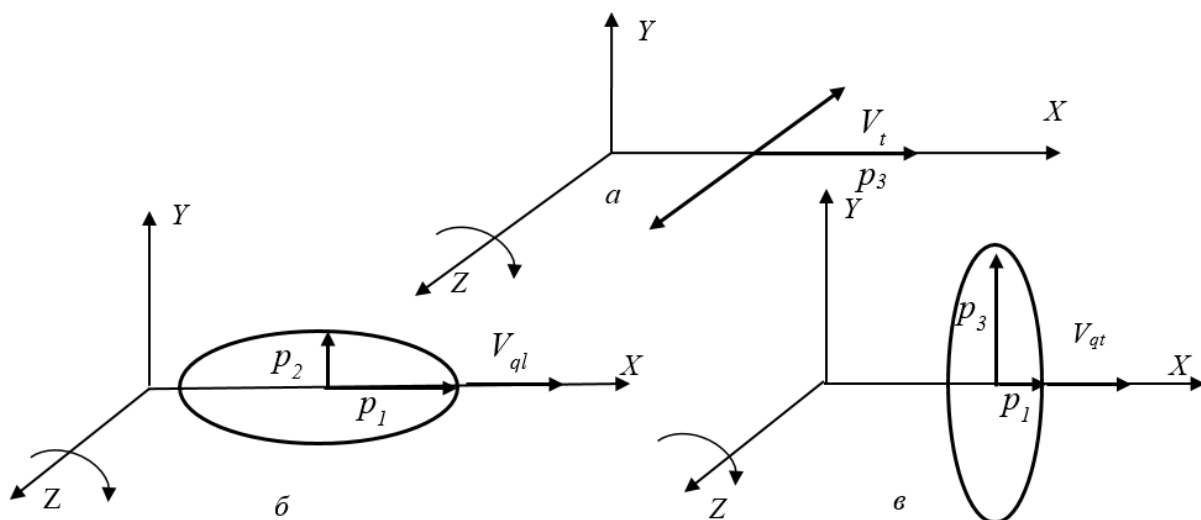


Рисунок 1

Где  $p_1, p_2, p_3$  - нормированные компоненты вектора смещения.

Доказано, что в качестве информативного сигнала ЧЭ ДУС можно использовать линейную зависимость возникающей ортогональной компоненты вектора поляризации от относительной скорости вращения звукопровода  $W$  (рисунок 2).

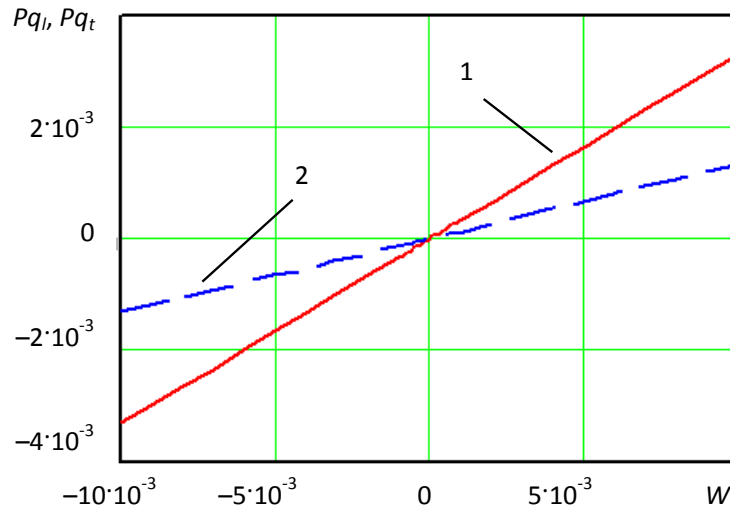


Рисунок 2

Где  $P_{q_l}, P_{q_t}$  - отношение длин осей эллипсов поляризации для квазипродольной и квазисдвиговых волн.

Показана однозначная обратно пропорциональная зависимость величины информативного сигнала от коэффициента Пуассона материала среды, когда вращение происходит перпендикулярно направлению распространения волны.

Проведена оценка дисперсии фазовой скорости ОАВ при вращении среды распространения. Показано, что дисперсия скорости распространения ОАВ не наблюдается в случае, когда волна распространяется в направлении, совпадающем с направлением вращения среды. Для ситуации, когда указанные направления перпендикулярны друг другу, величиной дисперсии можно пренебречь.

Материалы раздела опубликованы в [1-4,8].

**В третьем разделе**, на основе проведенного во втором разделе анализа, описана конструкция ЧЭ ДУС, информативным параметрам которой является величина ортогональной компоненты вектора поляризации в излученной волне, и представлены результаты экспериментальных исследований разработанного макета.

На рисунке 3 показана схема ЧЭ и измерительного стенда. ЧЭ состоит из твердотельного звукопровода 1 (рисунок 3), выполненного из плавленного кварца в форме цилиндра, и пластинчатых пьезокерамических преобразователей 2 и 3, выполненных из

пьезокерамики ЦТС-19. Преобразователи имеют поляризацию различного типа и размещаются на противоположных плоскопараллельных торцах звукопровода.

Параметры излучающего (ИП) и приёмного (ПП) преобразователей представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметр	ИП	ПП
Поляризация	Сдвиговая	Продольная
Материал	ЦТС-19	ЦТС-19
Форма	Круглая	Круглая
Диаметр, мм	20	35
Толщина, мм	1,76	3,7
Резонансная частота, МГц	0,5	0,5

Звукопровод выполнен из плавленного кварца, длиной 70 мм, в качестве материала контактного слоя использовался салол. На звукопровод по образующей нанесены насечки 4, которые в совокупности с фаской 5 снижают уровень переотражённых сигналов.

Измерительная установка представляет собой стенд одноосный автоматизированный (СОА15.5), обозначенный на рисунке выноской 6. Съём информативного сигнала обеспечивался через разъем 7.

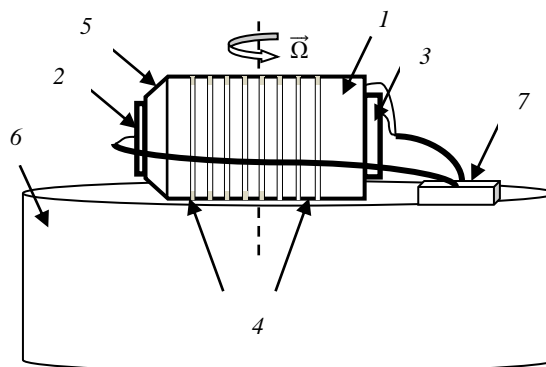


Рисунок 3

Структурная схема экспериментальной установки макета представлена на рисунке 4. Генератор радиоимпульса (ГРИ) АК ИП 3402 возбуждает гармонические колебания, амплитудой 4 В, на частоте 0,5 МГц, которые затем подаются на оригинальный усилитель мощности (УМ), имеющий свой специально разработанный блок питания (БП). Усиленные до амплитуды 200В колебания подаются на измерительный стенд (ИС), (СОА-15.5) с размещенным на нём макетом ЧЭ ДУС.

ИС управляется при помощи персонального компьютера (ПК) через блок управления (БУ) соответствующим программным обеспечением. Информативный сигнал снимается при помощи встроенного в ИС разъема и разработанной системы съема сигнала

с макета ЧЭ. Принятый ИС сигнал подается на осциллограф (ОСЦ) LeCroyWaveSurfer 24 Xs.

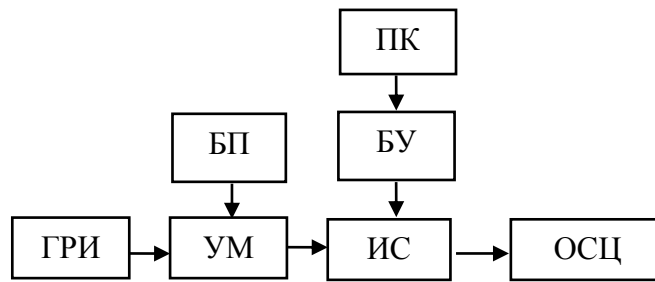


Рисунок 4

На рисунке 5 представлена фотография ЧЭ, размещенного на ИС.



Рисунок 5

Выходное напряжение макета ЧЭ ДУС определяется следующим соотношением

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} K_{\text{АК}} K_{\text{Г}} \Omega, \quad (2)$$

где  $U_{\text{ВХ}}$  – напряжение на выходе макета ЧЭ;

$K_{\text{АК}}$  – коэффициент передачи акустического тракта ЧЭ,

$K_{\text{Г}}$  – коэффициент передачи гироскопической составляющей, определяемый концепцией построения датчика.

Для разработанного макета  $U_{\text{ВХ}} = 200 \text{ В}$ ,  $K_{\text{АК}} = -8 \text{ дБ}$ ,  $K_{\text{Г}} = (3,322/2\pi)W = 4,23 \cdot 10^{-6}$ .

Результаты зависимости выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  от угловой скорости вращения  $\Omega$ , рассчитанные теоретически и полученные при проведении эксперимента, представлены на рисунке 6. Как видно из рисунка 6, полученные значения выходного напряжения при проведении эксперимента (кривая 1) коррелируют с расчетными значениями (кривая 2).

На предложенный способ выявления угловой скорости автором получен патент.

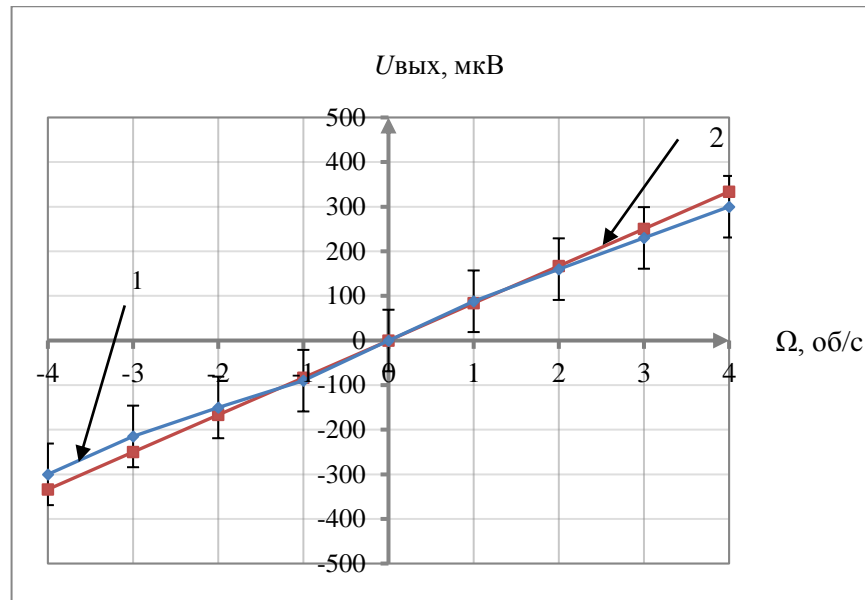


Рисунок 6

Показано, что ЧЭ ДУС на ОАВ, построенный принципе выявления угла поворота вектора поляризации, является с одноосевым.

Проведена сравнительная оценка уровней выходного сигнала для различных концепций построения ЧЭ, в результате которой сделан вывод об актуальности дальнейшего развития концепции ЧЭ ДУС на ОАВ, построенного на принципе выявления поворота вектора поляризации. Пути развития данной концепции изложены в разделе 4.

Материалы раздела опубликованы в [6,9-13,23].

**В четвертом разделе** представлены результаты анализа факторов, влияющих на уровень выходного сигнала ЧЭ, основанного на выявлении угла поворота вектора поляризации сдвиговой волны (рисунок 7), который ранее разработан на кафедре ЭУТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Попковой (Грибковой) Е.С., а также способы, позволяющие разработать ЧЭ, обладающий минимальными размерами и максимальным уровнем выходного сигнала.

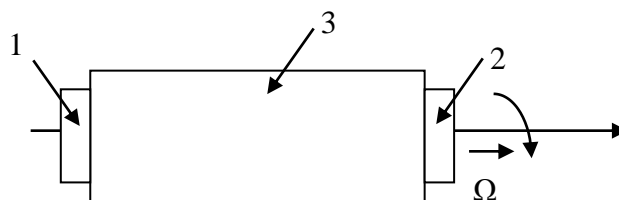


Рисунок 7

На рисунке 7 приняты следующие обозначения 1,2 – излучающий и приёмный пластинчатые преобразователи сдвиговых волн, оси чувствительности которых ортогональны друг другу, 3- звукопровод.

Выходное напряжение ЧЭ определяется следующим соотношением (2), с учетом того, что коэффициент передачи гироскопической составляющей  $K_G$  равен:

$$K_T = \tau \Omega,$$

где  $\tau = l/V$  – длина звукопровода,  $V$  – скорость распространения сдвиговой волны.

Таким образом, увеличение выходного напряжения производится путем повышения коэффициента передачи акустического тракта ЧЭ и коэффициента передачи гироскопической составляющей. Увеличение  $K_T$  не может быть обеспечено удлинением звукопровода, поскольку ЧЭ должен отвечать тенденциям миниатюризации, поэтому необходимо выбрать материалы, обладающие минимальной скоростью распространения сдвиговых волн. Уменьшение габаритов данного макета возможно путем повышения рабочей частоты. Это позволит понизить габариты ЧЭ и уровень акустических шумов, однако приведет к необходимости выбора материала звукопровода с учетом затухания ультразвука. Повышение рабочей частоты должно обеспечиваться с максимальным  $K_{AK}$ , что может быть реализовано путем использования высокоэффективных пьезоматериалов преобразователей.

Проведены экспериментальные исследования по оценке коэффициента передачи акустического тракта. Структурная схема установки для проведения экспериментальной оценки исследуемого коэффициента передачи акустического тракта представлена на рисунке 8.

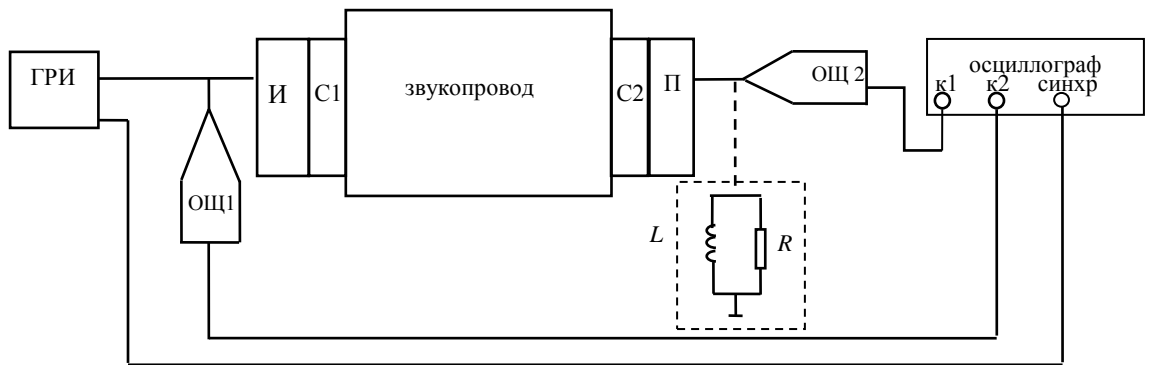


Рисунок 8

На рисунке приняты следующие обозначения: ГРИ – генератор радиоимпульсов; ОЩ1, ОЩ2 – осциллографические щупы И, П – пьезоизлучатель и пьезоприемник ультразвуковых волн соответственно; C1, C2 – контактные слои; k1, k2 – входы осциллографа, синхр – синхронизация.

В таблице 4 представлены характеристики макетов, которые использовались для экспериментальных исследований.

Таблица 4

Номер макета	1	2		3	
Материал пьезопреобразователей	Пьезокварц Y-срез	Пьезокерамика ЦТС – 19		Пьезокерамика ЦТС – 19	
		И	П	И	П
Длина и ширина $a*b$ / диаметр $D$ , мм	10*16	15,7	15,7	15	15
Толщина $t$ , мм	0,6	0,95	1,0	0,32	0,32
Рез. частота $f_p$ , МГц	3,25	2,0	1,94	5,9	6,25
Антирез. частота $f_a$ , МГц	3,26	2,33	2,17	7,00	7,3

Отдельно разработан макет с преобразователями из ниобата лития среза  $X+41^\circ$ . На рисунке 9 представлен график зависимости коэффициента передачи акустического тракта от частоты  $f$ .

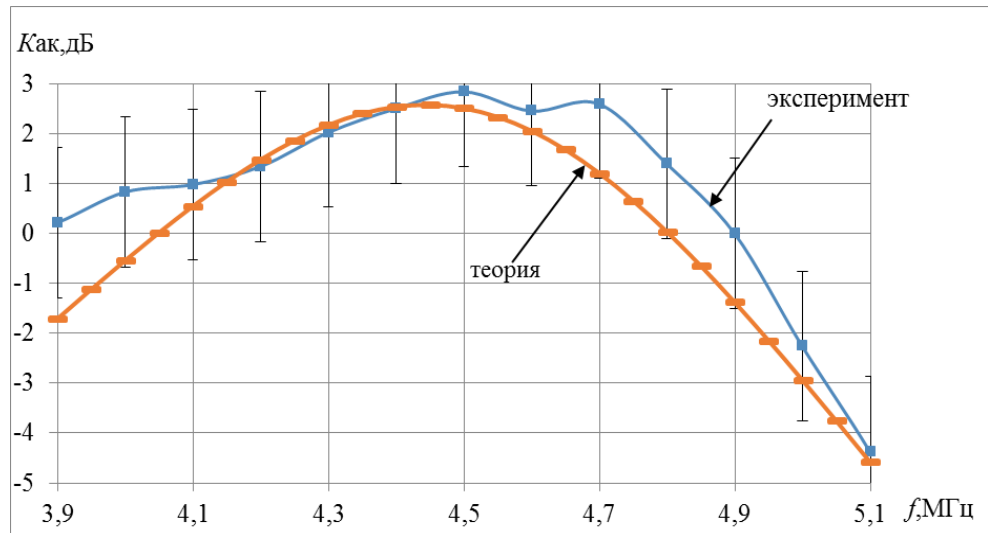


Рисунок 9

В результате проведенных исследований показано, что:

1. для макета с преобразователями из пьезокерамики и ниобата лития коэффициент передачи акустического тракта на 30 дБ выше, чем с преобразователями из пьезокварца;
2. при размещении колебательного контура в качестве электрической нагрузки происходит различное его влияние на значение коэффициента передачи акустического тракта для преобразователей, выполненных из разного материала. Для макета с преобразователями из пьезокварца происходит значительное увеличение значения  $K_{ак}$  на резонансной частоте, для макета с преобразователями из пьезокерамики наблюдается уменьшение коэффициента передачи на резонансной частоте колебательного контура.

В ходе проведенных исследований доказана справедливость ранее разработанной теории по расчету коэффициента передачи акустического тракта для применения к макетам, которые отличаются ограниченными размерами.

Таким образом, показано, что разница между результатами экспериментальных и теоретических исследований незначительна для разработки чувствительных элементов датчиков угловой скорости.

Сформулированы требования к материалу звукопровода и пьезопластины, на основе которых выделены следующие материалы:

1. монокристаллический кварц( $\text{SiO}_2$ ),
2. ниобат ( $\text{LiNbO}_3$ ) и танталат лития ( $\text{LiTaO}_3$ ),
3. лангасит( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ).

В качестве материала для звукопровода рассматриваются стекла различного состава: плавный кварц, халькогенидные стекла, а также монокристаллические материалы.

Для проведения анализа возможности использования материалов в качестве пластинчатых преобразователей предложен новый способ определения наиболее эффективных срезов пьезокристаллов для возбуждения волн. Способ основан на выявлении разности скоростей распространения волн с учетом и без учета пьезоэффекта, в направлении перпендикулярном срезу. При этом по скорости волн, можно отслеживать их поляризацию. На рисунке 10 представлены угловые зависимости скоростей распространения в плоскости YZ монокристалла ниобата лития.

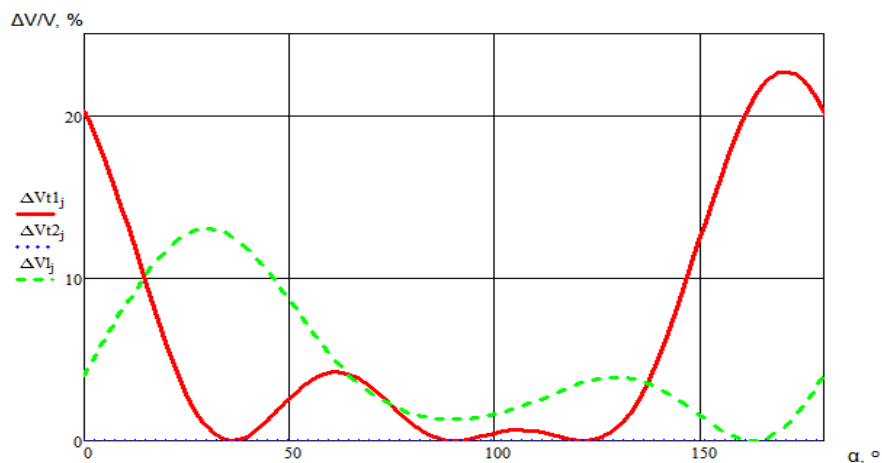


Рисунок 10

На рисунке 10 приняты следующие обозначения:  $\Delta v_{t1}$ ,  $\Delta v_{t2}$ ,  $\Delta V_l$  – относительная разница скоростей с учетом и без учета пьезосвойств для квазисдвиговых и квазипродольной волн.



Как видно из графика, представленного на рисунке 10, при значении угла в  $163^\circ$  влияние пьезоэффекта происходит только на одну волну сдвиговой поляризации и его значение достигает максимума, при этом влияние на волну продольной поляризации отсутствует. Таким образом, пьезопластина такого среза позволит излучать только волну сдвиговой поляризации.

Все возможные варианты применения рассмотренных пьезокристаллов в качестве пьезопластин и звукопровода представлены в таблице 2.

Таблица 2

Материал	Плоскость	Угол для звукопровода, °	Угол для пьезопластины, °
SiO <sub>2</sub>	ZY	90	5
		156	
	XY	-	-
	XZ	90	-
LiNbO <sub>3</sub>	YZ	47	163
		90	
	XY	-	-
	XZ	90	-
LiTaO <sub>3</sub>	YZ	90	-
		151	
	XY	-	-
	XZ	90	0
La <sub>3</sub> Ga <sub>5</sub> SiO <sub>14</sub>	YZ	42	11
		90	
	XY	-	-
	XZ	90	-

В таблице 3 представлены монокристаллы и изотропные материалы, которые можно использовать в качестве материала звукопровода.

Таблица 3

Материал	Скорость сдвиговой волны, м/с
Плавленый кварц	3770
Антимонид индия	723
Арсенид галлия	1000
Селенид цинка	983
Сульфид цинка	1264
ХГС	1330
ТФ-7	2167
ТФ-10	2047

Как видно из таблицы 3, наиболее перспективными из монокристаллов для применения являются арсенид галлия, антимонид индия и сульфид цинка. Среди изотропных материалов перспективными являются халькогенидные стекла (ХГС) и кварцевые стекла различных марок, например, тяжелые флинты (ТФ).

По результатам исследований, выполненных в четвертом разделе, разработан макет чувствительного элемента датчика угловой скорости, ось чувствительности которого совпадает с направлением распространения волны.

Макет включает в себя:

- твердотельный звукопровод 1 (рисунок 11), выполненный из стекла ТФ-10 в форме цилиндра, длиной 17,5 мм.
- пластинчатые пьезоэлектрические преобразователи сдвиговых волн, выполненные из ниобата лития среза  $Y+163^\circ$  (рисунок 11, 2).

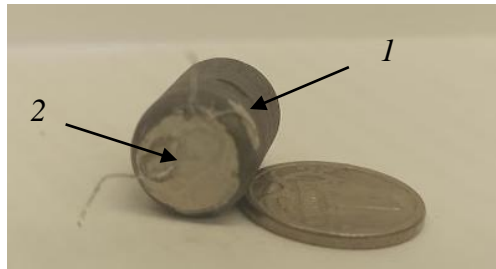


Рисунок 11 – Разработанный макет чувствительного элемента

В таблице 4 представлены характеристики пластинчатых пьезоэлектрических преобразователей.

Таблица 4 – Характеристики преобразователей

Параметр	Преобразователь
Поляризация	Сдвиговая
Материал	Ниобат лития
Форма	Круглая
Диаметр, мм	8
Толщина, мм	0,25
Резонансная частота, МГц	9

Структурная схема экспериментальной установки макета (рисунок 12) аналогична структурной схеме, представленной на рисунке 4.

Генератор радиоимпульса (ГРИ) АКИП 3402 возбуждает гармонические колебания амплитудой 50 В на частоте 9 МГц, которые поступают на измерительный стенд (ИС), который представляет собой стенд одноосный автоматизированный (СОА-15.5) с размещенным на нём макетом чувствительного элемента датчика угловой скорости (рисунок 13). Принятый ИС сигнал подается на (ОСЦ) осциллограф LeCroy Wave Surfer 24 Xs.

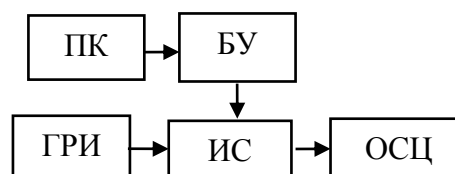


Рисунок 12 – Структурная схема экспериментальной установки

На рисунке 13 представлена фотография измерительного стенда, представляющего собой СОА15.5, обозначенный на рисунке выноской 2, и размещенный на ней макет ЧЭ, обозначенный выноской 1.

Результаты зависимости выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  от угловой скорости вращения  $\Omega$ , рассчитанные теоретически (кривая 1) и полученные при проведении эксперимента (кривая 2), представлены на рисунке 14.

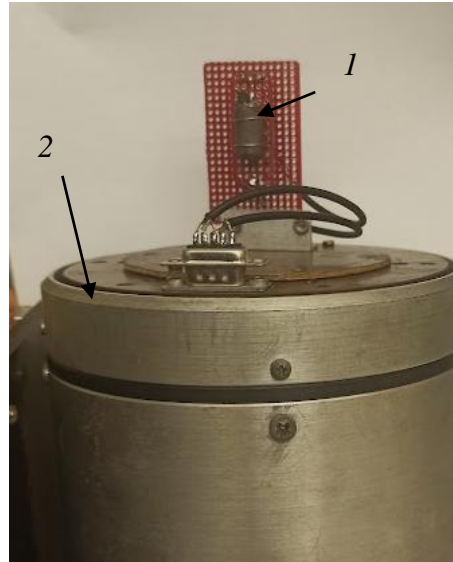


Рисунок 13– Фотография макета, размещенного на измерительном стенде

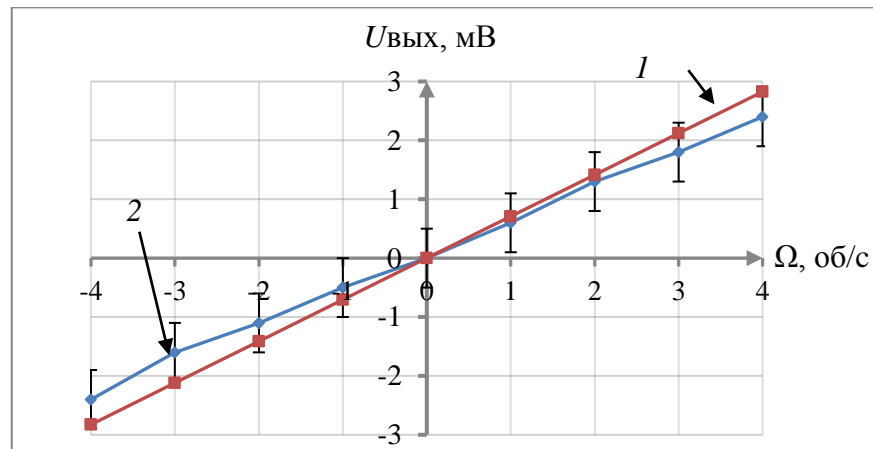


Рисунок 14 – Зависимость выходного напряжения макета чувствительного элемента от угловой скорости

Для входного напряжения 50 В,  $K_{\text{ак}}=-6$  дБ,  $\tau=68$  мкс,  $\Omega=1$  об/с уровень выходного напряжения составил порядка 0,5 мВ. Получившийся уровень выходного напряжения примерно в 10 раз больше, чем для макета, ранее разработанного на кафедре ЭУТ Попковой (Грибковой) Е.С. СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Материалы раздела опубликованы в [7,14-22].

В **заключении** описаны основные результаты, полученные в ходе работы над диссертацией, и показано, что все задачи диссертационной работы решены, а полученные результаты обеспечивают возможность достижения поставленной цели.

В первом разделе представлен аналитический обзор литературы, в результате которого показано, что существующие работы носят фундаментальный теоретический характер, за исключением работ коллектива кафедры ЭУТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Шевелько М.М., Перегудов А.Н., Попкова (Грибкова) Е.С., Лутовинов А.И.). По результатам проведенного анализа сформулированы основные направления развития научной области, которые нашли отражение в последующих разделах.

Во втором разделе представлены результаты решения задачи о выводе аналитических выражений, описывающих параметры (скорости и характер поляризаций) ОАВ, распространяющихся в монокристаллах, вдоль и перпендикулярно оси вращения звукопровода (среды). Доказано существование эффекта поворота вектора поляризации в монокристаллах, при распространении волны вдоль акустической оси, когда ось вращения совпадает с направлением распространения ОАВ.

В третьем разделе описаны результаты решения задачи об исследовании возможности создания макета чувствительного элемента, основанного на выявлении ортогональной компоненты вектора поляризации в излученной волне. Разработана, подтверждена патентом и апробирована в лабораторных условиях конструкция ЧЭ ДУС. Решена задача об определении влияния перпендикулярно ориентированного вращения на информативный параметр ЧЭ, основанного выявлении угла поворота вектора поляризации сдвиговой волны, для оценки степени одноосности. Показано, что ЧЭ ДУС, построенный на выявлении поворота вектора поляризации, является одноосевым.

В четвертом разделе представлены результаты решения задачи о расчетно-экспериментальном исследовании процессов эффективного возбуждения и приёма объемных акустических волн в ЧЭ ДУС. Проведен анализ зависимости коэффициента передачи акустического тракта от ряда факторов, и выявлены материалы, обеспечивающие максимальный коэффициент передачи акустического тракта.

Полезность настоящей диссертационной работы заключается в предложенном способе выбора среза пьезокристалла для возбуждения волн при построении акустоэлектронных устройств и в разработанном, а также апробированном в лабораторных условиях макете ЧЭ, уровень выходного напряжения которого в 10 раз больше, чем для макета, ранее разработанного Попковой (Грибковой) Е.С. на кафедре ЭУТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», а длина чувствительного элемента в два раза меньше.

Научная новизна заключается в результатах, полученных при изучении волновых процессов, описанных в первом разделе, в конструкции ЧЭ, описанной во втором разделе, в полученных скорректированных аналитических выражениях, представленных в четвертом разделе, что позволяет считать достижение цели диссертационной работы реализованным.

Перспективным направлением развития темы настоящей диссертационной работы является разработка трехосевых макетов ЧЭ ДУС, с рабочей частотой 50 -100 МГц, длиной до 10 мм, информативным параметром которых является выявление угла поворота вектора поляризации сдвиговой волны.

### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### **Статьи, опубликованные в зарубежных изданиях, входящих в систему цитирования Scopus:**

1. **Durukan Y.**, Shevelko M., Peregudov A., Popkova E., Shevchenko S. The Effect of a Rotating Medium on Bulk Acoustic Wave Polarization: From Theoretical Considerations to Perspective Angular Motion Sensor Design/ Sensors, 2020, 20(9), 2487 DOI : doi:10.3390/s20092487
2. **Durukan Y.**, A. Lutovinov, Shevelko M., Peregudov A., Popkova E. ,Shevchenko S. The Sensitive Element of Acoustic Sensor on Circular Polarized Waves: From Theoretical Considerations towards Perspective Rotation Rate Sensors Design. Sensors 2021, 21(1), 32; <https://doi.org/10.3390/s21010032>

#### **Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах из перечня ВАК:**

3. **Дурукан Я.**, Лутовинов А.И., Шевелько М.М., Перегудов А.Н. К вопросу о характеристиках волн, распространяющихся во вращающейся среде – Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 8’2014, с. 57 – 61.
4. **Дурукан Я.**, Лутовинов А.И., Шевелько М.М., Перегудов А.Н. О возможности построения датчиков вращательного движения на объемных акустических волнах. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 10’2015, с. 69 – 73.
5. **Дурукан Я.**, Лутовинов А.И., Шевелько М.М., Перегудов А.Н. Оценка чувствительности твердотельного ультразвукового датчика угловой скорости. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 9’2016, с. 58 – 63
6. **Дурукан Я.**, Перегудов А.Н., Шевелько М.М., Перегудов А.Н. Эффекты объемных акустических волн, распространяющихся ортогонально оси вращения среды. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2’2020, с. 17 – 26.

#### **Статьи, опубликованные в других изданиях и материалах конференций:**

7. **Дурукан Я.**, Перегудов А. Н., Шевелько М. М. Анализ коэффициента передачи акустического тракта датчика угловой скорости // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, No 1. С. 56–65. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-1-56-65)
8. **Дурукан Я.**, А. И. Лутовинов, Е. С. Грибкова. Особенности распространения акустических волн при наличии вращения и их использование в измерении

- параметров вращения – Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации. Сборник научных статей Международной научно-технической конференции «Шляндинские чтения – 2014» с.136-138;
9. **Дурукан Я.**, Лутовинов А.И., Шевелько М.М., Перегудов А.Н. Анализ характеристик волн, распространяющихся ортогонально оси вращения звукопровода. Сборник докладов конференции ППС СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. с.177-180;
  10. **Дурукан Я.**, Шевелько М.М. Исследование возможности применения объемных акустических волн для создания датчиков угловой скорости. Сборник материалов XVIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением. 15-18 марта 2016г. с. 622-627;
  11. **Дурукан Я.**, А. И. Лутовинов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько Информативный сигнал датчика вращательного движения на объемных акустических волнах. Сборник докладов конференции ППС СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. с.220-224;
  12. **Дурукан Я.**, Лутовинов А.И., Попкова Е.С., Шевелько М.М. Применение особенностей распространения объемных акустических волн для создания датчиков угловой скорости. Сборник XI научно-технической конференции молодых специалистов по радиоэлектронике с. 56-59
  13. **Durukan Y.**, Lutovinov A. I., Peregudov A.N., Popkova E. S., Shevelko M. M. The Characteristics of Acoustic Wave Propagation in Rotating Solid-State Media – Abstract book of 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus) January 29 – February 1, 2018, pp 461-464. DOI: 10.1109/ElConRus.2018.8317131
  14. **Дурукан Я.** Моделирование акустического тракта методом волновых уравнений. XXI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2018). Сборник докладов в 2-х томах. Санкт-Петербург. 23–25 мая 2018 г. СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Том 1, С. 442-445
  15. **Дурукан Я.**, Рыбина М.А., Шевелько М.М. Состояние и перспективы разработки чувствительных элементов на объемных акустических волнах для датчиков угловой скорости. Сборник материалов XIX конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» 19-22 Марта 2019 г. ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» с. 169-171;
  16. **Дурукан Я.**, Рыбина М.А., Перегудов А.Н., Шевелько М.М. Применение монокристаллических сред для звукопроводов чувствительных элементов на объемных акустических волнах. Сборник конференции ППС СПбГЭТУ "ЛЭТИ" 5-12 апреля 2019 года с.172-175.
  17. **Durukan Y.**; AleksanderN. Peregudov ;EkaterinaS. Popkova ;MichailM. Shevelko. Analysis of Elastic Wave Characteristics for Solid-State Medium Propagation under Rotation. Proceedings of the 2019 IEEE International Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS) 23-27 сентября 2019. Сочи, Россия.с.414-416. DOI:10.1109/ITQMIS.2019.8928425
  18. **Durukan Y.**; Rybina Marina A; Ekaterina S. Popkova; Michail M. Shevelko. Optimizing the Construction of Gyro Sensitive Elements Based on Bulk Acoustic Waves. Proceedings of the 2019 IEEE International Conference “Quality

Management, Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS) 23-27 сентября 2019. Сочи, Россия. С.411-413. DOI: 10.1109/ITQMIS.2019.8928387

19. **Durukan Y.**; Rybina Marina A; Ekaterina S. Popkova ;Aleksander N. Peregudov, Michail M. Shevelko. Piezoelectric materials for Transducers of Ultrasonic Sensitive Elements Based on Bulk Acoustic Waves. 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus) . 27-30 Jan. 2020. DOI: 10.1109/EIconRus49466.2020.9039158
20. **Durukan, Y.**, Shevelko, M.M., Peregudov, A.N., Popkova, E.S. The Materials for Sensitive Elements of Angular Velocity Sensors on Bulk Acoustic Waves. Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIconRus. St. Petersburg and Moscow, Russia 2021 с. 1256-1259 DOI: 10.1109/EIconRus51938.2021.9396200
21. **Дурукан Я.**, Перегудов А.Н., Попкова Е.С., Шевелько М.М. Разработка чувствительных элементов датчиков угловой скорости на объемных акустических волнах. Сборник докладов Шестой Всероссийской конференции «Акустика среды обитания», 2021. с.104-108;
22. **Дурукан Я.** Экспериментальное исследование чувствительного элемента датчика угловой скорости на объемных акустических волнах. Сборник материалов XXIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». 16-18 Марта 2021 г. ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» с. 205-207;

#### **Патенты**

23. Ультразвуковой способ измерения угловой скорости Российский патент [Текст]: пат. RU2714530С1 Российская Федерация: МПК МПК G01P3/44/**Дурукан Я.**, Перегудов А.Н., Шевелько М.М.; заявитель и патентообладатель С-Петерб. гос. электротехн. ун-т "ЛЭТИ". - № 2019111321; 15.04.2019; опубл. 18.02.2020, Бюл. №5