

На правах рукописи



Лутовинов Андрей Игоревич

ЭФФЕКТЫ КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ДЛЯ СОЗДАНИЯ
ДАТЧИКОВ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

01.04.06– Акустика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург,

2016

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.

Официальные оппоненты:

Пугачев Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Государственный научный центр Российской Федерации Открытое акционерное общество «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор» (г. Санкт-Петербург);

Ковалевский Михаил Васильевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Геологический институт Кольского научного центра РАН (ГИ КНЦ РАН) (г. Апатиты).

Ведущая организация: Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический университет (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится 28.12.2016 в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.238.06 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, ауд. 5108.

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

Ваши отзывы и замечания по автореферату (в двух экземплярах), заверенные печатью, просим высылать по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан 27.10.2016

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.238.06
к.т.н., доцент _____ /А.А. Великосельцев/

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Значительная роль в современной электронике принадлежит электроакустическим устройствам. Широкие возможности применения электроакустических устройств в качестве элементной базы привели к появлению нового направления науки и техники – акустоэлектроники. Одним из востребованных продуктов акустоэлектроники стали разного рода сенсоры, в основе работы которых лежат физические явления, связанные с особенностями распространения акустических волн. Работы последних десятилетий в части разработки акустических сенсоров направлены в сторону создания датчика угловой скорости. Подобные исследования имеют своей целью решить ряд проблем, которые существуют в области построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС), работающих в жестких виброусловиях.

Перспективы развития интеллектуальных систем навигации и управления движением определяются достижениями в области построения интегрированных систем ориентации и навигации, основополагающим элементом которых является БИНС. Необходимость создания устойчивых к внешним воздействиям чувствительных элементов инерциальных систем ориентации и навигации привела к появлению микромеханических гироскопов и акселерометров, развивающихся в настоящее время бурными темпами. Однако в области определения параметров движения высокодинамичных объектов применение современных микросенсоров ограничено по причине их низкой вибро- и ударопрочности. Существует большое число высокоманевренных объектов, движение которых характеризуется сверхбольшими ускорениями (до десятков тысяч g), значительными углами крена и тангажа. В таких условиях современные микромеханические датчики не выдерживают свои точностные характеристики или вообще оказываются неработоспособными. Использование гироскопов, построенных на других принципах (кольцевой лазерный гироскоп, волоконно-оптический гироскоп, твердотельный волновой гироскоп), может быть ограничено в силу их массогабаритных характеристик. Недостатком всех упомянутых типов гироскопов является достаточно узкий динамический диапазон измеряемых угловых скоростей. Альтернативным решением в данном случае являются гироскопы и акселерометры, использующие эффекты молекулярной кинетики твердой среды. Исследования в данной области ведутся на протяжении последних нескольких лет и уже подтвердили не только потенциальную возможность создания таких датчиков, но и их перспективность на рынке.

Современная геополитическая обстановка и взятый курс на импортозамещение требует создания отечественных образцов устройств различного назначения. Особенно остро этот вопрос стоит в стратегически важных для развития и безопасности государства сферах.

В силу указанных выше причин **актуальной** является задача создания принципиально нового поколения твердотельных ударо- и виброустойчивых чувствительных элементов датчиков угловой скорости, не содержащих подвижных инерционных масс и элементов их подвесов.

Целью настоящей диссертационной работы является разработка акустических принципов и технических решений для создания чувствительного элемента (ЧЭ) датчика угловой скорости (ДУС) на основе особенностей распространения объемных акустических волн круговой поляризации (АВКП) в твердых средах. В связи с этим были поставлены следующие **задачи**:

1. на основе теоретического анализа оценить информативность характеристик волны для построения ЧЭ ДУС;
2. определить способы выявления информативных признаков, использующие особенности поляризации волн во вращающихся средах;
3. разработать принципы построения и конструкцию устройства, позволяющего возбуждать и оценивать АВКП;
4. разработать конструкцию датчика угловой скорости, построенного на основе особенностей распространения АВКП в твердом теле в условиях вращения;
5. провести экспериментальную проверку выявленных закономерностей и предлагаемых конструктивных решений.

Научная новизна работы определяется впервые полученными теоретическими и экспериментальными данными, позволяющими предложить концепцию построения ЧЭ ДУС на базе АВКП:

- анализ характеристик акустических волн в условиях вращения звукопровода распространяется на случай произвольного соотношения направления распространения волны и оси вращения звукопровода;
- впервые показана возможность использования АВКП для выявления параметров углового движения звукопровода;
- впервые показана возможность непосредственного возбуждения волн круговой поляризации (КП) с помощью пьезопластин на основе решения задачи распространения упругих колебаний в системе, содержащей пьезоактивные анизотропные слои;

- впервые предложен принцип построения чувствительного элемента датчика угловой скорости (гироскопа), основанный на использовании эффекта изменения фазовой скорости акустических волн круговой поляризации во вращающемся твердотельном звукопроводе.

Научная новизна подтверждается полученными патентами.

Положения, выносимые на защиту:

1. вращение твердой среды оказывает влияние на фазовую скорость АВКП;
2. относительное изменение скорости АВКП, распространяющейся вдоль оси вращения звукопровода, пропорционально угловой скорости вращения;
3. излучение АВКП обеспечивается преобразователем разработанной конструкции (пластинчатого типа с пьезопластинами сдвиговых колебаний скрещенных поляризаций), параметры которого определены с помощью метода, предложенного в диссертационной работе;
4. импульсно-фазовый метод является оптимальным способом измерения информативного сигнала от чувствительного элемента датчика угловой скорости на базе АВКП

Практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

- разработаны принцип излучения и конструкция пьезоэлектрического преобразователя, позволяющего непосредственно излучать акустические волны круговой поляризации в твердую среду;
- предложен принцип построения ультразвукового датчика угловой скорости на акустических волнах круговой поляризации;
- работа служит основой дальнейших опытов и экспериментов по оценке параметров ДУС и акустических волн круговой поляризации.

Реализация и внедрение результатов работы:

Полученные теоретические положения, связанные с особенностями распространения акустических волн в условиях наличия вращения, а также основанные на них предложенные принципы конструктивной реализации твердотельных датчиков движения, внедрены в учебном процессе в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» при обучении магистров по дисциплине «Акустоэлектроника» магистерской программы по профилю «Акустические приборы и системы».

Результаты работы, выполненной в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), использованы в научно-технических отчетах в рамках реализации соглашения № 14-19-00693 от 23.06.2014 Российского научного фонда и поддержаны персональным грантом № 1605ГУ1/2014 от «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям).

Результаты диссертационной работы внедрены и использованы в научной и производственной коммерческой деятельности ООО «НКД».

Апробация

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. 65, 66, 67, 68, 69 научно-технические конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012–2016 гг., Санкт-Петербург, Россия.
2. VI конференции молодых специалистов ОАО «Авангард», 2013 г, Санкт-Петербург, Россия.
3. XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, 27.05.2013, Санкт-Петербург.
4. Всероссийская конференция XXVII сессии Российского акустического общества и сессии Научного Совета РАН по акустике, 16-18.04.2014, Санкт-Петербург, Россия.
5. Международная конференция «Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications», 30.10.14-02.11.2014, Пекин, Китай.
6. Международная научно-техническая конференция «Шляндинские чтения – 2014» г., 10-12.11.2014, Пенза, Россия.
7. XVIII конференция молодых ученых с международным участием «Навигация и управление движением», 15-18 марта 2016 г., Санкт-Петербург, Россия.

Публикации

Основные теоретические и практические результаты диссертации изложены в 18 публикациях, среди которых 6 статей в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 1 статья в издании, входящем в перечень Scopus, 2 патента РФ на изобретение, 9 статей – в научных сборниках и трудах российских и международных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка основной использованной литературы; изложена на 122 страницах машинописного текста и содержит 40 рисунков, 2 таблицы, 48 наименований отечественных и зарубежных источников литературы.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, формулируются цели и задачи работы, научная новизна, практическая значимость результатов и основные научные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 приведен обзор физических принципов построения современных датчиков угловой скорости (ДУС). Отдельно выделены имеющиеся концепции построения ДУС с использованием акустических волн. Рассмотрены физические основы и математические инструменты, используемые для описания акустических колебаний в твердых средах.

На сегодняшний день наиболее распространенными датчиками угловой скорости являются микроэлектромеханические гироскопы, кольцевые лазерные, волоконно-оптические и твердотельные волновые гироскопы.

Существует большое число высокоманевренных объектов, движение которых характеризуется сверхбольшими ускорениями, значительными углами крена и тангажа. Накопленный за последние годы опыт эксплуатации микромеханических чувствительных элементов выявил ряд существенных недостатков, к числу которых относят в первую очередь недостаточные точность и ударо- и вибростойкость, которые обусловлены применением упругих подвесов (торсионов) инерционных масс. Использование гироскопов, построенных на других принципах, может быть ограничено в силу их массогабаритных показателей. Недостатком всех упомянутых типов гироскопов является достаточно узкий динамический диапазон измеряемых угловых скоростей.

Одним из возможных принципов построения датчиков угловой скорости является использование особенностей распространения ультразвуковых волн в твердом теле в условиях вращения – на базе молекулярной кинетики звукопроводов.

Первые заключения о том, что характеристики распространяющейся акустической волны меняются под воздействием вращения, сделаны в работе [1], где показано, что во вращающейся среде фазовая скорость волны приобретает частотную зависимость, но дальнейших исследований выявленных дисперсионных свойств авторами не выполнено.

Впервые подробный математический анализ данного явления для рэлеевских волн, распространяющихся в твердом изотропном теле, дан в [2]. В работе получено общее уравнение движения, описывающее распространение акустической волны в неинерциальной системе отсчета для простейшего случая изотропной твердой среды.

Коллективом кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. Ульянова (Ленина) был проведен анализ ситуации распространения ОАВ вдоль оси вращения среды [3]. В результате было получено выражение, позволяющее определять скорость вращения звукопровода по повороту вектора поляризации сдвиговой акустической волны, который, в свою очередь, может быть представлен как возникновение дополнительной сдвиговой волны с ортогональной поляризацией, амплитуда которой будет характеризовать скорость вращения. Авторами были показаны способы реализации конструкции чувствительных элементов, позволяющих выделять

ортогональную моду колебаний, появляющуюся в условиях вращения. В основах предложенных датчиков угловой скорости могут быть положены различные способы выделения информативного сигнала: на основе расположения приемного преобразователя, регистрирующего только ортогональную составляющую вектора смещения исходной волны [4, 5]; на основе законов отражения или трансформации волн на границе раздела сред [6, 7].

Данная работа является развитием темы ультразвуковых датчиков угловой скорости, основанных на особенностях распространения объемных акустических волн круговой поляризации в условиях вращения.

Для анализа распространения акустических волн в условиях вращения в классическое уравнение движения добавляют слагаемые, учитывающие действие центробежного и Кориолисова ускорения. Решая его для случая распространения плоских акустических волн вдоль оси X_1 , являющейся произвольным направлением изотропной среды или акустической осью кубического кристалла, волны, распространяющиеся в твердом теле, описываются системой уравнений Грина-Кристоффеля:

$$\begin{cases} [C_{11} - \rho V^2(1 + W_2^2 + W_3^2)]\xi_{01} - (2jW_3 - W_1W_2) \cdot \rho V^2 \xi_{02} + (2jW_2 + W_1W_3) \cdot \rho V^2 \xi_{03} = 0 \\ [C_{44} - \rho V^2(1 + W_1^2 + W_3^2)]\xi_{02} + (2jW_3 - W_1W_2) \cdot \rho V^2 \xi_{01} - (2jW_1 - W_2W_3) \cdot \rho V^2 \xi_{03} = 0 \\ [C_{44} - \rho V^2(1 + W_1^2 + W_2^2)]\xi_{03} - (2jW_2 - W_1W_3) \cdot \rho V^2 \xi_{01} + (2jW_1 + W_2W_3) \cdot \rho V^2 \xi_{02} = 0 \end{cases}$$

где $W_i = \Omega_i / \omega$ – относительная скорость вращения, Ω_i – компонента угловой скорости вращения звукопровода.

Во **второй** главе рассмотрены эффекты, возникающие при распространении волны вдоль оси вращения.

В этом случае система уравнений Грина-Кристоффеля распадается на две независимые части:

$$(C_{11} - \rho V^2)\xi_{01} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} [C_{44} - \rho V^2(1 + W^2)]\xi_{02} - 2j \cdot \rho V^2 W \xi_{03} = 0 \\ [C_{44} - \rho V^2(1 + W^2)]\xi_{03} + 2j \cdot \rho V^2 W \xi_{02} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Уравнение (1) описывает распространение продольной волны со скоростью $V_\ell = \sqrt{C_{11}/\rho}$. Из (2) были найдены скорости распространения двух других волн:

$$V_{1,2} = \frac{V_0}{(1 \pm W)} \quad (3)$$

При этом компоненты вектора смещения вдоль осей X_2 и X_3 для каждой из волн имеют фазовый сдвиг $\pm \frac{\pi}{2}$:

$$\left. \frac{p_2}{p_3} \right|_{V_1} = j, \quad \left. \frac{p_2}{p_3} \right|_{V_2} = -j,$$

что свидетельствует о том, что эти колебания являются волнами с круговой поляризацией.

В диссертационной работе в качестве информативного параметра для определения угловой скорости движения предложено использовать изменение фазовой скорости акустической волны круговой поляризации, распространяющейся в твердой среде вдоль оси вращения.

Глава III посвящена вопросам излучения акустической волны круговой поляризации, разработке конструкции преобразователя, способного излучать такую волну, и его экспериментальной проверке.

Было показано, что интерференция двух линейно поляризованных волн, ортогональных друг другу, в зависимости от разности фаз между колебаниями дает в общем случае эллиптически поляризованную волну. В частном случае, суперпозиция двух ортогональных линейно поляризованных волн с разностью фаз $\pi/2$ позволяет получить акустическую волну круговой поляризации.

Для непосредственного излучения акустических волн круговой поляризации в работе предложена оригинальная конструкция излучателя АВКП (рисунок 1). Для получения фазового сдвига $\pi/2$ между двумя ортогональными поперечными акустическими волнами предложено использовать две идентичные пьезоэлектрические пластины 1 и 2, находящиеся в жестком акустическом контакте, причем угол между направлениями поляризации излучаемых волн составляет $\pi/2$. Толщины пьезопластин близки к величине $\lambda/4$ на рабочей частоте, где λ – длина волны ультразвука в материале пьезопластин. Внешние грани пьезопластин акустически нагружены на звукопроводы 3, выполненные из материалов с равными акустическими сопротивлениями.

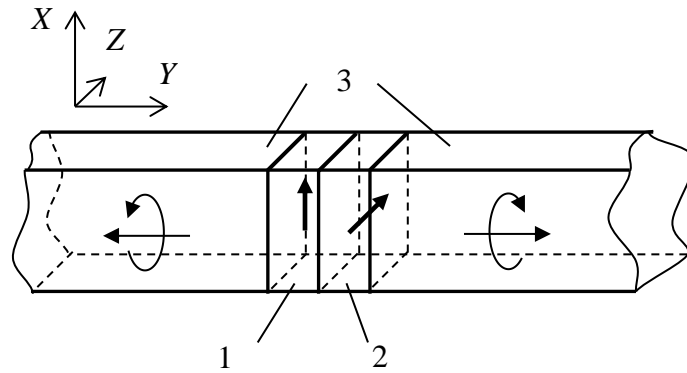


Рисунок 1 – Концепция преобразователя акустических волн круговой поляризации

Анализ работы такой конструкции потребовал решения задачи распространения акустических волн, возбуждаемых пьезопластинами 1 и 2, представляющие собой две акустически соединенные пластины кварца Y -среза, внешние грани которых находятся в акустическом контакте с материалом изотропных звукопроводов 3, выполненных из плавленного кварца.

Волновой процесс в каждом слое был представлен в виде плоских гармонических волн. С учетом граничных условий, которые заключаются в непрерывности векторов смещений и равенстве нормальных компонент напряжений на границе слоев, была получена система уравнений относительно неизвестных амплитуд волн. При решении системы уравнений с использованием математического пакета *MathCAD* были получены характеристики движения частиц, находящихся на внешних поверхностях пьезопластин, и построена траектория их движения (рисунок 2).

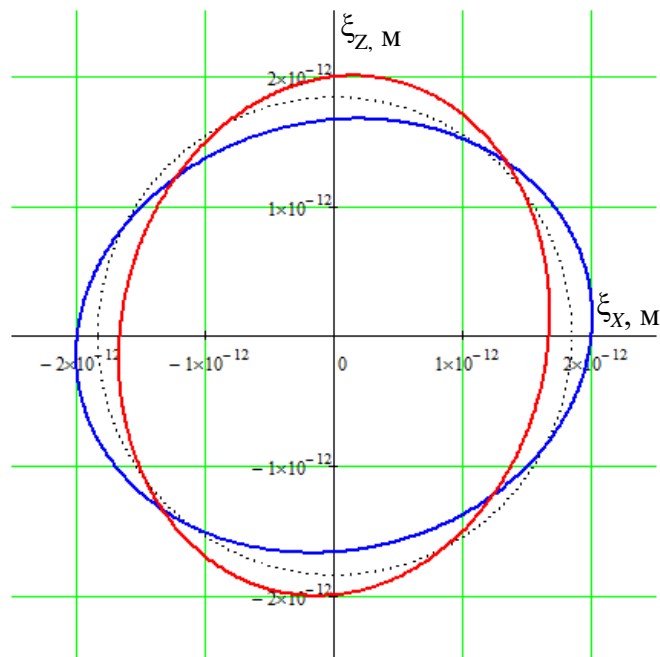


Рисунок 2 – Моделирование траектории движения частиц в излучаемой волне

Анализ показал, что изменение частоты возбуждающих колебаний на 1% приводит к изменению эксцентриситета на 0.5%. При этом изменение частоты на 3% и 5% приводит к изменению эксцентриситета соответственно на 5% и 15%. Таким образом, полоса пропускания преобразователя предложенной конструкции на уровне -3дБ составляет порядка 10% от центральной частоты, что соответствует добротности 10.

С использованием полученных характеристик был изготовлен преобразователь ультразвуковых волн, экспериментальные исследования которого подтвердили близкий к круговому характер колебаний частиц в излучаемой волне (рисунок 3).

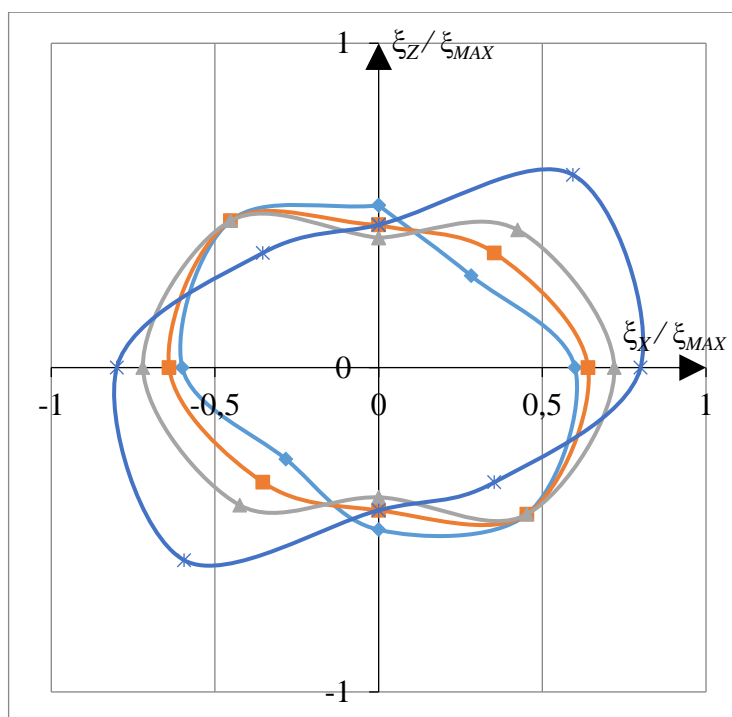


Рисунок 3 – Угловое распределение амплитуды принятого сигнала от преобразователя акустических волн круговой поляризации при излучении на частотах:
а – 1.8 МГц; б – 1.9 МГц; в – 2.0 МГц; г – 2.2 МГц

На рисунке 3 представлено нормированное угловое распределение амплитуды принятой волны. Можно видеть, что с изменением частоты колебаний меняется их форма и амплитуда.

По результатам проведенных экспериментальных исследований сделан вывод, что преобразователь предложенной конструкции способен излучать акустическую волну, поляризация которой близка к круговой в определенном частотном диапазоне.

В **главе IV** описан принцип построения ЧЭ ДУС, информативным сигналом в котором является изменение фазовой скорости АВКП, а также описаны экспериментальные испытания макета датчика угловой скорости.

В главе обосновано применение импульсно-фазового метода получения информативного сигнала и дифференциальный принцип построения макета, схема которого представлена на рисунке (рисунок 4).

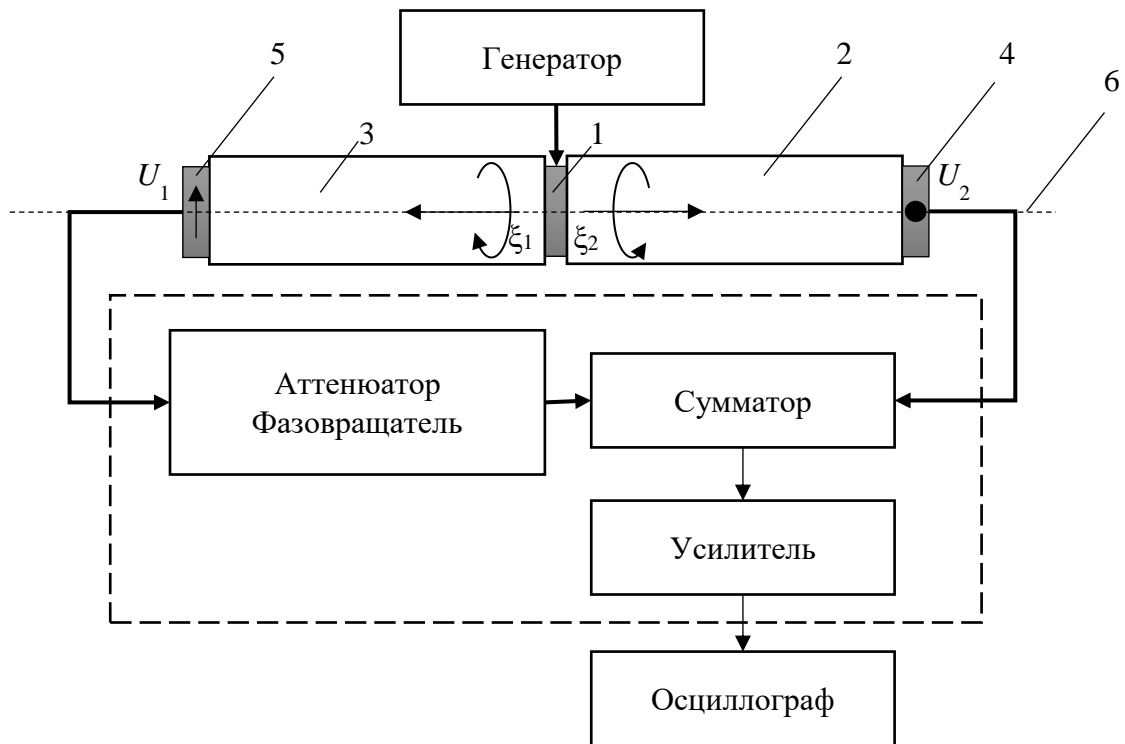


Рисунок 4 – Схема построения лабораторного макета ДУС на АВКП

1 – преобразователь АВКП; 2, 3 – изотропные звукопроводы; 4,5 – приемные пьезопластины чисто сдвиговых колебаний; 6 – ось вращения ЧЭ (ось чувствительности ДУС)

Разработанная схема была реализована в лабораторном макете, который подвергался испытаниям. Фотография закрепленного на центрифуге макета ДУС приведена на рисунке 5.

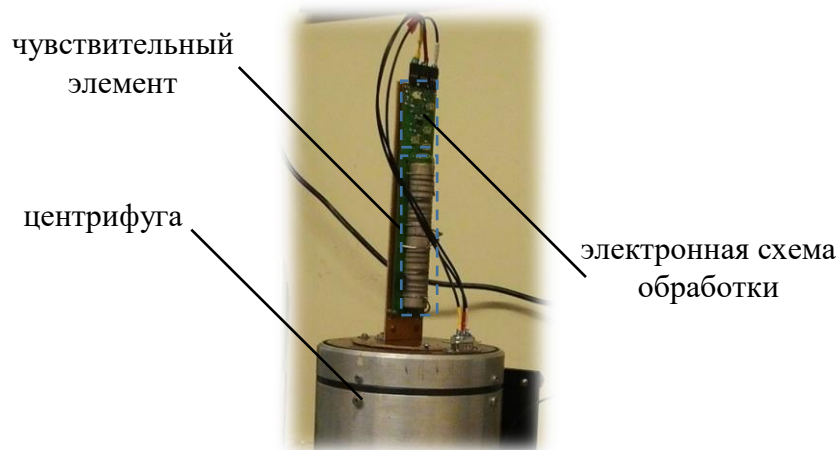


Рисунок 5 – Фотография установки для экспериментальных исследований макета ДУС на АВКП

В ходе экспериментальных исследований фиксировалась зависимость изменения напряжения суммарного сигнала U_1+U_2 (см. рисунок 4) от угловой скорости вращения центрифуги. Результаты серии экспериментов представлены на рисунке 6.

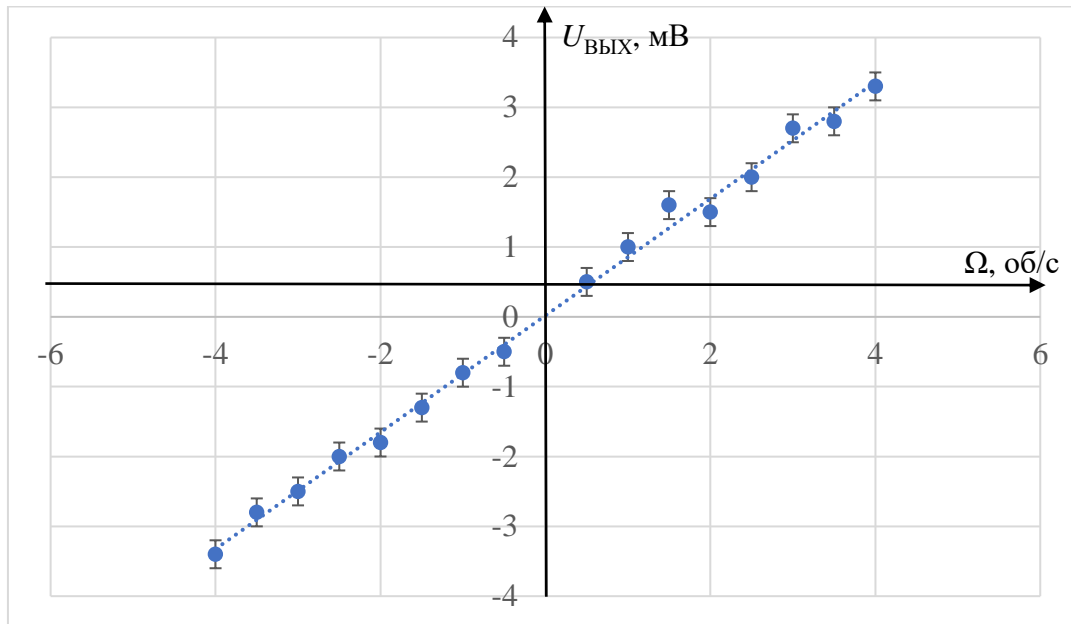


Рисунок 6 – Экспериментальная зависимость выходного напряжения от угловой скорости вращения ЧЭ

Полученная зависимость имеет линейный характер. Результаты испытаний изготовленного макета ДУС на АВКП подтвердили достоверность приведенных теоретических исследований и показали возможность построения твердотельного гироскопа на базе акустических волн круговой поляризации.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы:

1. обзор распространенных типов датчиков угловой скорости выявил ряд проблем, имеющих место в области определения параметров движения высокодинамичных объектов, работа которых характеризуется жесткими виброусловиями. Главными недостатками имеющихся устройств являются низкая устойчивость к вибронагрузкам (ММГ), неудовлетворительные массогабаритные характеристики (КЛГ, ВОГ), узкий динамический диапазон (ММГ, КГЛ, ВОГ, ТВГ). В связи с чем возможным принципом построения датчика угловой скорости, лишенного указанных недостатков, является использование молекулярной кинетики твердого тела и особенностей распространения ультразвуковых волн в условиях вращения;
2. на основе теоретического анализа распространения объемных сдвиговых волн сонаправлено с осью вращения была выявлена характеристика ультразвуковой волны, связанная с угловой скоростью движения среды распространения. Было показано, что фазовая скорость акустической волны круговой поляризации пропорциональна угловой скорости движения. На основе выявленных закономерностей было предложено использовать изменение фазовой скорости АВКП как информативный признак при построении ЧЭ ДУС;
3. анализ литературы выявил отсутствие излучателей акустической волны круговой поляризации. В связи с чем была решена задача разработки принципа излучения АВКП в

изотропную твердую среду с помощью пьезопластин. В результате была предложена и реализована оригинальная конструкция пьезопреобразователя АВКП, способного излучать УЗ волну на частоте 1,8 МГц, экспериментальная проверка которого подтвердила круговой характер движения частиц в излучаемой волне;

4. была разработана схема датчика угловой скорости с использованием излучателя АВКП, реализующая импульсно-фазовый метод выявления изменения фазовой скорости АВКП под воздействием вращения дифференциальным способом. Проведенная оценка чувствительности макета составила 340 мкВ/об/с, что является выявляемой величиной на фоне ожидаемых шумов, величина которых составляет десятки наноВольт;

5. проведенные экспериментальные исследования макета ДУС показали линейный характер выходной величины и подтвердили возможность выявления вращения на основе предложенных закономерностей.

Список основной использованной литературы

1. **Schoenberg M.** Elastic waves in rotating media [Текст] / M. Schoenberg, D. Censor // Quart. Appl. Math. – 1973. – No. 31. – pp. 115-125.
2. **Lao B.** Gyroscopic effect in surface acoustic waves [Текст] // Ultrasonic Symposium, – 1980. – pp. 687–691.
3. **Gribkova E.** Theoretical and Experimental Researches of Bulk Acoustic Wave's Availability in Angular Motion Sensor [Текст] / E. Gribkova, A. Peregudov, M. Shevelko // Proceeding of the IEEE Russia. – 2011. – pp. 69-71.
4. **Пат. 2397445 Российская федерация, МПК G01C19/58, G01P9/04.** Чувствительный элемент гироскопа [Текст] / Грибкова Е.С., Д. П. Лукьянов, А. Н. Перегудов, М.М.Шевелько. ; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И.Ульянова (Ленина). – № 2009118663/28 ; заявл. 18.05.2009 ; опубл. 20.08.2010, Бюл. №23.
5. **Пат. 2392625 Российская федерация, МПК G01P3/44.** Способ измерения угловой скорости [Текст] / Лукьянов Д.П., Перегудов А.Н., Шевелько М.М., Грибкова Е.С., ; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И.Ульянова (Ленина). – № 2009118664/28 ; заявл. 18.05.2009 ; опубл. 20.06.2010, Бюл. №17.

6. **Шевелько М.М.** Разделение мод колебаний при отражении и преломлении упругих волн в ультразвуковых сенсорах движения [Текст] / М.М. Шевелько, А.Н. Перегудов, А.А. Поженская, А.И. Лутовинов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». –2012. – № 3. – С. 53–59.
7. **Пат. 2460078 Российская федерация, МПК G01P3/44.** Способ измерения угловой скорости [Текст] / Грибкова Е.С., Перегудов А.Н., Поженская А.А, Шевелько М.М. ; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И.Ульянова (Ленина). – № 2011115171/28 ; заявл. 18.04.2011 ; опубл. 28.07.2012, Бюл. №24.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. **Лутовинов А.И.** Разделение мод колебаний при отражении и преломлении упругих волн в ультразвуковых сенсорах движения [Текст] / М.М. Шевелько, А.Н. Перегудов, А.А. Поженская, А.И. Лутовинов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». –2012. – № 3. – С. 53-59.
2. **Лутовинов А.И.** Преобразователь ультразвуковых волн круговой поляризации. Теория и эксперимент [Текст] / Лутовинов А.И., Шевелько М.М., Перегудов А.Н. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2013. – № 7. – С. 78-84.
3. **Лутовинов А.И.** Оптимизация тракта акустического сенсора на объемных волнах [Текст] / Лутовинов А.И., Шевелько М.М., Перегудов А.Н., Кадырова А.Р. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». –2014. –№ 5. –С. 49-54.
4. **Лутовинов А.И.** К вопросу о характеристиках волн, распространяющихся во вращающейся среде [Текст] / Лутовинов А.И., Шевелько М.М., Перегудов А.Н., Дурукан Я. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». –2014. –№8. –С. 57-61.
5. **Лутовинов А.И.** Особенности распространения объемных и поверхностных акустических волн в условиях вращения и их применение в датчиках параметров углового движения [Текст] / Лутовинов А.И., Грибкова Е.С., Перегудов А.Н., Шевелько М.М // Омский научный вестник. – 2015. –№ 1 (137). –С.227-231.
6. **Лутовинов А.И.** О возможности построения датчиков вращательного движения на объемных акустических волнах [Текст] / Дурукан Я., Лутовинов А.И., Шевелько М.М., Перегудов А.Н. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2015. – № 10. – С. 69-73.

Публикации в изданиях, входящих в базы Scopus:

7. **Lutovinov A.I.** Solid-state motion sensors on acoustic waves. Theory and experiment [Текст] / E.S. Gribkova, D.P. Lukyanov, A.I. Lutovinov, A.N. Peregudov, M.M. Shevelko // Abstract book of 2014 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications. – 2014. – pp. 21-22.

Патенты

8. **Пат. 2520949 Российская федерация, МПК G01C19/58.** Способ измерения угловой скорости и чувствительный элемент на его основе [Текст] / Лутовинов А. И., Лукьянов Д. П., Перегудов А. Н., Поженская А.А. Шевелько М.М. ; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И.Ульянова (Ленина). – № 2012153018/28 ; заявл. 07.12.2012 ; опубл. 27.06.2014, Бюл. №18.
9. **Пат. 2529824 Российская федерация, МПК G01C19/58.** Пьезоэлектрический преобразователь [Текст] / Лутовинов А.И., Перегудов А.Н., Поженская А.А., Шевелько М.М. ; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И.Ульянова (Ленина). – № 2012151331/28 ; заявл. 29.11.2012 ; опубл. 10.06.2014, Бюл. №27.

Другие статьи и материалы конференций:

10. **Лутовинов А.И.** Исследование возможности использования акустических волн в датчиках вращения [Текст] / Лутовинов А.И., Поженская А.А., Похоруков С.А., Грибкова Е.С., Перегудов А.Н., Шевелько М.М // Сборник докладов 65ой научно-технической конференции ППС СПбГЭТУ «ЛЭТИ». –2012. –С.184-187
11. **Лутовинов А.И.** Исследования возможности возбуждения акустических волн круговой поляризации [Текст] / А.И.Лутовинов, М.М.Шевелько, А.Н.Перегудов // Сборник докладов 66ой научно-технической конференции ППС СПбГЭТУ «ЛЭТИ». –2013. –С. 199–203.
12. **Лутовинов А.И.** Исследование особенностей распространения акустических волн для создания твердотельных датчиков параметров движения [Текст] / А.И. Лутовинов, М.М. Шевелько, Д.П. Лукьянов, А.Н. Перегудов, Е.С. Грибкова. // Сборник докладов XX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – 2013. –С. 149-151.
13. **Лутовинов А.И.** Исследование особенностей распространения акустических волн для создания твердотельных датчиков параметров движения [Текст] / А.И. Лутовинов, Е.С. Грибкова. // Сборник докладов VI научно-технической конференции молодых специалистов по радиоэлектронике. –2013.
14. **Лутовинов А.И.** Исследование возможности возбуждения акустических волн круговой поляризации [Текст] / Лутовинов А.И., Кадырова А.Р. Перегудов А.Н., Шевелько М.М. // Сборник докладов 67ой научно-технической конференции ППС СПбГЭТУ «ЛЭТИ». –2014. – С.173-177
15. **Лутовинов А. И.** Теоретические и экспериментальные исследования возможности возбуждения акустических волн круговой поляризации [Текст] / А. И. Лутовинов, М. М. Шевелько, А. Н. Перегудов, Е. С. Грибкова. // Сборник материалов конференции XXVII сессии РАО и сессии Научного Совета РАН по акустике. –2014. –С. 900-905.

16. **Лутовинов А. И.** Применение особенностей распространения объемных акустических волн в твердых средах для построения датчиков параметров движения [Текст] / А. И. Лутовинов, М. М. Шевелько, А. Н. Перегудов, Е. С. Грибкова. // Сборник материалов конференции XXVII сессии РАО и сессии Научного Совета РАН по акустике. –2014. –С. 1320-1329.
17. **Лутовинов А. И.** Особенности распространения акустических волн при наличии вращения и их использование в измерении параметров вращения [Текст] / А. И. Лутовинов, Е. С. Грибкова, Я. Дурукан. // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации. Сборник научных статей Международной научно-технической конференции «Шляндинские чтения – 2014». –2014. –С. 136-138.
18. **Лутовинов А.И.** Анализ характеристик объемных волн, распространяющихся ортогонально оси вращения [Текст] / Лутовинов А.И., Дурукан Я., Перегудов А.Н., Шевелько М.М. // Сборник докладов 68ой научно-технической конференции ППС СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2015. – С.177-180